

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE, CHIMIE, SCIENCES DE LA TERRE, DE
L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR (ED-PCSTUI)

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Année académique : 2019-2020

N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : ENERGIE SOLAIRE

Présentée par :

Mr. Mamour Amadou BA Maître ès sciences

**THEME : EFFET DU CHAMP ELECTRIQUE SUR UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A
JONCTION VERTICALE PARALLELE SOUS ECLAIREMENT
POLYCHROMATIQUE**

Soutenu publiquement le 25 / 07 / 2020 devant le jury composé de :

Président	Grégoire SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Rapporteurs	Moustapha DIENG	Professeur Titulaire	FST/UCAD
	Biram DIENG	Maître de Conférences	UADB
Examineurs	Ibrahima LY	Professeur Titulaire	EPT/THIES
	Amadou DIAO	Maître de Conférences	FST/UCAD
	Mor NDIAYE	Maître Assistant	FST/UCAD
	Ibrahima DIATTA	Assistant	FST/UCAD
Directeur de thèse	Mamadou WADE	Professeur Titulaire	EPT/THIES
Invité	Masse Samba DIOP	Docteur	ASER

Je dédie, en particulier, ce travail à :

- ❖ **A ma mère** pour son affection, tu représentes pour nous un modèle constant de bravoure, de générosité et surtout d'humilité qui a toujours inspiré nos actes quotidiens les plus élémentaires.
- ❖ **A mon père**, le temps n'efface rien, il apaise seulement... Ta voix ne résonne plus mais tu es vivant dans nos cœurs. Ta présence nous manque énormément mais tu resteras toujours gravé dans nos mémoires. Nous veillerons aussi tous les jours à perpétuer les valeurs cardinales qui ont toujours rythmées ton vécu.
- ❖ **A ma grand-mère 'Ndioba'**, qui a pu nourrir très tôt en nous le sentiment d'appartenance à une génération consciente, imbue de valeurs morales et spirituelles sûres. A celle qui guida mes premiers pas dans la vie, je dédie ce modeste travail !
- ❖ **A feu mon maître coranique Zeynou Abidine DIOP** que la terre de Saint-Louis vous soit légère. Qu'ALLAH vous agrée et vous compte parmi ses humbles serviteurs au paradis. Que la lumière du noble coran que vous m'avez enseigné éclaire votre dernière demeure. Amine !
- ❖ **A ma Femme** pour son dévouement et son affection et sa compréhension à mon égard.
- ❖ **A mes enfants** pour leurs attachements et leurs affections.
- ❖ **Mon oncle Pape SEMBENE** qui a profondément orienté et influencé d'une manière bénéfique ma vie. Merci pour tout l'encadrement moral, intellectuel et matériel que tu n'as cessé de m'offrir aux moments les plus incertains de mon existence.
- ❖ **A mes oncles et tantes** sans exceptions je vous remercie tous du fond du cœur.

- ❖ **A mes frères et sœurs** : J'atteste devant Dieu la compréhension, l'amour et la sollicitude constante dont j'ai été l'objet de la part de, El hadji, Mame Arona, qui ont bien voulu relire et corriger ce document, Bocar, Adja, Fatou, Amadou, Ciré ly, Khady, Mame Maty, Amet NDIAYE et sa famille, ainsi que tous les autres qui n'ont jamais cessé de m'encourager.

- ❖ **Mes grand-frères** (Pape Seyni TOURE, Djiby DIALLO, Habib SAKHO.) qui se distinguent essentiellement par leurs conseils, leurs prières, leurs générosités, leurs amours du travail et leurs sens de la famille et des grandes responsabilités.

- ❖ **A mes amis** : Je remercie particulièrement Fatmah dite « Mahma Ndioubouré », Chérif Mbodji, Oumar DIOUF, Mouhamadou Lamine DIOUF, Mamadou Bèye DIOUF, Mamour DIACK, Oumar G. Diop, Pr. Mamadou SECK, Mar NDIAYE, BARRO pour leurs précieux conseils et leurs encouragements sincères.

- ❖ **A tous mes anciens collègues du SERTEC** particulièrement mon premier chef de service le capitaine de vaisseau Papa Seyni TOURE, Mouhamadou Lamine DIOUF, Pierre Faye, Mouhamed FALL, P. Amath GUEYE.

- ❖ **A tous mes collègues de la DIRTEC** en particuliers les membres de la **Division Projet** en l'occurrence Abdou SARR, Mouhamed FALL, Alima FAYE, Abdoulaye SIDIBE, Khady SECK et Anta SOW.

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'un élan spontané et enthousiaste remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail. Il faut bien que j'en nomme quelques-uns.

Le Doyen de la FST pour m'avoir accepté au sein de sa faculté. Le Responsable de l'école doctorale ED-PCSTUI pour m'avoir permis de mener à bien ce travail dans d'excellentes conditions.

Je remercie mon encadreur **Mr. Grégoire SISSOKO**, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar qui, en 2002, fut mon professeur d'électricité en première année de Physique-Chimie. Ce travail est juste une petite décoration de l'édifice que vous avez érigé avec nos ainées il y a des décennies auparavant. Vous avez désherbé, enlevé les épines, bâti un fondement solide puis un édifice qui traversera les siècles, mieux encore vous avez bâti des HOMMES. Professeur au-delà de la recherche scientifique avec vous j'ai appris à discerner ce qui est important dans la vie. Ce que j'ai le plus retenu en vous côtoyant et qui d'ailleurs, m'a le plus marqué est : l'importance que vous accordez à la vénération des parents. Qu'ALLAH vous comble de gloire et vous garde en excellente santé devant votre famille. Merci de nous avoir donné l'opportunité de contribuer dans les activités du GIRER.

A Monsieur **Abdoulaye DIOP** Maître de conférences à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar qui, m'a remis entre les mains du Professeur SISSOKO pour accomplir ce travail de recherche. Merci de m'avoir enseigné l'électronique et d'avoir contribué à ma réussite scientifique sans votre générosité et votre affection à mon égard ce travail n'aurait jamais eu lieu. Je vous en suis profondément reconnaissant.

Je ne manquerai pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury :

Monsieur **Mamadou Wade** Professeur Titulaire à l'école polytechnique de Thiès, je n'ai pas les mots pour vous remercier d'avoir dirigé ma soutenance de thèse doctorale. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document.

Monsieur **Moustapha DIENG** Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Je vous remercie d'avoir accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce mémoire de thèse de doctorat unique à sa juste valeur, et de me faire part de vos remarques pertinentes qui, contribuent, sans nul doute au perfectionnement du présent travail.

Monsieur **Ibrahima Ly** Professeur Titulaire à l'école polytechnique de Thiès, je vous remercie de votre déplacement, d'avoir accepté de participer au jury. Vos conseils contribueront à l'amélioration de ce travail en cours.

Monsieur **Biram DIENG** Maître de conférences à l'Université Alioune Diop de Bambey je vous remercie de votre déplacement, d'avoir accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce mémoire de thèse de doctorat unique à sa juste valeur, et de me faire part de vos remarques pertinentes qui, contribuent, sans nul doute au perfectionnement du présent travail.

Monsieur **Amadou DIAO** Maître de conférences à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner mon travail de recherche. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document.

Monsieur **Mor NDIAYE** Maître assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner mon travail de recherche. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document.

Monsieur **Ibrahima DIATTA** assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner mon travail de recherche. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document. Vous avez été toujours disponible à mes innombrables sollicitations.

Monsieur **Masse SAMBA DIOP** Docteur en Physique Responsable technique à ASER, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner mon travail de recherche. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document. Vous avez été toujours disponible à mes innombrables sollicitations.

Ces sentiments de reconnaissance vont aussi à l'endroit de tous les professeurs de l'École Supérieure polytechnique de Dakar et de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD qui ont sans cesse œuvré à la pleine contribution de ma formation universitaire.

A mes condisciples : Je ne cesserai de remercier tous mes camarades membres du Groupe International de Recherche sur les Energies Renouvelables (GIRER) qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiv
NOMENCLATURE	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : Effets du champ électrique sur les paramètres électroniques de la photopile	3
Introduction	3
1.1 Densité des porteurs de charges minoritaires	3
1.1.1 Densité des porteurs minoritaires de charge en excès	5
1.1.2 Modélisation de la densité des porteurs minoritaires	5
1.1.3 Effet du champ électrique sur la densité des porteurs minoritaires	8
1.1.4 Effet du nombre de soleil sur la densité des porteurs minoritaires	9
1.1.5 Effet de la profondeur sur la densité des porteurs minoritaires	10
1.2 Densité de photocourant	11
1.2.1 Modélisation de la densité de photocourant	11
1.2.2 Effet du champ électrique sur la densité de photocourant	13
1.2.3 Effet du nombre de soleil sur la densité de photocourant	14
1.2.4 Effet de la profondeur de la base sur la densité de photocourant	15
1.3 Phototension	16
1.3.1 Modélisation de la phototension	16
1.3.2 Effet du champ électrique sur la phototension	18
1.3.3 Effet du nombre de soleil sur la phototension	19
1.3.4 Effet de la profondeur sur la phototension	20
1.4 Capacité de la photopile	21
1.4.1 Modélisation de la capacité de la photopile	21
1.4.2 Effet du champ électrique sur la capacité	23
1.4.3 Effet du nombre de soleil sur la capacité	24
1.4.4 Effet de la profondeur de la base sur la capacité	25
1.5 Etude de la capacité sous obscurité C_0	26
1.6 Caractéristique courant-tension	26
1.6.1 Effet du champ électrique sur la caractéristique courant-tension	27
1.6.2 Effet du nombre de soleil sur la caractéristique courant-tension	28
1.6.3 Effet de la profondeur de la base sur la caractéristique courant-tension	29
Conclusion	31
CHAPITRE 2 : Effets du champ électrique sur les paramètres phénoménologiques	32
Introduction	32
3.1 Résistance Série de la photopile	32
3.1.1 Modélisation de la résistance série de la photopile	33

3.1.2	Effet du champ électrique sur la résistance série R_s	35
3.1.3	Effet du nombre de soleil sur la résistance série R_s	36
3.1.4	Effet de la profondeur de la base sur la résistance série R_s	37
3.2	Résistance Shunt de la photopile.....	38
3.2.1	Modélisation de la résistance shunt de la photopile.....	39
3.2.2	Effet du champ électrique sur la résistance série shunt R_{Sh}	40
3.2.3	Effet du nombre de soleil sur la résistance série shunt R_{Sh}	41
3.2.4	Effet de la profondeur sur la résistance série shunt R_{Sh}	42
3.3	Vitesse de recombinaison initiant le court-circuit.....	43
3.3.1	Méthode de détermination de la valeur de Sf_{CC}	44
3.3.1.1	Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_{CC}	44
3.3.1.2	Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_{CC}	44
3.3.1.3	Intérêts de l'algorithme du plus petit majorant.....	45
3.3.2	Effet du champ électrique sur la valeur de Sf_{CC}	45
3.3.3	Variation de la vitesse Sf_{CC} en fonction du champ électrique.....	46
3.3.4	Effet du nombre de soleil (n) sur la vitesse Sf_{CC}	47
3.3.5	Variation de la vitesse Sf_{CC} en fonction du nombre de soleil n	48
3.3.6	Effet de la profondeur z sur la valeur de Sf_{CC}	49
3.3.7	Variation de la vitesse Sf_{CC} en fonction de la profondeur.....	50
3.4	Vitesse de recombinaison limitant le circuit-ouvert.....	51
3.4.1	Méthode de détermination de la valeur de Sf_{CO}	52
3.4.1.1	Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_{CO}	52
3.4.1.2	Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_{CO}	52
3.4.1.3	Intérêts de la méthode de l'algorithme du plus grand minorant	53
3.4.2	Effet du champ électrique sur la valeur de Sf_{CO}	54
3.4.3	Variation de la vitesse Sf_{CO} en fonction du champ électrique.....	55
3.4.4	Effet du nombre de soleil et de la profondeur sur la valeur de Sf_{CO}	55
3.4.5	Variation de la vitesse Sf_{CO} en fonction du nombre de soleil n	56
3.4.6	Effet de la profondeur sur la valeur de Sf_{CO}	57
3.4.7	Variation de la vitesse de Sf_{CO} en fonction de la profondeur z.....	58
3.5	Etude de la résistance série expérimentale.....	59
3.5.1	Méthode de détermination de la valeur de Rs_{CO}	59
3.5.1.1	Méthode classique de détermination de la valeur de Rs_{CO}	59
3.5.1.2	Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Rs_{CO}	60
3.5.1.3	Intérêts de la détermination basée sur l'algorithme « <i>Find _Rs_{CO}</i> ».....	60
3.5.2	Effet du champ électrique sur la valeur de Rs_{CO}	61
3.5.3	Variation de la résistance Rs_{CO} en fonction du champ électrique E.....	62
3.5.4	Effet du nombre de soleil sur la résistance Rs_{CO}	63
3.5.5	Variation de la résistance Rs_{CO} en fonction du nombre de soleil n.....	63

3.5.6	Effet de la profondeur z sur la valeur de $R_{s_{CO}}$	65
3.5.7	Variation de la valeur de $R_{s_{CO}}$ en fonction de la profondeur.....	65
3.6	Etude de la résistance shunt expérimentale.....	67
3.6.1.1	Méthode classique de détermination de la valeur de $R_{sh_{CC}}$	67
3.6.1.2	Nouvelle méthode de détermination de la valeur de $R_{sh_{CC}}$	67
3.6.1.3	Intérêts de la méthode basée sur l'algorithme « <i>Find _ $R_{sh_{CC}}$</i> »	68
3.6.2	Effet du champ électrique sur la valeur de $R_{sh_{CC}}$	69
3.6.3	Variation de la valeur de $R_{sh_{CC}}$ en fonction du champ électrique.....	70
3.6.4	Effet de la profondeur z sur la résistance shunt expérimentale $R_{sh_{CC}}$	71
3.6.5	Variation de la valeur de $R_{sh_{CC}}$ en fonction de la profondeur.....	71
3.6.6	Effet du nombre de soleil sur la résistance shunt expérimentale $R_{sh_{CC}}$	72
3.6.7	Variation de la valeur de $R_{sh_{CC}}$ en fonction du nombre de soleil n	73
	Conclusion	75
Chapitre 3 : Effets du champ électrique sur la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs et sur la puissance réelle de la photopile.		
	Introduction.....	77
4.1	Vitesse de recombinaison intrinsèque des porteurs à la jonction.....	77
4.1.1	Méthode de détermination de la valeur de Sf_0	77
4.1.1.1	Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_0	77
4.1.1.2	Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_0	78
4.1.2	Détermination de la valeur de Sf_0 par l'algorithme « <i>Find _ Sf_0</i> ».....	78
4.1.2.1	Calcul de la longueur de diffusion effective L_{eff}	78
4.1.2.2	Calcul de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0	80
4.1.3	Variation de la vitesse de Sf_0 en fonction du champ électrique.....	81
4.1.4	Variation de la vitesse Sf_0 en fonction de la profondeur.....	82
4.2	Puissance de la photopile	82
4.2.1	Modélisation de la puissance de la photopile.....	83
4.2.2	Effet du champ électrique sur la puissance réelle	85
4.2.3	Effet de la profondeur de la base sur la puissance réelle	86
4.2.4	Effet du nombre de soleil sur la puissance.....	87
	Conclusion	87
CONCLUSION GENERALE		89
BIBLIOGRAPHIE		92

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma synoptique du dispositif expérimental.....	4
Figure 2: Représentation en 2D de la photopile à jonction verticale parallèle.....	4
Figure 3: Schéma du modèle mathématique de la densité des porteurs	5
Figure 4: Profil de $\delta(x)$ en circuit ouvert, $z=10\ \mu\text{m}$, $E=0.01\ \text{V/cm}$	6
Figure 5: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en circuit ouvert, $E=0.01\ \text{V/cm}$	6
Figure 6: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, $z=10\ \mu\text{m}$, $E=0.01\ \text{V/cm}$	7
Figure 7: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, $E=0.01\ \text{V/cm}$	7
Figure 8: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de E	8
Figure 9: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de E	8
Figure 10 : Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de n	9
Figure 11: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de n	9
Figure 12: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de z	10
Figure 13: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de z	10
Figure 14: Profil en 3D de la densité des porteurs minoritaires	11
Figure 15: Schéma du modèle mathématique de la densité de photocourant.....	11
Figure 16: Profil de la densité de photocourant $J_{ph}(Sf)$	12
Figure 17: Profil en 3D de la densité de photocourant $J_{ph}(Sf)$	12
Figure 18: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E	13
Figure 19: Profils en 3D de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de E	13
Figure 20: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du nombre de soleil n	14
Figure 21: Profils en 3D des de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z	14
Figure 22: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z	15
Figure 23 : Profils en 3D de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z	15
Figure 24: Schéma du modèle mathématique de la phototension	16
Figure 25: Profil de la phototension V_{ph} en fonction de Sf	17

Figure 26: Profil en 3 D de la phototension en fonction de Sf	17
Figure 27: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E	18
Figure 28: Profils en 3D des de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes de E.....	18
Figure 29: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de n	19
Figure 30: Profils en 3D de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	19
Figure 31: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	20
Figure 32: Profils en 3D des de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	20
Figure 33: Schéma du modèle mathématique de la capacité.....	21
Figure 34: Profil de la capacité en fonction de la vitesse Sf	22
Figure 35: Profil en 3D de la capacité en fonction de la vitesse Sf	22
Figure 36: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de E	23
Figure 37: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de E.....	23
Figure 38: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	24
Figure 39: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	24
Figure 40: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	25
Figure 41: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	25
Figure 42: Détermination de la capacité sous obscurité C_0	26
Figure 43: Profil de la caractéristique courant-tension (I-V)	26
Figure 44: Profil en 3D de la caractéristique (I-V).....	27
Figure 45: Profils de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de E.....	28
Figure 46: Profils en 3D de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de E.....	28
Figure 47: Profils de la Caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de n	29
Figure 48: Profils en 3D de la caractéristique I-V pour différentes valeurs de n.....	29
Figure 49: Profils de la caractéristique I-V pour différentes valeurs de z.....	30
Figure 50: Profils en 3D de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de z.....	30
Figure 51: Schéma du circuit équivalent de la résistance série	33
Figure 52: Schéma du modèle mathématique de la résistance série.....	33
Figure 53: Profil de la résistance série en fonction de la vitesse Sf	34
Figure 54: Profil en 3D de la résistance série en fonction de Sf	34

Figure 55: Profils de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de E.....	35
Figure 56: Représentation en 3D de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de E.....	35
Figure 57: Profils de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	36
Figure 58: Représentation en 3D de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	36
Figure 59: Profils de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de de z.	37
Figure 60: Profils en 3D de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	37
Figure 61: Schéma du circuit équivalent de la résistance série R_{sh}	38
Figure 62: Schéma du modèle mathématique de la résistance shunt.	39
Figure 63: Profil de la résistance shunt en fonction de Sf	39
Figure 64: Représentation en 3D de R_{sh} en fonction de Sf	40
Figure 65: Profils de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de E.....	40
Figure 66: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de E.....	41
Figure 67: Profils de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	41
Figure 68: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de n.....	42
Figure 69: Profils de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	42
Figure 70: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	43
Figure 71: Logigramme de l'algorithme du plus petit majorant	44
Figure 72: Détermination de Sf_{CC} pour un profil de la densité de photocourant donnée.....	45
Figure 73: Détermination de Sf_{CC} pour différentes valeurs du champ E.....	46
Figure 74: Profil de Sf_{CC} en fonction du champ électrique E.....	47
Figure 75: Détermination de Sf_{CC} pour différentes valeurs du nombre de soleil n.....	48
Figure 76: Profil de Sf_{CC} en fonction du nombre de soleil n.....	49
Figure 77: Détermination de Sf_{CC} pour différentes valeurs de la profondeur	49
Figure 78: Profil de Sf_{CC} en fonction de la profondeur	50
Figure 79: Profil en 3D de Sf_{CC} en fonction du champ électrique et de la profondeur	51
Figure 80: Logigramme de l'algorithme du plus grand minorant	52
Figure 81: Détermination de Sf_{CO} pour un profil de la densité de photocourant donnée.....	53

Figure 82: Détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs du champ électrique	54
Figure 83: Profil de Sf_{CO} en fonction du champ électrique	55
Figure 84: Détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs du nombre de soleil n	56
Figure 85: Profil de Sf_{CO} en fonction du champ électrique	57
Figure 86: Détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs de la profondeur.	57
Figure 87: Profil de Sf_{CO} en fonction de la profondeur.	58
Figure 88: Profil en 3D de Sf_{CO} en fonction de la profondeur et du champ E.	59
Figure 89: Logigramme de l'algorithme « $Find_Rs_{CO}$ »	60
Figure 90: Détermination de Rs_{CO} pour un profil de résistance série donnée.	61
Figure 91: Détermination de Rs_{CO} pour différentes valeurs du champ électrique.....	61
Figure 92: Profil de Rs_{CO} en fonction du champ électrique.	62
Figure 93: Détermination de Rs_{CO} pour différentes valeurs du nombre de soleil.	63
Figure 94: Profil de Rs_{CO} en fonction du nombre de soleil.	64
Figure 95: Profil en 3D de Rs_{CO} en fonction du nombre de soleil et de la profondeur	64
Figure 96: Détermination de Rs_{CO} pour différentes valeurs de la profondeur.....	65
Figure 97: Résistance série expérimentale Rs_{CO} en fonction de la profondeur	66
Figure 98: Profil en 3D de Rs_{CO} en fonction du champ électrique et de la profondeur	66
Figure 99: Logigramme de l'algorithme $Find_Rsh_{CC}$	68
Figure 100: Détermination de Rsh_{CC} pour un profil de la densité de photocourant donné....	69
Figure 101: Détermination de Rsh_{CC} pour différentes valeurs de E	69
Figure 102: Profil de Rsh_{CC} en fonction du champ électrique	70
Figure 103: Détermination de Rsh_{CC} pour différentes valeurs de la profondeur	71
Figure 104: Résistance shunt expérimentale Rsh_{CC} en fonction de la profondeur	72
Figure 105: Profil 3D de Rsh_{CC} en fonction de E et de z.....	72
Figure 106: Détermination de Rsh_{CC} pour différentes valeurs de n.....	73
Figure 107: Profil de Rsh_{CC} en fonction du nombre de soleil n.....	74
Figure 108: Profil en 3D de Rsh_{CC} en fonction de n et de z.....	74

Figure 109: Logigramme de l'algorithme « $Find_L_{eff}$ ».	78
Figure 110: Détermination de la longueur de diffusion effective.	79
Figure 111: Logigramme de l'algorithme « $Find_Sf_0$ ».....	80
Figure 112: Détermination de la valeur de Sf_0	81
Figure 113 : Variation de Sf_0 en fonction du champ électrique.	81
Figure 114: Variation de Sf_0 en fonction de la profondeur z.....	82
Figure 115: Schéma du modèle mathématique de la puissance.	83
Figure 116: Profil de la puissance réelle en fonction de la vitesse Sf	84
Figure 117: Profil en 3D de la puissance réelle en fonction de Sf	84
Figure 118: Profil de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E.....	85
Figure 119: Profils en 3D de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de E	85
Figure 120: Profils de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de profondeur.....	86
Figure 121: Profils en 3 D de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z.....	86
Figure 122: Profils de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de profondeur.....	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CC} , $J_{ph_{cc}}$ et E.	46
Tableau 2: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CC} , $J_{ph_{cc}}$ et n.	48
Tableau 3: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CC} , $J_{ph_{cc}}$ et z.	50
Tableau 4: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CO} , $V_{ph_{co}}$ et E.	54
Tableau 5: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CO} , $V_{ph_{co}}$ et n.	56
Tableau 6: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CO} , $V_{ph_{co}}$ et z.	58
Tableau 7: Table de correspondance des valeurs de Rs_{CO} , Sf_{CO} et E.	62
Tableau 8 : Table de correspondance des valeurs de Rs_{CO} , Sf_{CO} et E.	63
Tableau 9: Table de correspondance des valeurs de Rs_{CO} , Sf_{CO} et z.	65
Tableau 10: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{CC} , Sf_{CC} et E.	70
Tableau 11: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{CC} , Sf_{CC} et z.	71
Tableau 12: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{CC} , Sf_{CC} et n.	73

NOMENCLATURE

SYMBOLES	DESIGNATIONS
a_i (cm ⁻³ .s ⁻¹)	Coefficient tabulé du rayonnement solaire
b_i (cm ⁻¹)	Coefficient tabulé du rayonnement solaire
C (F/cm ²)	Capacité de la zone de charge d'espace
C_0 (F/cm ²)	Capacité sous obscurité de la photopile
D (cm ² /s)	Coefficient de diffusion des porteurs de charges
δ (cm ⁻³)	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile
E (V/cm)	Champ électrique de polarisation
G (cm ³ /s)	Taux de génération des porteurs
I_d (A/cm ²)	Courant de diffusion
J_{ph} (A/cm ²)	Densité de photocourant
$J_{ph_{cc}}$ (A/cm ²)	Densité de photocourant de court-circuit
K (J/°K)	Constante de Boltzmann
L (cm)	Longueur de diffusion des porteurs de charges
L_{eff} (cm)	Longueur de diffusion effective des porteurs
N_B (cm ⁻³)	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté
n_i (cm ⁻³)	Concentration intrinsèque des porteurs dans la base
P_{ph} (W/cm ²)	Puissance électrique
q (C)	Charge de l'électron
R_s (Ω /cm ²)	Résistance série
R_{sh} (Ω /cm ²)	Résistance shunt
$R_{s_{co}}$ (Ω /cm ²)	Résistance série expérimentale
$R_{sh_{cc}}$ (Ω /cm ²)	Résistance shunt expérimentale
S_b (cm/s)	Vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires à la face arrière
S_f (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction
$S_{f_{cc}}$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction initiant le court-circuit
$S_{f_{co}}$ (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction limitant le circuit-ouvert

Sf_0 (cm/s)	Vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction
T (K)	Température
V_{ph} (V)	Phototension
$V_{ph_{co}}$ (V)	Tension de circuit ouvert
V_T (V)	Tension thermique
x (cm)	Epaisseur de la base
z (cm)	Profondeur de la base

INTRODUCTION GENERALE

La demande énergétique constitue un défi grandissant, auquel l'humanité est confrontée. Présentement, la plus grande partie de l'énergie consommée sur la planète terre provient des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz, uranium). Outre l'épuisement de ces ressources, les perturbations irréversibles des écosystèmes engendrées par l'exploitation énergétique, compromettent sérieusement les conditions de vie et le devenir de la planète.

La hausse du taux de la demande énergétique fluctue entre 1.5% et 4.6% suivant les pays [1]. Ainsi, en 2030, d'après les experts du domaine, la demande énergétique aura doublé. Face à une telle situation les énergies renouvelables générées par des sources inépuisables telles que le soleil l'eau, et le vent constituent d'excellentes alternatives aux énergies fossiles qui, tôt ou tard finiront par disparaître.

Compte tenu des contraintes géographiques le soleil est sans aucun doute la source d'énergie propre la mieux partagée au monde. La production d'énergie solaire repose sur la transformation de la lumière en électricité par un dispositif dite photopile, il s'agit de l'effet photovoltaïque, découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 [2,3]. Ce phénomène, à l'époque, incompris par les physiciens fut expliqué par Albert Einstein, qui, grâce à ses travaux [4] publiés en 1905 élucida enfin, le mystère du phénomène photoélectrique. Plus tard, au début des années 50, des chercheurs mirent au point les premières cellules photovoltaïques au silicium avec un rendement de 4,5% [5].

Au fil des années, ces convertisseurs d'énergie lumineuse en énergie électrique ont subi de nombreuses améliorations et continuent de susciter un intérêt majeur pour la recherche. Le développement fulgurant des techniques de conception [6] des matériaux semi-conducteurs constitue une première amélioration structurelle des photopiles. L'objectif visée dans le perfectionnement des photopiles est d'atteindre de meilleurs rendements à faible coût de production. Dans ce contexte, les techniques de fabrication des photopiles ont connu des innovations spectaculaires ces dernières décennies. Suite à l'avènement des photopiles conventionnelles [7], les photopiles bifaciales [8,9] pouvant être éclairés par les deux faces ont été conçues avec un rendement supérieur ou égal à 20%. Par ailleurs, le développement de la recherche, loin d'avoir atteint son apogée a conduit à la mise au point de nouvelles variétés de photopiles plus performantes : les photopiles à jonction horizontale, les photopiles à jonction verticale, etc.

Lorsque la photopile est éclairée il y a établissement des phénomènes tels que la génération, la diffusion, la recombinaison des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base. Un courant électrique est généré à travers les zones de collecte suite à la diffusion de ces porteurs. Au cours de cette diffusion tous les porteurs ne seront pas collectés, certains seront perdus à cause du phénomène de recombinaison. Ils existent divers mécanismes de recombinaison de ces porteurs de charges :

- Les mécanismes d'origine intrinsèques : les recombinaisons thermiques, en volume de Schrockley-Real-Hall [10,11], d'Auger, radiatives et surfaciques [11,12] qui théoriquement abaissent les performances de la cellule photovoltaïque.
- Les mécanismes d'origine extrinsèques liés aux imperfections présentes dans la structure cristalline, qui technologiquement diminuent les performances de la photopile.

Le faible rendement des photopiles est en majeure partie dû à ces phénomènes de recombinaison qui influent sur les paramètres caractéristiques de la photopile [11,12,13]. Divers paramètres caractéristiques sont considérés, il s'agit : des paramètres électroniques (vitesse de recombinaison aux interfaces, durée de vie des porteurs, longueur de diffusion des porteurs, etc.) et des paramètres électriques macroscopiques (résistance shunt et résistance série).

Dans ce travail il s'agit d'étudier en régime statique [13-24] les influences d'un champ électrique externe, de la profondeur du matériau et de l'éclairement sur les paramètres électriques microscopiques et macroscopiques d'une photopile à jonction verticale parallèle au silicium soumis à un éclairement polychromatique.

Au premier chapitre de notre étude nous déterminerons théoriquement les paramètres électriques microscopiques de la photopile ainsi que les effets respectifs, d'un champ électrique externe, de la profondeur du matériau et de l'éclairement sur ces paramètres. Au second chapitre une étude similaire à celle précédente sera menée cette fois ci sur les paramètres électriques macroscopiques. Dans le dernier chapitre nous nous focaliserons sur la détermination de la vitesse intrinsèque de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile et sur la puissance réelle de la photopile. En guise de conclusion nous effectuerons une synthèse des résultats obtenus à travers cette étude pour en dégager de nouvelles perspectives.

CHAPITRE 1 : EFFETS DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LES PARAMETRES ELECTRONIQUES DE LA PHOTOPILE

INTRODUCTION

Le développement de la recherche en plein essor, a conduit à la conception de nouvelles variétés de photopiles plus performantes : les photopiles à jonction verticale [1]. Ces photopiles sont disponibles sous deux formes : les photopiles à jonction verticale série et celles à jonction verticale parallèle [24-26].

La détermination des paramètres caractéristiques des photopiles à jonction horizontale et à verticale [27,28] a été l'objet de plusieurs investigations élaborées sous diverses conditions expérimentales [29-33].

Dans ce chapitre, nous apportons notre contribution à cette dynamique de recherche sur le comportement en régime statique des porteurs de charge minoritaires en excès dans la base d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle, placée dans un champ électrique externe. La photopile étudiée présente une certaine particularité liée à sa structure, qui présente une parfaite symétrie entre les différentes parties qui la constitue. Ainsi, l'essentiel de notre étude est confiné entre deux jonctions à travers lesquelles les porteurs vont migrer pour être collectée.

Dans ce chapitre nous évaluerons les effets respectifs du champ électrique, de la profondeur et de l'intensité d'irradiation lumineuse sur la densité des porteurs de charges et sur tous les autres paramètres électroniques de la photopile.

1.1 DENSITE DES PORTEURS DE CHARGES MINORITAIRES

Nous présentons sur la figure 1 une n-p-p+ [34] cellule solaire sous éclairage multi spectral. Afin d'étudier l'influence du champ électrique externe sur le comportement des porteurs de charges dans la majeure partie de la base de la cellule solaire. Nous appliquons une différence de potentiel et nous étudions dans la théorie de la base quasi neutre (QNB) [35]. La polarisation externe crée un champ électrique interne qui influence le mouvement total des porteurs de charge. Ce champ électrique est la somme du champ électrique externe résultant de la polarisation et du champ électrique interne de la cellule solaire. La figure 1 représente le schéma de la photopile à jonction verticale.

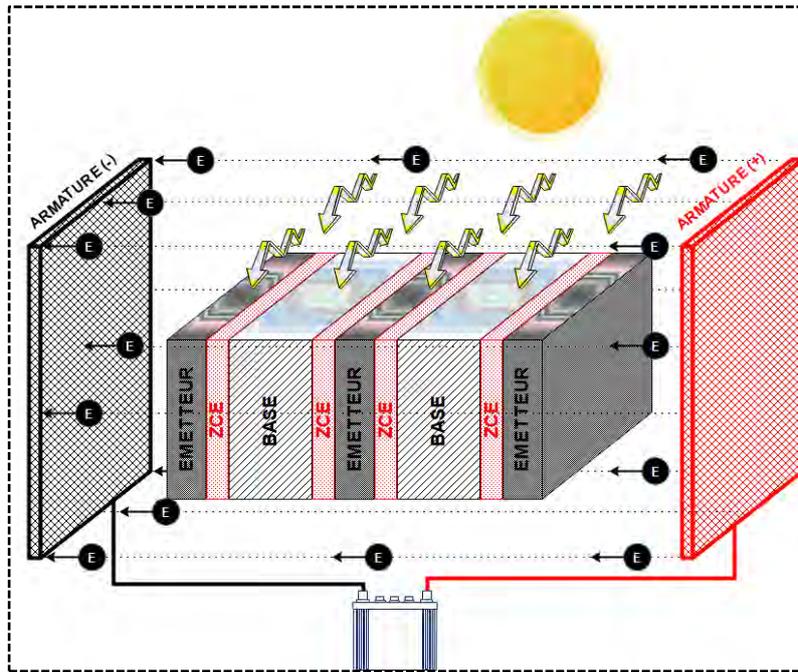


Figure 1: Schéma synoptique du dispositif expérimental

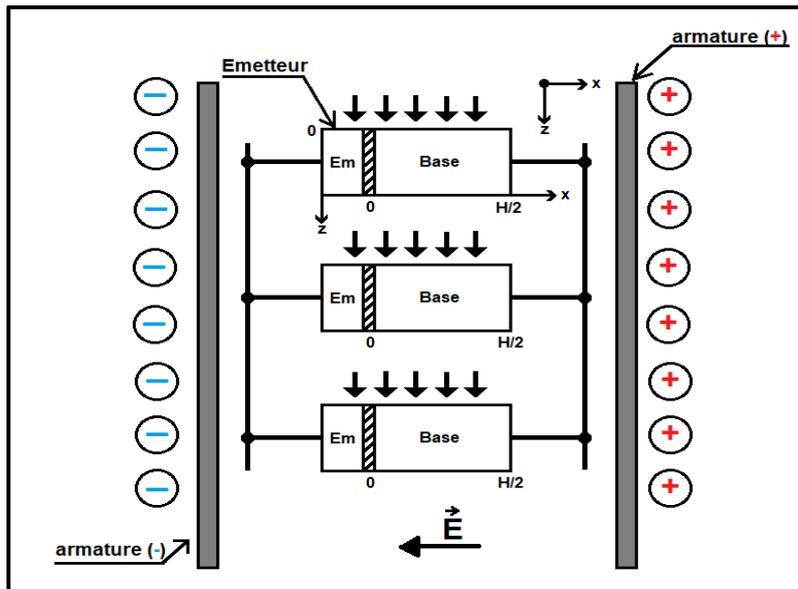


Figure 2: Représentation en 2D de la photopile à jonction verticale parallèle

Lorsque la photopile est éclairée il y a établissement des phénomènes tels que la génération, la diffusion, la recombinaison des porteurs de charges en excès dans la base. En régime statique, ces phénomènes sont caractérisés par l'équation de continuité donnée par l'équation (1.1).

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{\mu \cdot E}{D_n} \right) \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} - \left(\frac{1}{\tau \cdot D_n} \right) \cdot \delta(x) = - \frac{G(z)}{D_n} \quad (1.1)$$

La résolution de l'équation (1.1) et l'utilisation des conditions aux limites données par les équations (1.2) et (1.3) permettent de déterminer l'équation à laquelle obéit la densité des porteurs.

À la jonction :

$$D_n \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, z, E, n)}{\partial x} \right|_{x=0} = S_f \cdot \delta(0, z, E, n) \quad (1.2)$$

A milieu de la base :

$$\left. \frac{\partial \delta(x, z, E, n)}{\partial x} \right|_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad (1.3)$$

1.1.1 Densité des porteurs minoritaires de charge en excès

L'équation (1.4) est celle de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile.

$$\delta(x, z, S_f, E, n) = e^{\beta(E) \cdot x} \cdot [A(z, S_f, E) \cdot \text{ch}(\alpha(E) \cdot x) + B(z, S_f, E) \cdot \text{sh}(\alpha(E) \cdot x)] + n \cdot \sum_{i=1}^3 c_i \cdot e^{-b_i \cdot z} \quad (1.4)$$

1.1.2 Modélisation de la densité des porteurs minoritaires

La figure 3 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (1.4)

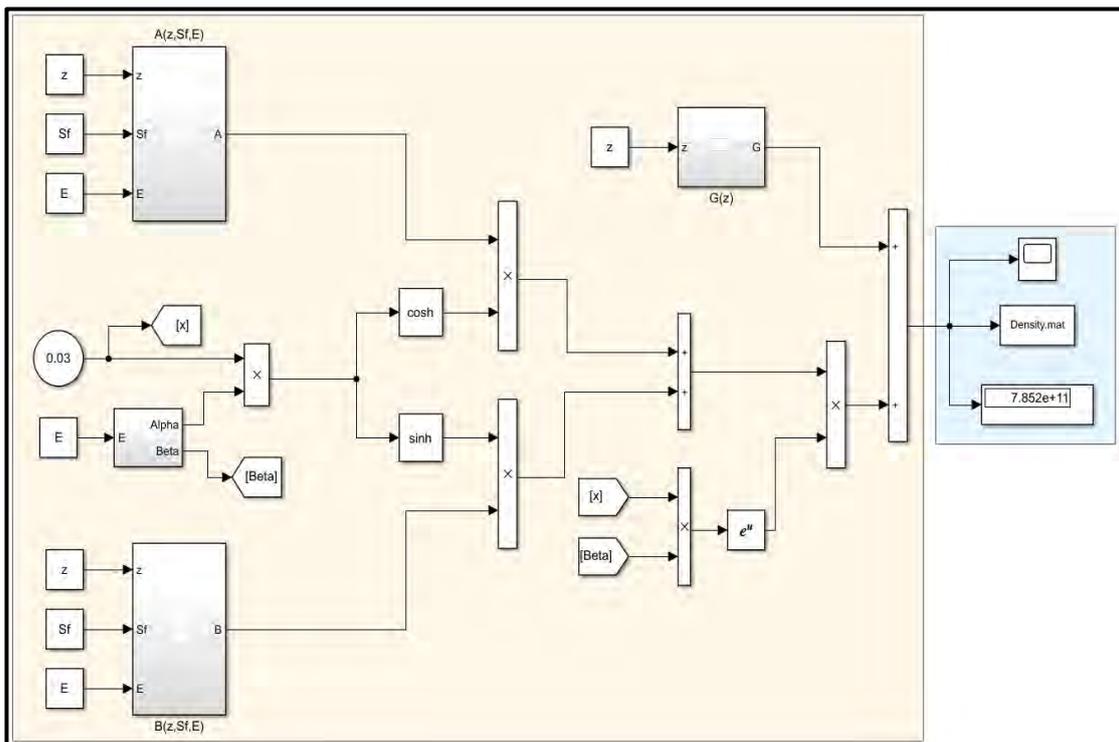


Figure 3: Schéma du modèle mathématique de la densité des porteurs

A partir de l'équation (1.4), sont obtenus les figures 3 à 12. La figure 4 représente les courbes de la densité des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert respectivement pour $Sf=10\text{cm/s}$, $Sf=200\text{ cm/s}$ et $Sf=3000\text{ cm/s}$, en fonction de l'épaisseur de la base.

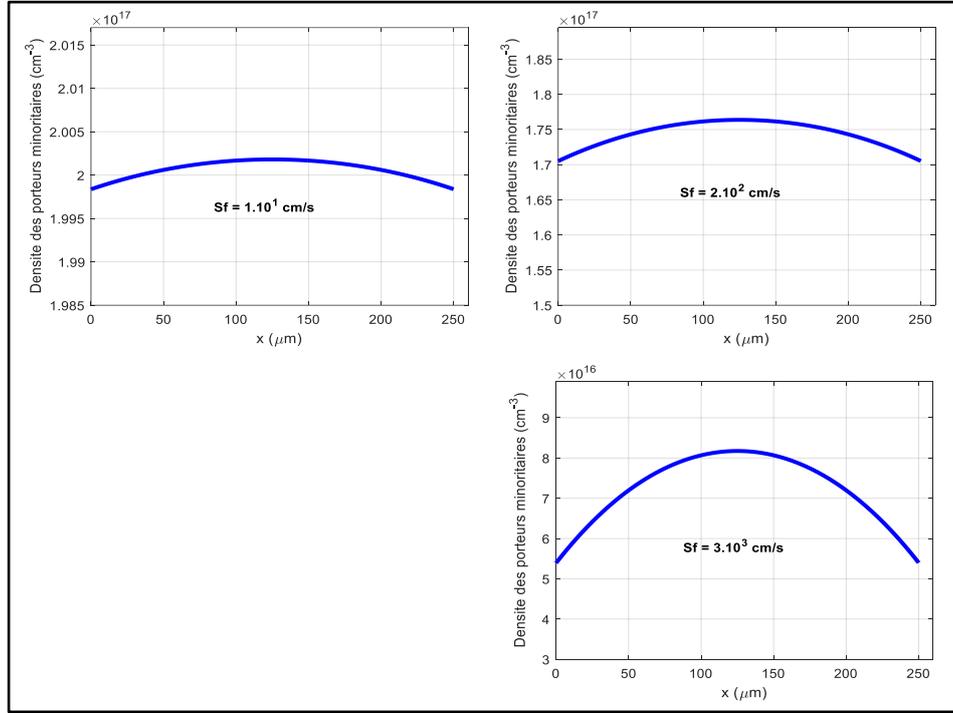


Figure 4: Profil de $\delta(x)$ en circuit ouvert, $z=10\mu\text{ m}$, $E=0.01\text{ V/cm}$

La figure 5 est la représentation en 3 dimensions de la figure 3.

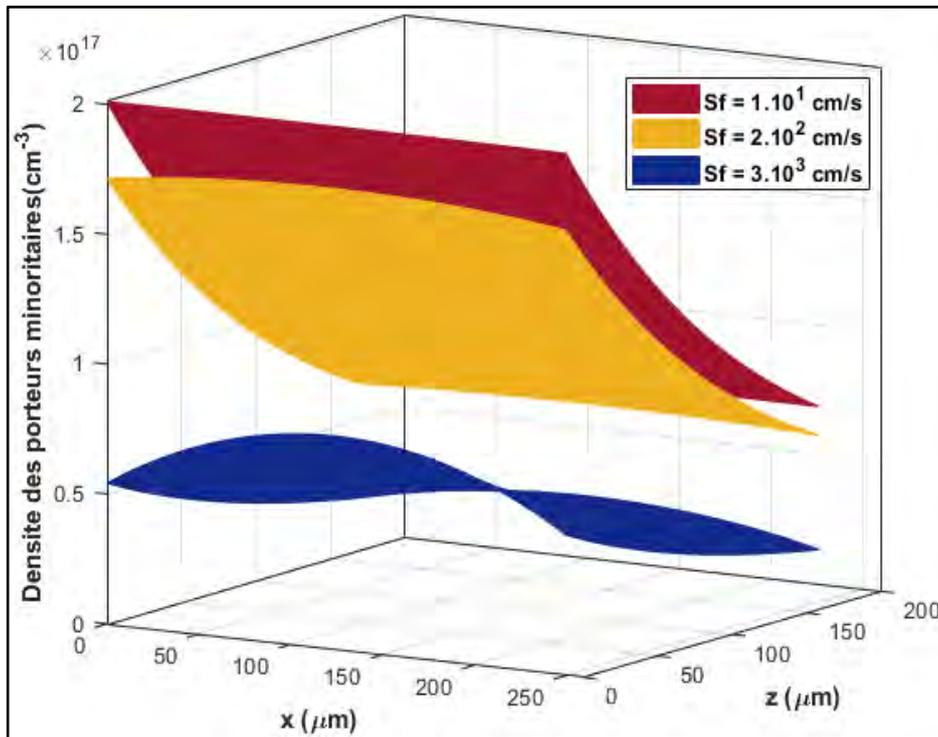


Figure 5: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en circuit ouvert, $E=0.01\text{ V/cm}$

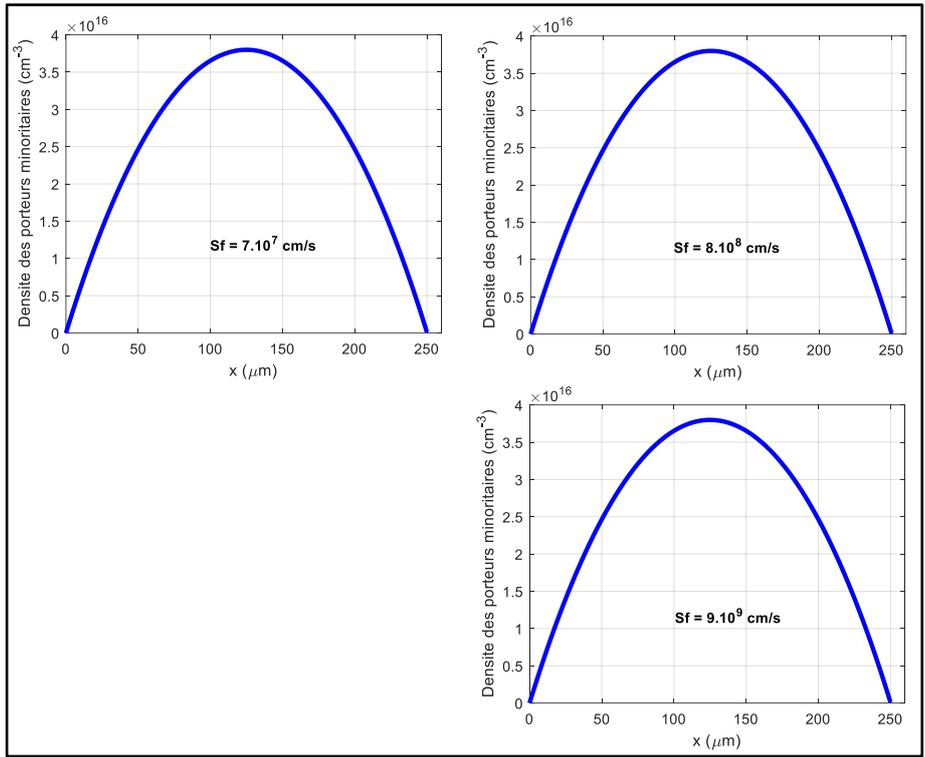


Figure 6: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, $z=10 \mu\text{m}$, $E=0.01 \text{ V/cm}$

La figure 7 représente le profil en 3 dimensions de la densité des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert ($Sf = 3.103 \text{ cm/s}$), en fonctionnement intermédiaire ($Sf = 5.105 \text{ cm/s}$), en court-circuit ($Sf = 9.109 \text{ cm/s}$), en fonction de l'épaisseur de la base.

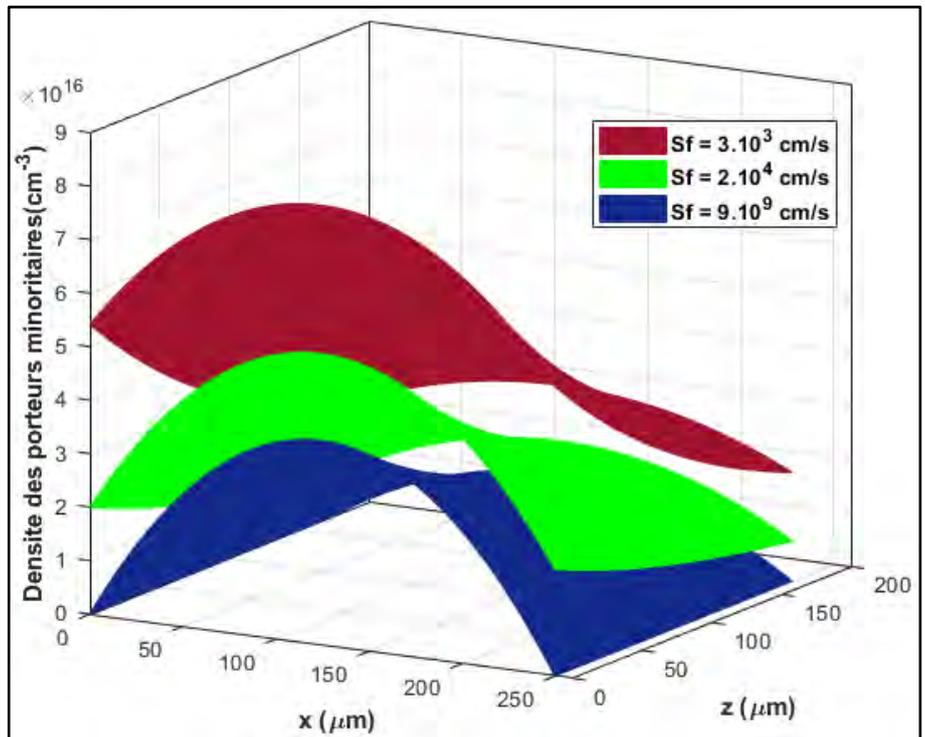


Figure 7: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, $E=0.01 \text{ V/cm}$

Les figures 3 ,4 ,5 et 6 montrent que le taux de porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile diminue lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente.

1.1.3 Effet du champ électrique sur la densité des porteurs minoritaires

La figure 8 qui représente le profil de la densité des porteurs minoritaires de la photopile en court-circuit en fonction de l'épaisseur de la base, pour différentes valeurs du champ électrique.

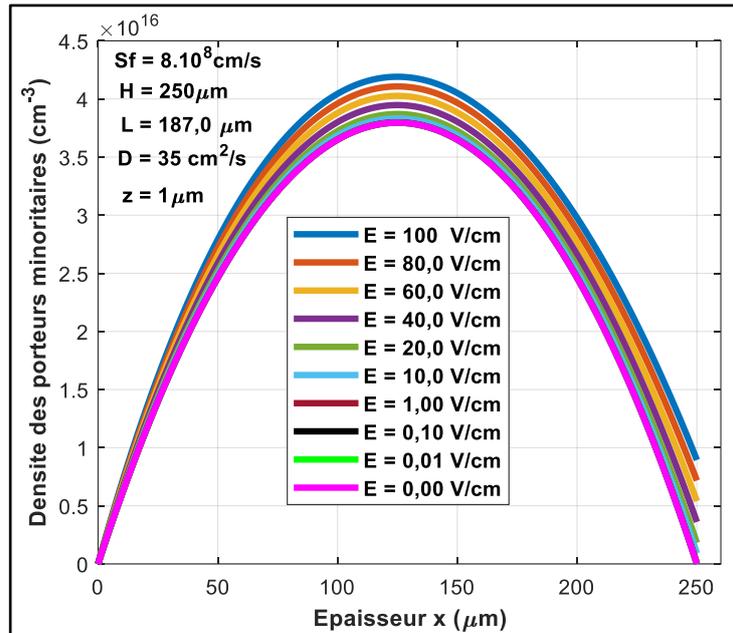


Figure 8: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de E

La figure 9 est la représentation en 3 dimensions de la figure 7.

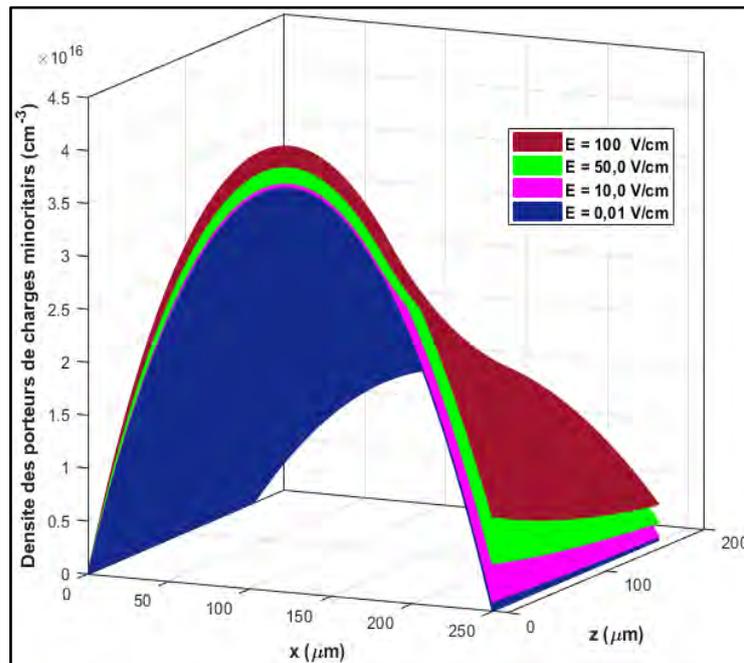


Figure 9: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de E

Les figures 8 et 9 permettent d’observer une croissance du taux de porteurs photogénérés en phase avec l’augmente du champ électrique extérieur E.

1.1.4 Effet du nombre de soleil sur la densité des porteurs minoritaires

La figure 10 qui représente le profil de la densité des porteurs minoritaires de la photopile en court-circuit ($S_f = 8.108 \text{ cm/s}$) en fonction de l’épaisseur de la base, pour différentes valeurs du nombre de soleil n.

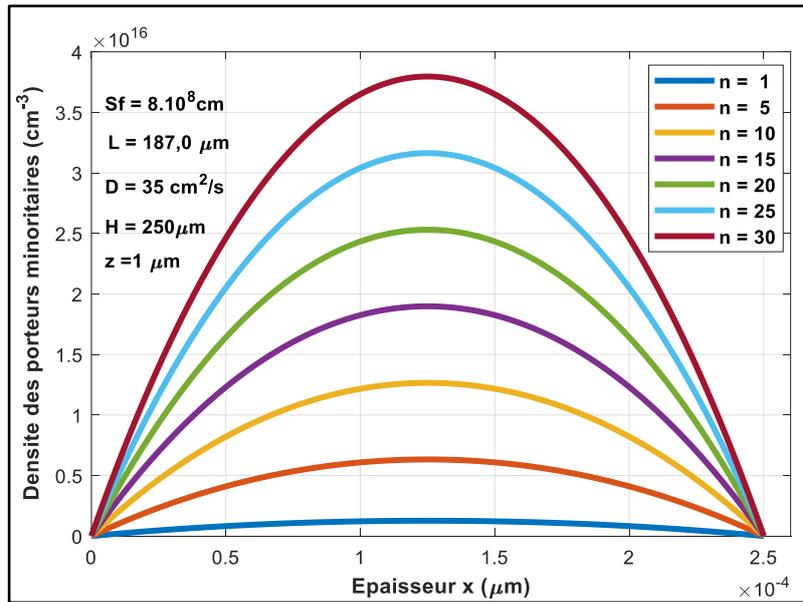


Figure 10 : Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de n

La figure 11 est la représentation en 3 dimensions de la figure 10.

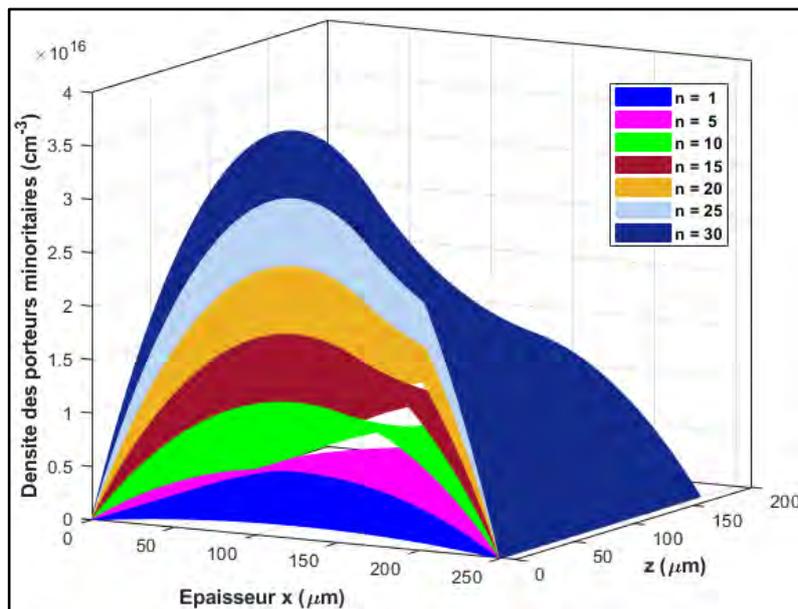


Figure 11: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de n

Les figures 10 et 11 permettent d’observer une croissance du taux de porteurs photogénérés en phase avec l’augmente du nombre de soleil.

1.1.5 Effet de la profondeur sur la densité des porteurs minoritaires

La figure 12 représente le profil de la densité des porteurs minoritaires de la photopile en mode de fonctionnement court-circuit en fonction de l’épaisseur de la base, pour différentes valeurs de la profondeur.

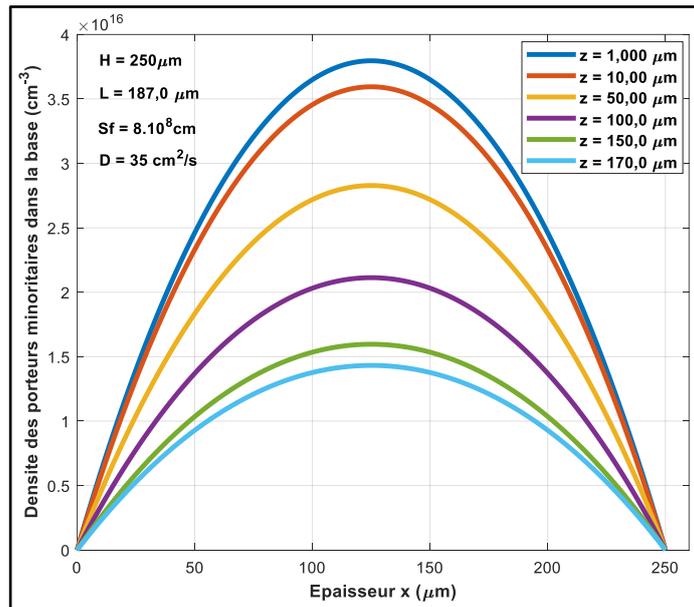


Figure 12: Profils de $\delta(x)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de z

La figure 13 est la représentation en 3 dimensions de la figure 12.

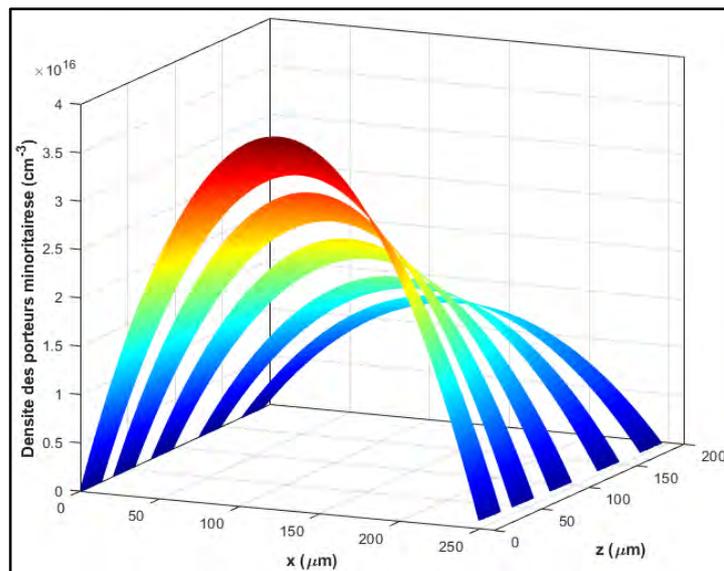


Figure 13: Profils en 3D de $\delta(x, z)$ en court-circuit, pour différentes valeurs de z

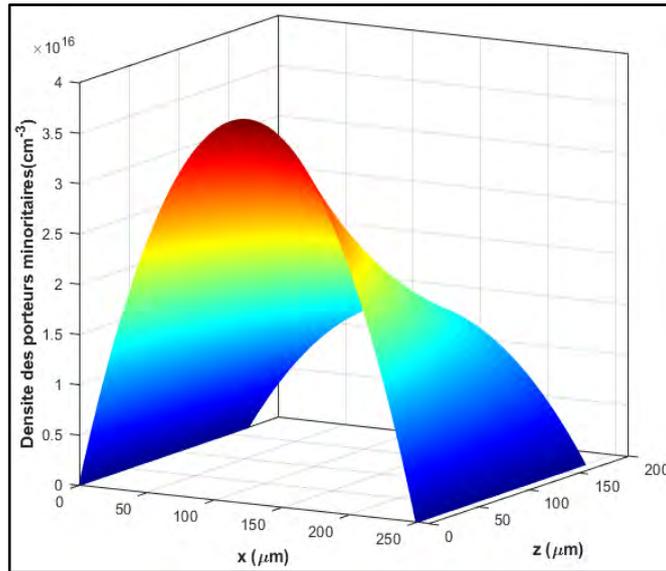


Figure 14: Profil en 3D de la densité des porteurs minoritaires

Les figures 12,13 et 14 illustrent une diminution de la densité des porteurs de charge en excès dans la base au fur et à mesure que l'on pénètre en profondeur dans le matériau semi-conducteur.

1.2 DENSITE DE PHOTOCOURANT

Les électrons photogénérés dans la base et ayant parvenus à traverser la jonction sont collectés dans un circuit extérieur pour générer un courant. La loi de Fick, nous permet d'établir l'équation de la densité de photocourant :

$$J_{ph}(z, Sf, E, n) = 2 \cdot q \cdot D_n \cdot \left. \frac{\partial(x, z, Sf, E, n)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1.5)$$

1.2.1 Modélisation de la densité de photocourant

La figure 15 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (1.5)

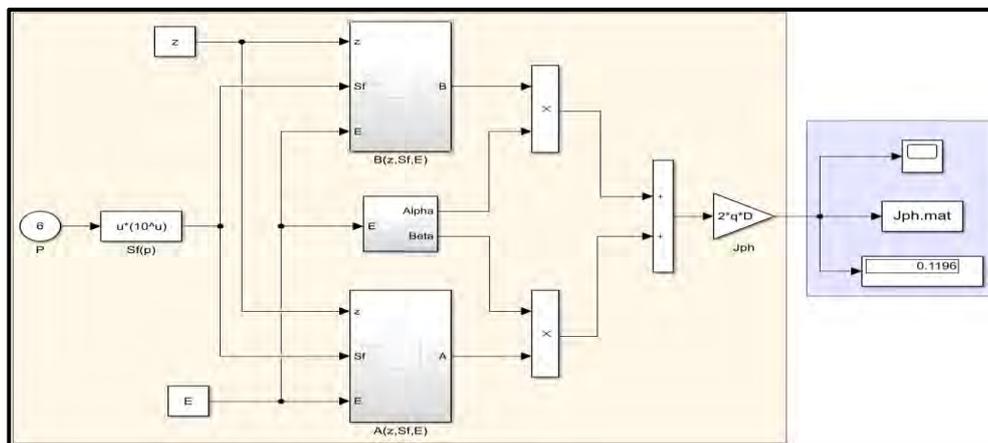


Figure 15: Schéma du modèle mathématique de la densité de photocourant

A partir de l'équation (1.5), sont obtenus les figures 15 à 23. La figure 16 représente le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires.

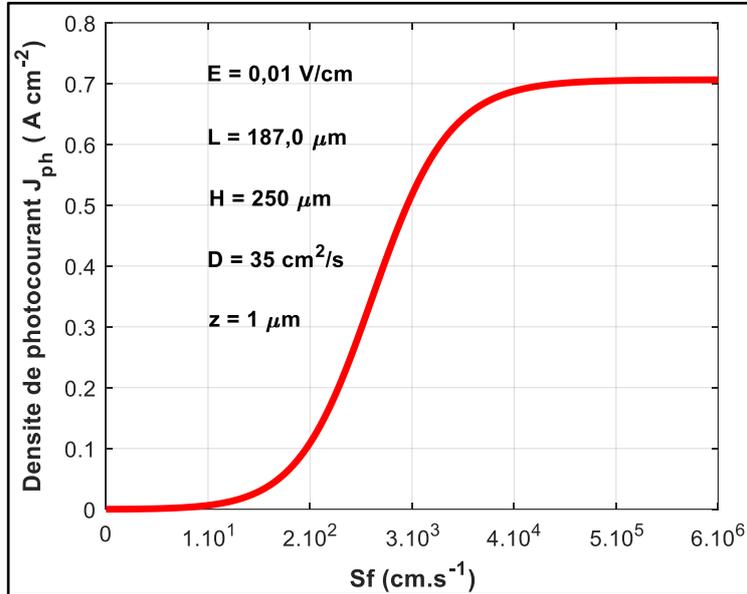


Figure 16: Profil de la densité de photocourant $J_{ph}(Sf)$

La figure 17 est une représentation en 3 dimensions de la figure 16.

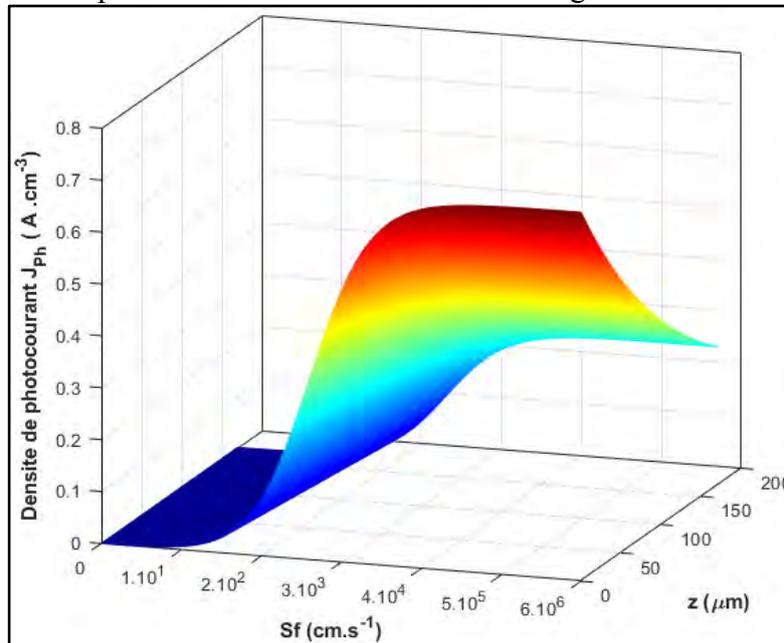


Figure 17: Profil en 3D de la densité de photocourant $J_{ph}(Sf)$

Aux faibles valeurs de Sf , J_{ph} est presque nulle traduisant le fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. Les porteurs photogénérés sont ainsi bloqués à la jonction.

Aux grandes valeurs de Sf , la densité de photocourant est maximale et correspond au photocourant de court-circuit. La photopile fonctionne en situation de court-circuit où le maximum de porteurs traverse les jonctions pour participer au photocourant.

1.2.2 Effet du champ électrique sur la densité de photocourant

La figure 18 représente le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du champ électrique.

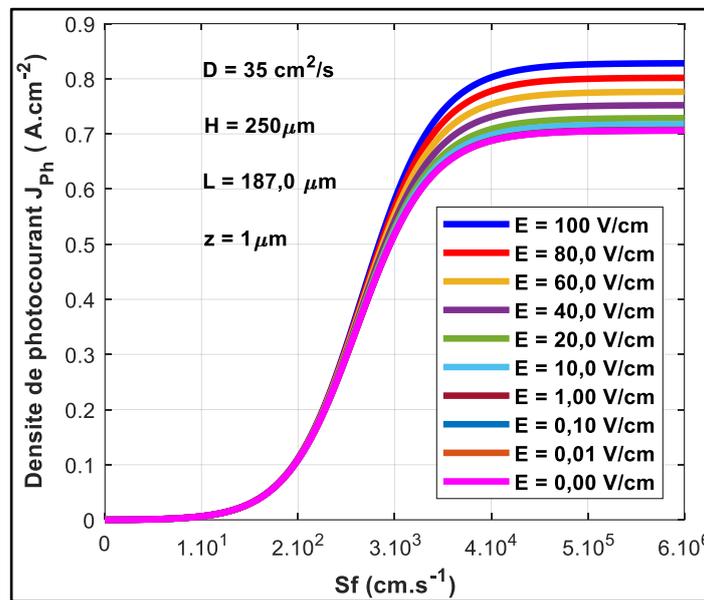


Figure 18: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E

La figure 19 est une représentation en 3 dimensions de la figure 18.

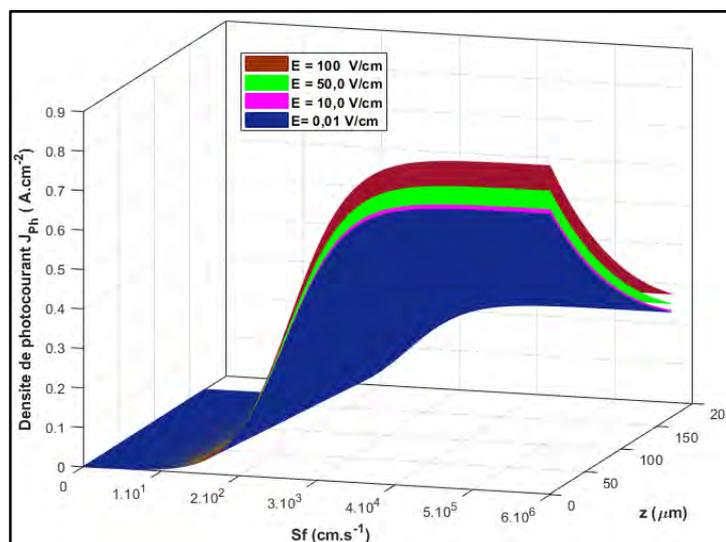


Figure 19: Profils en 3D de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de E

Les figures 18 et 19 permettent d’observer une croissance de la densité de photocourant délivrée par la photopile en phase avec l’augmente du champ électrique extérieur E.

1.2.3 Effet du nombre de soleil sur la densité de photocourant

La figure 20 représente le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse Sf pour différentes valeurs du nombre de soleil n.

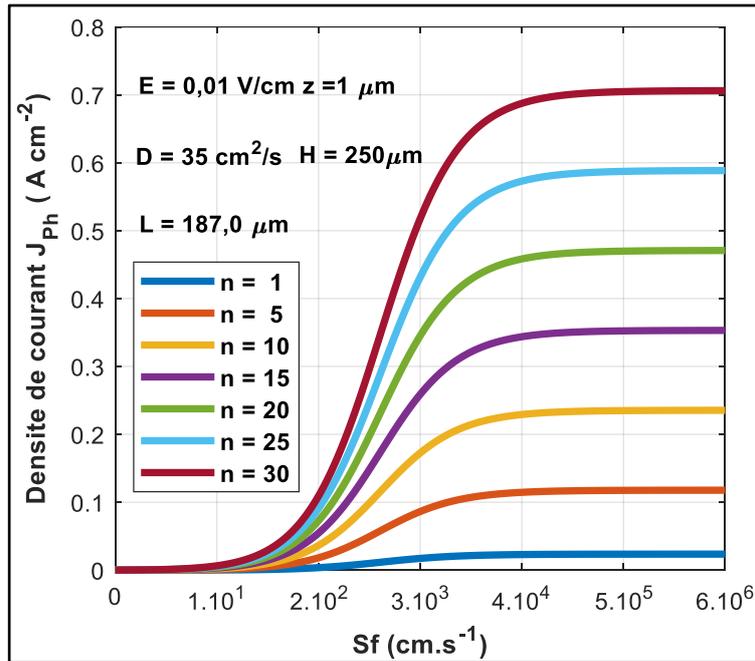


Figure 20: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du nombre de soleil n

La figure 21 est une représentation en 3 dimensions de la figure 20.

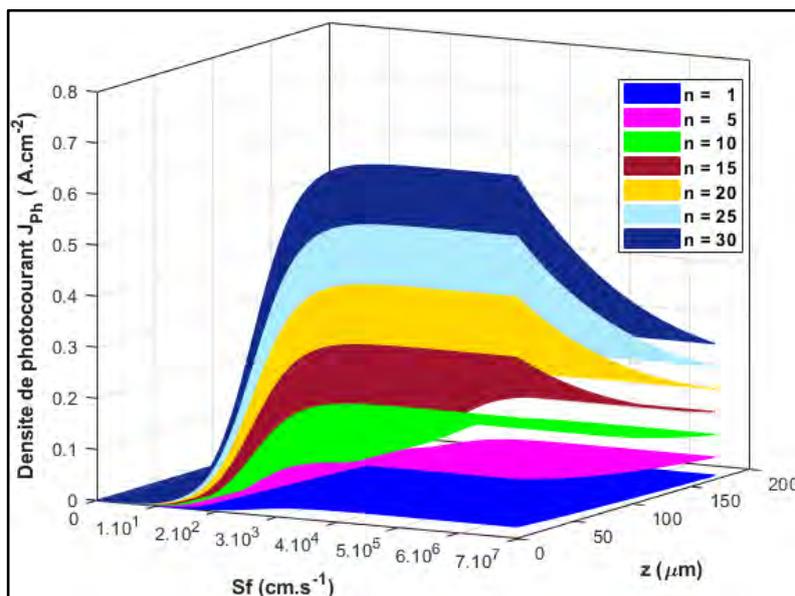


Figure 21: Profils en 3D des de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

Les figures 20 et 21 permettent d’observer une croissance de la densité de photocourant en phase avec l’augmentation du nombre de soleil (n).

1.2.4 Effet de la profondeur de la base sur la densité de photocourant

La figure 22 représente le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la profondeur.

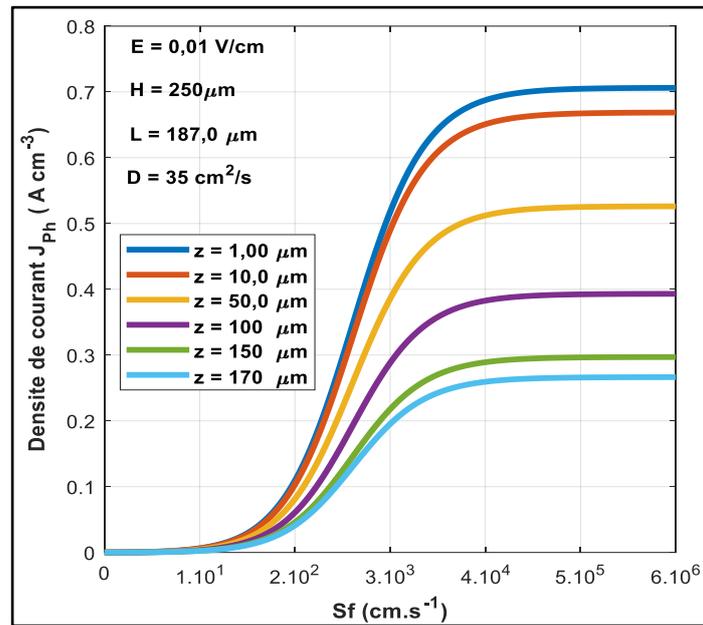


Figure 22: Profils de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

La figure 23 est une représentation en 3 dimensions de la figure 22.

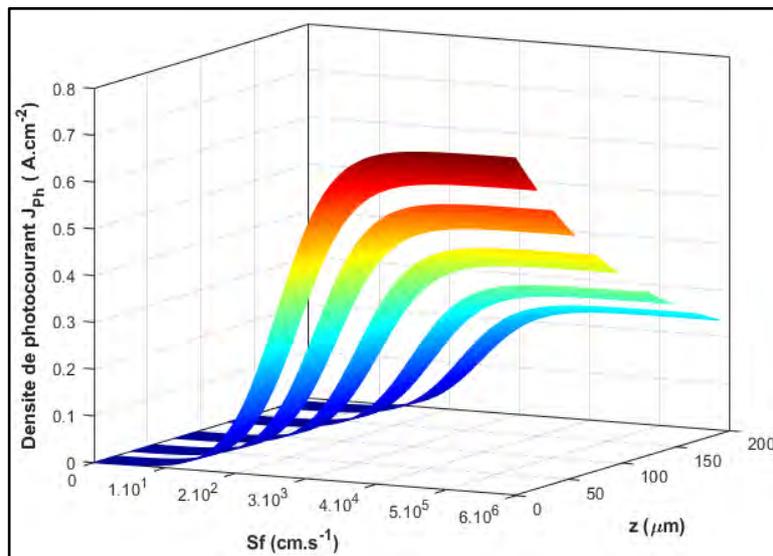


Figure 23 : Profils en 3D de $J_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

Les figures 22 et 23 illustrent une diminution de la densité de photocourant au fur et à mesure que l'on pénètre en profondeur dans le matériau semi-conducteur.

1.3 PHOTOTENSION

Au cours du phénomène de diffusion déclenchée par l'éclairement de la photopile, des électrons dont les énergies ne suffisent pas pour leur permettre une traversée de la jonction s'accumulent au voisinage de la zone d'espace et de charge. Cette accumulation de charges au niveau de la jonction est à l'origine d'une différence de potentiel considérée comme étant la phototension. La relation de Boltzmann nous a permis d'obtenir l'équation (1.6) caractérisant la phototension.

$$V_{ph}(z, Sf, E, n) = V_T \cdot Ln \left[\frac{N_b}{n_i} \cdot \delta(0, z, Sf, E, n) + 1 \right] \quad (1.6)$$

1.3.1 Modélisation de la phototension

La figure 24 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (1.6).

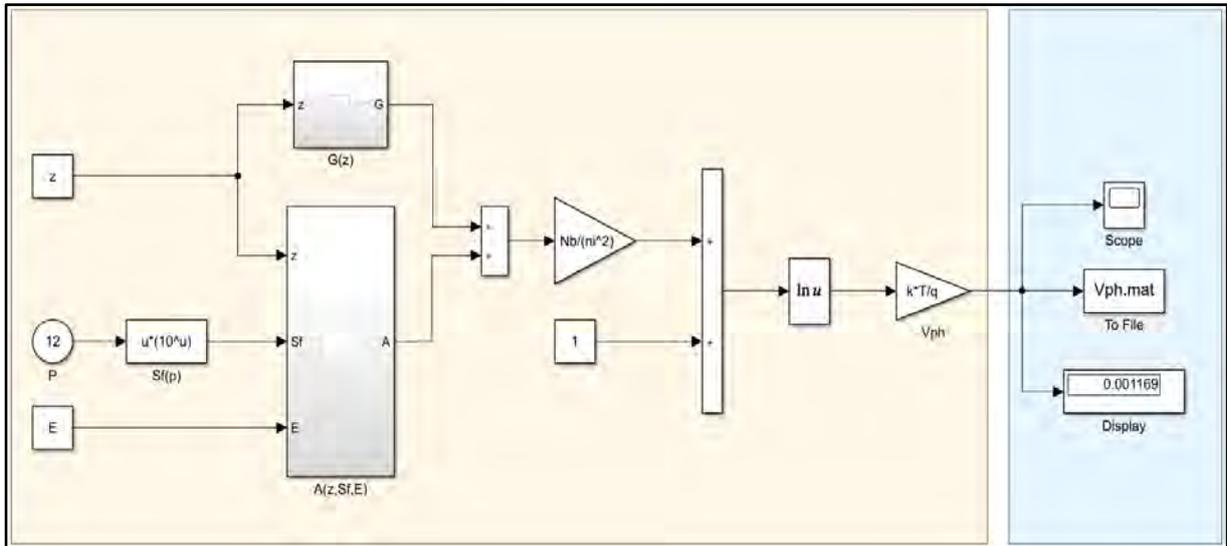


Figure 24: Schéma du modèle mathématique de la phototension

A partir de l'équation (1.6), sont obtenus les figures 24 à 32. La figure 25 est le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf des porteurs minoritaires.

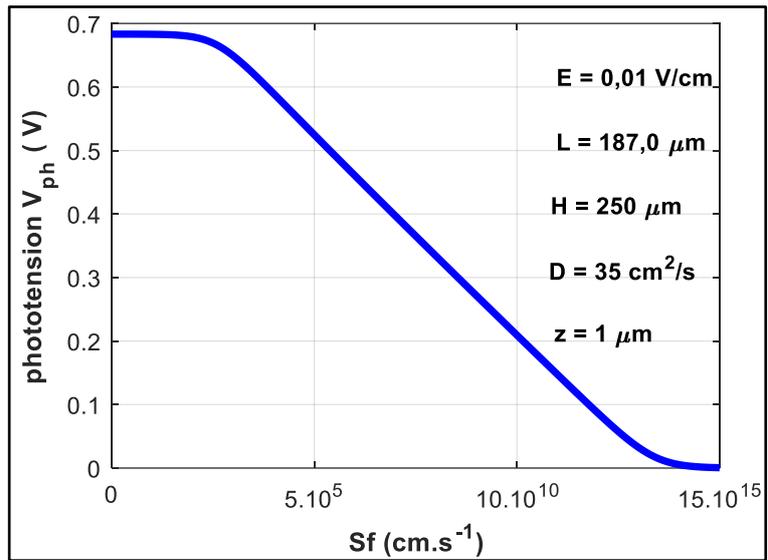


Figure 25: Profil de la phototension V_{ph} en fonction de Sf

La figure 26 est une représentation en 3 dimensions de la figure 25.

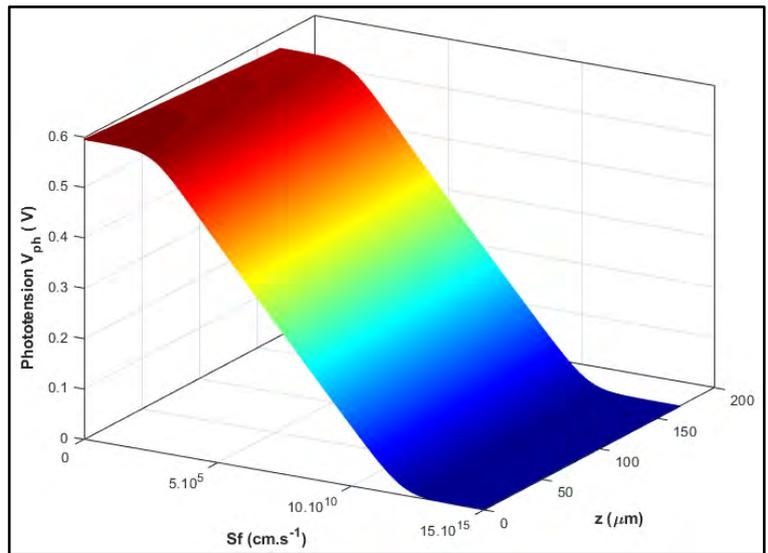


Figure 26: Profil en 3 D de la phototension en fonction de Sf

Les figures 25 et 26 montrent que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) la phototension est maximale et égale à la phototension de circuit ouvert. Ensuite aux grandes valeurs de Sf (au voisinage du court-circuit), la phototension diminue considérablement en tendant vers une valeur nulle. En effet, pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, les porteurs de charges ne possèdent pas une énergie suffisante pour traverser la jonction. Ainsi, ces porteurs s'accumulent à la jonction et par conséquent, la phototension augmente. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison, les porteurs réussissent à traverser la jonction et entraînent par la suite une baisse considérable de la phototension.

1.3.2 Effet du champ électrique sur la phototension.

La figure 27 représente le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du champ électrique.

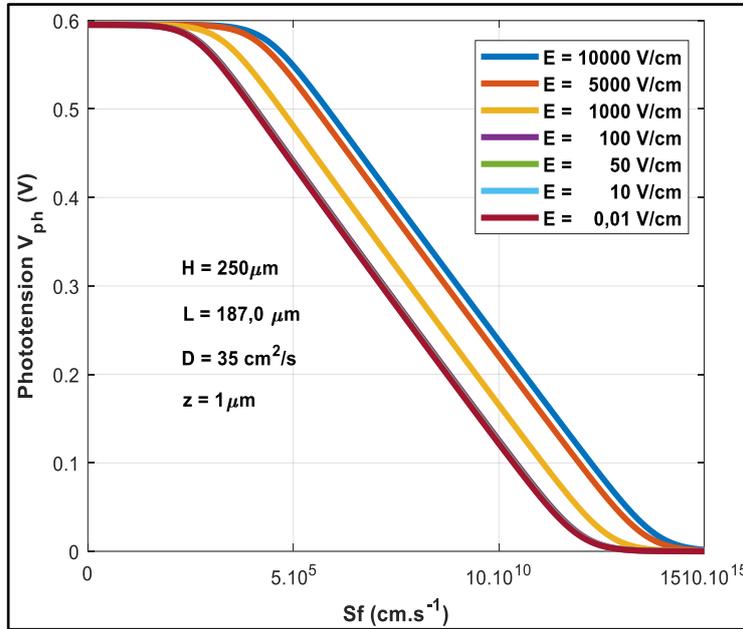


Figure 27: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E

La figure 28 est une représentation en 3 dimensions de la figure 27.

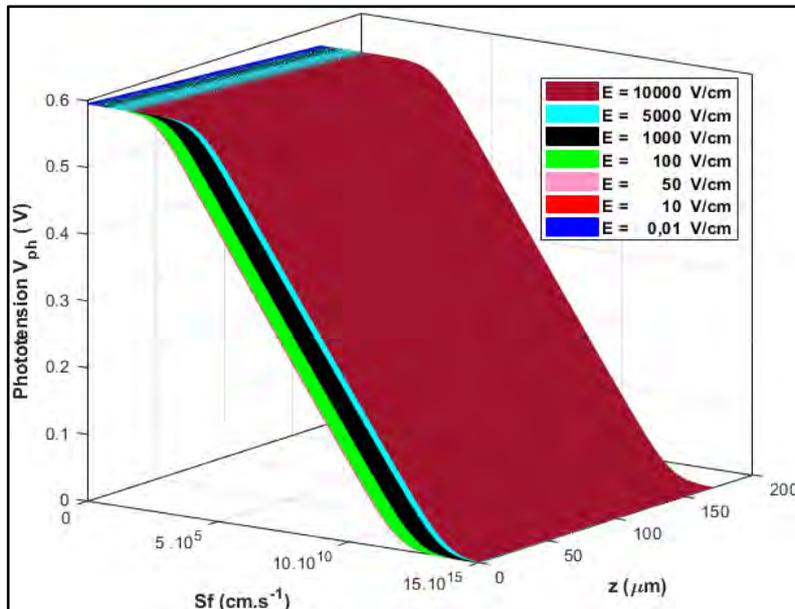


Figure 28: Profils en 3D des de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes de E

Les figures 27 et 28 permettent d'observer une croissance de la phototension délivrée par la photopile en phase avec l'augmentation du champ électrique extérieur E .

1.3.3 Effet du nombre de soleil sur la phototension

La figure 29 représente le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du nombre de soleil n .

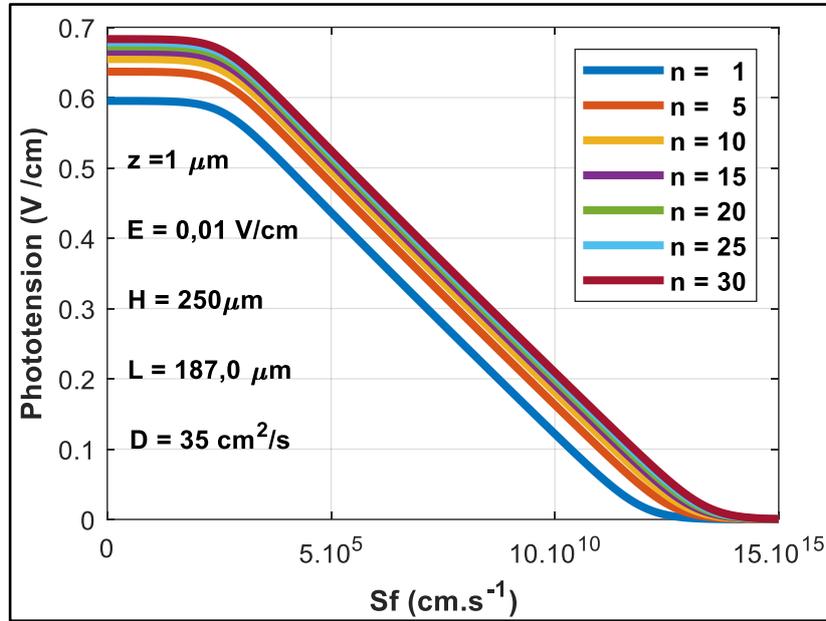


Figure 29: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de n

La figure 30 est une représentation en 3 dimensions de la figure 29.

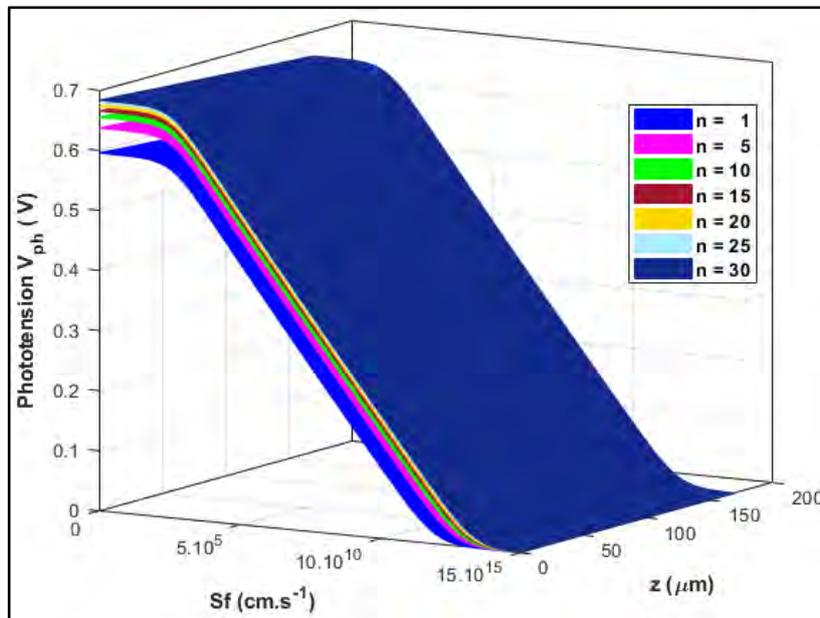


Figure 30: Profils en 3D de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de n

Les figures 29 et 30 permettent d'observer une croissance de la phototension en phase avec l'augmentation du nombre de soleil (n).

1.3.4 Effet de la profondeur sur la phototension

La figure 31 représente les profils de la densité de propulsion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la profondeur z .

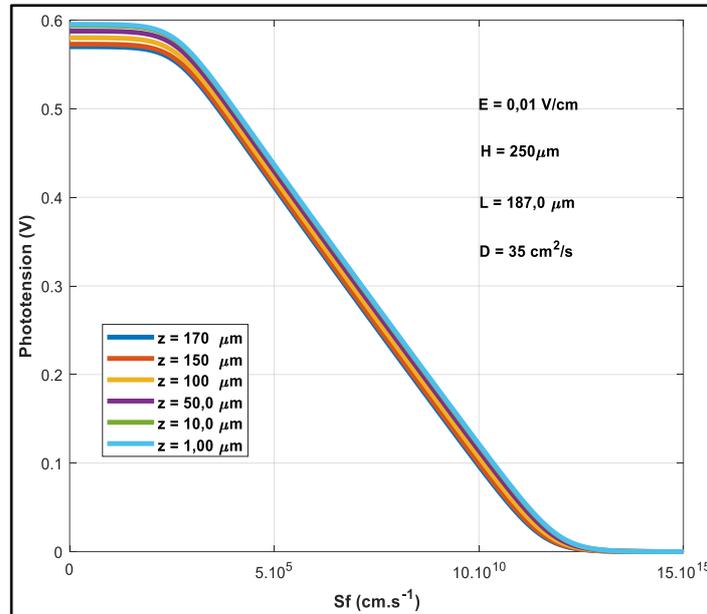


Figure 31: Profils de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

La figure 32 est une représentation en 3 dimensions de la figure 30.

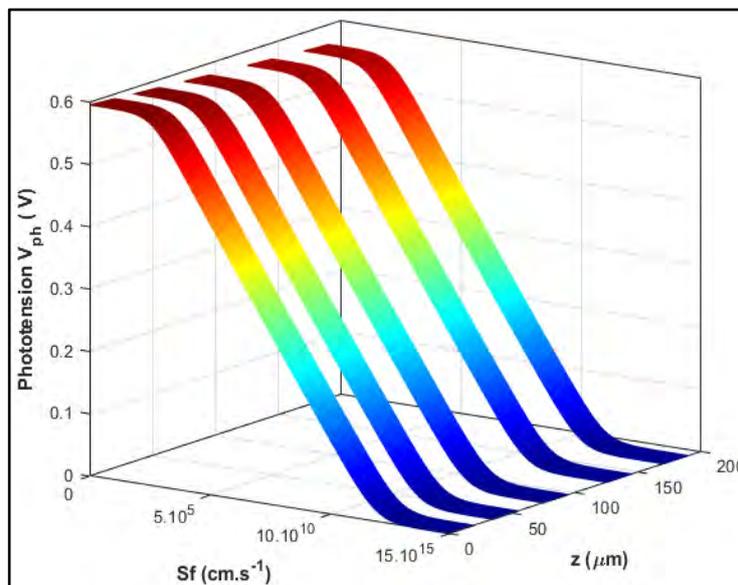


Figure 32: Profils en 3D des de $V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

Les figures 31 et 32 illustrent une diminution de la densité de phototension au fur et à mesure que l'on pénètre en profondeur dans le matériau semi-conducteur.

1.4 CAPACITE DE LA PHOTOPILE

Les porteurs de charges stockés de part et d'autre de la jonction (électrons du côté de la base et trous du côté de l'émetteur) entraînent l'établissement d'un condensateur dont l'expression de la capacité est donnée par l'équation (1.7) :

$$C(z, Sf, E, n) = q \cdot \frac{\delta(z, Sf, E, n)}{V_{ph}(z, Sf, E, n)} \tag{1.7}$$

1.4.1 Modélisation de la capacité de la photopile

La figure 33 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (1.7).

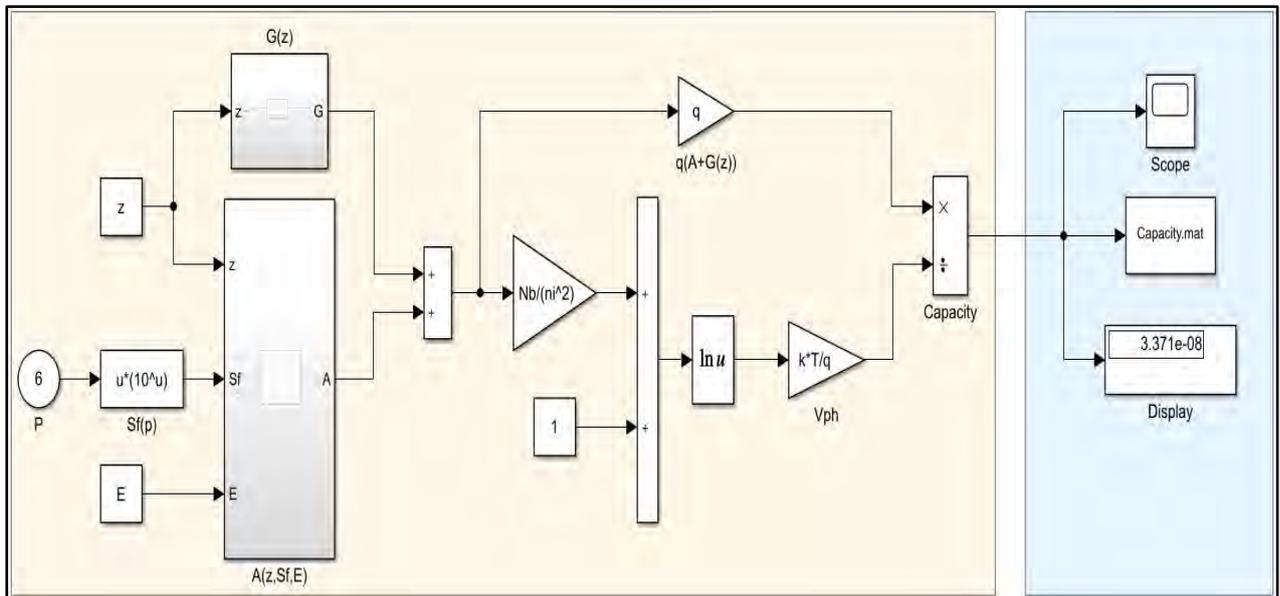


Figure 33: Schéma du modèle mathématique de la capacité

A partir de l'équation (1.7), sont obtenus les figures 33 à 42. La figure 34 représente le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (*Sf*) des porteurs minoritaires.

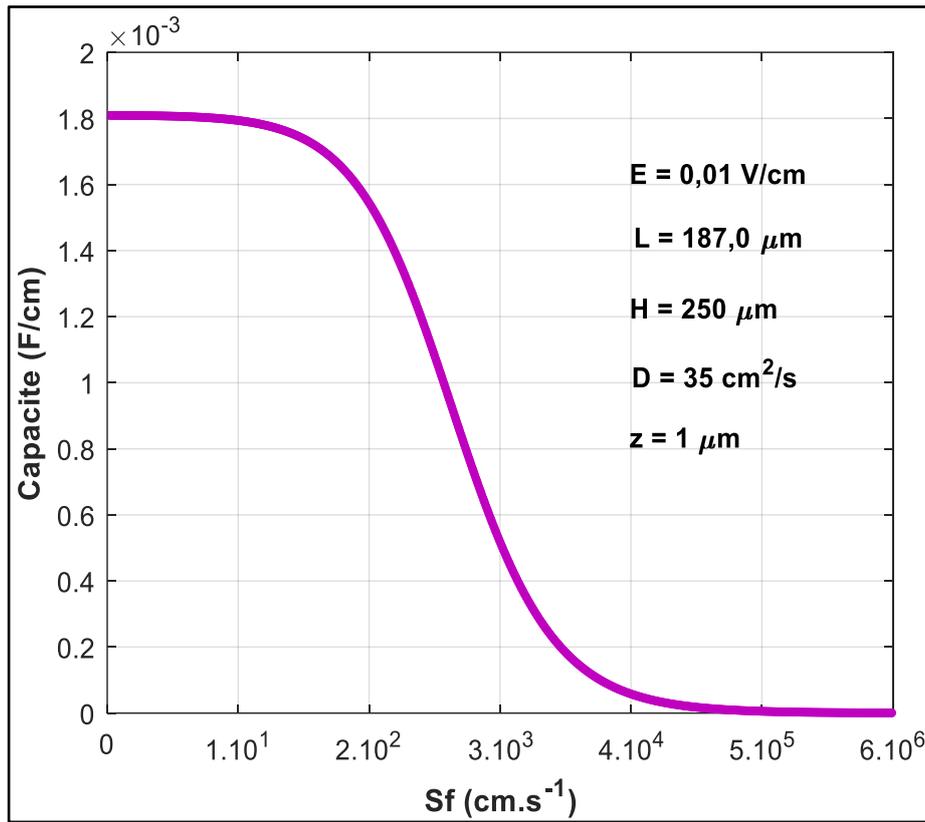


Figure 34: Profil de la capacité en fonction de la vitesse Sf

La figure 35 est une représentation en 3 dimensions de la figure 34.

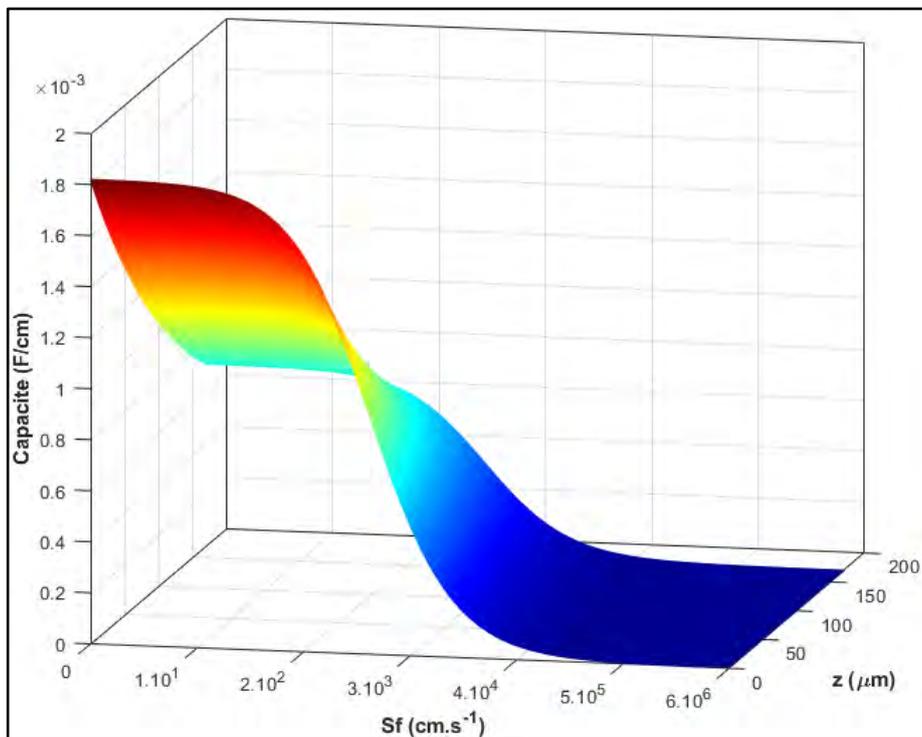


Figure 35: Profil en 3D de la capacité en fonction de la vitesse Sf

1.4.2 Effet du champ électrique sur la capacité

La figure 36 représente le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du champ électrique.

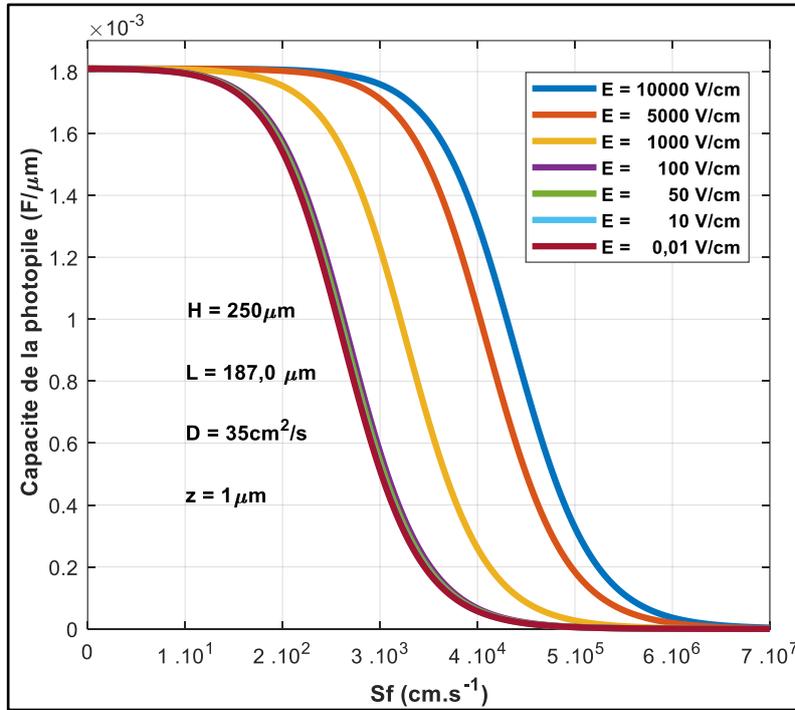


Figure 36: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de E

La figure 37 est une représentation en 3 dimensions de la figure 36.

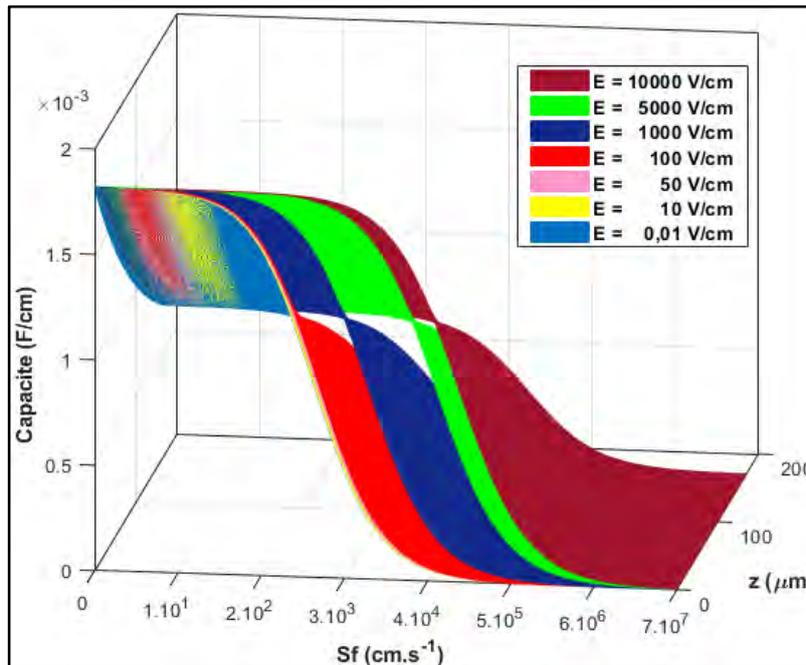


Figure 37: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de E

1.4.3 Effet du nombre de soleil sur la capacité

La figure 38 représente les profils de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du nombre de soleil (n).

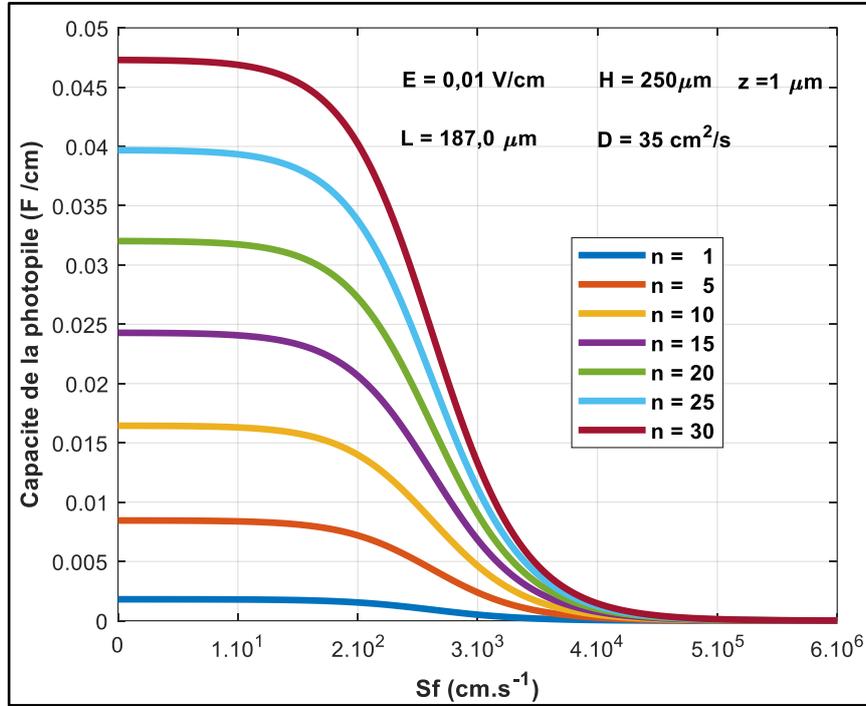


Figure 38: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de n

La figure 39 est une représentation en 3 dimensions de la figure 38.

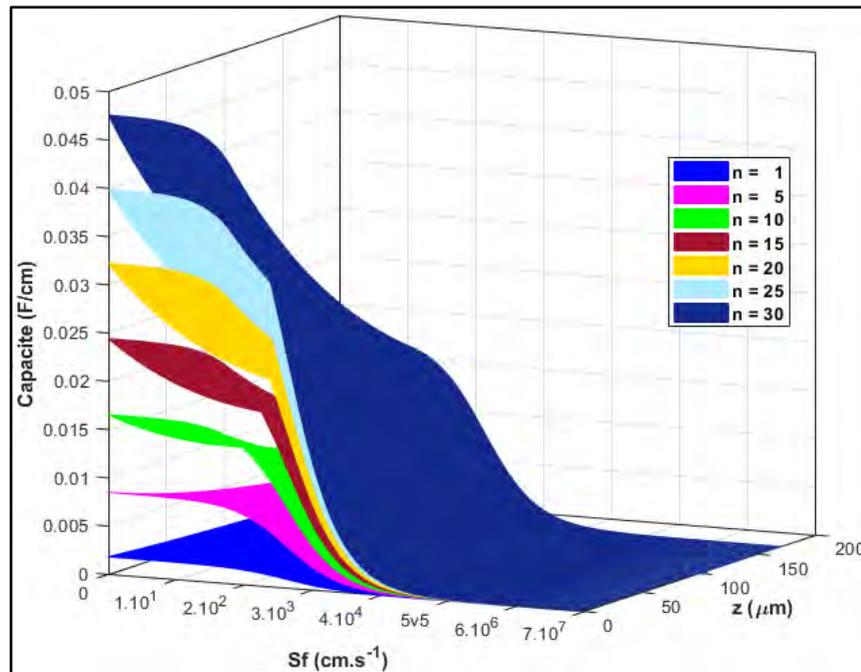


Figure 39: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de n

1.4.4 Effet de la profondeur de la base sur la capacité

La figure 40 représente les profils de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la profondeur.

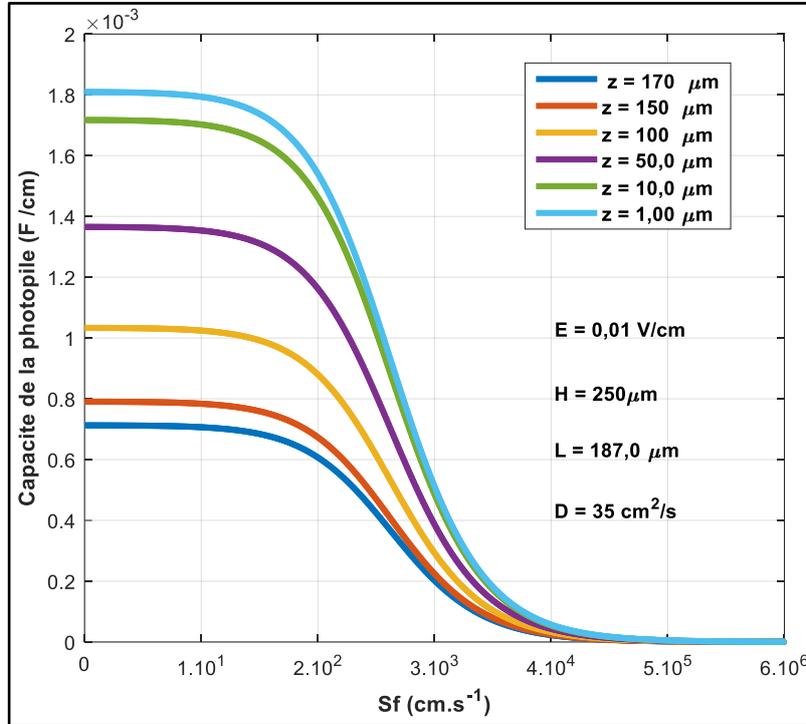


Figure 40: Profils de la Capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de z

La figure 41 est une représentation en 3 dimensions de la figure 40.

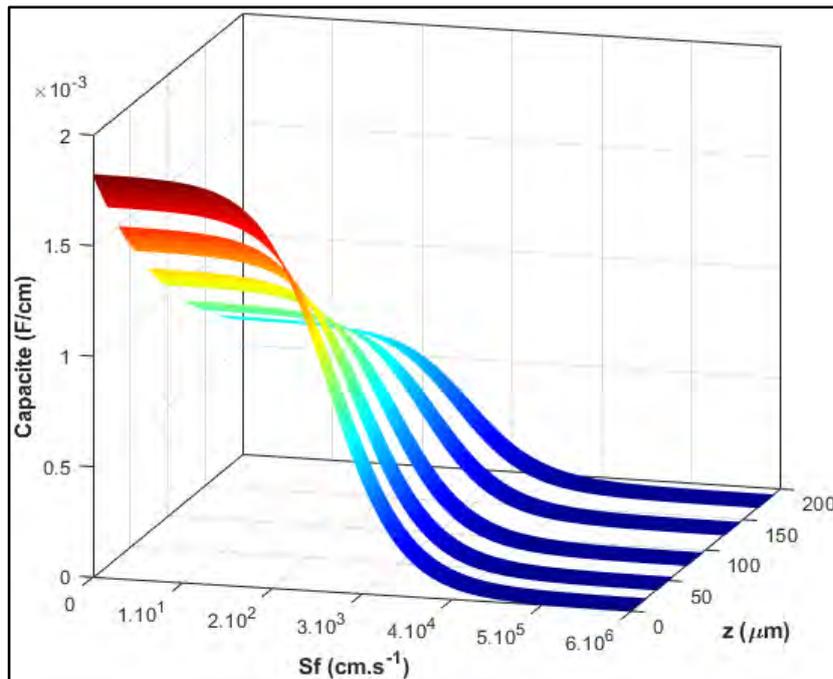


Figure 41: Profils en 3D de la capacité $C(Sf)$ pour différentes valeurs de z

1.5 ETUDE DE LA CAPACITE SOUS OBSCURITE C_0

L'intersection de l'axe des ordonnées et la courbe représentative du logarithme népérien de la capacité en fonction de la phototension correspond à la valeur de $\ln(C_0)$. La figure 34 représente la détermination de la capacité sous obscurité C_0 .

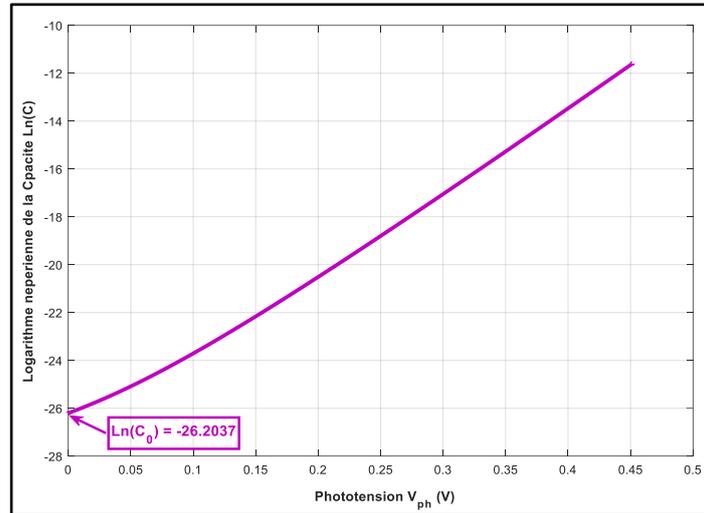


Figure 42: Détermination de la capacité sous obscurité C_0

1.6 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION

Pour voir si la photopile est idéale ou non nous avons tracé la figure 43 représentant la caractéristique densité de photocourant-phototension.

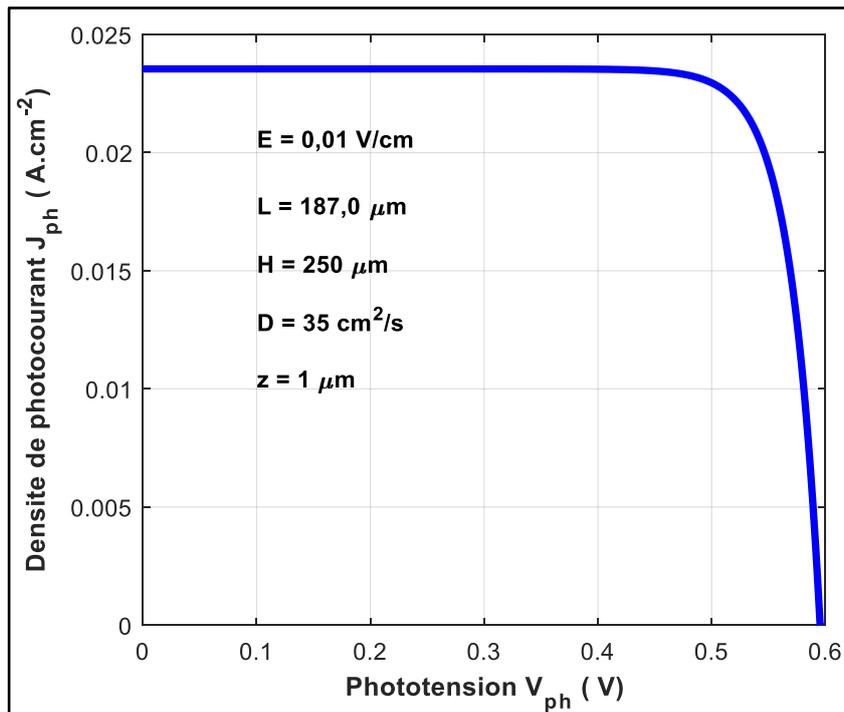


Figure 43: Profil de la caractéristique courant-tension (I-V)

La figure 43 est la représentation en 3D de la figure 42.

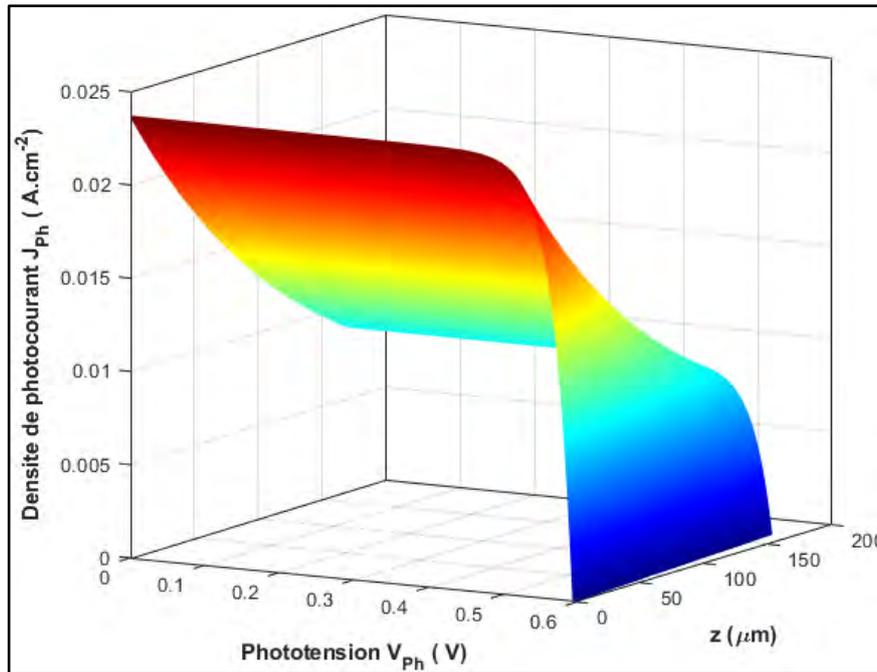


Figure 44: Profil en 3D de la caractéristique (I-V)

Les figures 43 et 44 permettent de constater sur que la densité de photocourant est maximale aux faibles valeurs de la phototension correspondant au photocourant de court-circuit puis elle diminue pour les grandes valeurs de la phototension correspondant au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert.

1.6.1 Effet du champ électrique sur la caractéristique courant-tension

La figure 45 représente la caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du champ électrique.

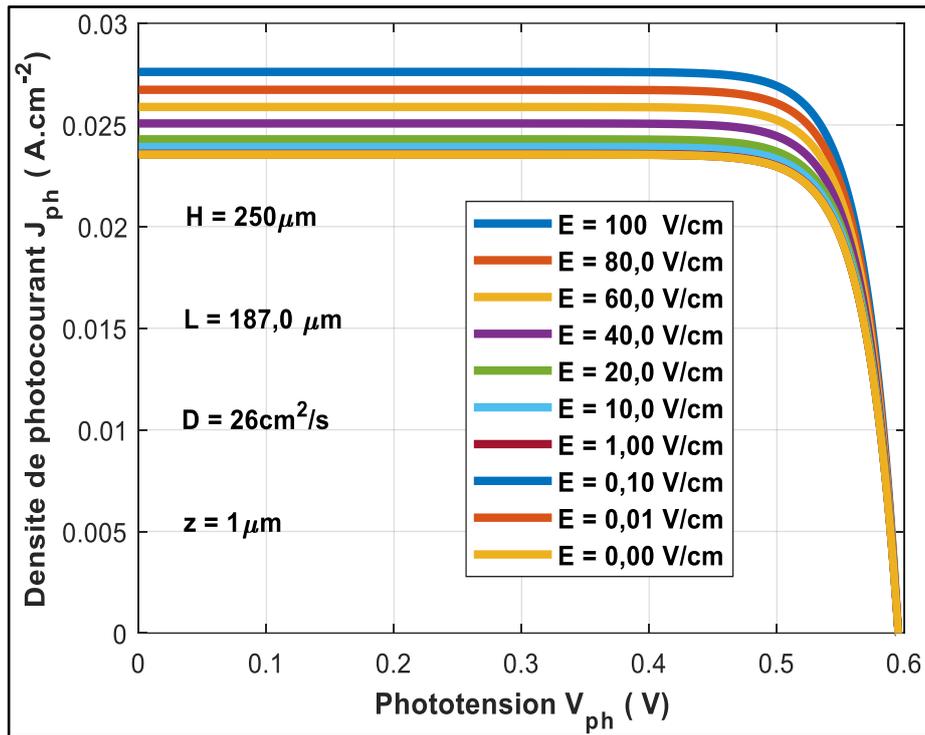


Figure 45: Profils de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de E

La figure 46 est la représentation en 3D de la figure 45.

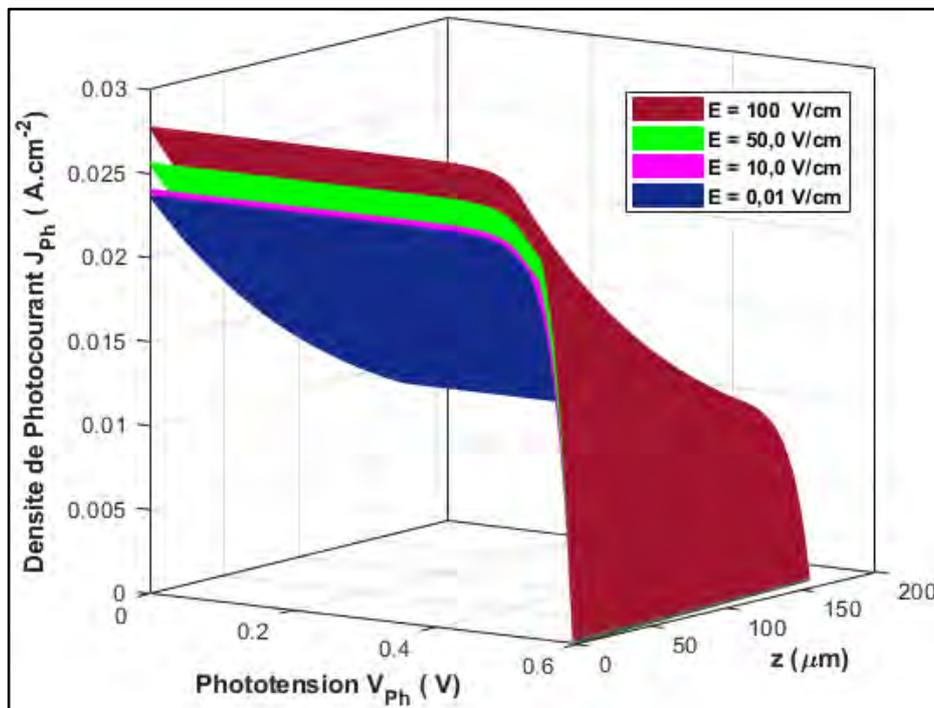


Figure 46: Profils en 3D de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de E

1.6.2 Effet du nombre de soleil sur la caractéristique courant-tension

La figure 47 représente la caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du champ électrique E.

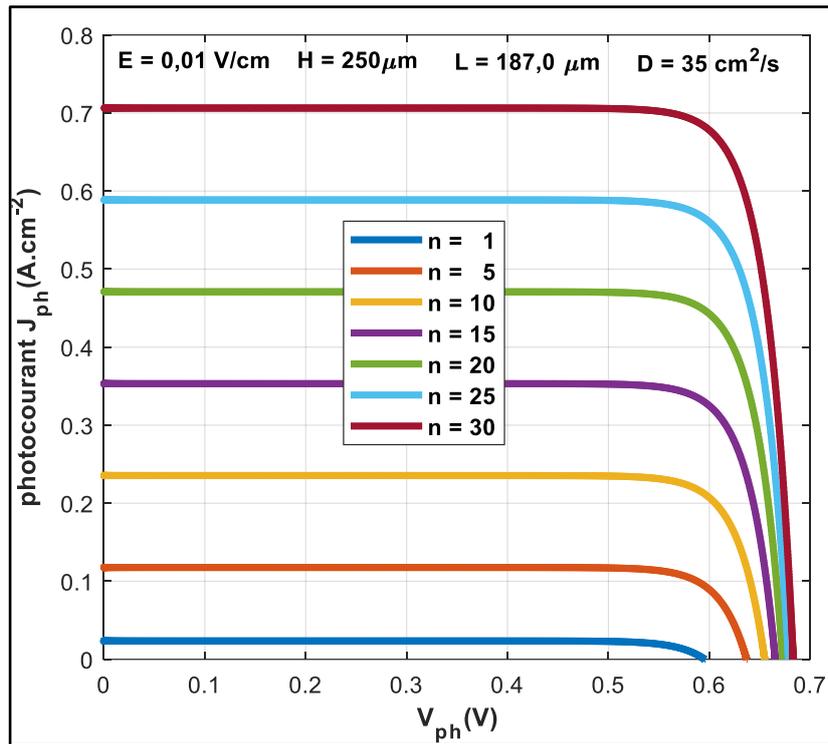


Figure 47: Profils de la Caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de n

La figure 48 est la représentation en 3D de la figure 47.

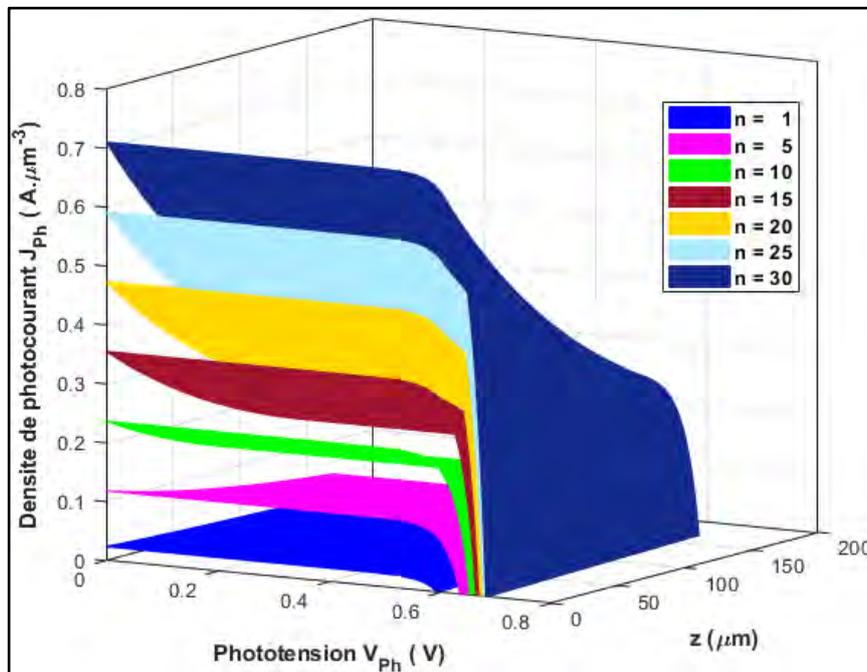


Figure 48: Profils en 3D de la caractéristique I-V pour différentes valeurs de n

1.6.3 Effet de la profondeur de la base sur la caractéristique courant-tension

La figure 49 représente la caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la profondeur z (μm).

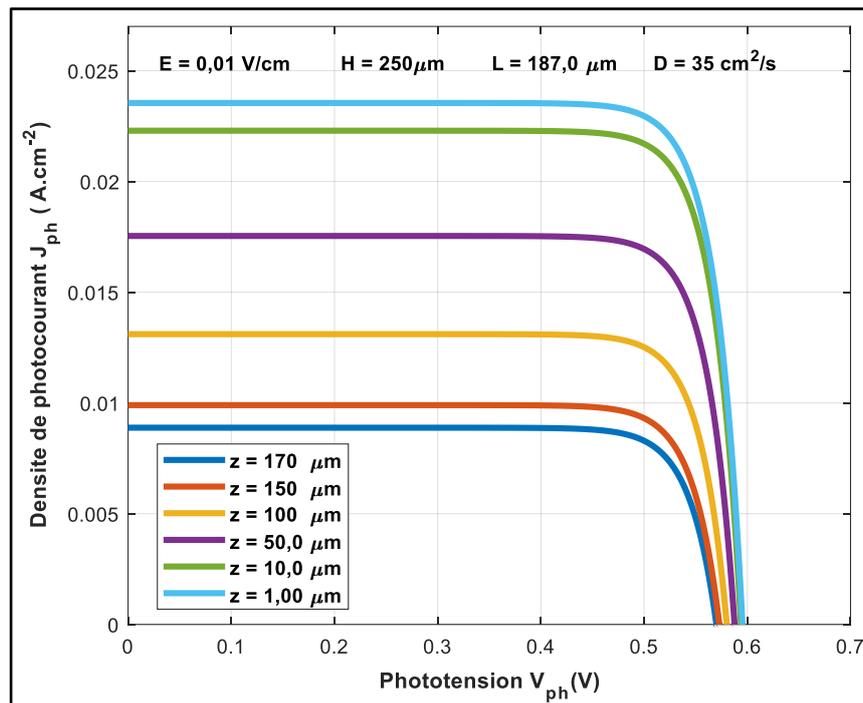


Figure 49: Profils de la caractéristique I-V pour différentes valeurs de z

La figure 50 est la représentation en 3D de la figure 49.

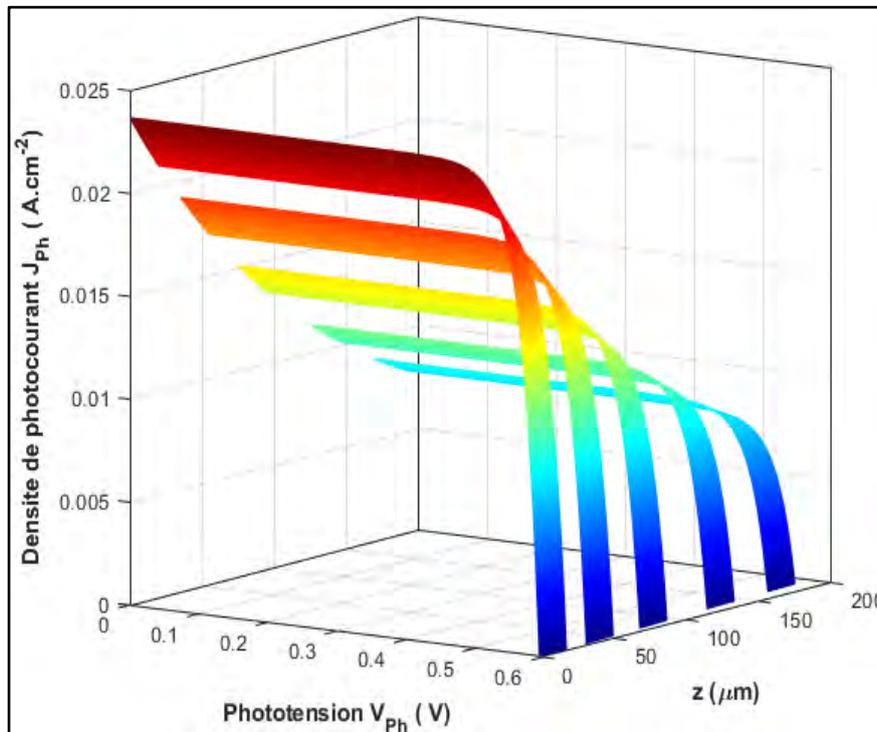


Figure 50: Profils en 3D de la caractéristique (I-V) pour différentes valeurs de z

Les figures 49 et 50 permettent de constater la diminution de la densité de photocourant et celle de la phototension lorsque la profondeur z augmente.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons évalué en régime statique, les effets respectifs du champ électrique, de l'intensité d'irradiation lumineuse et de la profondeur du matériau semi-conducteur sur la densité des porteurs de charges $\delta(x, z, Sf, E, n)$ ainsi que sur les autres paramètres électroniques de la photopile à savoir : la densité de photocourant $J_{ph}(x, z, Sf, E, n)$, la phototension $V_{ph}(x, z, Sf, E, n)$, la caractéristique courant-tension de la photopile au silicium à jonction verticale parallèle. De cette étude nous notons les phénomènes suivants :

- La densité des porteurs diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction.
- Le champ électrique de polarisation externe et l'intensité d'irradiation lumineuse contribuent à l'amplification des paramètres électroniques de la photopile.
- L'augmentation de profondeur du matériau semi-conducteur abaisse les paramètres électroniques de la photopile.

Les courbes de la caractéristique courant-tension obtenues mettent en évidence que la photopile n'est pas idéale, donc présente des pertes. Ces pertes sont caractérisées par les résistances série et Shunt. Dans le chapitre suivant nous allons étudier l'influence des paramètres externes sur ces deux résistances.

CHAPITRE 2 : EFFETS DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LES PARAMETRES PHENOMENOLOGIQUES

INTRODUCTION

La courbe caractéristique courant-tension vue précédemment, présente un palier horizontal et un palier vertical qui permettent de déduire deux modes de fonctionnement de la photopile :

- ✓ Au voisinage du circuit ouvert la photopile se comporte comme un générateur de tension réel [36] ;
- ✓ Au voisinage du court-circuit la photopile se comporte comme un générateur de courant réel [43].

2.1 RESISTANCE SERIE DE LA PHOTOPILE

La résistance série est l'un des paramètres électriques qui diminuent la performance de la cellule solaire. En fait, elle traduit les chutes ohmiques et les effets résistifs du matériau et du dispositif de contact. La détermination de cette grandeur s'avère primordiale pour une bonne caractérisation de la photopile. Diverses méthodes de détermination [36,37,43,44] de la résistance série ont été proposées par les chercheurs.

En considérant la partie verticale de la caractéristique courant-tension, qui, correspond au fonctionnement en situation de circuit ouvert, alors la photopile peut être assimilée à un générateur de tension. Ce générateur de tension est modélisé par le circuit électrique équivalent [43,44] de la figure 51, où J_{ph} et V_{ph} sont respectivement la densité de photocourant et la phototension ; R_s la résistance série ; R_{sh} la résistance de charge et V_{co} la phototension en circuit ouvert.

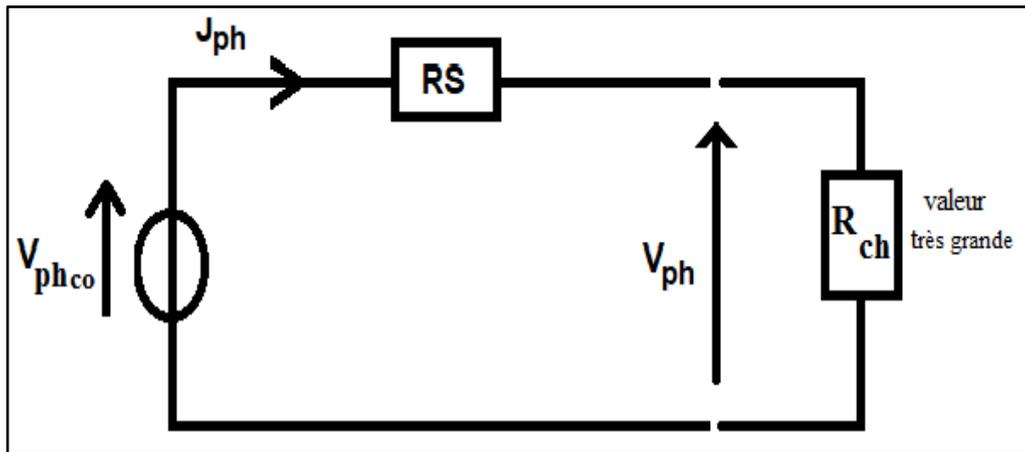


Figure 51: Schéma du circuit équivalent de la résistance série

A partir de la figure 51 en appliquant la loi des mailles nous obtenons l'expression de la résistance série qui est donnée par l'équation (2.1) :

$$R_s(z, Sf, E) = \frac{V_{phco}(z, E) - V_{ph}(z, Sf, E)}{J_{ph}(z, Sf, E)} \quad (2.1)$$

2.1.1 Modélisation de la résistance série de la photopile

La figure 52 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (2.1).

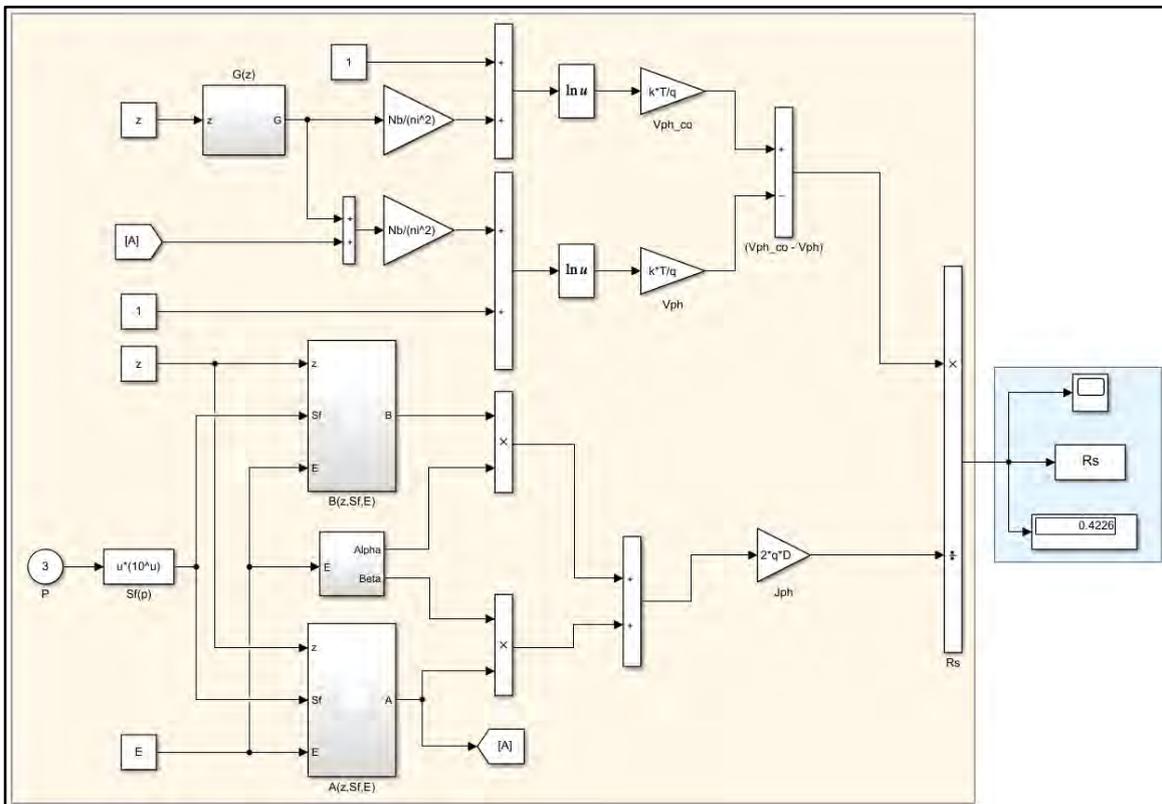


Figure 52: Schéma du modèle mathématique de la résistance série

A partir de l'équation (2.1), sont obtenus les figures 52 à 60. La figure 53 représente le profil de la résistance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

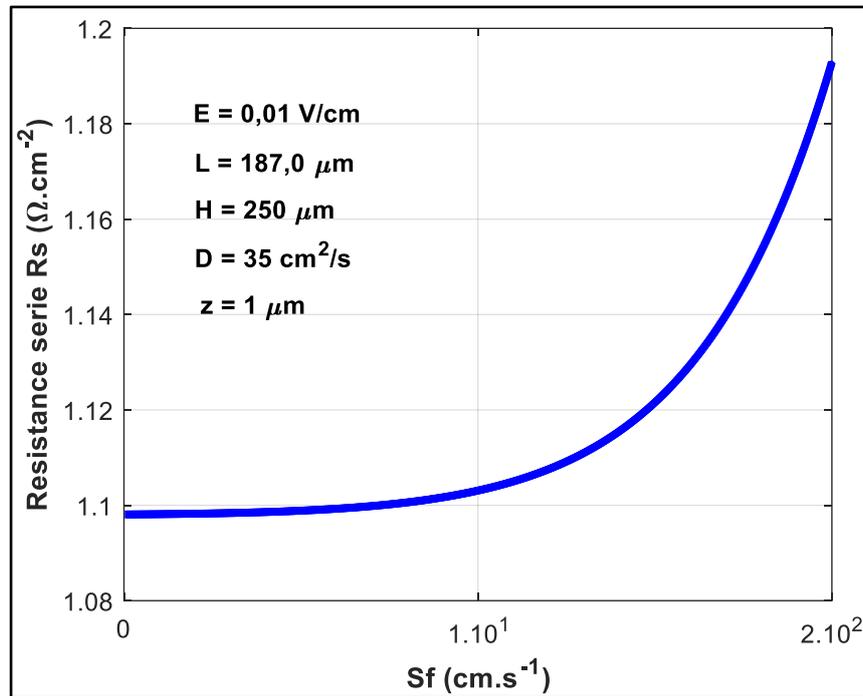


Figure 53: Profil de la résistance série en fonction de la vitesse Sf

La figure 54 est la représentation en 3D de la figure 53.

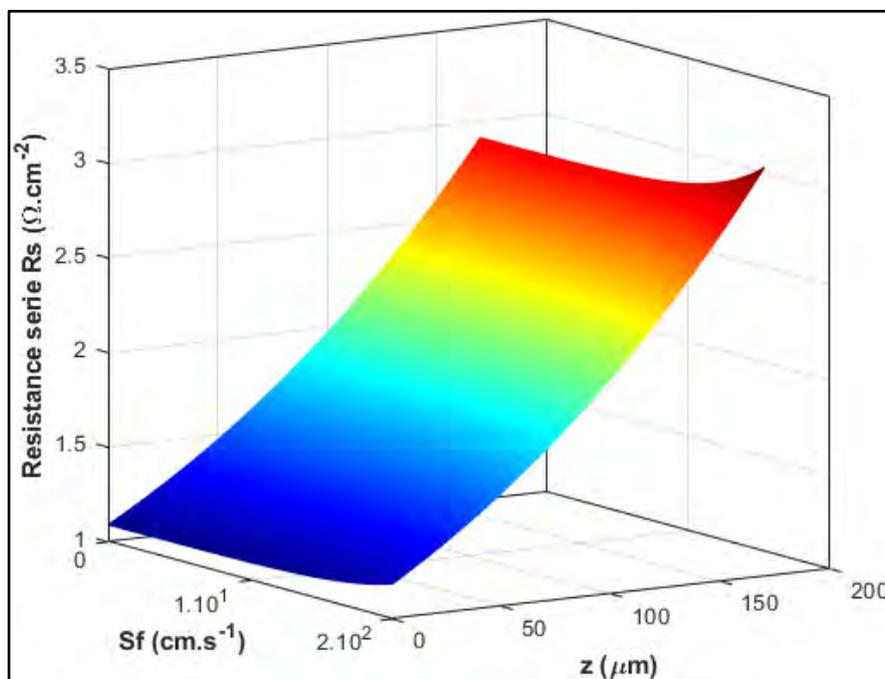


Figure 54: Profil en 3D de la résistance série en fonction de Sf

Les figures 53 et 54 permettent d'observer une légère augmentation de la résistance série en fonction de l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf .

2.1.2 Effet du champ électrique sur la résistance série R_s

La figure 55 est le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.

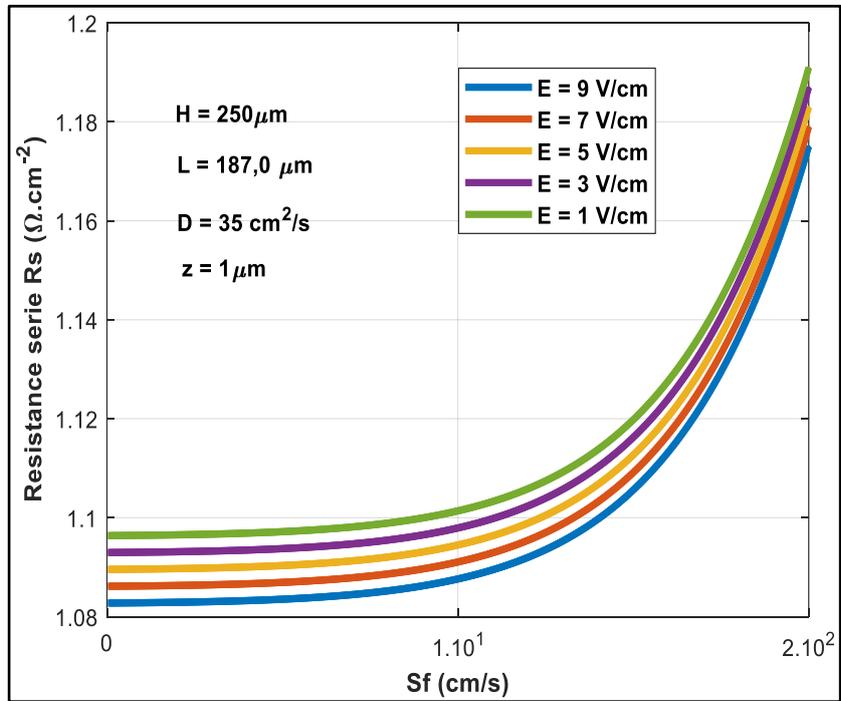


Figure 55: Profils de $R_s (Sf)$ pour différentes valeurs de E

La figure 56 est la représentation en 3D de la figure 55.

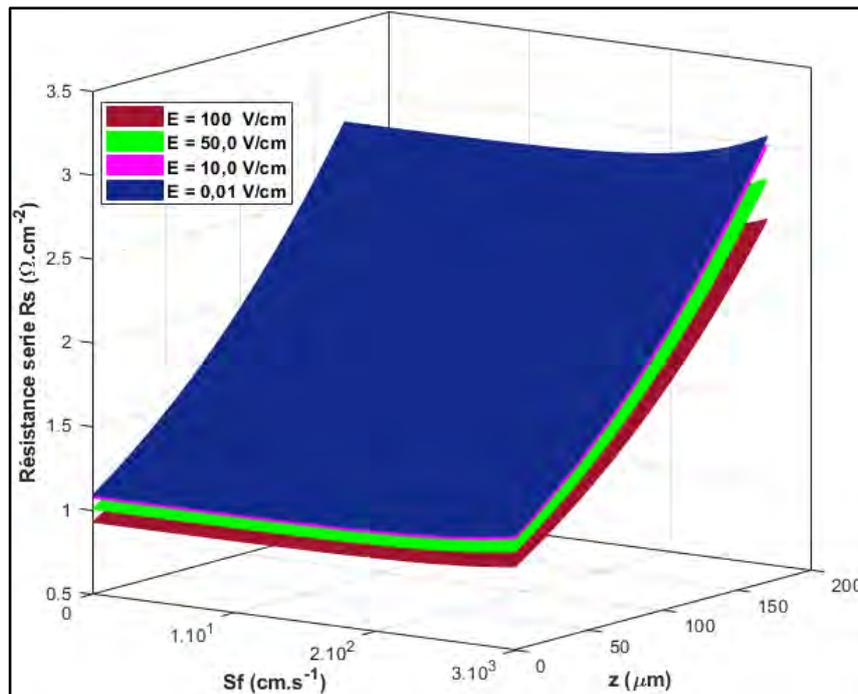


Figure 56: Représentation en 3D de $R_s (Sf)$ pour différentes valeurs de E

Les figures 55 et 56 permettent d'observer une décroissance de la résistance série en opposition avec l'augmentation du champ électrique (n).

2.1.3 Effet du nombre de soleil sur la résistance série R_s .

La figure 57 illustre les profils de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.

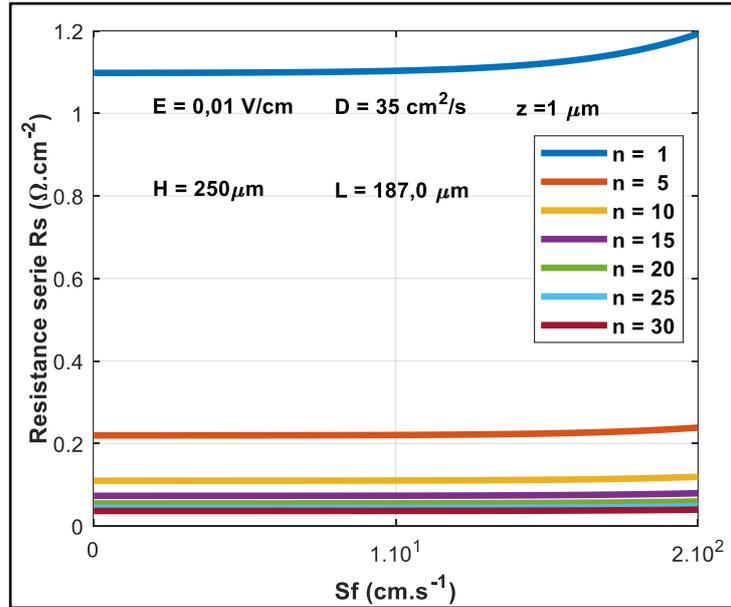


Figure 57: Profils de $R_s (Sf)$ pour différentes valeurs de n

La figure 58 est la représentation en 3D de la figure 57.

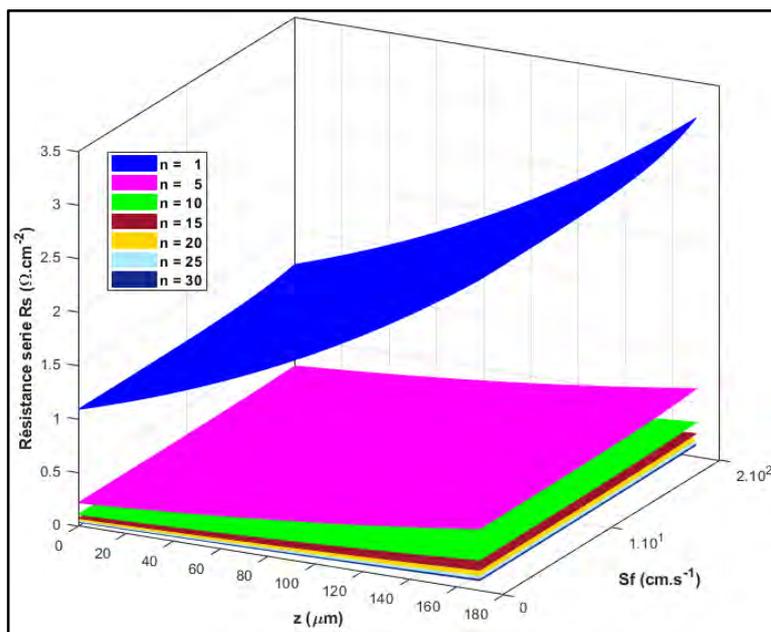


Figure 58: Représentation en 3D de $R_s (Sf)$ pour différentes valeurs de n

Les figures 57 et 58 permettent d’observer une décroissance considérable de la résistance série en fonction de l’augmentation du nombre de soleil n.

2.1.4 Effet de la profondeur de la base sur la résistance série R_s

La figure 59 est le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur.

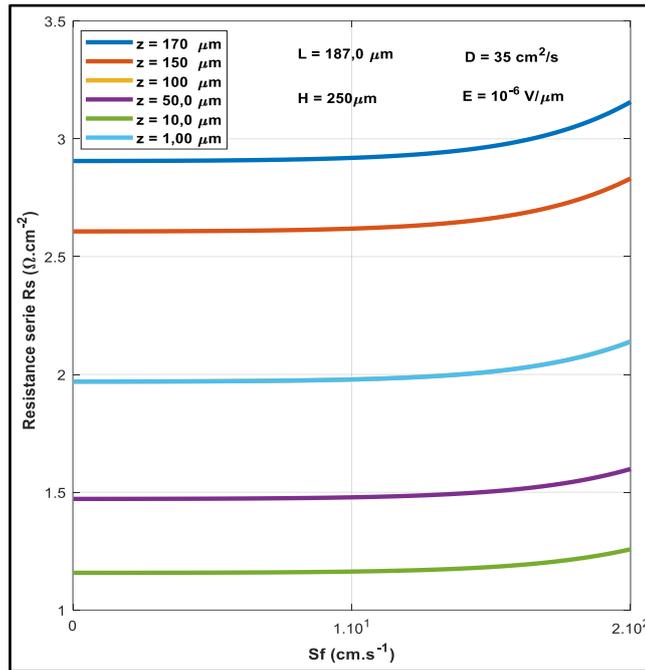


Figure 59: Profils de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de de z.

La figure 60 est la représentation en 3D de la figure 59.

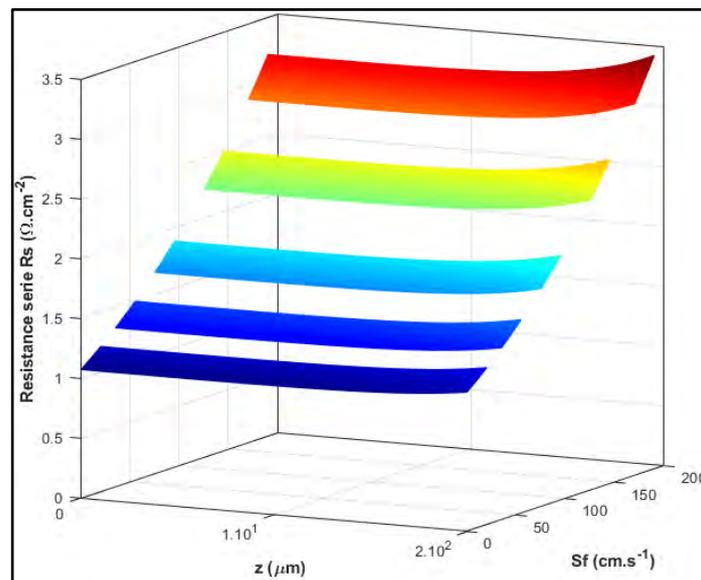


Figure 60: Profils en 3D de $R_s(Sf)$ pour différentes valeurs de z

Les figures 59 et 60 permettent d’observer une croissance de la résistance série de la photopile en phase avec l’augmentation de la profondeur du matériau semi-conducteur. En effet comme souligné précédemment, lorsque la profondeur augmente, le taux de génération des porteurs diminue. Ainsi, les effets résistifs du matériau augmentent et donc la résistance série.

2.2 RESISTANCE SHUNT DE LA PHOTOPILE

La résistance shunt est l’un des paramètres électriques qui diminuent la performance de la cellule solaire. En fait, elle symbolise les fuites de courant au sein de la photopile. La détermination de cette grandeur s’avère primordiale pour une bonne caractérisation de la photopile. Diverses méthodes de détermination [43,44] de la résistance shunt ont été proposées par les chercheurs.

En considérant la partie horizontale de la caractéristique courant-tension, qui, correspond au fonctionnement en situation de court-circuit, alors la photopile peut être assimilée à un générateur de courant réel. Ce générateur de courant est modélisé par le circuit électrique équivalent [40,45] de la figure 61, où J_{ph} et V_{ph} sont respectivement la densité de photocourant et la phototension ; R_{sh} la résistance shunt ; R_{ch} la résistance de charge ; I_{sh} la densité de photocourant passant dans la branche de la résistance shunt et $J_{ph_{cc}}$ la densité de photocourant en court-circuit.

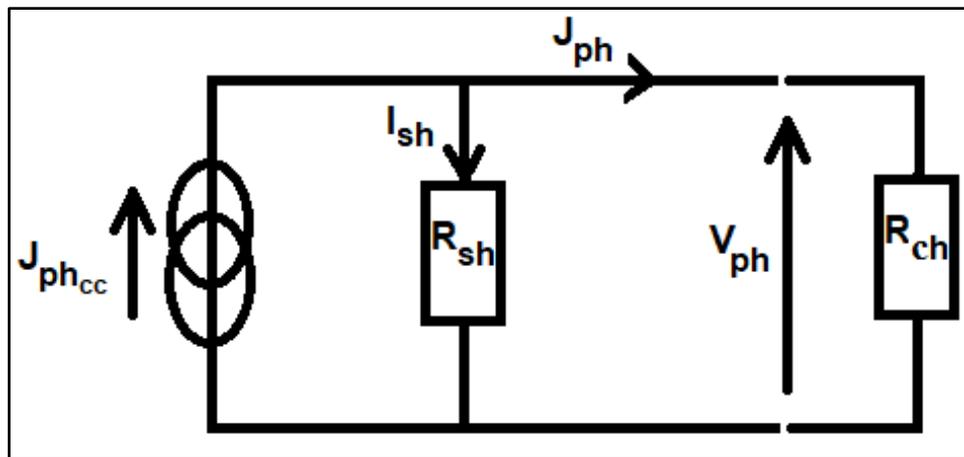


Figure 61: Schéma du circuit équivalent de la résistance série R_{Sh}

En appliquant la loi des mailles au circuit équivalent de la figure 61 nous obtenons l’expression de la résistance série caractérisée par l’équation (2.2) :

$$R_{Sh}(z, Sf, E, n) = \frac{V_{ph}(z, Sf, E, n)}{J_{ph_{cc}}(z, E, n) - J_{ph}(z, Sf, E, n)} \quad (2.2)$$

2.2.1 Modélisation de la résistance shunt de la photopile.

La figure 62 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (2.2).

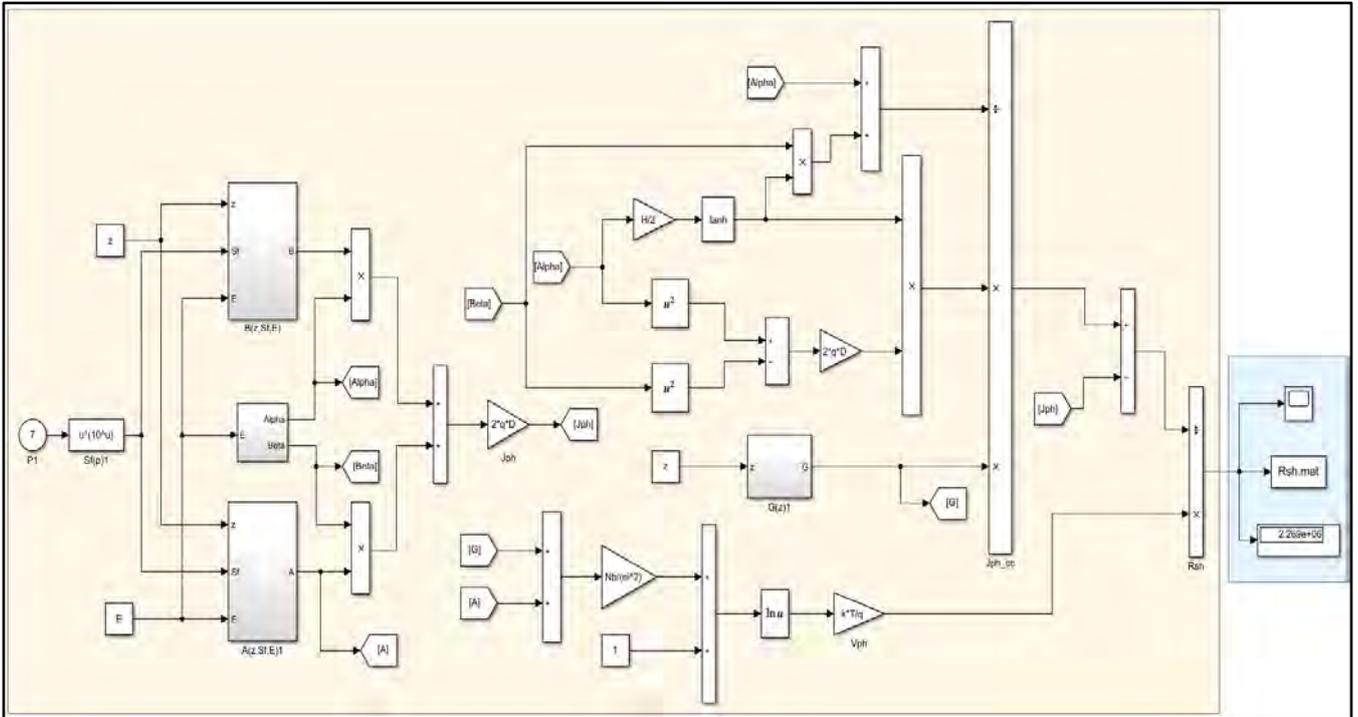


Figure 62: Schéma du modèle mathématique de la résistance shunt.

A partir de l'équation (2.2), sont obtenus les figures 62 à 70. La figure 63 représente le profil de la résistance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

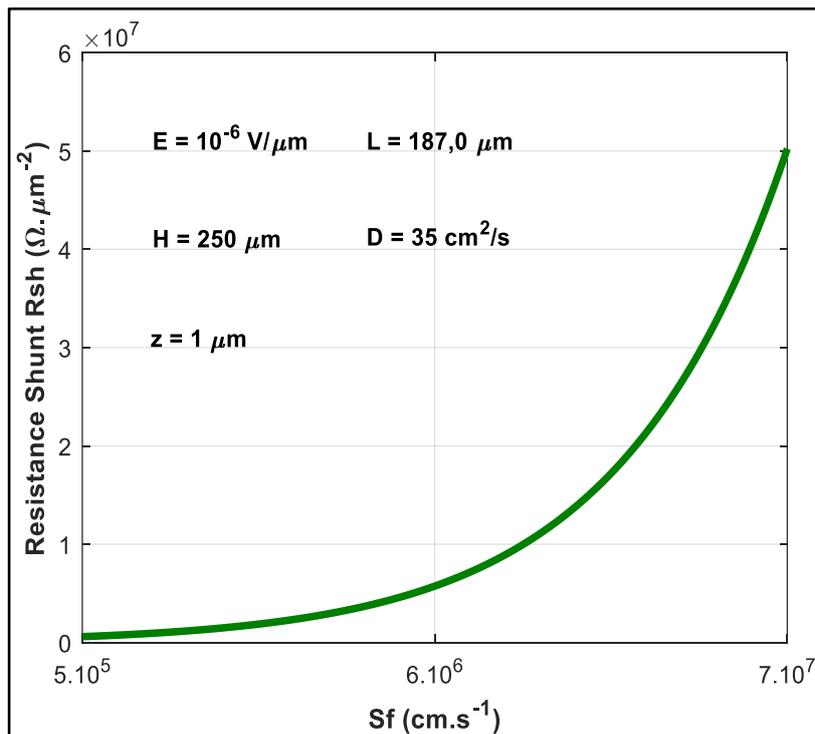


Figure 63: Profil de la résistance shunt en fonction de Sf

La figure 64 est la représentation en 3D de la figure 63.

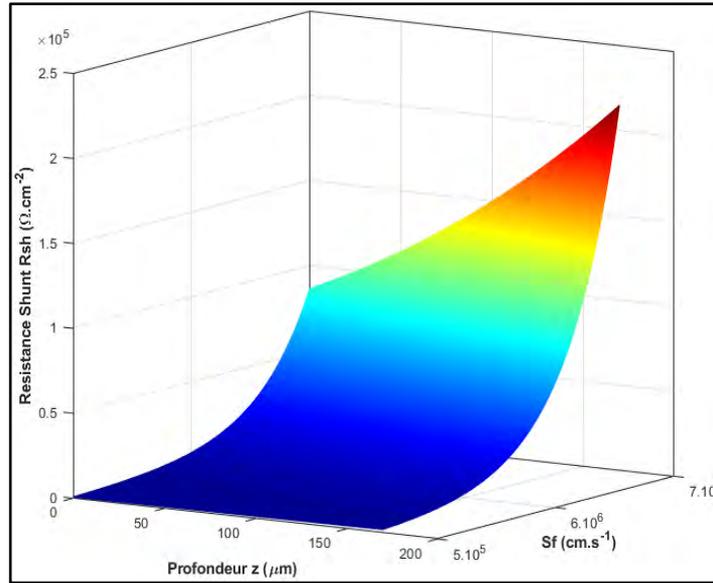


Figure 64: Représentation en 3D de R_{Sh} en fonction de Sf

Les figures 63 et 64 illustrent une augmentation considérable de la résistance shunt avec la vitesse de recombinaison à la jonction. En effet, les fuites de courant au sein de la photopile augmentent avec l'accélération du mouvement des porteurs dans la base.

2.2.2 Effet du champ électrique sur la résistance série shunt R_{Sh}

La figure 65 est le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.

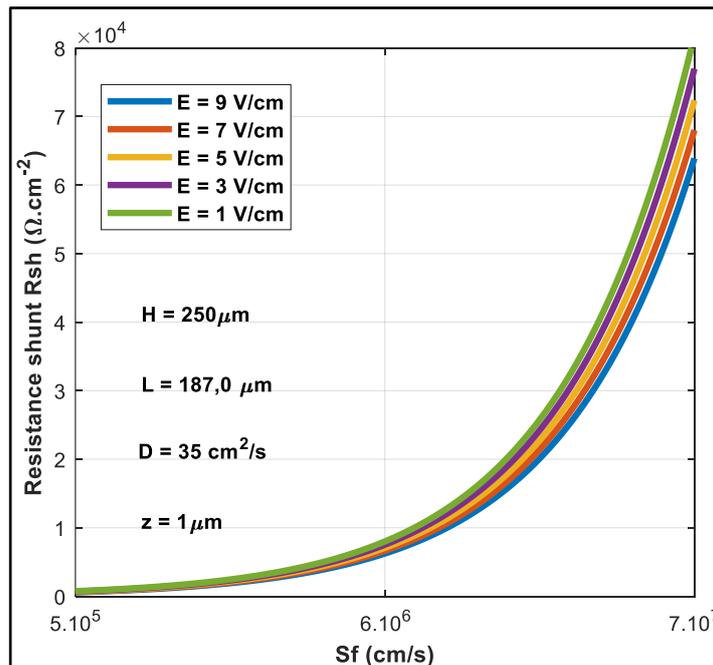


Figure 65: Profils de $R_{Sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de E

La figure 66 est la représentation en 3D de la figure 65.

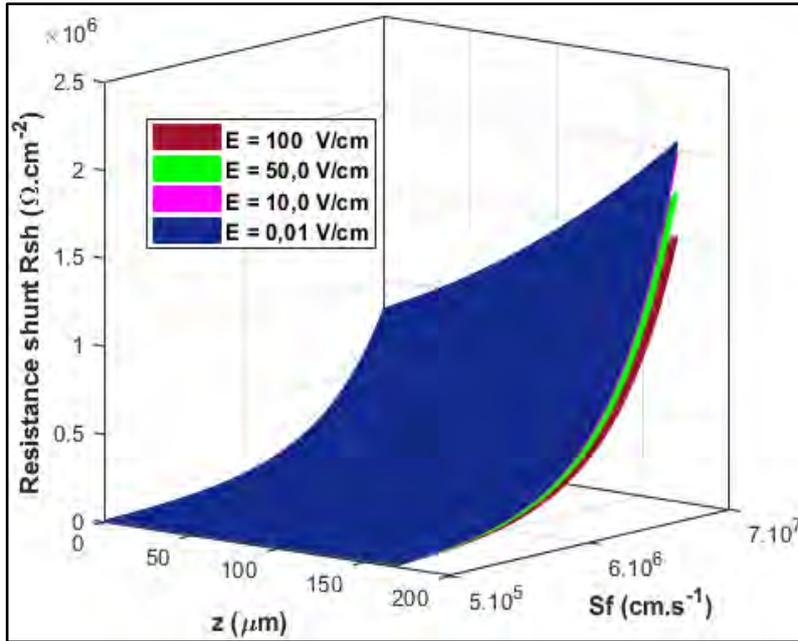


Figure 66: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de E

Les figures 65 et 66 permettent d’observer une décroissance de la résistance shunt en opposition avec l’augmentation du champ électrique E.

2.2.3 Effet du nombre de soleil sur la résistance série shunt R_{sh}

La figure 67 est le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du nombre de soleil n.

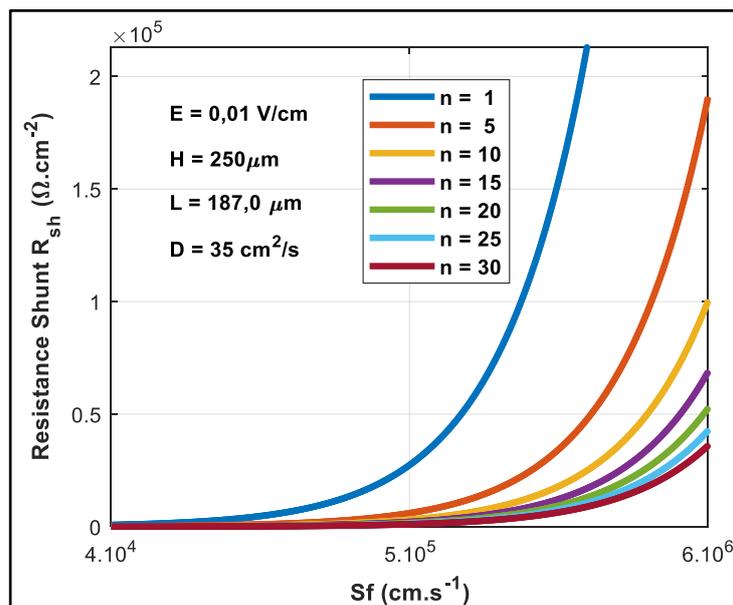


Figure 67: Profils de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de n

La figure 68 est la représentation en 3D de la figure 67.

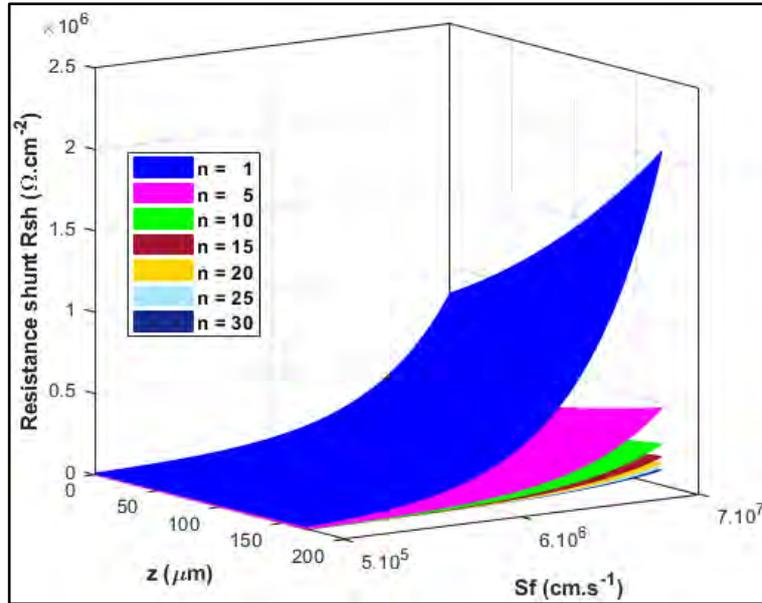


Figure 68: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de n

Les figures 67 et 68 permettent d’observer une décroissance considérable de la résistance shunt en fonction de l’augmentation du nombre de soleil n.

2.2.4 Effet de la profondeur sur la résistance série shunt R_{sh}

La figure 69 est le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur.

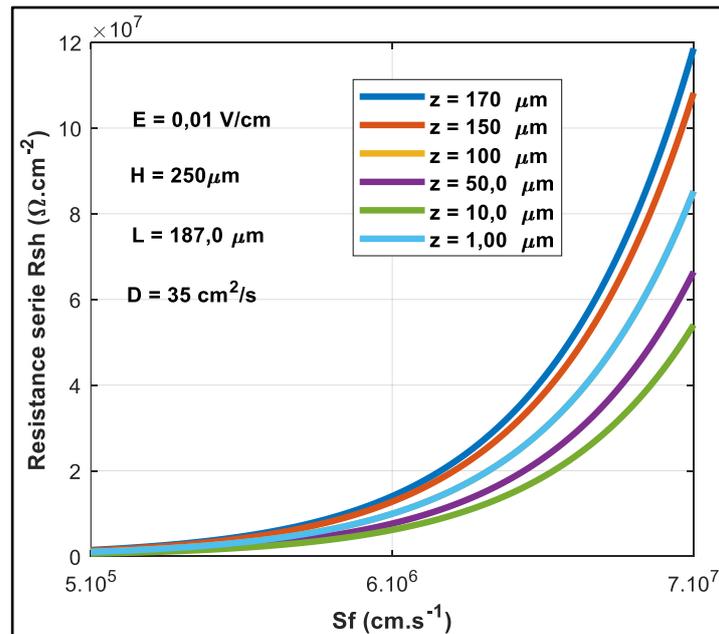


Figure 69: Profils de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

La figure 70 est la représentation en 3D de la figure 69.

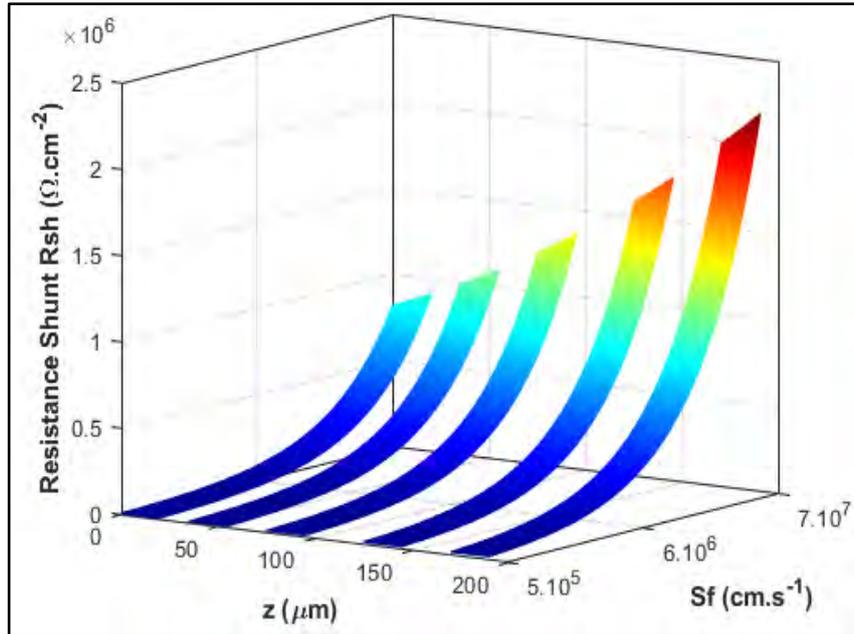


Figure 70: Profils en 3D de $R_{sh}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

Les figures 69 et 70 montrent une croissance de la résistance shunt en phase avec l’augmentation de la profondeur du matériau semi-conducteur. En effet, lorsque la profondeur augmente, les recombinaisons des porteurs en volume deviennent plus importantes ce qui augmente les fuites de courant et par conséquent la résistance shunt.

2.3 VITESSE DE RECOMBINAISON INITIANT LE COURT-CIRCUIT

Dans cette partie nous déterminerons la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile initiant le court-circuit Sf_{cc} [46,49]. Les influences respectives d’un champ électrique de polarisation [50,48], du nombre de soleil et de la profondeur du matériau semi-conducteur [47] seront évaluées dans notre étude en vue de trouver les lois de variations de la vitesse Sf_{cc} en fonctions des paramètres exogènes précitées.

La résolution de l’équation (2.3) devrait nous permettre d’obtenir l’expression de Sf_{cc} .

$$J_{ph}(z, Sf, E, n) - J_{ph_{cc}}(z, Sf, E, n) = 0 \quad \text{avec} \quad J_{ph_{cc}} = \lim_{Sf \rightarrow \infty} J_{ph} \quad (2.3)$$

Cependant cette méthode n’est pas adaptée à notre cas, l’expression obtenue de la résolution analytique de cette équation est indépendante de Sf , Cause pour laquelle une autre méthode a été utilisée.

2.3.1 Méthode de détermination de la valeur de Sf_{cc}

2.3.1.1 Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_{cc}

Une méthode de détermination classique de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit, consiste à s'intéresser au maximum de la courbe de la densité de photocourant (juste avant le palier horizontal) qui correspond à un point initiant le court-circuit. La **projection orthogonale à main levée** de ce point sur l'axe des ordonnées donne le courant de court-circuit $J_{ph_{cc}}$ et la **projection à main levée** sur l'axe des abscisses donne la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit Sf_{cc} .

2.3.1.2 Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_{cc}

Ce nouveau procédé de calcul de la valeur de Sf_{cc} repose sur l'implémentation de l'algorithme dite « **Algorithme du plus petit majorant** » qui consiste à déterminer le plus petit majorant de la différence $J_{ph_{cc}}(z, E) - J_{ph}(z, Sf, E)$. La figure 71 représente le logigramme de l'algorithme du plus petit majorant.

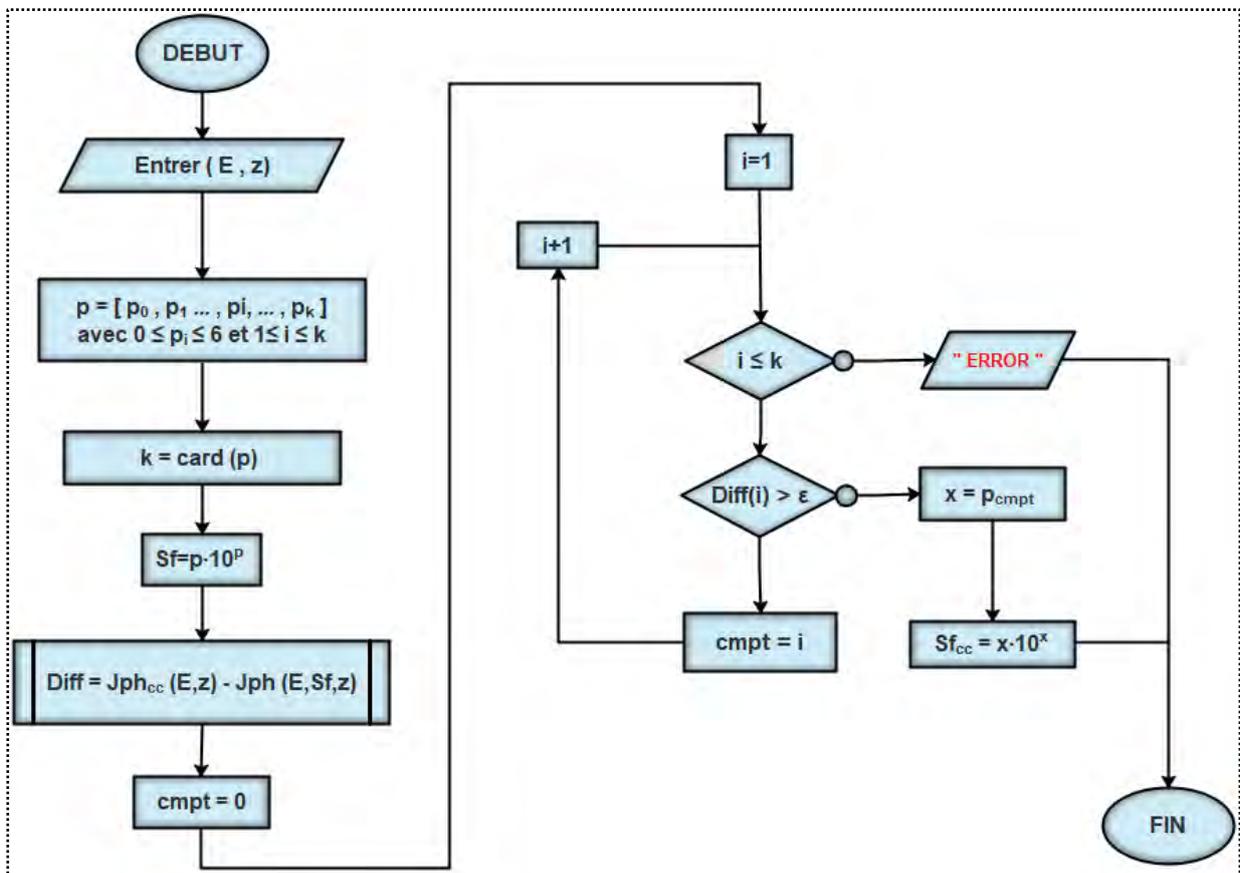


Figure 71: Logigramme de l'algorithme du plus petit majorant

2.3.1.3 Intérêts de l’algorithme du plus petit majorant

La détermination de Sf_{cc} par l’algorithme du plus petit majorant présente plusieurs intérêts :

- Les projections sont automatiquement effectuées ;
- La valeur de Sf_{cc} est déterminée par le programme en fonction des paramètres de la photopile ;
- La possibilité d’étudier le comportement de Sf_{cc} en fonction des variations d’autres paramètres tels que la profondeur du matériau et le champ électrique.

A partir de l’algorithme du plus petit majorant, sont obtenus les figures 72 à 79. La figure 72 est une illustration de la détermination de Sf_{cc} basée sur l’algorithme du plus petit majorant pour un profil de la densité de photocourant donné.

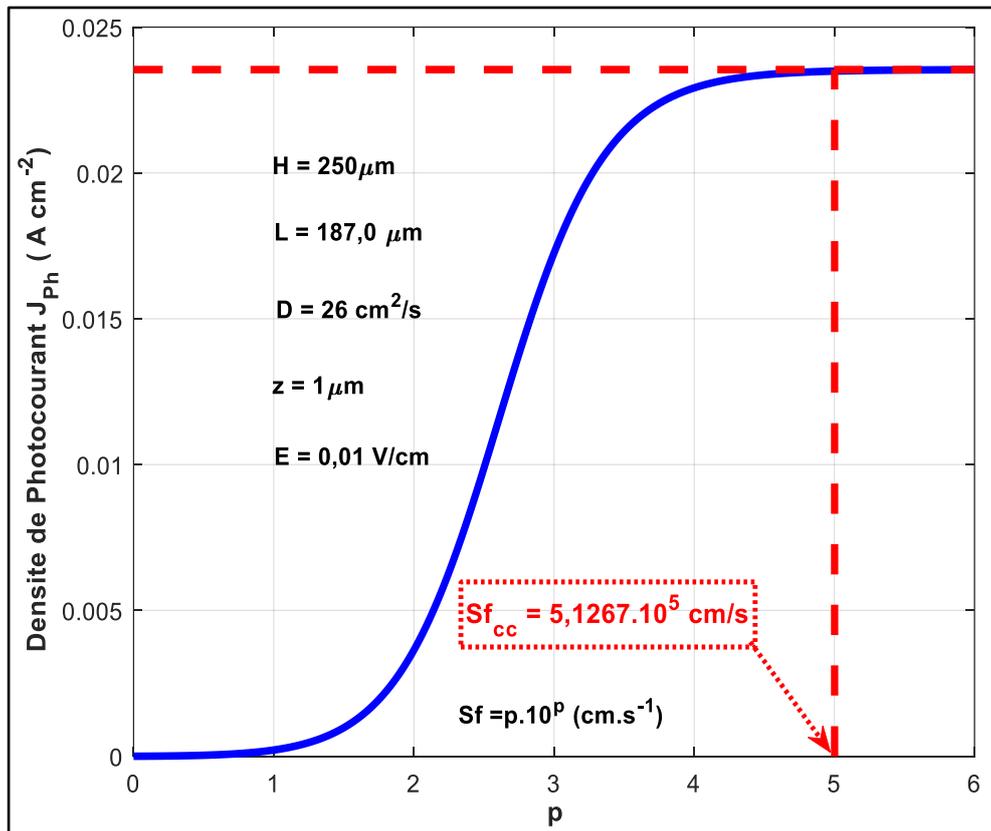


Figure 72: Détermination de Sf_{cc} pour un profil de la densité de photocourant donnée

2.3.2 Effet du champ électrique sur la valeur de Sf_{cc}

La figure 73 représente la détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs du champ électrique.

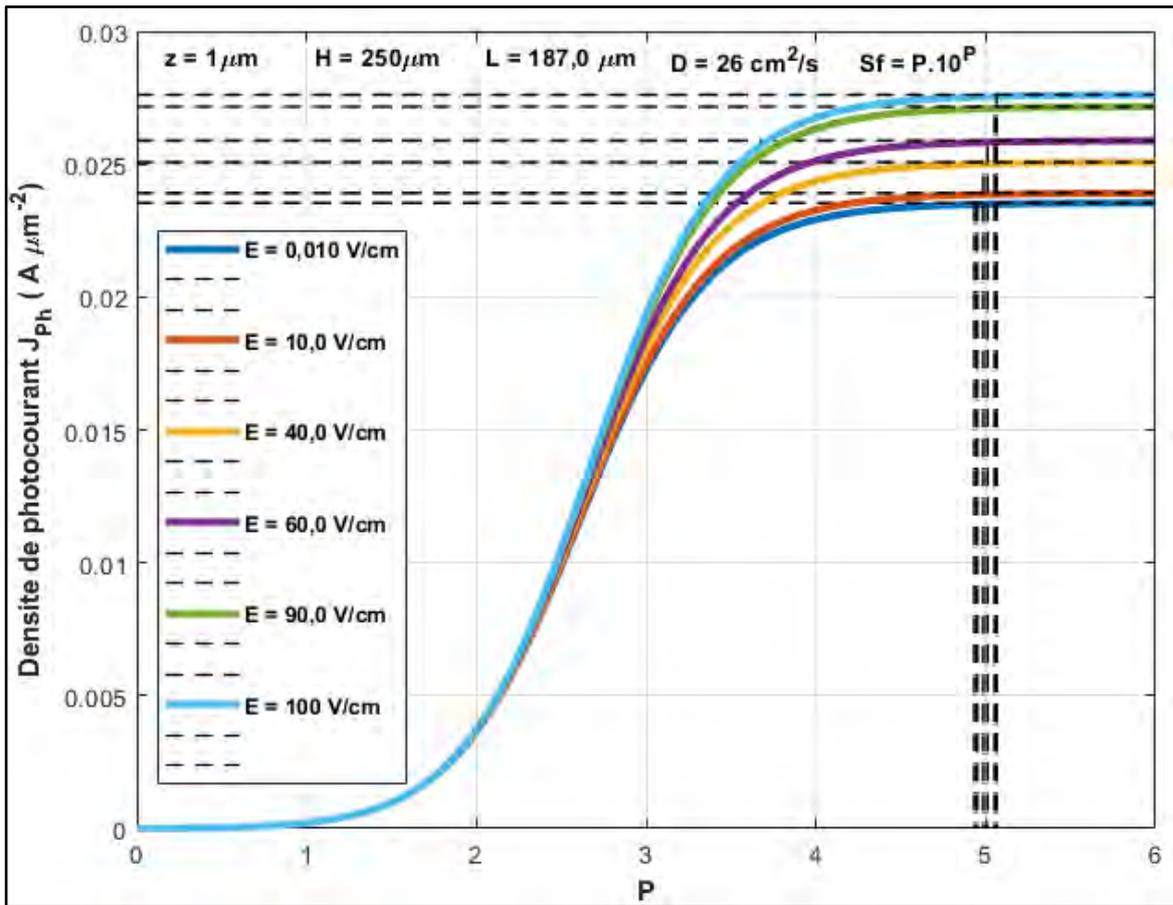


Figure 73: Détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs du champ E

La figure 73 permet de dresser le tableau 1 ci-dessous.

E en (V/s)	$Sf_{cc}(cm /s)$	$J_{ph_{cc}} (A \cdot cm^{-2})$
0,01	$4,932 \cdot 10^{4,932}$	0,0235
10	$4,950 \cdot 10^{4,950}$	0,0239
40	$4,986 \cdot 10^{4,986}$	0,0251
60	$5,010 \cdot 10^{5,010}$	0,0259
90	$5,052 \cdot 10^{5,052}$	0,0272
100	$5,064 \cdot 10^{5,064}$	0,0276

Tableau 1: Table de correspondance des valeurs de Sf_{cc} , $J_{ph_{cc}}$ et E.

2.3.3 Variation de la vitesse Sf_{cc} en fonction du champ électrique

La figure 74 représente la profil de Sf_{cc} en fonction du champ électrique.

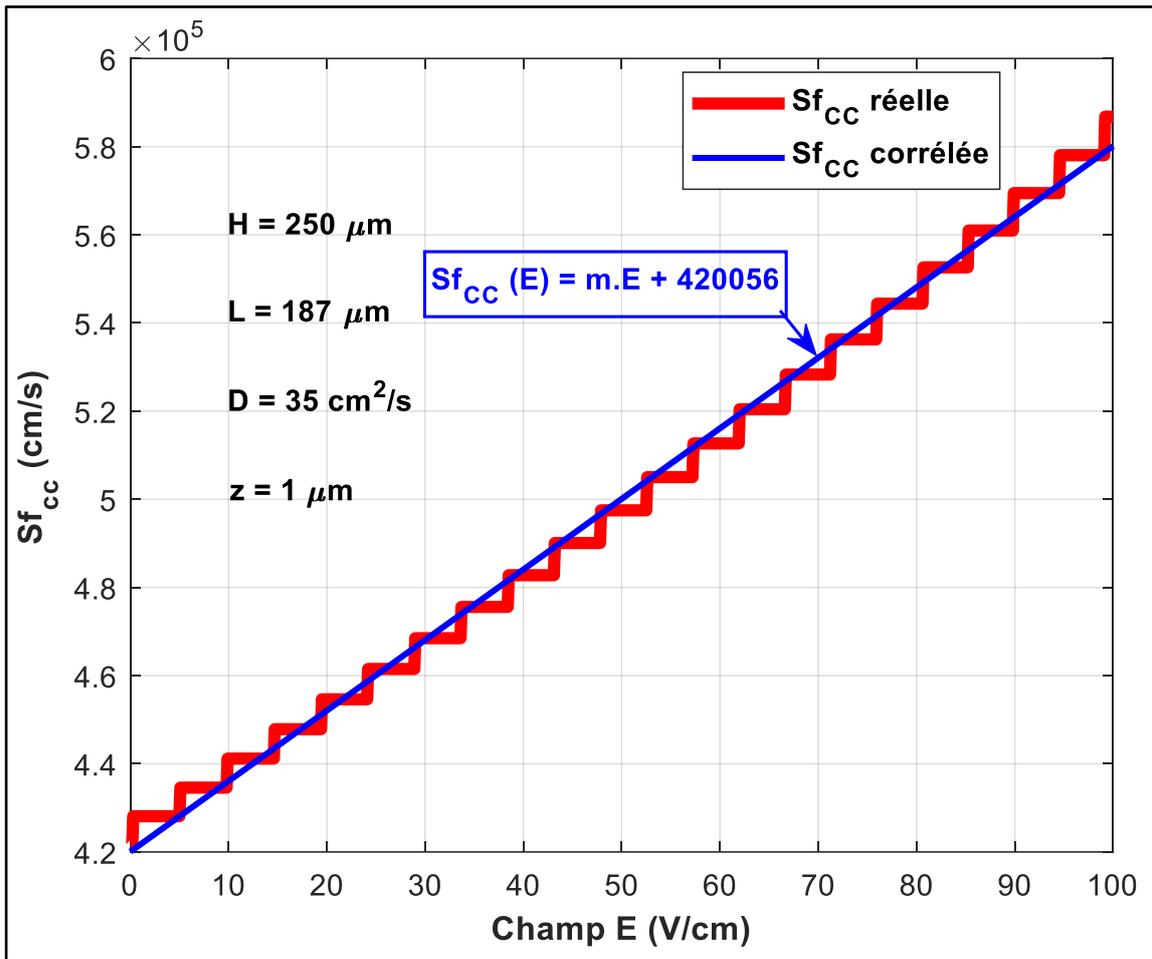


Figure 74: Profil de Sf_{cc} en fonction du champ électrique E

L'évolution de Sf_{cc} en fonction du champ électrique suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation d'une droite affine:

$$Sf_{cc}(E) = m \cdot E + 4,20056 \cdot 10^5 \quad (2.4)$$

La pente de la droite vaut : $m = 1600,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$

2.3.4 Effet du nombre de soleil (n) sur la vitesse Sf_{cc}

La figure 75 représente la détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs du nombre de soleil.

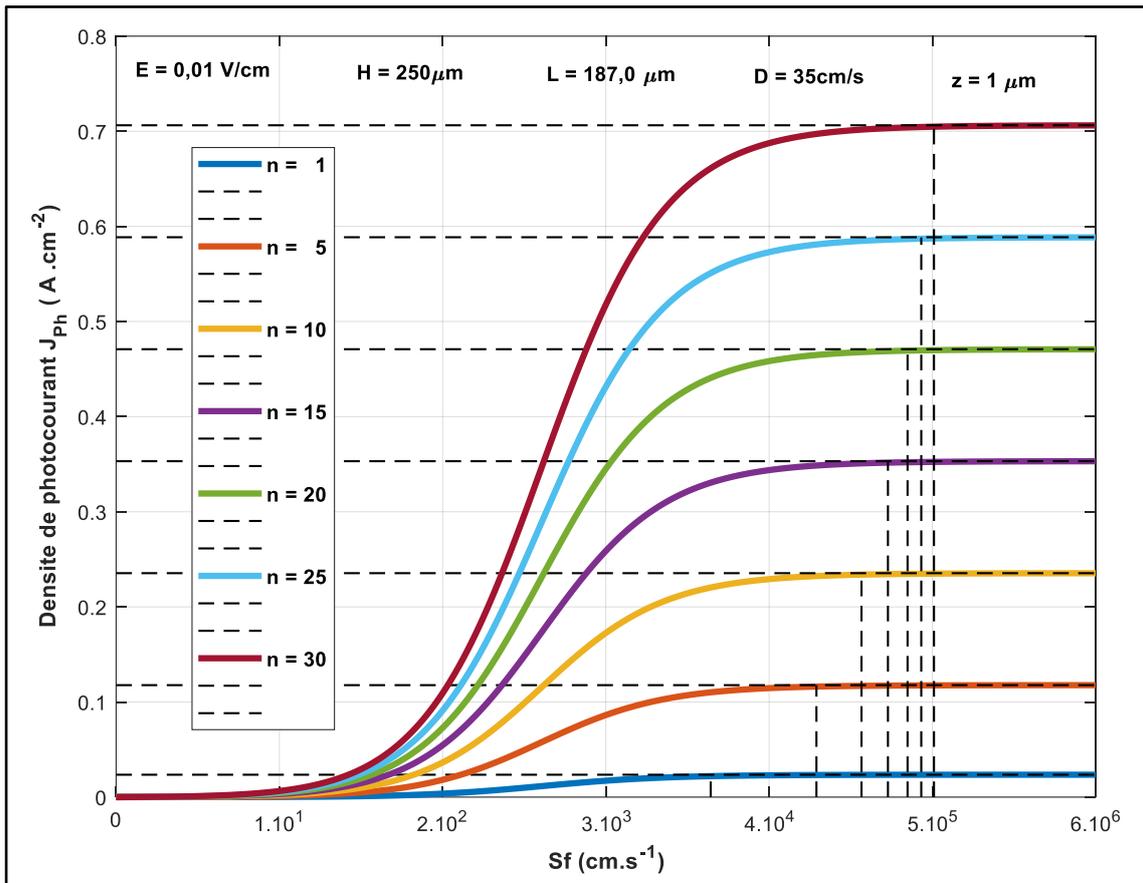


Figure 75: Détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs du nombre de soleil n

La figure 75 permet de dresser le tableau 2 ci-dessous.

n	$Sf_{cc}(cm /s)$	$J_{ph_{cc}} (A \cdot cm^{-2})$
1	$3,522 \cdot 10^{3,522}$	0,0235
5	$4,176 \cdot 10^{4,176}$	0,1177
10	$4,452 \cdot 10^{4,452}$	0,2354
15	$4,614 \cdot 10^{4,614}$	0,3531
20	$4,728 \cdot 10^{4,728}$	0,4709
25	$4,818 \cdot 10^{4,818}$	0,5886
30	$4,890 \cdot 10^{4,890}$	0,7063

Tableau 2: Table de correspondance des valeurs de Sf_{cc} , $J_{ph_{cc}}$ et n .

2.3.5 Variation de la vitesse Sf_{cc} en fonction du nombre de soleil n

La figure 77 représente la profil de Sf_{cc} en fonction du nombre de soleil.

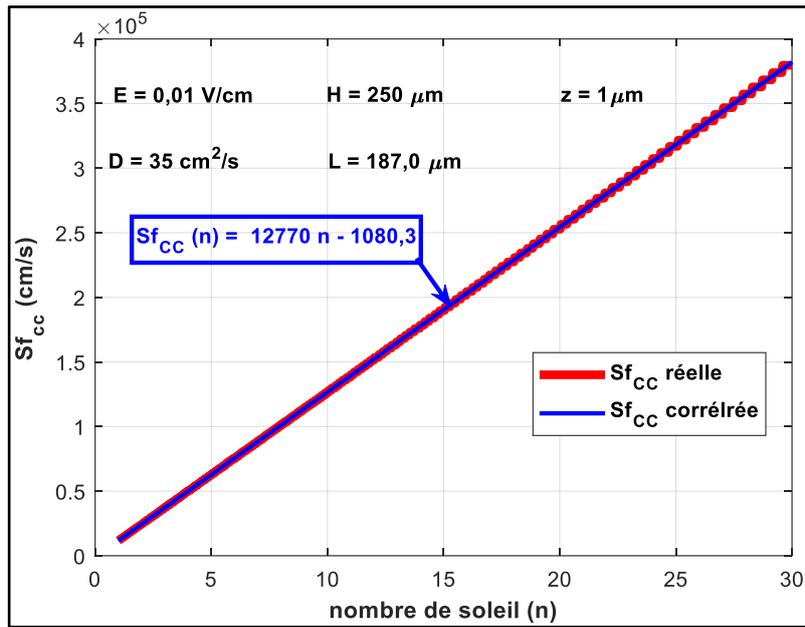


Figure 76: Profil de Sf_{cc} en fonction du nombre de soleil n

L'évolution de Sf_{cc} en fonction du champ électrique suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation d'une droite affine:

$$Sf_{cc}(n) = 12770 \cdot n - 1080,3 \quad (2.5)$$

2.3.6 Effet de la profondeur z sur la valeur de Sf_{cc}

La figure 78 représente la détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs de la profondeur.

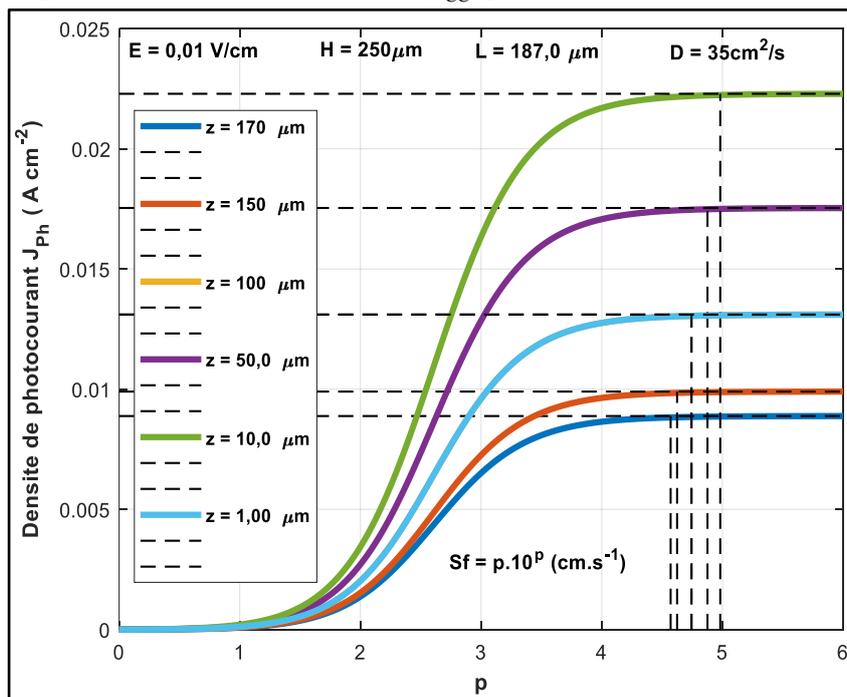


Figure 77: Détermination de Sf_{cc} pour différentes valeurs de la profondeur

La figure 77 permet de dresser le tableau 3 ci-dessous.

z en (μm)	$Sf_{cc}(\text{cm} / \text{s})$	$J_{ph_{cc}} (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
1	$4,932 \cdot 10^{4,932}$	0,0235
10	$4,914 \cdot 10^{4,914}$	0,0223
50	$4,818 \cdot 10^{4,818}$	0,0175
100	$4,698 \cdot 10^{4,698}$	0,0131
150	$4,590 \cdot 10^{4,590}$	0,0099
170	$4,548 \cdot 10^{4,548}$	0,0089

Tableau 3: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CC} , $J_{ph_{cc}}$ et z

2.3.7 Variation de la vitesse Sf_{CC} en fonction de la profondeur

La figure 78 représente la profil de Sf_{CC} en fonction de la profondeur.

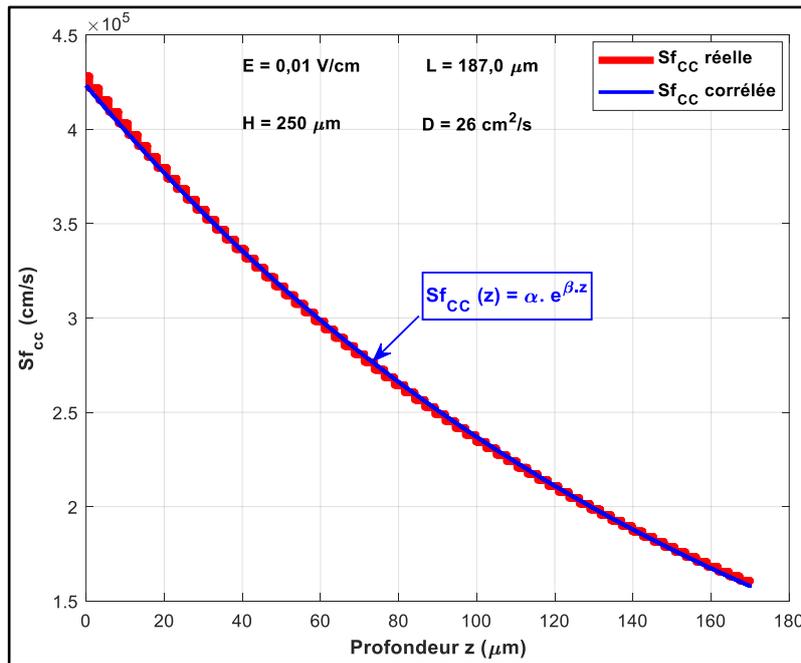


Figure 78: Profil de Sf_{CC} en fonction de la profondeur

L'évolution de Sf_{CC} en fonction du champ électrique suit une décroissance exponentielle donnée par l'équation suivante :

$$Sf_{cc}(z) = 423301 \cdot e^{-5802 \cdot z} \quad (2.6)$$

La figure 79 est une représentation en 3 dimensions des variations de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit Sf_{cc} en fonction du champ électrique et de la profondeur.

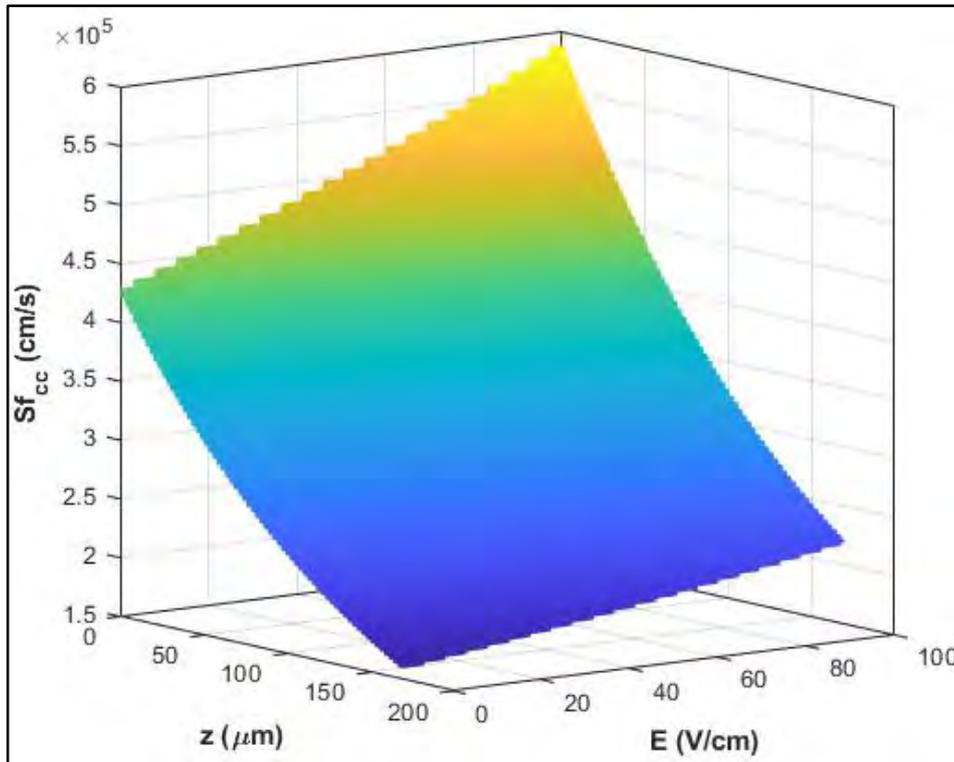


Figure 79: Profil en 3D de Sf_{cc} en fonction du champ électrique et de la profondeur

La vitesse de recombinaison initiant le court-circuit croit linéairement suivant l'augmentation du champ électrique et du nombre de soleil, par contre elle diminue de manière exponentielle suivant l'augmentation de la profondeur du matériau semi-conducteur.

2.4 VITESSE DE RECOMBINAISON LIMITANT LE CIRCUIT-OUVERT.

Dans cette partie nous déterminerons la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile limitant le circuit ouvert Sf_{co} [48]. Les influences respectives d'un champ électrique de polarisation [46,50], du nombre de soleil et de la profondeur du matériau semi-conducteur [47] seront évaluées dans notre étude en vue de trouver les lois de variations de la vitesse Sf_{co} en fonctions des paramètres exogènes précitées.

La résolution de l'équation (2.7) devrait nous permettre d'obtenir l'expression de Sf_{co} .

$$V_{ph}(z, Sf, E, n) - V_{ph_{co}}(z, Sf, E, n) = 0 \quad \text{avec} \quad V_{ph_{co}} = \lim_{Sf \rightarrow \infty} V_{ph} \quad (2.7)$$

Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à notre cas, car après résolution de cette équation l'expression obtenue est indépendante de Sf , Cause pour laquelle une autre méthode a été utilisée.

2.4.1 Méthode de détermination de la valeur de Sf_{co}

2.4.1.1 Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_{co}

Une méthode de détermination classique de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le circuit-ouvert, consiste à s'intéresser au maximum de la courbe de la phototension (juste avant le palier horizontal) qui correspond à un point initiant le circuit-ouvert. La **projection orthogonale à main levée** de ce point sur l'axe des ordonnées donne la tension de circuit-ouvert $V_{Ph_{co}}$ et la **projection à main levée** sur l'axe des abscisses donne la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le circuit-ouvert Sf_{co} .

2.4.1.2 Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_{co}

Ce nouveau procédé de calcul de la valeur de Sf_{co} repose sur l'implémentation de l'Algorithme dite « **Algorithme du plus grand minorant** » qui consiste à déterminer le plus grand minorant de la différence $V_{ph_{co}}(z, E) - V_{ph}(z, Sf, E)$. La figure 80 représente le logigramme de l'algorithme du plus grand minorant.

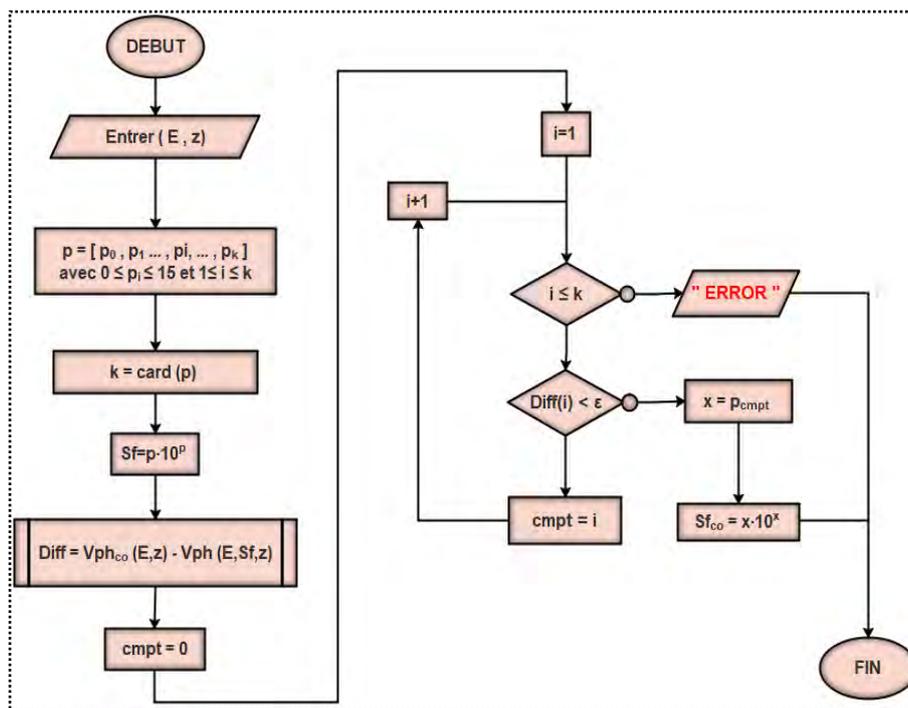


Figure 80: Logigramme de l'algorithme du plus grand minorant

2.4.1.3 Intérêts de la méthode de l’algorithme du plus grand minorant

La détermination de Sf_{CO} par l’algorithme présente plusieurs intérêts :

- Les projections sont automatiquement effectuées ;
- La valeur de Sf_{CO} est déterminée par le programme en fonction des paramètres de la photopile ;
- La possibilité d’étudier le comportement de Sf_{CO} en fonction des variations d’autres paramètres tels que la profondeur du matériau et le champ électrique.

A partir de l’algorithme du plus grand minorant, sont obtenus les figures 81 à 88. La figure 81 est une illustration de la détermination de Sf_{CO} basée sur l’algorithme du plus grand minorant pour un profil donné de la densité de photocourant.

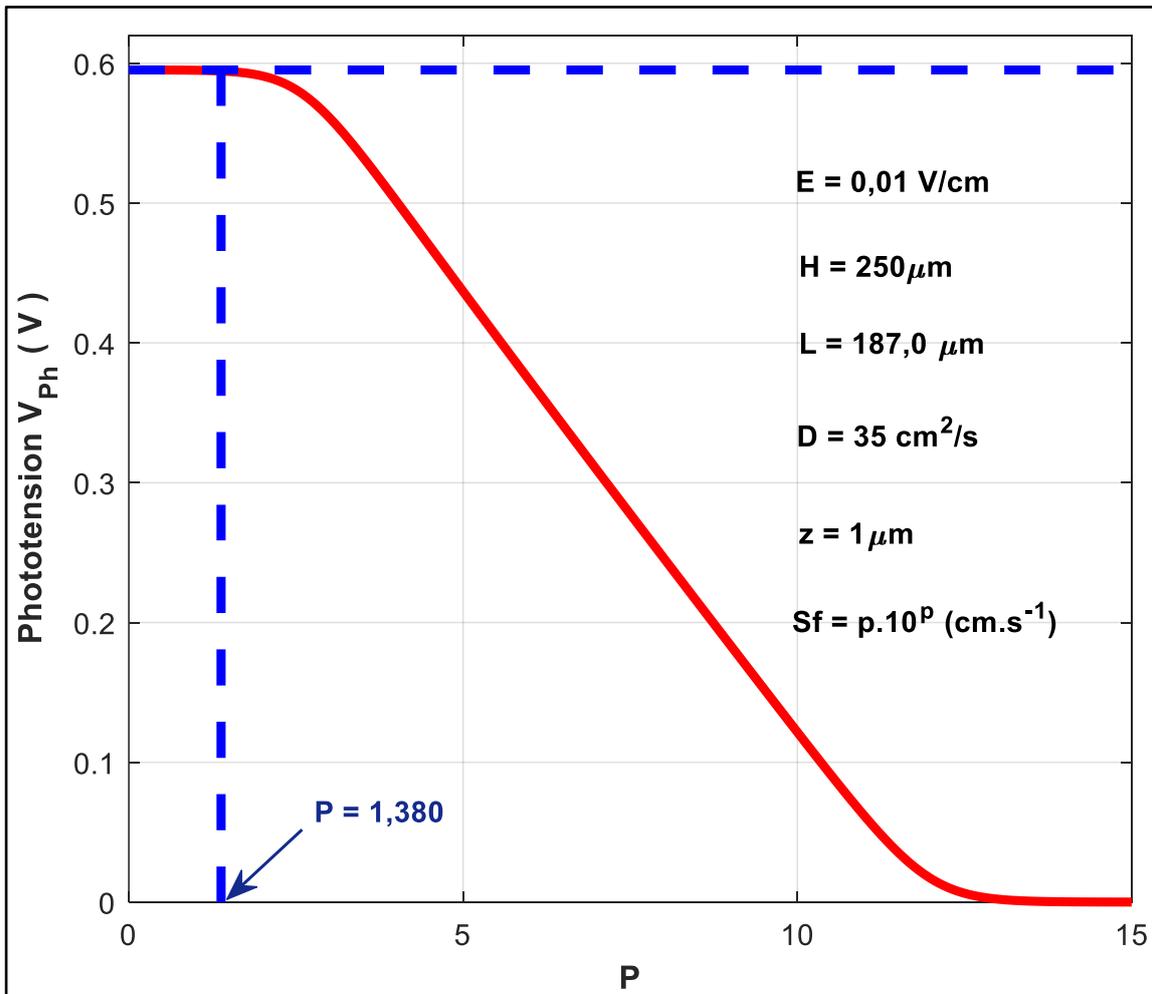


Figure 81: Détermination de Sf_{CO} pour un profil de la densité de photocourant donnée.

2.4.2 Effet du champ électrique sur la valeur de Sf_{CO}

La figure 82 représente la détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs du champ électrique.

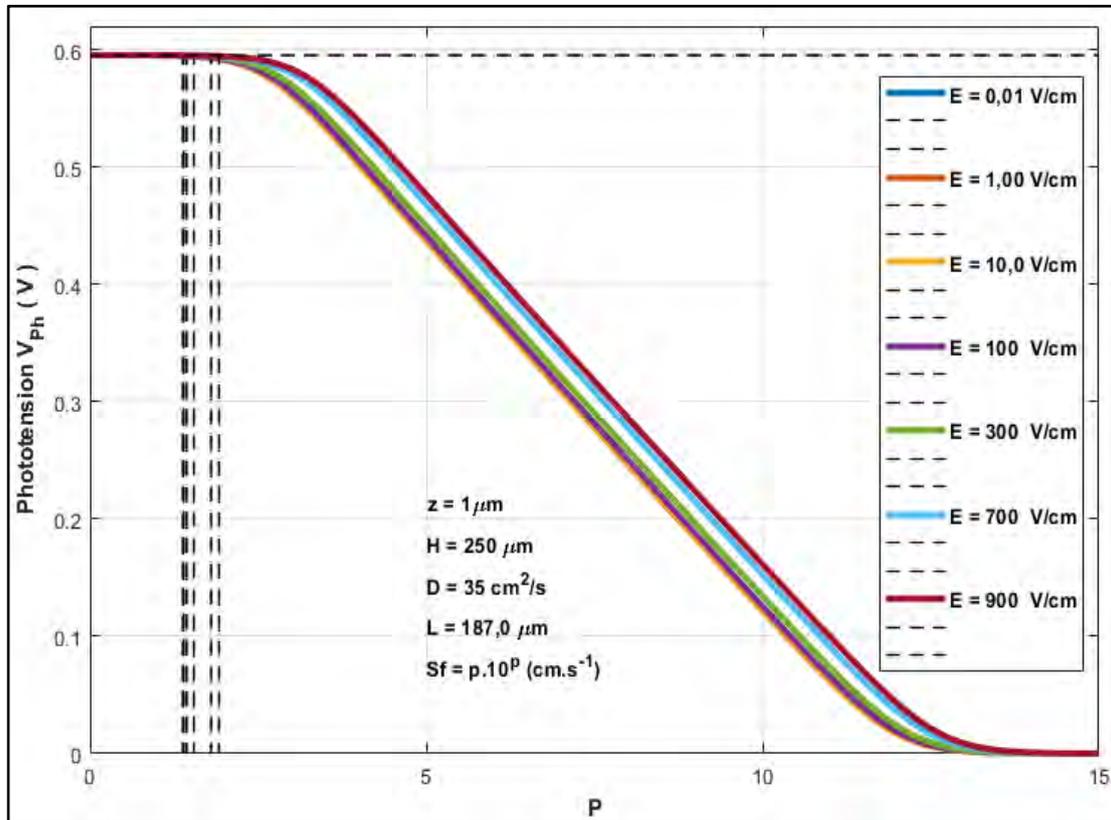


Figure 82: Détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs du champ électrique

La figure 82 permet de dresser le tableau 4.

E en (V/s)	Sf_{co} (cm /s)	$V_{ph_{co}}$ (V)
0,01	33,104	0,595
1	33,104	0,595
10	34,640	0,595
100	39,661	0,595
300	54,191	0,595
700	113,572	0,595
900	159,699	0,595

Tableau 4: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CO} , $V_{ph_{co}}$ et E

2.4.3 Variation de la vitesse Sf_{CO} en fonction du champ électrique

La figure 83 représente le profil de Sf_{CO} en fonction du champ électrique.

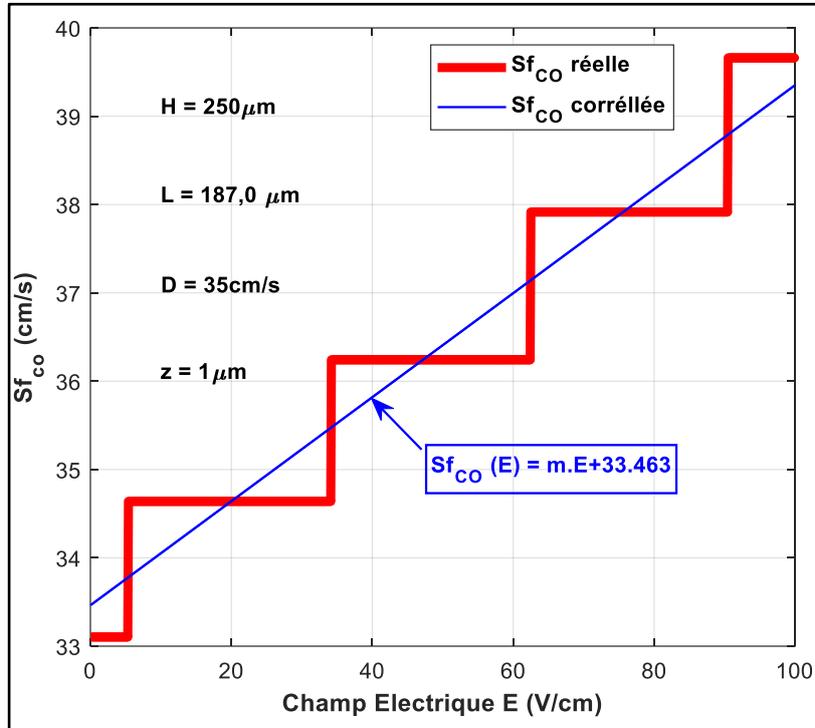


Figure 83: Profil de Sf_{CO} en fonction du champ électrique

L'évolution de Sf_{CO} en fonction du champ électrique suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation d'une droite affine:

$$Sf_{CO}(E) = m \cdot E + 33,463 \quad (2.8)$$

La pente de la droite vaut : $m = 58896 \cdot 10^{-6} cm^2 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1}$

2.4.4 Effet du nombre de soleil et de la profondeur sur la valeur de Sf_{CO}

La figure 84 représente la détermination de Sf_{CO} pour différentes valeurs du nombre de soleil.

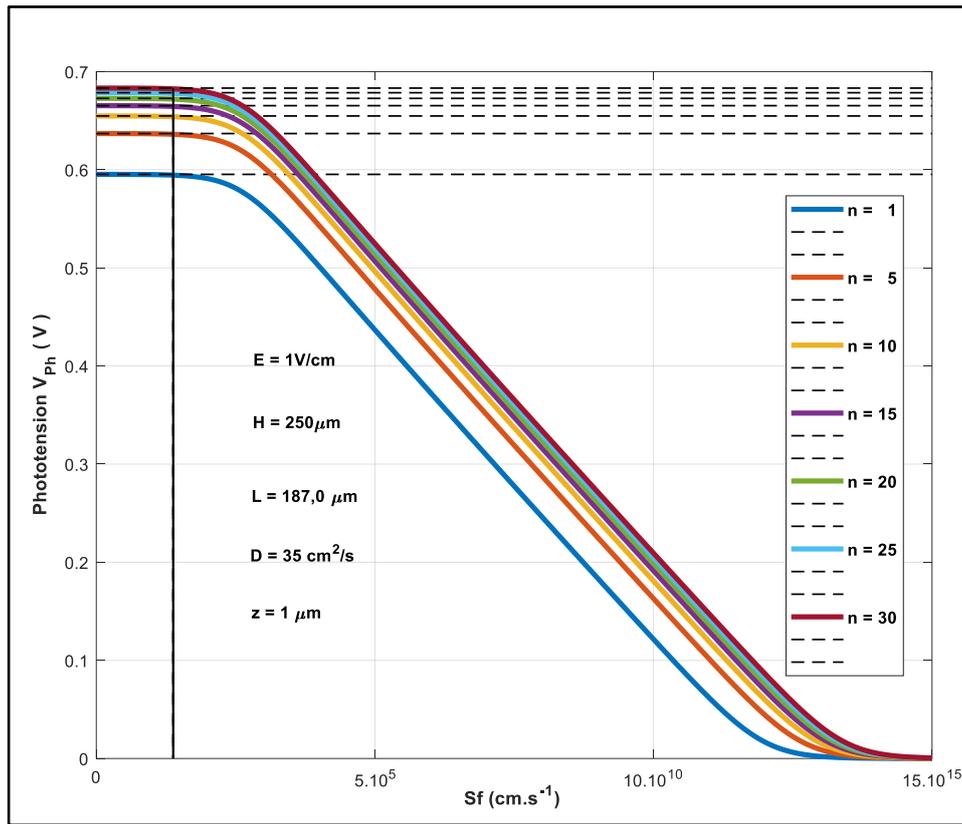


Figure 84: Détermination de Sf_{co} pour différentes valeurs du nombre de soleil n

La figure 84 permet de dresser le tableau 5.

n	$Sf_{co}(cm / s)$	$V_{ph_{co}} (V)$
1	33,104	0,595
5	33,104	0,637
10	33,104	0,655
15	33,104	0,665
20	33,104	0,673
25	33,104	0,679
30	33,104	0,683

Tableau 5: Table de correspondance des valeurs de Sf_{co} , $V_{ph_{co}}$ et n

2.4.5 Variation de la vitesse Sf_{co} en fonction du nombre de soleil n

La figure 85 représente le profil de Sf_{co} en fonction du nombre de soleil.

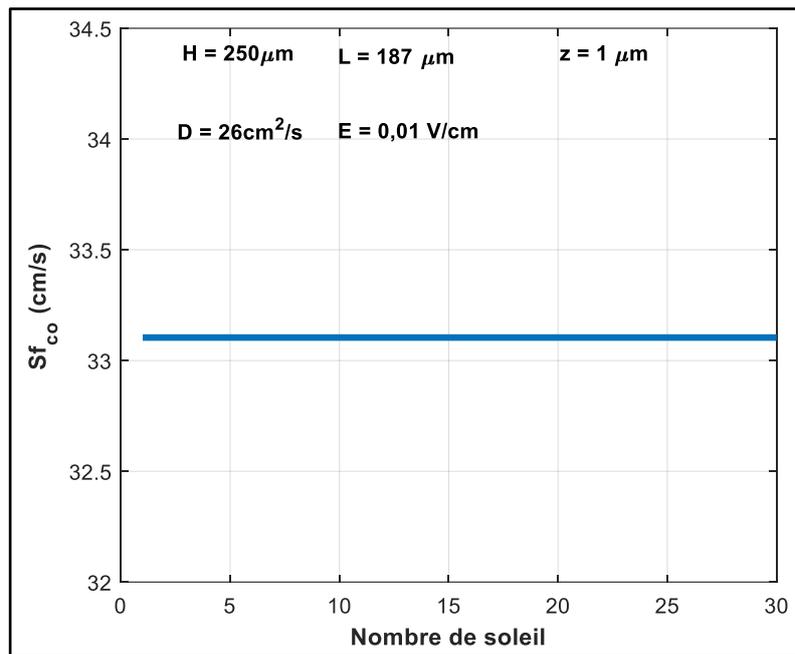


Figure 85: Profil de Sf_{co} en fonction du champ électrique

2.4.6 Effet de la profondeur sur la valeur de Sf_{co}

La figure 86 représente la détermination de Sf_{co} pour différentes valeurs de la profondeur.

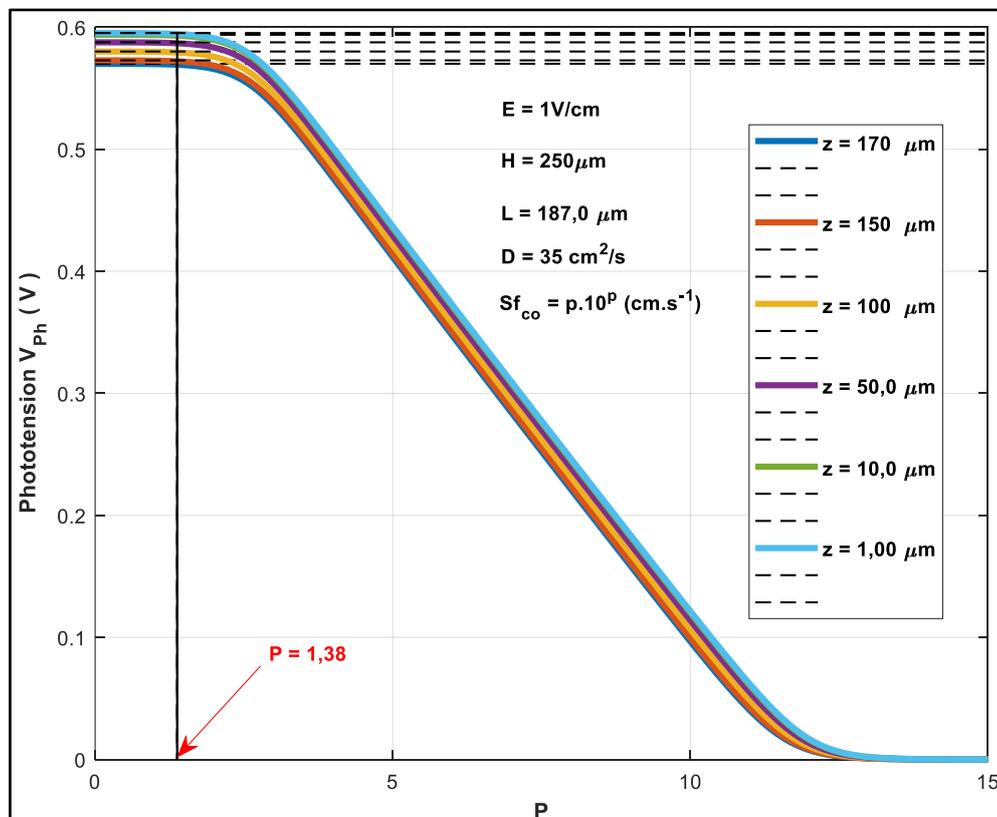


Figure 86: Détermination de Sf_{co} pour différentes valeurs de la profondeur.

La figure 86 permet de dresser le tableau 5.

z en (μm)	Sf_{co}(cm /s)	$V_{ph_{co}}$ (V)
1	33,104	0,5953
10	33,104	0,5938
50	33,104	0,5876
100	33,104	0,5801
150	33,104	0,5729
170	33.104	0,5701

Tableau 6: Table de correspondance des valeurs de Sf_{CO} , $V_{ph_{co}}$ et z.

2.4.7 Variation de la vitesse de Sf_{CO} en fonction de la profondeur z.

La figure 87 représente le profil de Sf_{CO} en fonction de la profondeur z de la photopile.

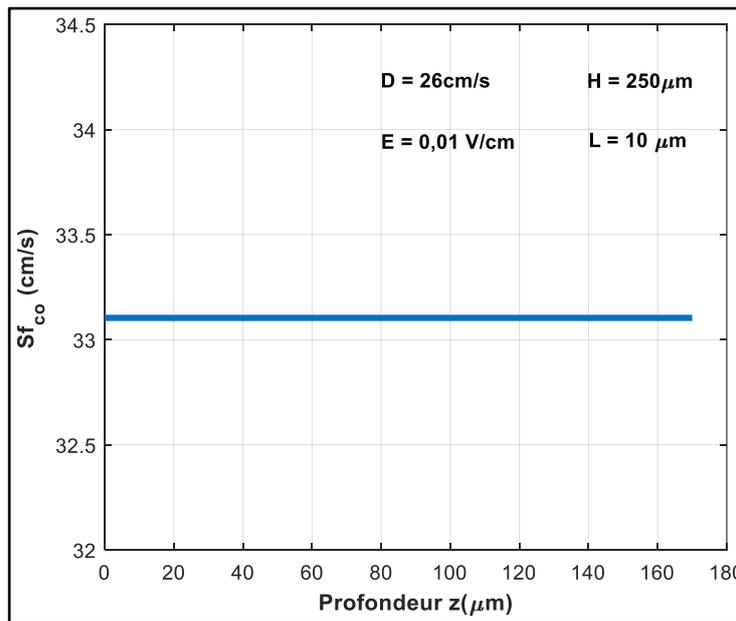


Figure 87: Profil de Sf_{CO} en fonction de la profondeur.

La figure 88 est une représentation en 3 dimensions des variations de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit Sf_{CO} en fonction du champ électrique et de la profondeur.

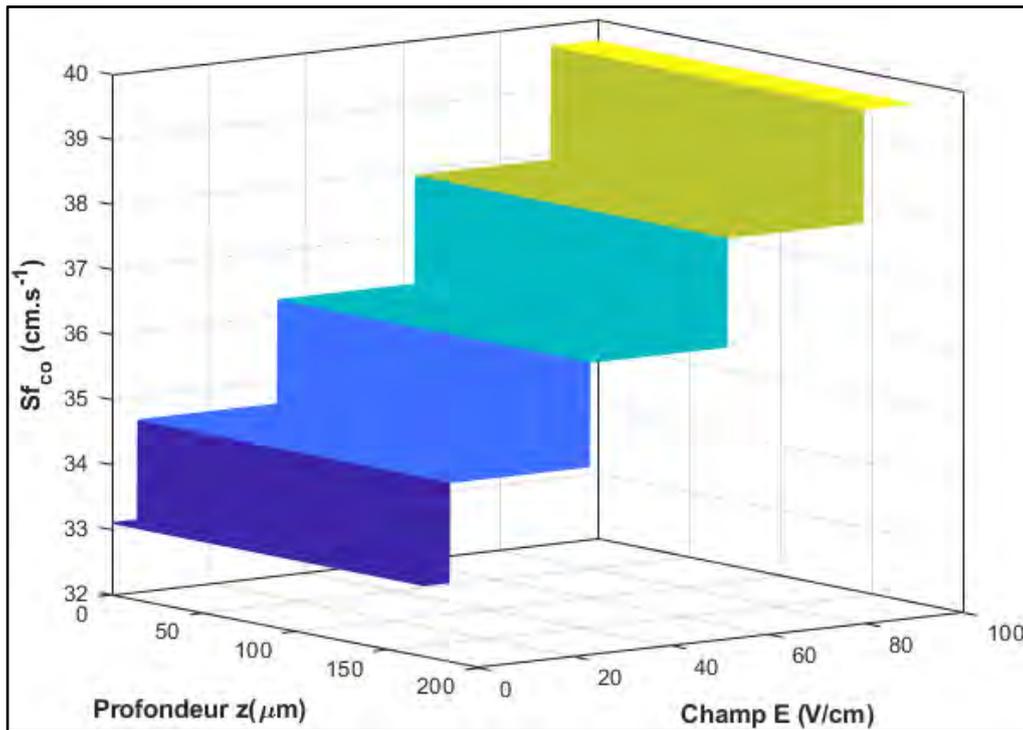


Figure 88: Profil en 3D de Sf_{co} en fonction de la profondeur et du champ E.

La vitesse de recombinaison limitant le circuit-ouvert croit suivant l'augmentation du champ électrique, par contre elle demeure constante sous l'influence de la profondeur et de l'irradiation du matériau semi-conducteur.

2.5 ETUDE DE LA RESISTANCE SERIE EXPERIMENTALE

Cette partie consiste dans un premier temps à déterminer la valeur de la résistance série de la photopile au voisinage du circuit-ouvert dite résistance série expérimentale (Rs_{co}) et dans un second le comportement de cette résistance par rapport aux variations du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau.

2.5.1 Méthode de détermination de la valeur de Rs_{co}

2.5.1.1 Méthode classique de détermination de la valeur de Rs_{co}

Elle consiste à projeter orthogonalement la valeur de la vitesse de recombinaison limitant le circuit-ouvert Sf_{co} sur la courbe de la résistance série Rs . Le point d'intersection du projeté de Sf_{co} et de la courbe de Rs correspond à la valeur expérimentale de la résistance série Rs_{co} .

2.5.1.2 Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Rs_{CO}

Ce nouveau procédé de calcul de la valeur de Rs_{CO} dite « *Find_Rs_{CO}* » consiste à utiliser l’algorithme du plus grand minorant pour déterminer la valeur de la vitesse de recombinaison limitant le circuit-ouvert Sf_{CO} . La connaissance de la valeur de Sf_{CO} permet d’identifier par comparaison la valeur Rs_{CO} correspondante à la valeur de $Rs|_{Sf=Sf_{CO}}$.

La figure 89 représente le logigramme de l’algorithme « *Find_Rs_{CO}* ».

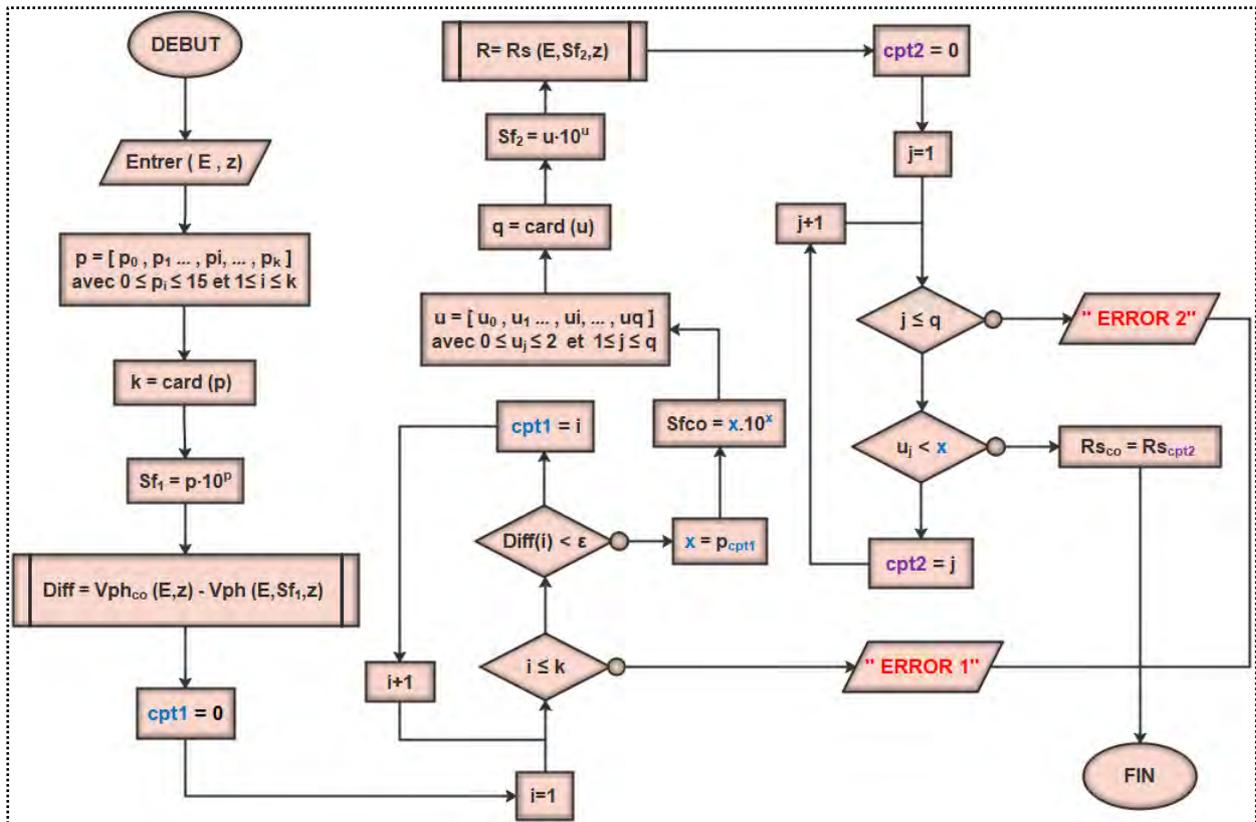


Figure 89: Logigramme de l'algorithme « *Find_Rs_{CO}* »

2.5.1.3 Intérêts de la détermination basée sur l’algorithme « *Find_Rs_{CO}* »

La détermination de Rs_{CO} par l’algorithme présente plusieurs intérêts :

- Les projections sont automatiquement effectuées
- La valeur de Rs_{CO} est déterminée par le programme en fonction des paramètres de la photopile.
- La possibilité d’étudier le comportement de Rs_{CO} en fonction des variations d’autres paramètres tels que la profondeur du matériau, le champ électrique et l’irradiation.

A partir de l'algorithme Find_ Rs_{co} , sont obtenus les figures 90 à 98. La figure 90 illustre la détermination de la résistance série Rs_{co} basée sur l'algorithme $find_Rs_{co}$ pour un profil de la densité de photocourant donné.

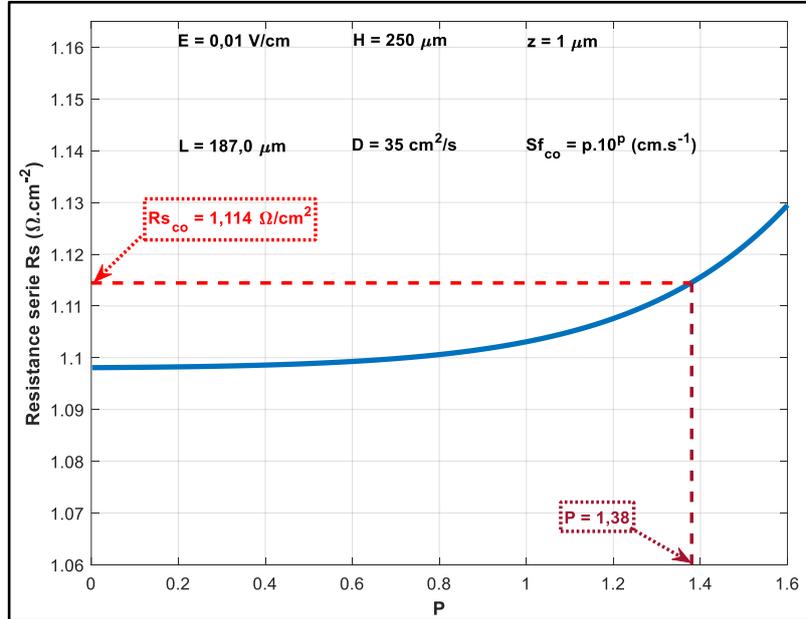


Figure 90: Détermination de Rs_{co} pour un profil de résistance série donnée.

2.5.2 Effet du champ électrique sur la valeur de Rs_{co}

La figure 91 représente la détermination de Rs_{co} pour différentes valeurs du champ électrique.

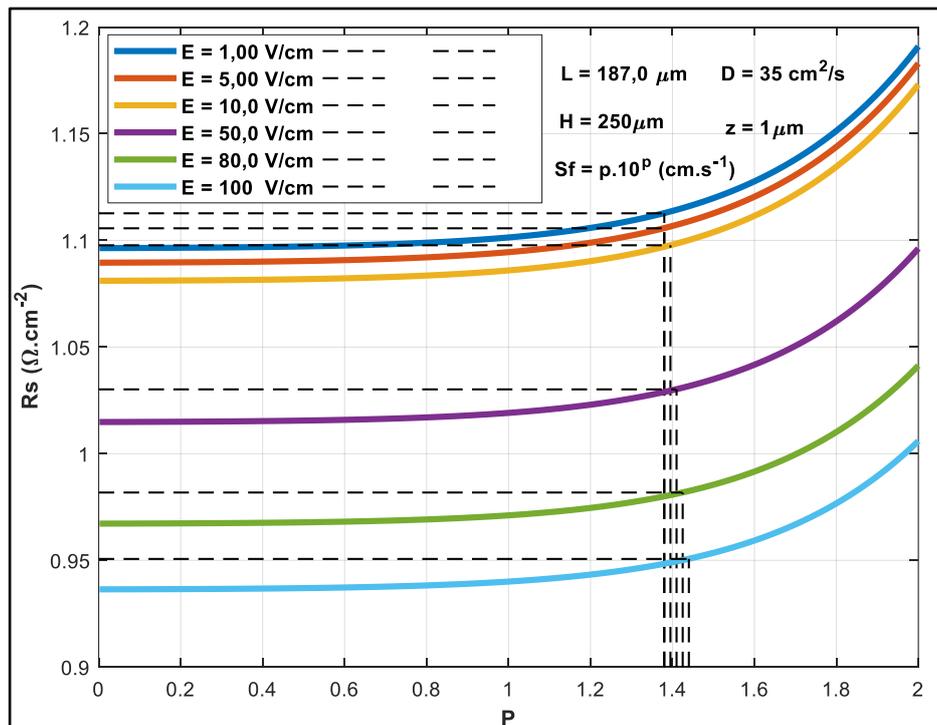


Figure 91: Détermination de Rs_{co} pour différentes valeurs du champ électrique

La figure 91 permet de dresser le tableau 5.

E en (V/s)	Sf_{co} (cm /s)	Rs_{co} (Ω/cm^2)
1	33,1039	1,1127
5	33,1039	1,1057
10	34,6397	1,0977
50	36,2426	1,0301
80	37,9153	0,9818
100	39,6609	0,9506

Tableau 7: Table de correspondance des valeurs de Rs_{co} , Sf_{co} et E

2.5.3 Variation de la résistance Rs_{co} en fonction du champ électrique E.

La figure 92 représente le profil de Rs_{co} en fonction du champ électrique.

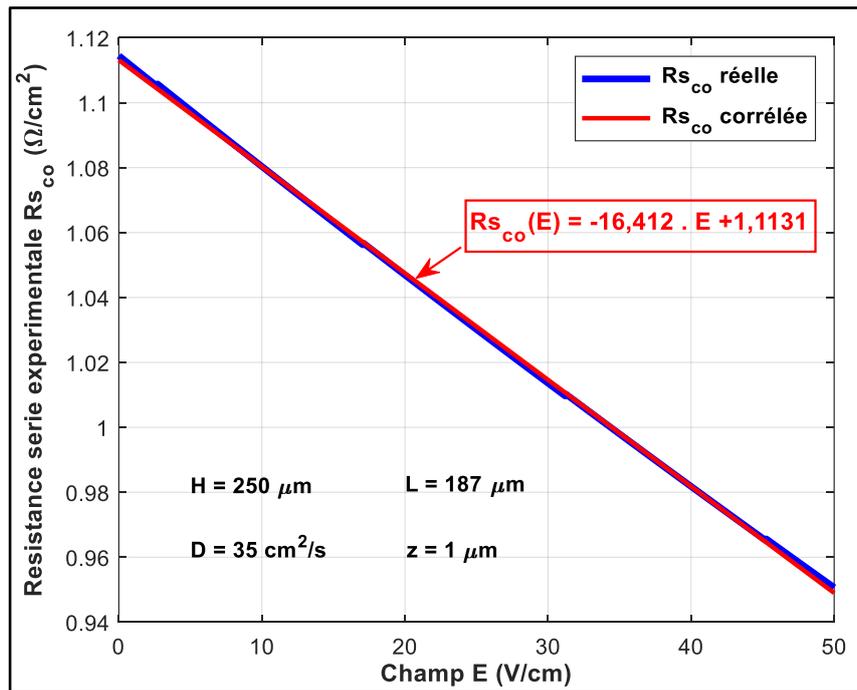


Figure 92: Profil de Rs_{co} en fonction du champ électrique.

L'évolution de Rs_{co} en fonction du champ électrique suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation d'une droite affine:

$$Rs_{co}(E) = -16,412 \cdot E + 1,1131 \tag{2.9}$$

2.5.4 Effet du nombre de soleil sur la résistance Rs_{co}

La figure 93 représente la détermination de Rs_{co} pour différentes valeurs du nombre de soleil.

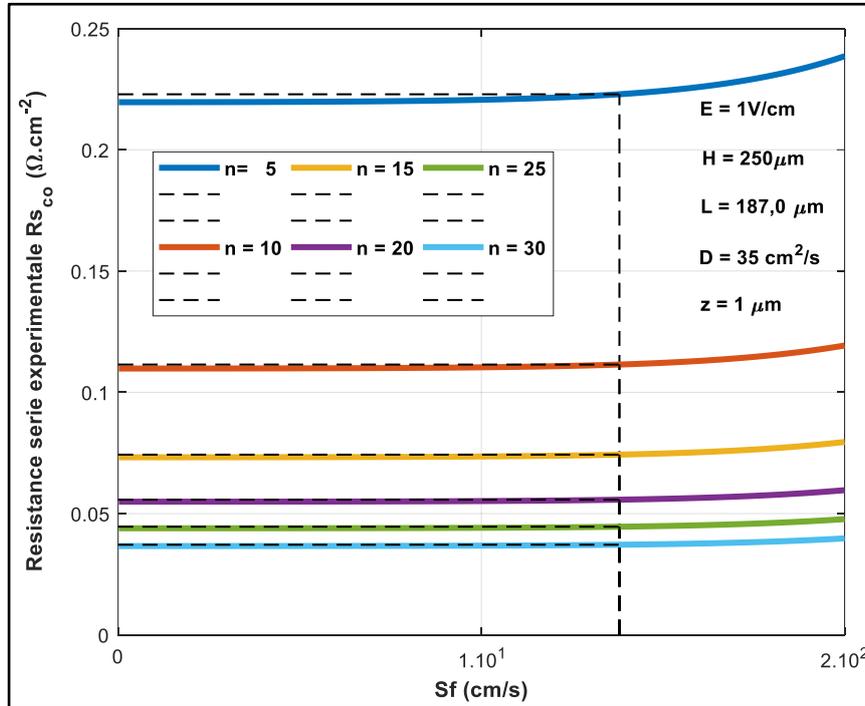


Figure 93: Détermination de Rs_{co} pour différentes valeurs du nombre de soleil.

La figure 93 permet de dresser le tableau 8.

E en (V/s)	$Sf_{co}(cm /s)$	$Rs_{co} (\Omega/cm^2)$
5	33,1039	0,2225
10	33,1039	0,1113
15	34,6397	0,0742
20	36,2426	0,0556
25	37,9153	0,0445
30	39,6609	0,0371

Tableau 8 : Table de correspondance des valeurs de Rs_{co} , Sf_{co} et E.

2.5.5 Variation de la résistance Rs_{co} en fonction du nombre de soleil n.

La figure 94 représente le profil de Rs_{co} en fonction du nombre de soleil.

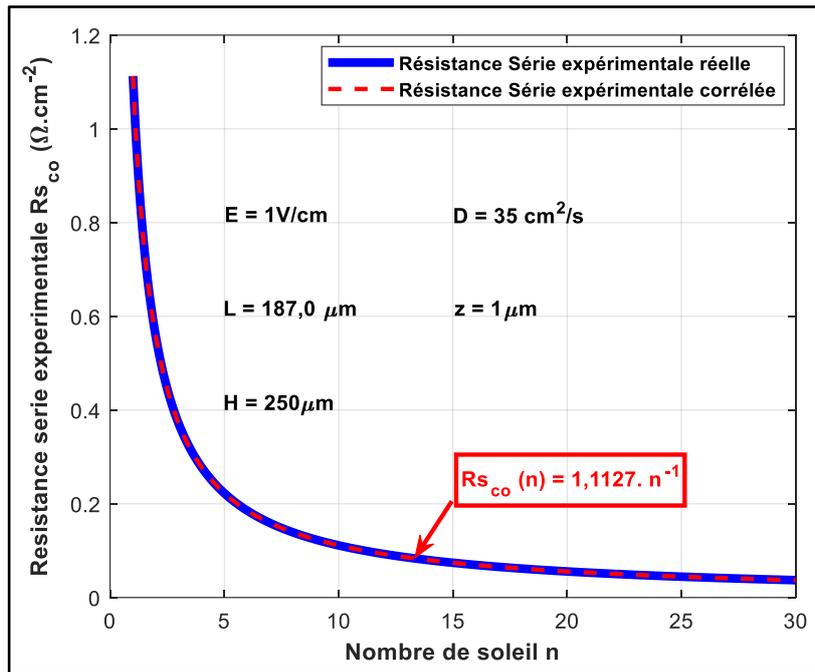


Figure 94: Profil de $R_{s_{co}}$ en fonction du nombre de soleil.

L'évolution de $R_{s_{co}}$ en fonction du nombre de soleil suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation d'une droite affine:

$$R_{s_{co}}(E) = \frac{1,1127}{n} \approx \frac{1}{n} \quad \text{avec } n > 0 \quad (2.10)$$

La figure 95 est une représentation en 3 dimensions de $R_{s_{co}}$ en fonction du nombre de soleil et de la profondeur.

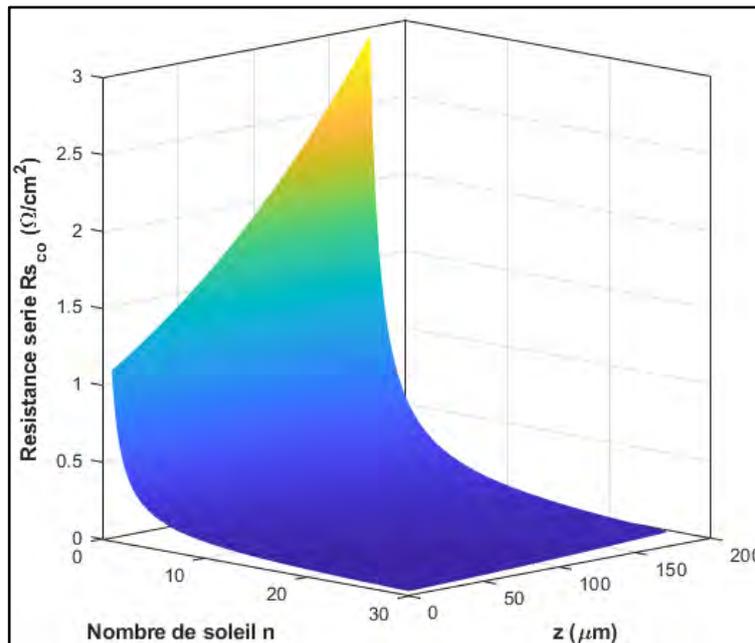


Figure 95: Profil en 3D de $R_{s_{co}}$ en fonction du nombre de soleil et de la profondeur

2.5.6 Effet de la profondeur z sur la valeur de Rs_{CO}

La figure 96 représente la détermination de Rs_{CO} pour différentes valeurs de la profondeur z de la photopile.

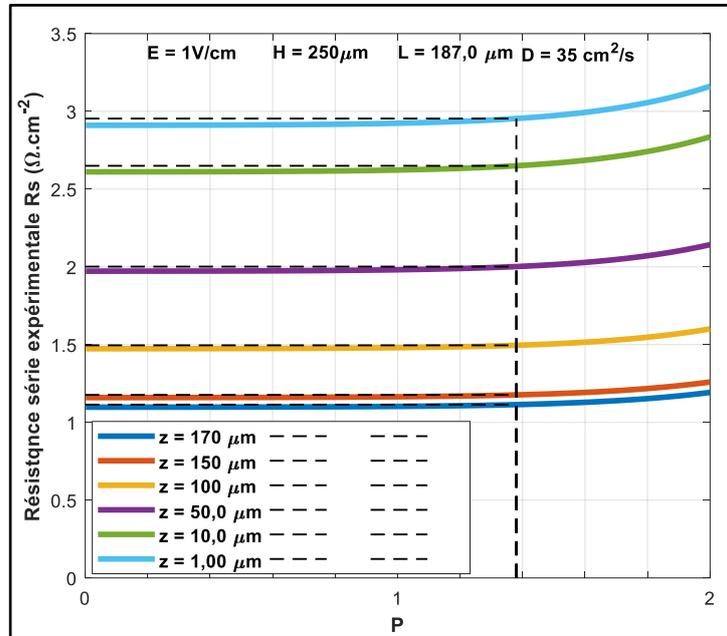


Figure 96: Détermination de Rs_{CO} pour différentes valeurs de la profondeur

La figure 96 permet de dresser le tableau 9 ci-dessous.

z en (μm)	$Sf_{CO}(cm /s)$	$Rs_{CO} (\Omega/cm^2)$
1	33,104	1,114
10	33,104	1,177
50	33,104	1,496
100	33,104	2,00
150	33,104	2,650
170	33.104	2,954

Tableau 9: Table de correspondance des valeurs de Rs_{CO} , Sf_{CO} et z.

2.5.7 Variation de la valeur de Rs_{CO} en fonction de la profondeur.

La figure 97 représente le profil de Rs_{CO} en fonction de la profondeur de la photopile.

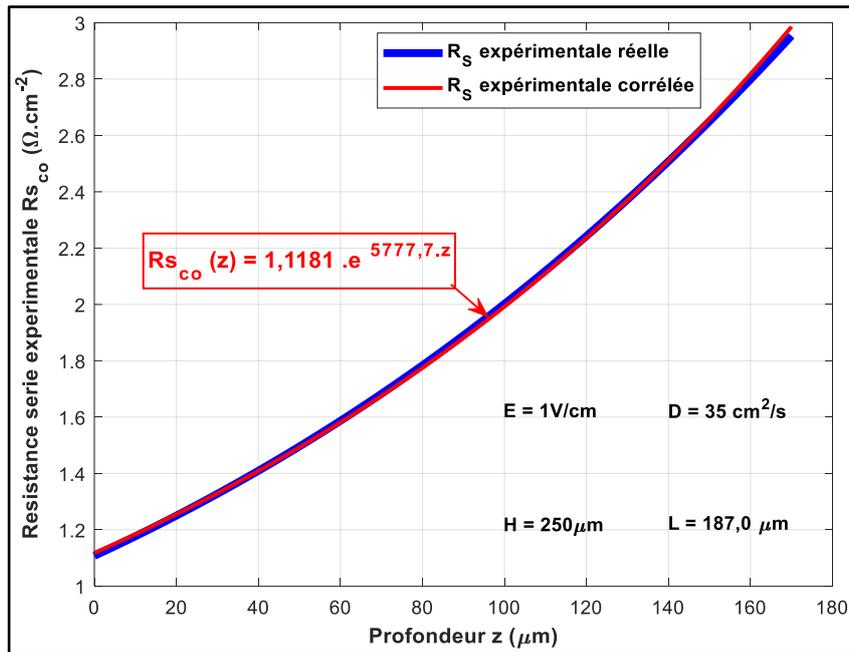


Figure 97: Résistance série expérimentale $R_{s_{CO}}$ en fonction de la profondeur

L'évolution de $R_{s_{CO}}$ en fonction du nombre de soleil suit une progression relativement exponentielle :

$$R_{s_{CO}}(z) = 1,1181 \cdot e^{5777,7 \cdot z} \quad (2.11)$$

La figure 98 est une représentation en 3 dimensions de $R_{s_{CO}}$ en fonction du champ électrique et de la profondeur.

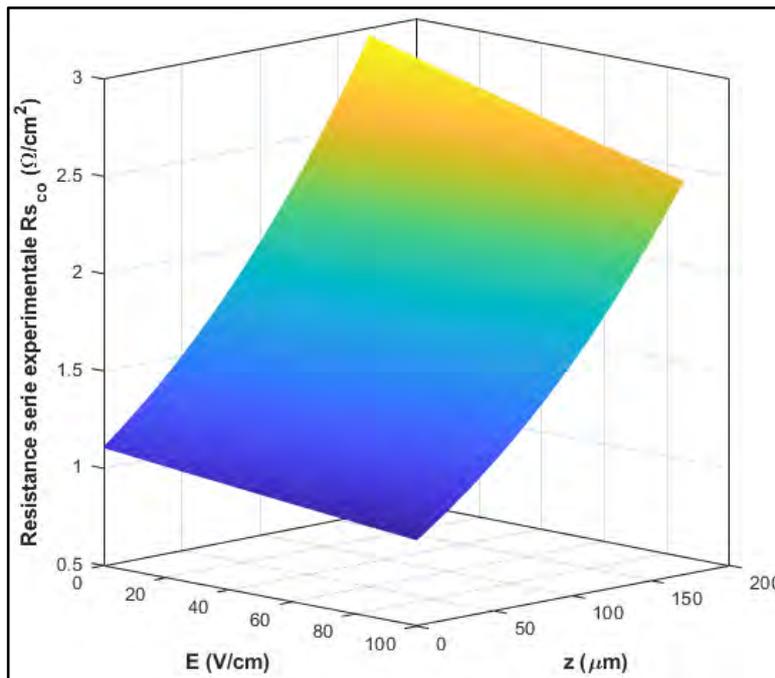


Figure 98: Profil en 3D de $R_{s_{CO}}$ en fonction du champ électrique et de la profondeur

L'augmentation du champ électrique baisse linéairement la valeur de la résistance série expérimentale. L'augmentation du nombre de soleil diminue de manière inverse la résistance série de la photopile. La croissance de la profondeur du matériau augmente de manière exponentielle la valeur de la résistance série.

2.6 ETUDE DE LA RESISTANCE SHUNT EXPERIMENTALE

Cette partie consiste dans un premier temps à déterminer la valeur de la résistance shunt expérimentale (Rsh_{cc}) et dans un second le comportement de cette résistance par rapport au variation du champ électrique et de la profondeur. Méthode de détermination de la valeur de Rsh_{cc} .

2.6.1.1 Méthode classique de détermination de la valeur de Rsh_{cc}

Elle consiste à projeter orthogonalement la valeur de la vitesse de recombinaison initiant le circuit-fermé Sf_{cc} sur la courbe de la résistance shunt R_{sh} . Le point d'intersection du projeté de Sf_{cc} et de la courbe de R_{sh} correspond à la valeur expérimentale de la résistance shunt Rsh_{cc} .

2.6.1.2 Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Rsh_{cc}

Ce nouveau procédé de calcul de la valeur de Rsh_{cc} dite « *Find _ Rsh_{cc}* » consiste à utiliser l'algorithme du plus petit majorant pour déterminer la valeur de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit Sf_{cc} . La connaissance de la valeur de Sf_{cc} permet d'identifier par comparaison la valeur Rsh_{cc} correspondante à la valeur de $Rsh|_{Sf=Sf_{cc}}$.

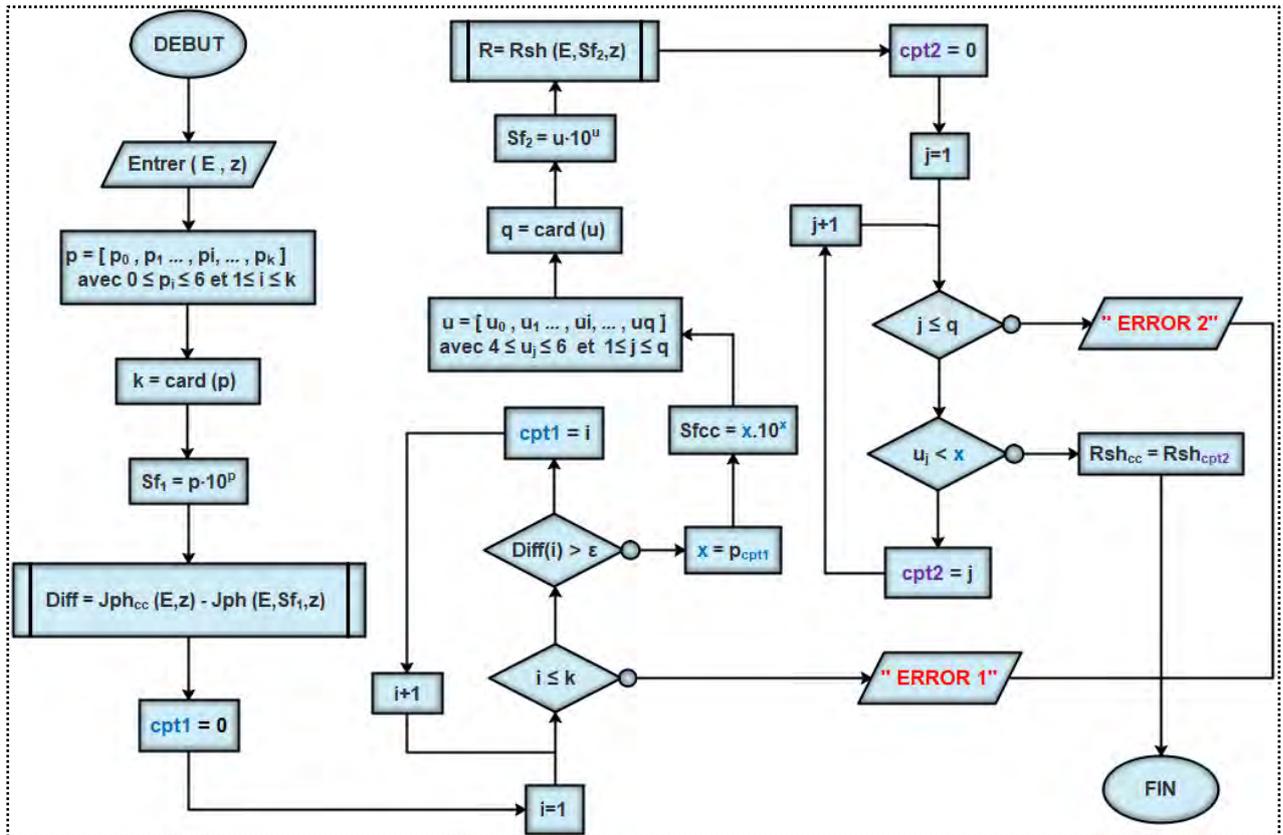


Figure 99: Logigramme de l'algorithme $Find_Rsh_{cc}$

2.6.1.3 Intérêts de la méthode basée sur l'algorithme « $Find_Rsh_{cc}$ »

La détermination de Rsh_{cc} par l'algorithme « $Find_Rsh_{cc}$ » présente plusieurs intérêts :

- Les projections sont automatiquement effectuées
- La valeur de Rsh_{cc} est déterminée par le programme en fonction des paramètres de la photopile.
- La possibilité d'étudier le comportement de Rsh_{cc} en fonction des variations d'autres paramètres tels que la profondeur du matériau et le champ électrique.

A partir de l'algorithme $Find_Rsh_{cc}$, sont obtenus les figures 100 à 108.

La figure 100 est une illustration de la détermination de la résistance série Rsh_{cc} basée sur l'algorithme « $Find_Rsh_{cc}$ » pour un profil de la densité de photocourant donné.

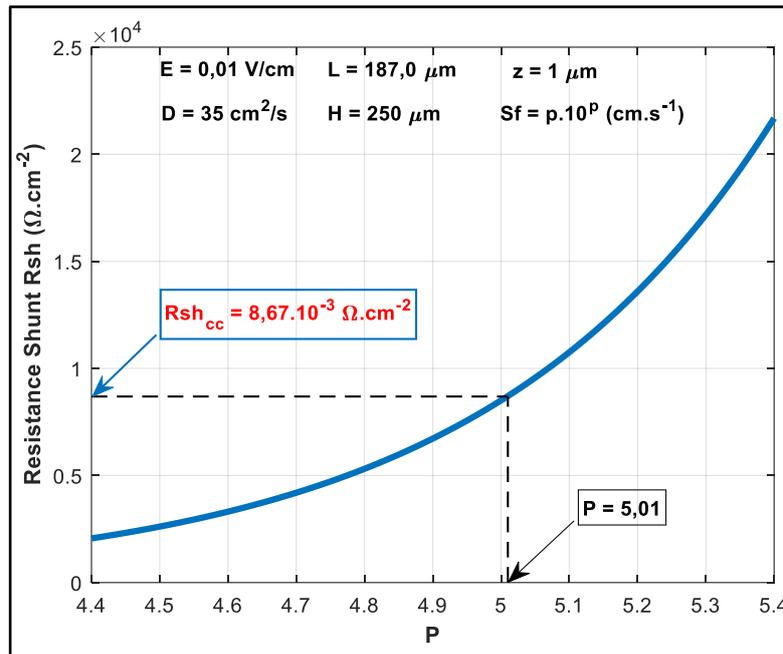


Figure 100: Détermination de Rsh_{cc} pour un profil de la densité de photocourant donné

2.6.2 Effet du champ électrique sur la valeur de Rsh_{cc}

La figure 101 représente la détermination de Rsh_{cc} pour différentes valeurs de E.

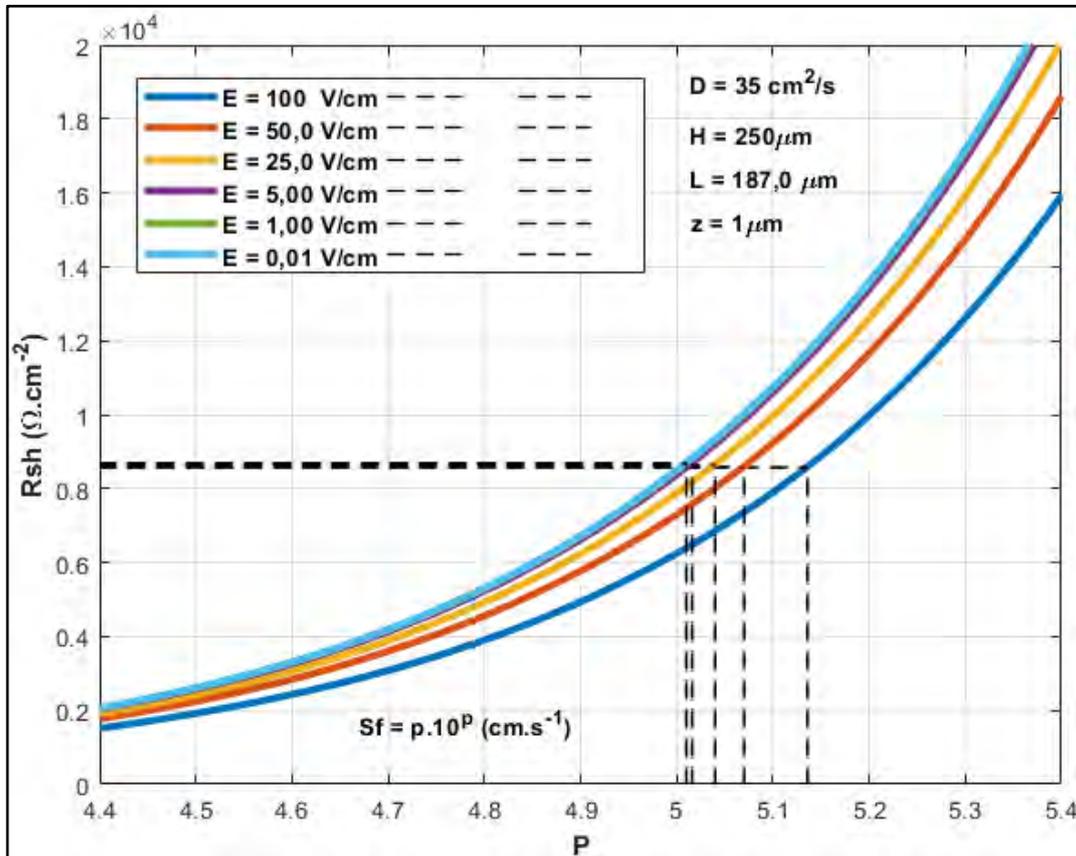


Figure 101: Détermination de Rsh_{cc} pour différentes valeurs de E

La figure 101 permet d’obtenir le tableau 10

E en (V/s)	$Sf_{cc}(cm /s)$	$Rsh_{cc} (\Omega/cm^2)$
0,01	$5.1267 \cdot 10^5$	$8,6682 \cdot 10^3$
1	$5.1267 \cdot 10^5$	$8,6422 \cdot 10^3$
5	$5.2042 \cdot 10^5$	$8,6594 \cdot 10^3$
25	$5.5262 \cdot 10^5$	$8,6203 \cdot 10^3$
50	$5.9567 \cdot 10^5$	$8,5652 \cdot 10^3$
100	$7.0247 \cdot 10^5$	$8,5550 \cdot 10^3$

Tableau 10: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{cc} , Sf_{cc} et E

2.6.3 Variation de la valeur de Rsh_{cc} en fonction du champ électrique

La figure 102 représente le profil de Rsh_{cc} en fonction du champ électrique.

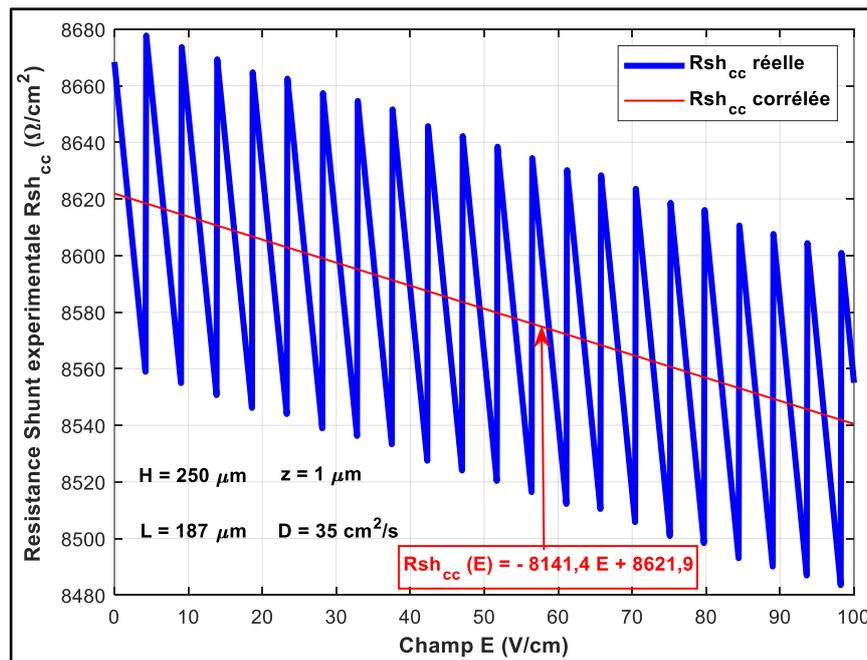


Figure 102: Profil de Rsh_{cc} en fonction du champ électrique

L’évolution de Rsh_{cc} en fonction du nombre du champ électrique E suit une progression relativement linéaire et obéit à une équation de droite affine :

$$Rsh_{cc}(E) = -8141,4 \cdot E + 8621,9 \tag{2.12}$$

2.6.4 Effet de la profondeur z sur la résistance shunt expérimentale Rsh_{cc}

La figure 103 représente la détermination de Rsh_{cc} pour différentes valeurs de la profondeur z de la photopile.

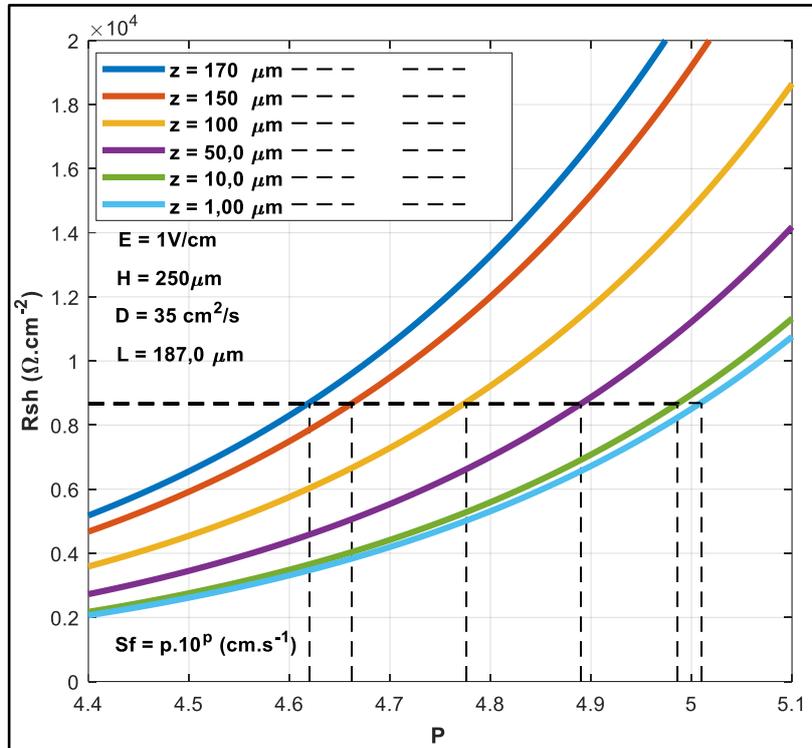


Figure 103: Détermination de Rsh_{cc} pour différentes valeurs de la profondeur

La figure 103 permet d'obtenir le tableau 11.

z en (μm)	Sf_{cc} (cm / s)	Rsh_{cc} (Ω / cm^2)
1	$5,1267 \cdot 10^5$	$8.6885 \cdot 10^3$
10	$4,8278 \cdot 10^5$	$8.6453 \cdot 10^3$
50	$3,7958 \cdot 10^5$	$8.6440 \cdot 10^3$
100	$2,8514 \cdot 10^5$	$8.6955 \cdot 10^3$
150	$2,1408 \cdot 10^5$	$8.6546 \cdot 10^3$
170	$1,9259 \cdot 10^5$	$8.6820 \cdot 10^3$

Tableau 11: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{cc} , Sf_{cc} et z

2.6.5 Variation de la valeur de Rsh_{cc} en fonction de la profondeur

La figure 104 représente le profil de Rsh_{cc} en fonction de la profondeur z .

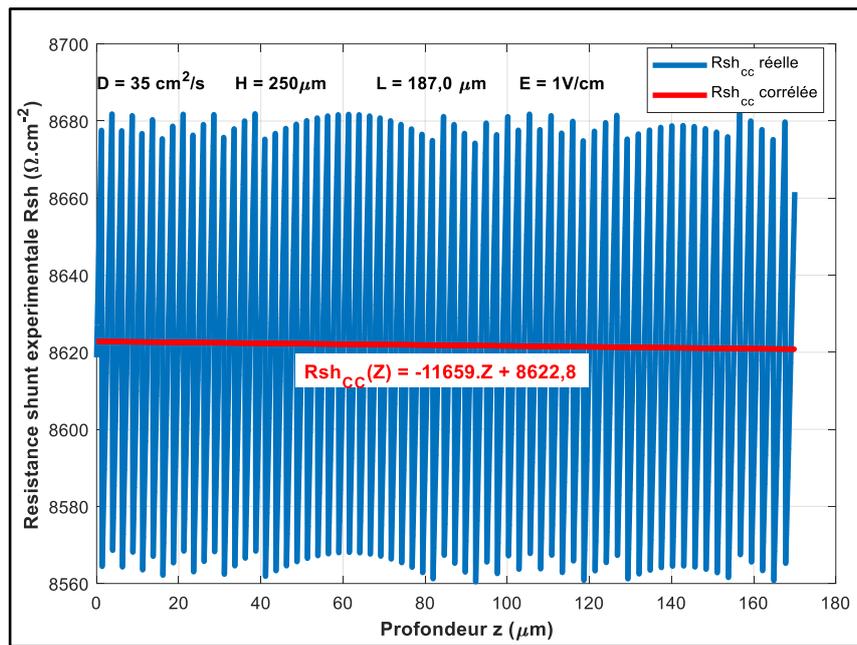


Figure 104: Résistance shunt expérimentale Rsh_{cc} en fonction de la profondeur

La figure 105 est une représentation en 3 dimensions de Rsh_{cc} en fonction du champ E.

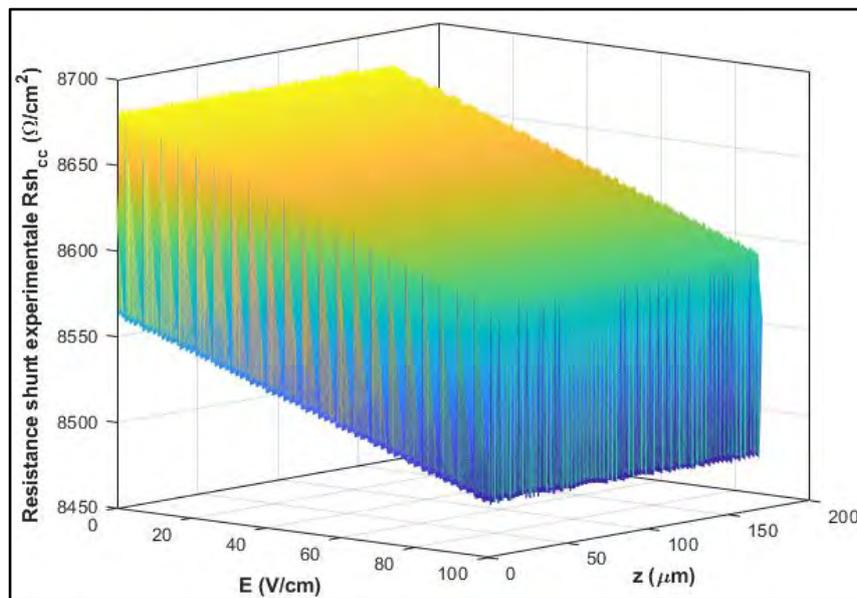


Figure 105: Profil 3D de Rsh_{cc} en fonction de E et de z

2.6.6 Effet du nombre de soleil sur la résistance shunt expérimentale Rsh_{cc}

La figure 106 représente le profil de Rsh_{cc} pour différentes valeurs du nombre de soleil.

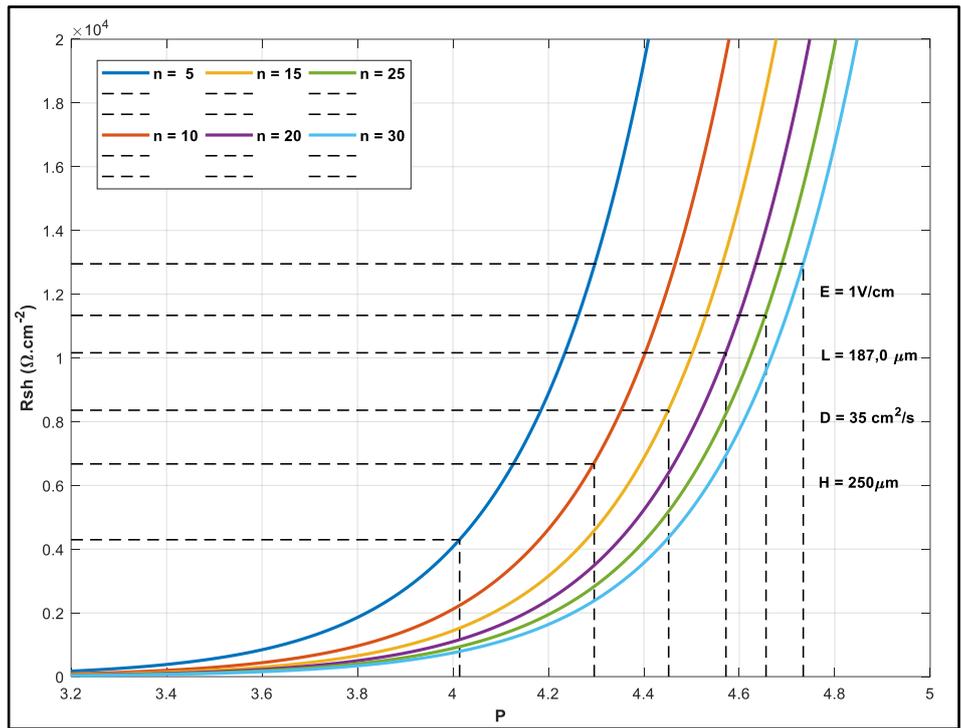


Figure 106: Détermination de Rsh_{cc} pour différentes valeurs de n

La figure 106 permet d'obtenir le tableau 12.

n	$Sf_{cc}(cm/s)$	$Rsh_{cc}(\Omega/cm^2)$
5	$4,15 \cdot 10^4$	$4,2952 \cdot 10^3$
10	$8,49 \cdot 10^4$	$6,6739 \cdot 10^3$
15	$1,26 \cdot 10^5$	$8,3594 \cdot 10^3$
20	$1,71 \cdot 10^5$	$1,0162 \cdot 10^4$
25	$2,11 \cdot 10^5$	$1,1335 \cdot 10^4$
30	$2,57 \cdot 10^5$	$1,2952 \cdot 10^4$

Tableau 12: Table de correspondance des valeurs de Rsh_{cc} , Sf_{cc} et n

2.6.7 Variation de la valeur de Rsh_{cc} en fonction du nombre de soleil n

La figure 107 représente le profil de Rsh_{cc} en fonction du nombre de soleil.

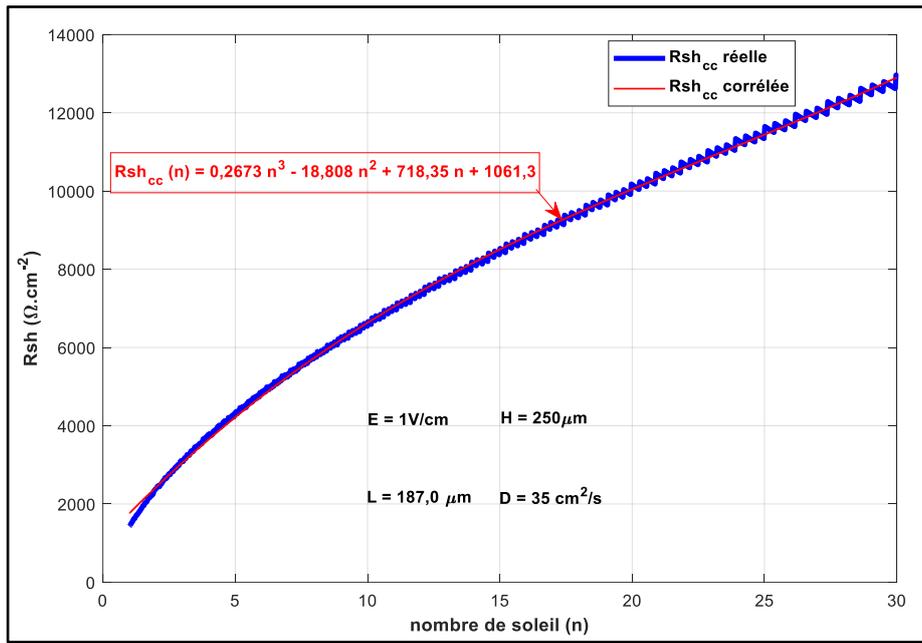


Figure 107: Profil de Rsh_{cc} en fonction du nombre de soleil n

L'évolution de Rsh_{cc} en fonction du nombre de soleil suit une progression obéissant à la relation (2.13) :

$$Rsh_{cc}(n) = 0,2673 n^3 - 18,808 n^2 + 718,35 n + 1061,3 \quad (2.13)$$

La figure 108 est une représentation en 3 dimensions de Rsh_{cc} en fonction de n et de z .

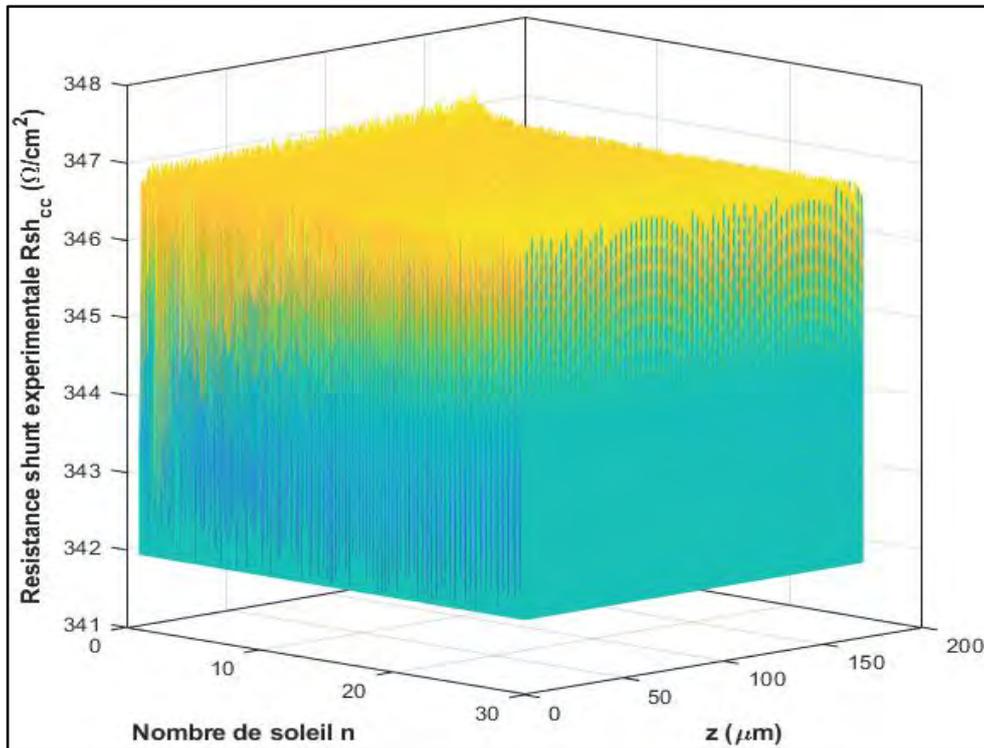


Figure 108: Profil en 3D de Rsh_{cc} en fonction de n et de z

L'augmentation du champ électrique externe favorise la décroissance linéaire de la résistance shunt expérimentale. La croissance de la profondeur du matériau semi-conducteur contribue à une légère diminution de la résistance shunt expérimentale qui fluctue en deux valeurs extrêmes. L'augmentation du nombre de soleil contribue à la hausse considérable de la résistance shunt expérimentale, ce qui permet de déduire qu'en mode court-circuit la recombinaison engendrée par la radiation constitue un des facteurs majeurs responsables de la baisse de performance de la photopile.

CONCLUSION

Au début de ce chapitre nous avons étudié les effets du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau sur les résistances série et shunt de la photopile. A travers cette étude, les phénomènes suivants ont été observés :

- Les résistances série et shunt augmentent suite à une croissance de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf .
- Le champ électrique de polarisation externe et l'intensité d'irradiation lumineuse contribuent à la baisse des résistances série et shunt de la photopile.
- L'augmentation de profondeur du matériau semi-conducteur amplifie les résistances séries et shunt de la photopile.

Par ailleurs, dans ce chapitre nous avons déterminé la vitesse de recombinaison initiant le phénomène de court-circuit (Sf_{cc}) et la vitesse de recombinaison limitant le phénomène de circuit ouvert (Sf_{co}). La connaissance de ces deux vitesses de recombinaison permet de caractériser les différents modes de fonctionnement de la photopile. La résolution analytique des équations asymptotiques permettant d'obtenir Sf_{co} et Sf_{cc} aboutit à une indétermination. Afin de contourner cet obstacle, nous avons adopté une résolution numérique basée sur des algorithmes. Ainsi, les influences du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau sur les vitesses Sf_{co} et Sf_{cc} notées sont les suivantes :

- La vitesse de recombinaison initiant le court-circuit croît linéairement suivant l'augmentation du champ électrique et du nombre de soleil, par contre elle diminue de manière exponentielle suivant l'augmentation de la profondeur du matériau semi-conducteur.

- La vitesse de recombinaison limitant le circuit-ouvert croît suivant l'augmentation du champ électrique, par contre elle demeure constante sous l'influence de la profondeur et de l'irradiation du matériau semi-conducteur.

Dans la dernière partie de ce chapitre nous avons évalué les effets du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau sur les résistances expérimentales série et shunt de la photopile. Sous l'influence des paramètres exogènes les comportements des résistances expérimentales sont les suivants :

- L'augmentation du champ électrique externe favorise la baisse des résistances expérimentales série et shunt.
- La croissance de la profondeur du matériau augmente de manière exponentielle la valeur de la résistance série expérimentale et laisse invariant la résistance shunt expérimentale.
- L'augmentation du nombre de soleil contribue à la hausse considérable de la résistance shunt expérimentale, ce qui permet de déduire qu'en mode court-circuit la recombinaison engendrée par la radiation constitue un des facteurs majeurs responsables de la baisse de performance de la photopile.

Suite à l'étude de l'influence des paramètres externes sur les grandeurs électriques macroscopiques de la photopile en mode court-circuit et en mode circuit ouvert nous déterminerons au prochain chapitre le comportement des grandeurs intrinsèques et de la puissance face à l'influence du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau.

CHAPITRE 3 : EFFETS DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA VITESSE INTRINSEQUE DE RECOMBINAISON DES PORTEURS ET SUR LA PUISSANCE REELLE DE LA PHOTOPILE.

INTRODUCTION

Les phénomènes de recombinaison impactent négativement sur l'efficacité de la photopile. Ils existent divers processus de recombinaison des porteurs de charges dont le processus d'origine intrinsèque. Dans ce dernier chapitre nous mettrons l'accent sur l'influence du champ de polarisation externe, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau sur la vitesse intrinsèque de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile [51] et sur la puissance réelle de la photopile.

3.1 VITESSE DE RECOMBINAISON INTRINSEQUE DES PORTEURS A LA JONCTION.

Cette partie consiste dans un premier temps à déterminer la valeur de la vitesse de recombinaison intrinsèque (Sf_0) [51] de la photopile et dans un second temps le comportement de cette vitesse par rapport aux variations du champ électrique, du nombre de soleil et de la profondeur du matériau semi-conducteur.

3.1.1 Méthode de détermination de la valeur de Sf_0

3.1.1.1 Méthode classique de détermination de la valeur de Sf_0

Elle consiste dans un premier temps à la détermination de la longueur de diffusion effective (L_{eff}) [54],[55] en projetant orthogonalement à main levée le point d'intersection des courbes représentatives de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la longueur ($Jph_{cc} = f(L)$) de la photopile et la courbe de la densité de photocourant de court-circuit expérimentale (Jph_{exp}) [52]. La connaissance de L_{eff} permet dans un second temps de déterminer la valeur de la phototension de circuit ouvert correspondante à la longueur de diffusion effective ($Vph_{co}(L_{eff})$), la projection orthogonale à main levée du point d'intersection des courbes représentatives de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison et

l'asymptote horizontale d'équation $V_{ph} = V_{ph_{co}}(L_{eff})$ correspond à la vitesse de recombinaison intrinsèque de la photopile Sf_0 recherchée.

3.1.1.2 Nouvelle méthode de détermination de la valeur de Sf_0

Ce nouveau procédé de calcul de la valeur de Sf_0 dite « *Find_Sf0* » [53] consiste à déterminer automatiquement la valeur de la longueur de diffusion effective L_{eff} , ensuite utiliser la valeur trouvée pour calculer la valeur de phototension de circuit-ouvert correspondante $V_{ph_{co}}(L_{eff})$. La connaissance de la valeur de $V_{ph_{co}}(L_{eff})$ permet d'identifier la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour laquelle $V_{ph} = V_{ph_{co}}(L_{eff})|_{Sf=Sf_0}$ grâce à l'exécution de l'algorithme du plus petit majorant.

3.1.2 Détermination de la valeur de Sf_0 par l'algorithme « *Find_Sf0* »

3.1.2.1 Calcul de la longueur de diffusion effective L_{eff}

La figure 109 représente le logigramme de l'algorithme « *Find_Leff* » permettant de déterminer numériquement la valeur de la longueur de diffusion effective des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile.

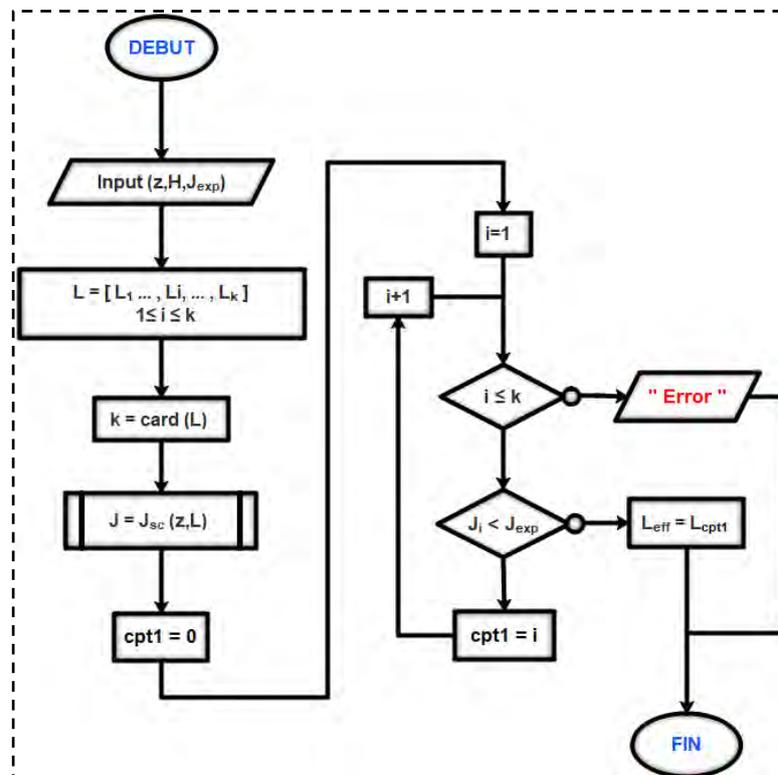


Figure 109: Logigramme de l'algorithme « *Find_Leff* ».

La figure 110 représente le calcul de la longueur de diffusion effective pour des valeurs de champ électrique et de profondeur données.

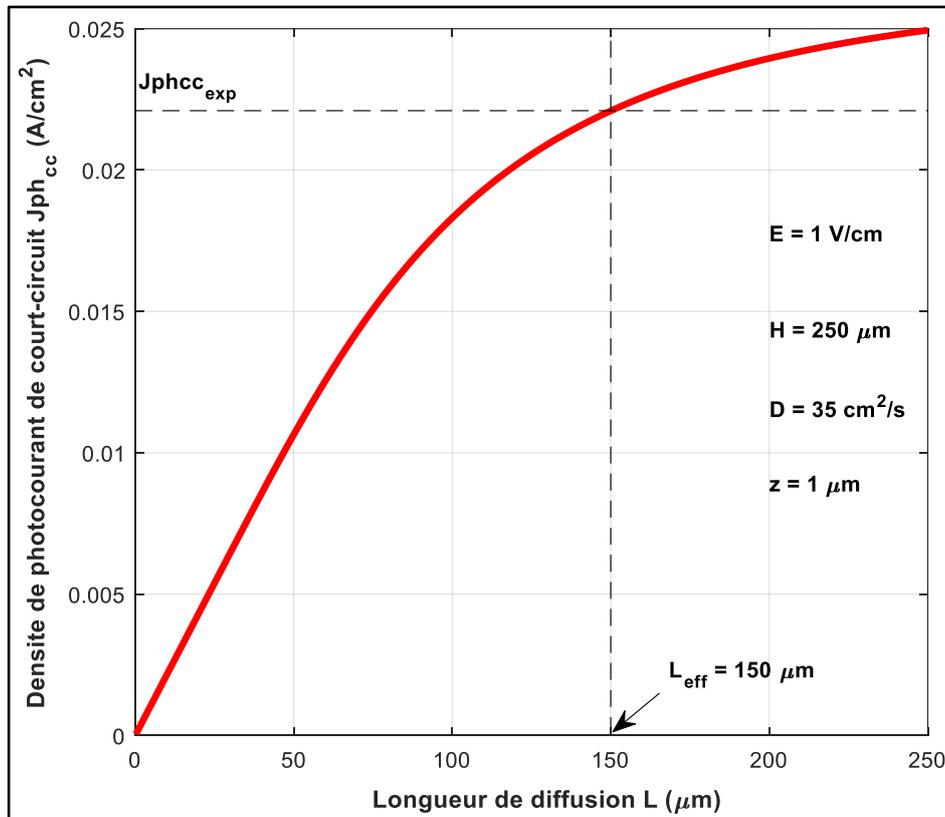


Figure 110: Détermination de la longueur de diffusion effective.

La figure 110 représente le logigramme de l'algorithme $Find_{Sf_0}$.

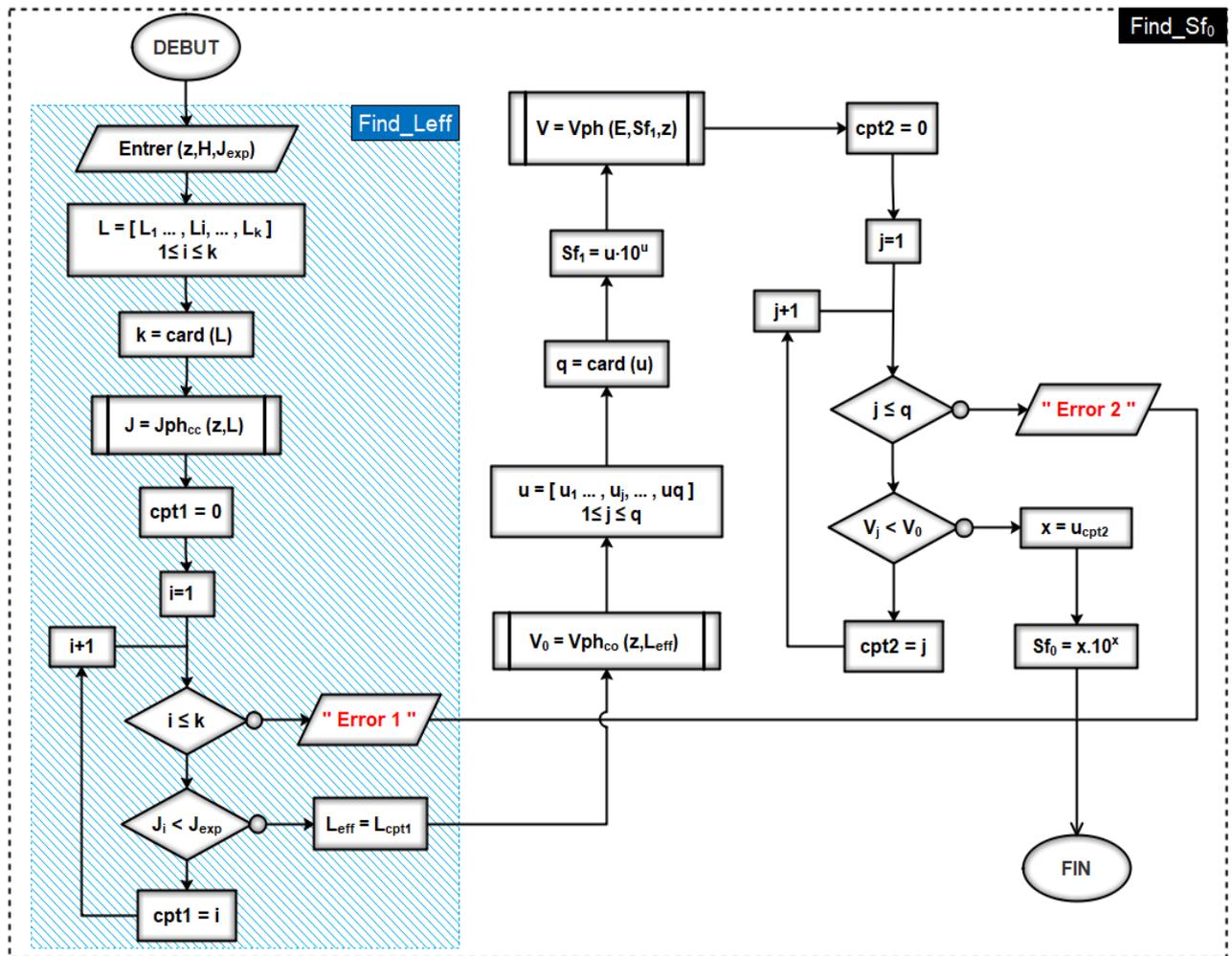


Figure 111: Logigramme de l'algorithme « *Find_Sf₀* »

Les résultats obtenus suite à l'exécution du programme de l'algorithme « *Find_Sf₀* » sous le logiciel Matlab sont illustrés par les figures 110 et 112

3.1.2.2 Calcul de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0

La figure 112 représente le calcul de la vitesse de recombinaison intrinsèque (Sf_0) pour les mêmes valeurs de champ électrique et de profondeur utilisées pour calculer la longueur de diffusion effective (L_{eff}).

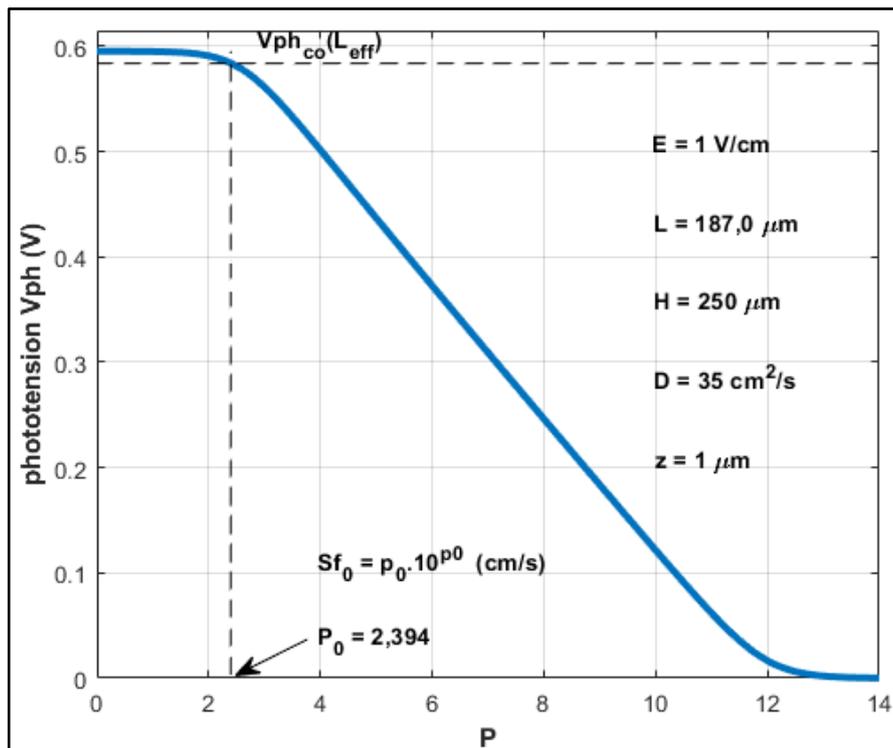


Figure 112: Détermination de la valeur de Sf_0

3.1.3 Variation de la vitesse de Sf_0 en fonction du champ électrique.

La figure 113 représente le profil de Sf_0 en fonction du champ électrique.

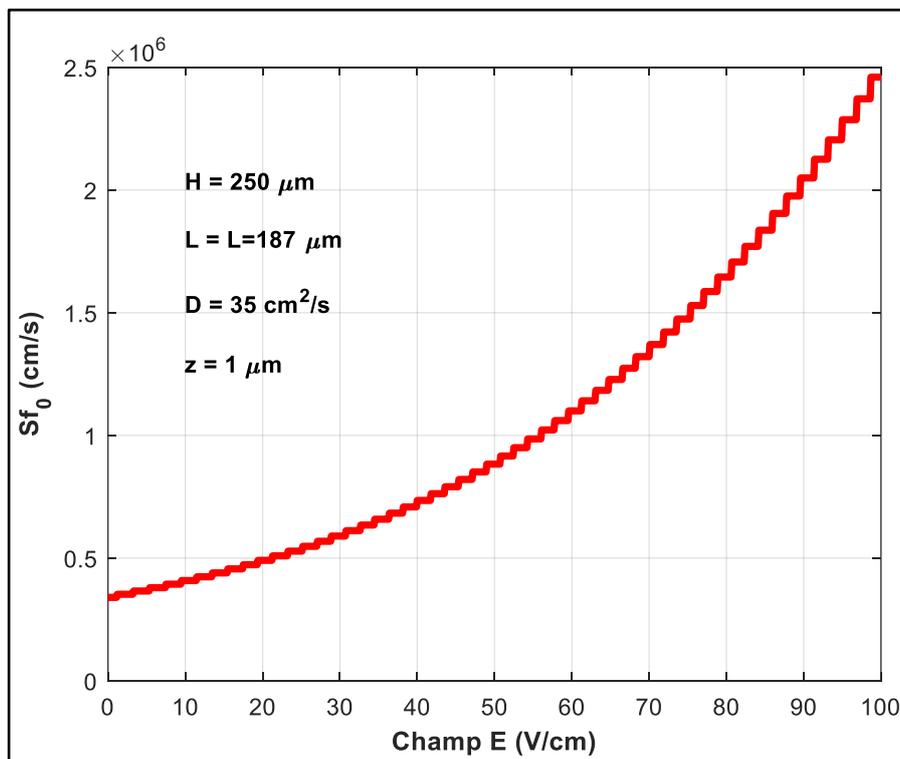


Figure 113 : Variation de Sf_0 en fonction du champ électrique.

3.1.4 Variation de la vitesse Sf_0 en fonction de la profondeur.

La figure 114 représente le profil de Sf_0 en fonction du champ électrique.

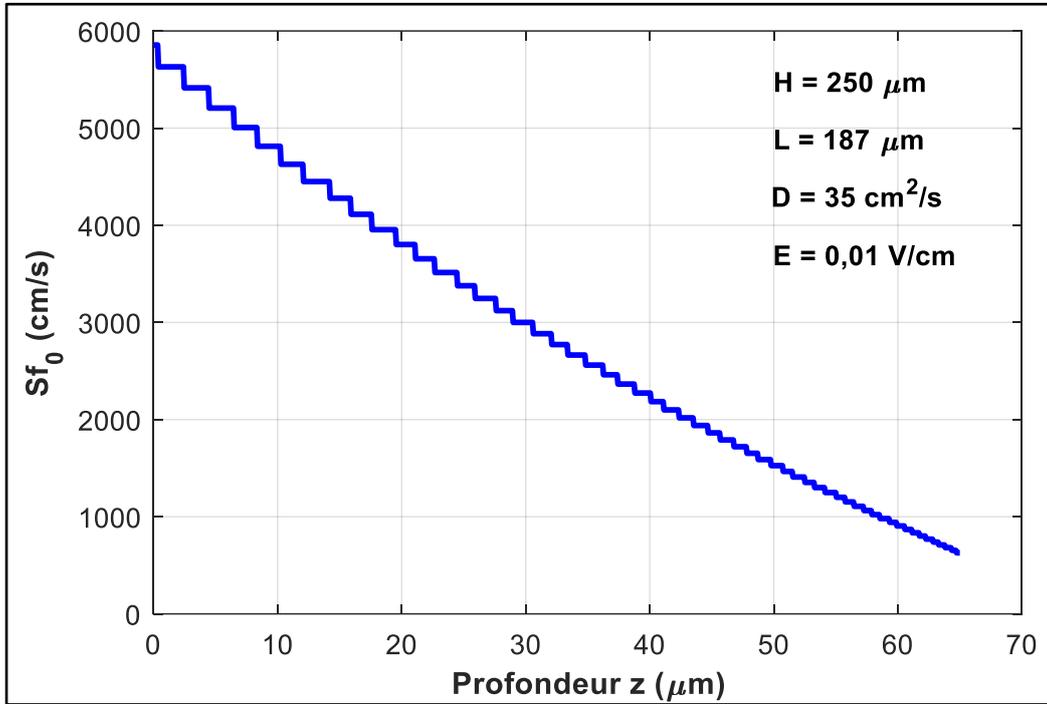


Figure 114: Variation de Sf_0 en fonction de la profondeur z .

L'augmentation du champ électrique favorise la croissance de la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs (Sf_0) tandis que l'augmentation de la profondeur diminue drastiquement Sf_0 .

3.2 PUISSANCE DE LA PHOTOPILE

La puissance électrique fournie par la photopile sous éclairage est obtenue en faisant le produit de la phototension et du courant réel collecté au circuit extérieur. Son expression est donnée par l'équation (3.1) :

$$P_{ph}(z, Sf, E, n) = I(z, Sf, E, n) \cdot V_{ph}(z, Sf, E, n) \quad (3.1)$$

$$\text{Avec} \begin{cases} \text{Courant réel: } I = J_{ph} - I_d \\ \text{Courant de diffusion: } I_d = q \cdot Sf_0 \cdot \frac{n_i^2}{N_b} \cdot \exp\left[\frac{V_{ph}(z, Sf, E, n)}{V_T} - 1\right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Courant réel: } I = J_{ph} - J_d \\ \text{Courant de diode: } J_d = q \cdot Sf_0 \cdot \frac{n_i^2}{N_b} \cdot \exp\left[\frac{V_{ph}(z, Sf, E, n)}{V_T}\right] - 1 \end{cases}$$

3.2.1 Modélisation de la puissance de la photopile.

La figure 115 représente une modélisation sous Simulink de l'équation (16)

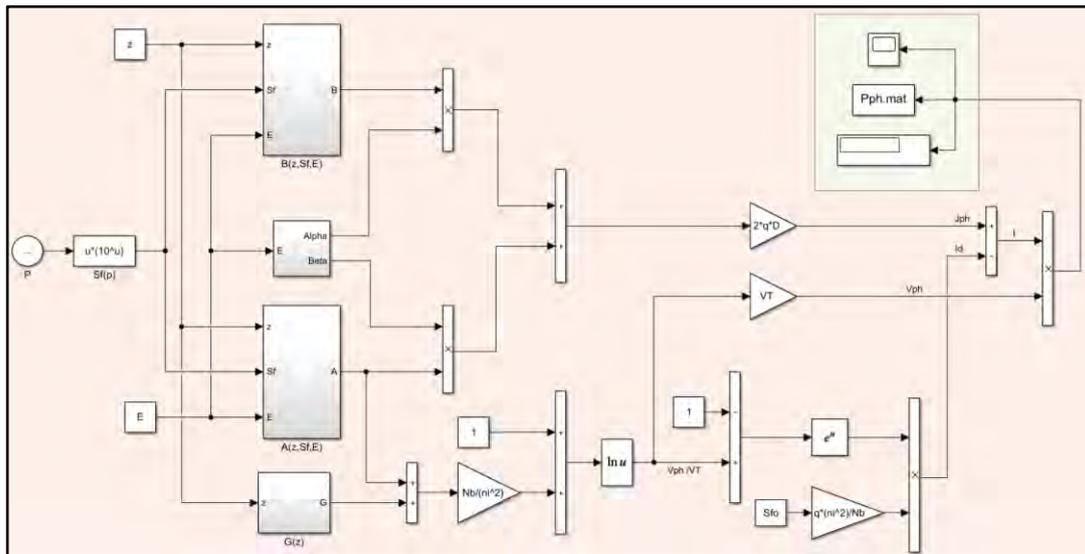


Figure 115: Schéma du modèle mathématique de la puissance.

A partir de l'équation (16), sont obtenus les figures 114 à 120. La figure 114 représente le profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) des porteurs minoritaires.

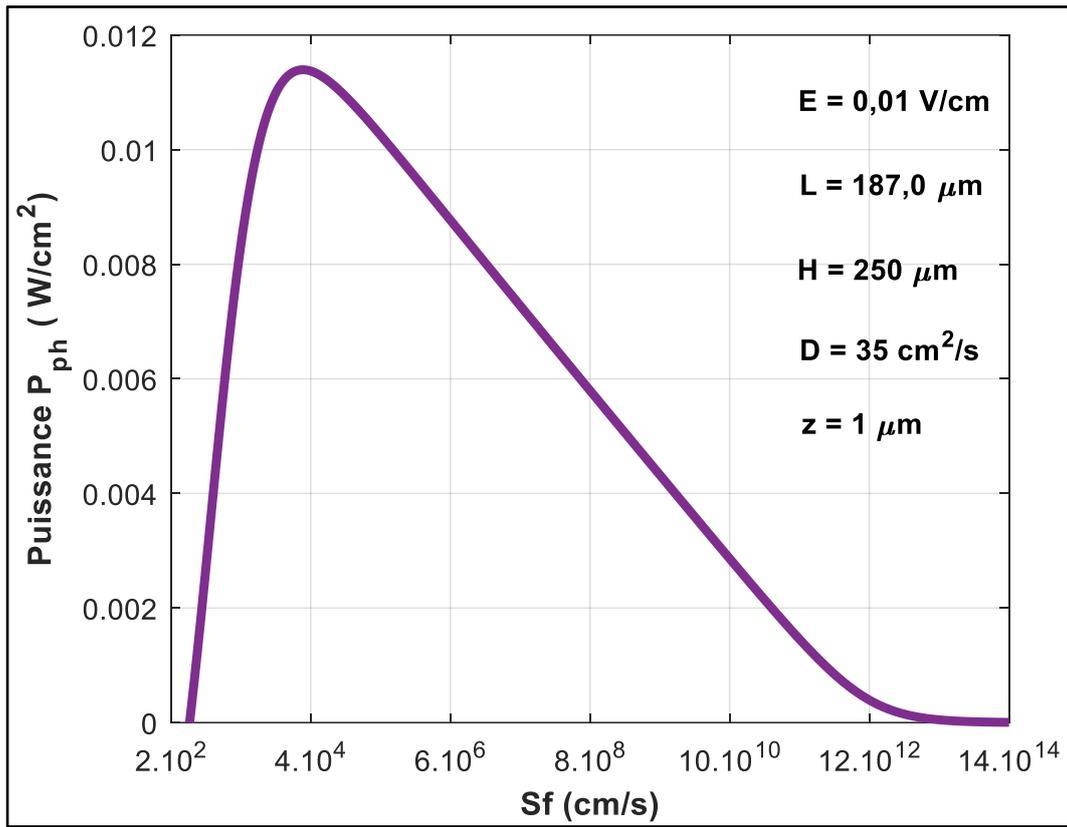


Figure 116: Profil de la puissance réelle en fonction de la vitesse Sf

La figure 117 est une représentation en 3 dimensions de la figure 116.

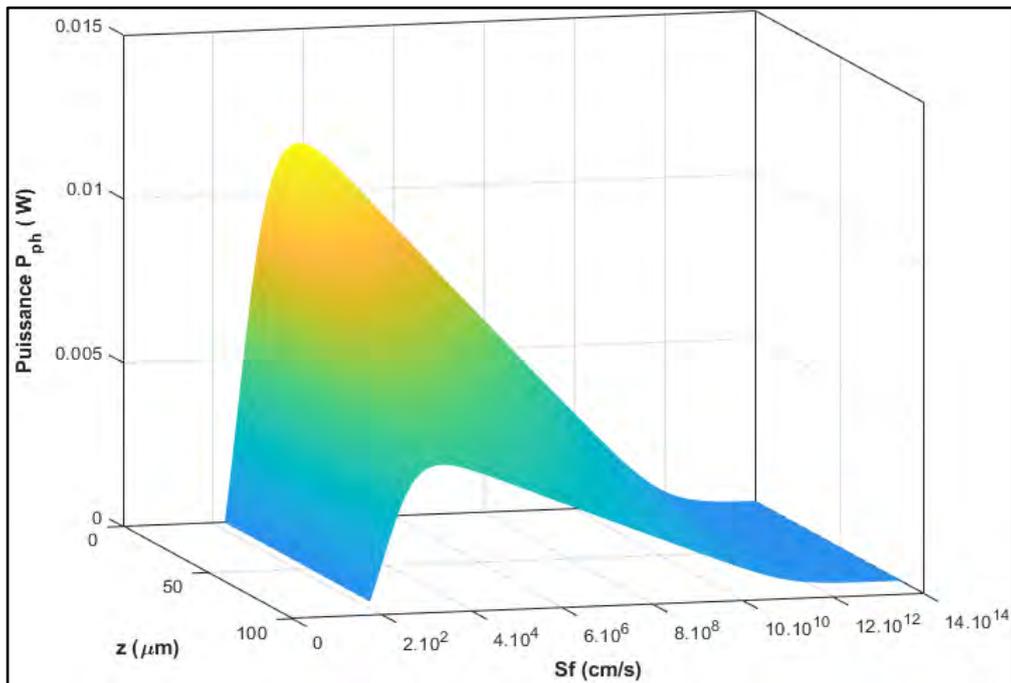


Figure 117: Profil en 3D de la puissance réelle en fonction de Sf .

3.2.2 Effet du champ électrique sur la puissance réelle

La figure 118 représente le profil de la puissance réelle en fonction de Sf pour différentes valeurs du champ électrique.

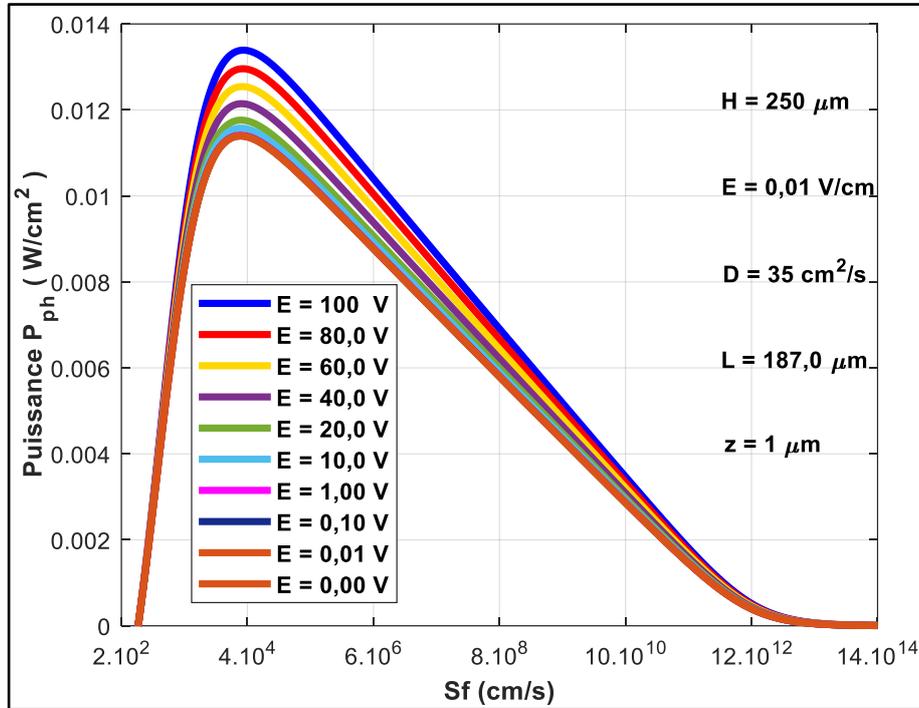


Figure 118: Profil de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs du champ E

La figure 119 est une représentation en 3 dimensions de la figure 118.

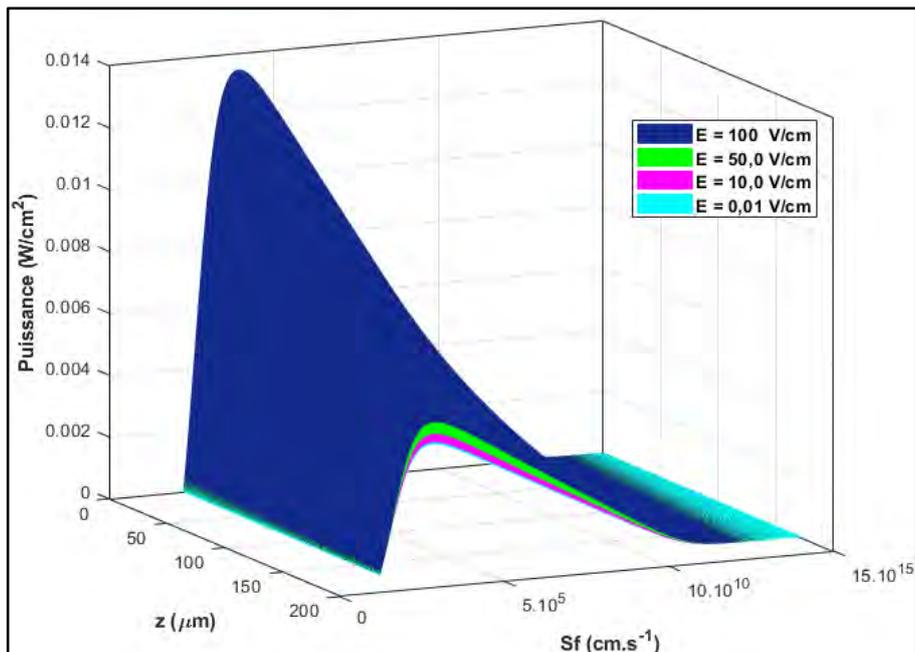


Figure 119: Profils en 3D de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de E

3.2.3 Effet de la profondeur de la base sur la puissance réelle

La figure 120 représente le profil de la puissance réelle en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de profondeur.

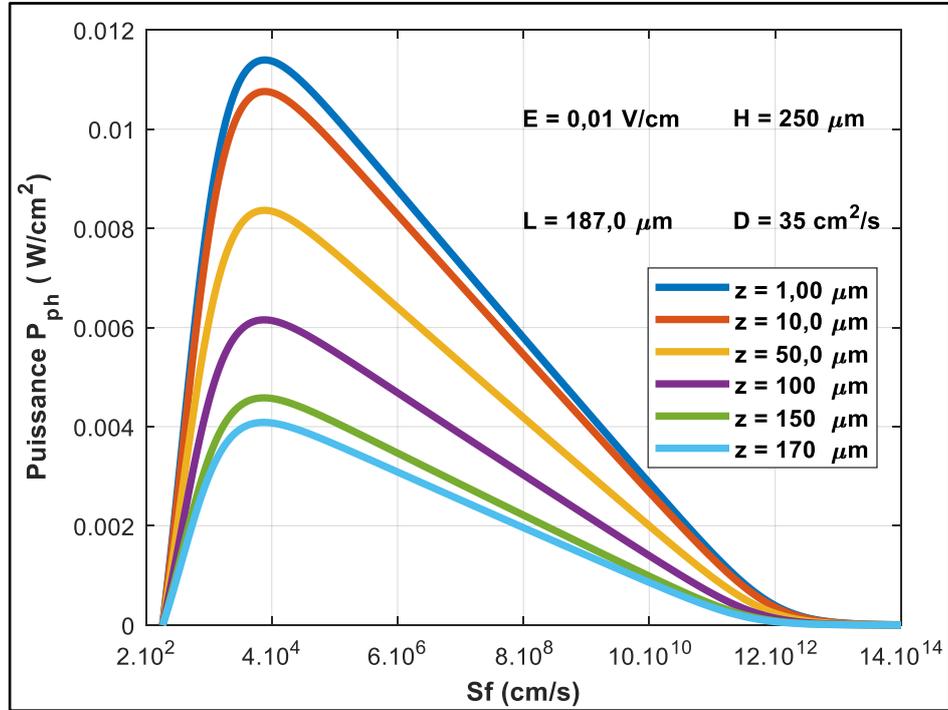


Figure 120: Profils de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de profondeur

La figure 121 est une représentation en 3 dimensions de la figure 119.

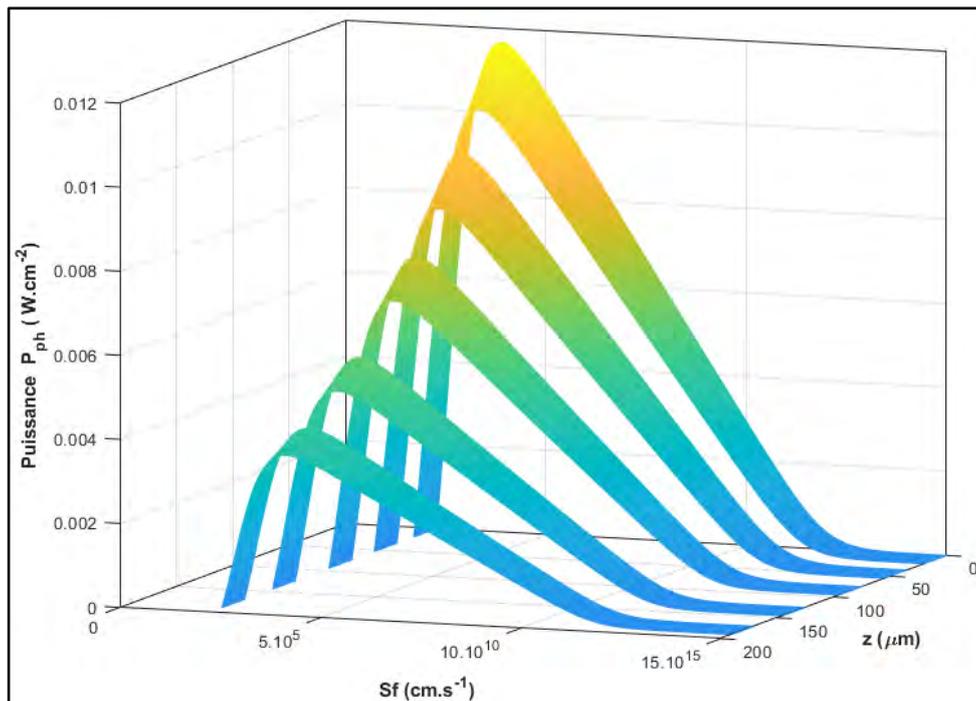


Figure 121: Profils en 3 D de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de z

3.2.4 Effet du nombre de soleil sur la puissance.

La figure 122 représente le profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) des porteurs minoritaires pour différentes valeurs du nombre de soleil.

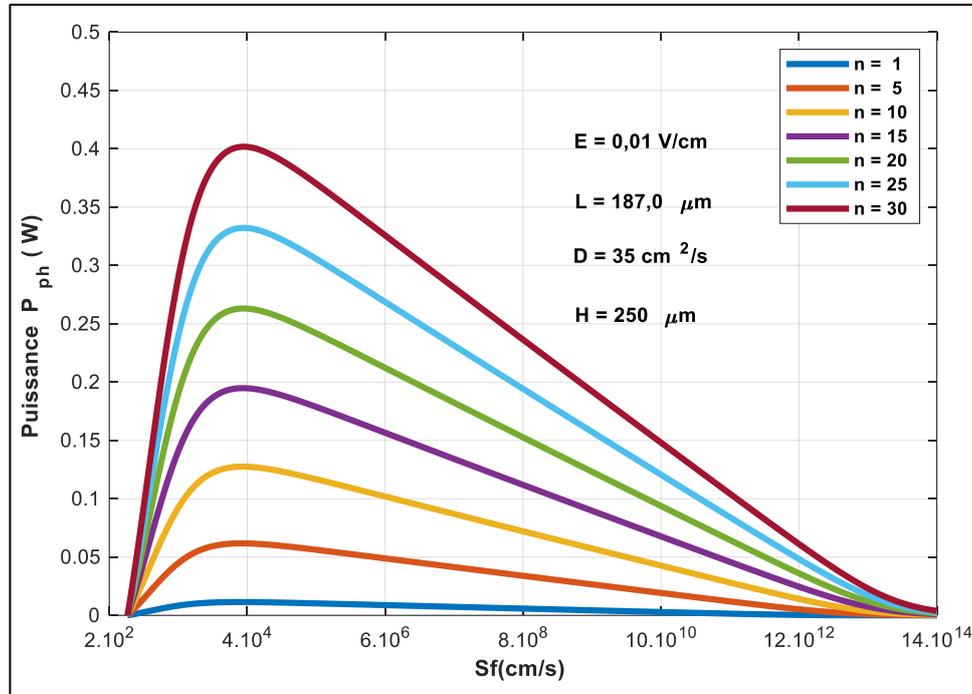


Figure 122: Profils de $P_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de profondeur

Au voisinage du circuit ouvert et du court-circuit la puissance électrique est presque nulle. Cela est dû aux faibles valeurs du courant en circuit ouvert et de la phototension en court-circuit.

Lorsque la profondeur augmente, la puissance électrique diminue à cause de la diminution du courant et de la tension. Avec cette diminution de puissance en profondeur, on peut s'attendre à une diminution du rendement de conversion de la photopile.

Lorsque le champ électrique et le nombre de soleil augmentent, la puissance électrique augmente à cause de l'augmentation du courant et de la tension. Avec cette hausse de puissance, on peut s'attendre à une augmentation du rendement de conversion de la photopile.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons déterminé en régime statique la valeur de la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs minoritaires en excès dans la base d'une photopile à jonction verticale parallèle soumise à un éclairage polychromatique. Sous les influences d'un champ de

polarisation électrique externe et la profondeur du matériau semi-conducteur nous avons noté les changements de comportements suivants de la photopile :

- L'augmentation du champ électrique favorise la croissance de la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs (Sf_0) tandis que l'augmentation de la profondeur diminue drastiquement Sf_0 .
- Au voisinage du circuit ouvert et du court-circuit la puissance électrique est presque nulle. Cela est dû aux faibles valeurs du courant en circuit ouvert et de la phototension en court-circuit.
- Lorsque la profondeur augmente, la puissance électrique diminue à cause de la diminution du courant et de la tension. Avec cette diminution de puissance en profondeur, on peut s'attendre à une diminution du rendement de conversion de la photopile.
- Lorsque le champ électrique et le nombre de soleil augmentent, la puissance électrique est amplifiée à cause de l'augmentation du courant et de la tension. Avec cette hausse de puissance, on peut s'attendre à une amélioration du rendement de conversion de la photopile.

CONCLUSION GENERALE

Au prélude de ce travail de recherche, les paramètres électriques [11,12,13] en régime statique d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle soumise à un éclairage polychromatique ont été étudiés sous l'influence d'un champ électrique de polarisation, de l'irradiation lumineuse et de la profondeur du matériau semi-conducteur. Cette première partie de notre étude met en exergue les phénomènes suivants :

- L'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction favorise la diminution de la densité des porteurs minoritaires [34,35] en excès dans la base de la photopile.
- Le champ électrique de polarisation externe et l'intensité d'irradiation lumineuse contribuent à l'amplification des paramètres électroniques de la photopile.
- L'augmentation de profondeur du matériau semi-conducteur abaisse les paramètres électroniques de la photopile.

L'exploitation de la caractéristique courant-tension obtenu dans cette partie de notre étude révèle que la photopile en question n'est pas idéale, donc présente des pertes [36,43]. Ces pertes sont caractérisées par les résistances série [43,44] et Shunt [40,45].

Dans la deuxième partie de notre recherche nous avons étudié l'influence des paramètres externes sur ces deux résistances [36,37,43,44]. A travers cette étude, les phénomènes suivants ont été observés :

- Les résistances série et shunt augmentent suite à une croissance de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf .
- Le champ électrique de polarisation externe et l'intensité d'irradiation lumineuse contribuent à la baisse des résistances série et shunt de la photopile.
- L'augmentation de profondeur du matériau semi-conducteur amplifie les résistances séries et shunt de la photopile.

Dans le souci d'obtenir des résultats fiables, nous avons considéré les conditions de validité des résistances série et shunt, en déterminant leurs valeurs en mode circuit ouvert (Rs_{co} : résistance série expérimentale) et en mode court-circuit (Rsh_{cc} : résistance shunt expérimentale). A cet effet, nous avons adopté une méthode numérique basée sur des algorithmes pour déterminer les vitesses de recombinaison limitant le phénomène de circuit ouvert (Sf_{co}) [46,47,50] et initiant le phénomène de court-circuit (Sf_{cc}) [46,49] ainsi que les deux résistances expérimentales.

Sous l'influence des paramètres exogènes, à quelques exceptions près nous avons noté des comportements similaires entre résistances (R_s et R_{sh}) et résistances expérimentales ($R_{sh_{cc}}$ et $R_{s_{co}}$) [36,37,43,44]. Les différences observées sont les suivantes :

- En mode de fonctionnement circuit ouvert l'augmentation de la profondeur du matériau semi-conducteur amplifie la résistance série, par contre en mode de fonctionnement court-circuit elle laisse invariante la résistance shunt.
- En mode de fonctionnement circuit ouvert l'augmentation du nombre de soleil diminue la résistance série, contrairement en mode de fonctionnement court-circuit elle amplifie la résistance shunt.

En situation de court-circuit la photopile est le siège de recombinaisons radiatives qui favorisent les pertes liées au fuite de courant.

Dans la dernière partie de notre recherche nous nous sommes intéressés aux pertes relatives au phénomène de recombinaison intrinsèque [51] des porteurs de charges minoritaire en excès dans la base de la photopile. La détermination de la vitesse intrinsèque ne saurait se faire sans la connaissance de la longueur de diffusion effective L_{eff} [54,55] des porteurs. A cet effet, nous avons apporté notre contribution en proposant une méthode innovante basée sur un algorithme nommée « L_{eff} finder » [53] qui permet de déterminer la longueur de diffusion effective des porteurs. Les effets des paramètres exogènes observées sur la vitesse Sf_0 sont :

- L'augmentation du champ électrique favorise la croissance de la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs (Sf_0) [51]. Le champ de polarisation a pour but de créer davantage de porteurs ce qui explique l'augmentation des recombinaisons des paires électrons-trous.
- l'augmentation de la profondeur diminue drastiquement Sf_0 . La vitesse Sf_0 est une vitesse surfacique, la structure cristalline du semi-conducteur limite le degré de liberté des électrons situés en profondeur dans le cristal et par conséquent, les recombinaisons électrons-trous se font rares en profondeur du matériau.

La puissance réelle de la photopile constitue le dernier point abordé dans cette partie. A l'instar des autres paramètres électroniques étudiées dans le premier chapitre les mêmes phénomènes ont été observés :

- Le champ électrique de polarisation externe et l'intensité d'irradiation lumineuse contribuent à l'amplification de la puissance de la photopile.
- L'augmentation de profondeur du matériau semi-conducteur diminue la puissance de la photopile.

En somme, cette étude nous a permis d'évaluer en régime statique les effets du champ électrique, de l'irradiation lumineuse et de la profondeur du matériau semi-conducteur sur les grandeurs caractéristiques d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle. Certes, le champ de polarisation et le l'irradiation contribuent à l'amplification des paramètres électriques de la photopile, mais paradoxalement le champ électrique augmente le phénomène de recombinaison intrinsèque, en mode court-circuit, l'irradiation baisse les performances de la photopile en favorisant l'apparition de recombinaison radiative. Toutefois, dans le but d'optimiser les performances de la photopile il s'avère donc nécessaire de trouver un compromis sur l'application de ces paramètres.

En guise de continuité à ce travail, la détermination du rendement et du facteur de qualité de la photopile permettra d'identifier l'impact réel des paramètres exogènes sur le fonctionnement de la photopile. La photopile étant constituée par des matériaux semi-conducteur, il est primordial d'évaluer l'effet de la température sur les grandeurs caractéristiques pour mieux évaluer les pertes intrinsèques et extrinsèques responsables de la baisse des performances des cellules solaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. IEA, World Energy Outlook 2007, p.93
- [2]. E. Becquerel (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous les rayons solaires ». Comptes Rendus. 9: 561-567.
- [3]. R. Williams (1960). "Effet photovoltaïque de Becquerel dans les composés binaires". Le Journal of Chemical Physics. 32 (5): 1505-1514. Bib code: 1960JChPh...32.1505W. doi: 10.1063 / 1.1730950.
- [4]. A. Einstein, "Über einen die erzeugung und verwandlung des liches betreffenden heuristischen gesichtspunkt", Annalen der Physik, pp. 322, 132–148, 1905.
- [5]. D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J. Appl. Phys., 1954, Vol. 25, pp. 676-677.
- [6]. R. Lago-Aurrekoetxea, C. Del Canizo, I. Pou, A. Luque, "Fabrication Process for Thin Silicon Solar Cells" Proc. 11th European PVSEC, 2, pp: 1519-1522, Munich 22-26 October 2001.
- [7]. JE. FABRE, M. MAUTREF Caractérisation physique des cellules solaires au silicium par étude de réponse spectrale Acta Electronica 18 (4) P 331 (1975)
- [8]. S. Bau, T. Kieliba, D. Oswald, A. Hurre, "Chemical Vapour Deposition of Silicon on Ceramic Substrates for Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells", Proc. 11th European PVSEC, 2, pp: 1575-1577, Munich 22-26 October 2001.
- [9]. A Schneider, C. Gerhards, F. Huster, W. Neu, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, R. J. S. Young, A. G. Prince, J. A Raby, A. F. Carroll, "Al BSF for Thin Screen printed Multicrystallines Si Solar Cells", Proc. 17th European PVSEC, 1, pp: 1575 -1577 Munich 22-26 October 2001.
- [10]. A. Ricaud, 'Photopiles Solaires : De la physique de la Conversion Photovoltaïque aux Filières, Matériaux et Procédés', Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp : 332, 1997.
- [11]. H. J. Möller, "Semiconductors for solar cells", Artech house, 29, pp: 343, 1993.
- [12]. B. EQUER, "Energie Solaire Photovoltaïque", Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, 1, pp : 238, Ellipses, Unesco, 1993.
- [13]. S. Bowden and A. Rohatgi, "Rapid and Accurate Determination of Series Resistance and Fill Factor Losses in Industrial Silicon Solar Cells", Proc. 17th European PVSEC, (Munich, 2001), pp. 1802-1806.
- [14]. Dhariwal S.R and Mehrotra D.R., "Solar Cells", 25, pp. 223-23, 1988.

- [15]. S. K. Sharma, S. N. Singh, B. C. Chakravarty and B. K. Das "Determination of minority Carriers Diffusion Length in p- Silicon. Wafer by Photocurrent Generation Method" J. Appl. Phys. 60 (10) pp. 3550- 52, 1986.
- [16]. D. L. Meier, Hwang Jeong-Mo, R. B. Campbell, I.E.E.E Transactions on Electron Devices, 35(1), pp. 70-78, 198.
- [17]. G. C. Jain, S. N. Singh and R. Kotnala. " Diffusion Length Determination in n+ p p+ Structure Based in silicon Solar Cells from the intensity Dependence of the short circuit Current for illumination from the p+ Side" Solar Cells 8 pp. 239-48, 1983.
- [18]. S. R. Lederhendler and L. J. Giacoletto. Proc. IRE 43, P 477 (1955).
- [19]. A. Jakubowicz. Solid. State Electr vol. 23, pp 635-39 (1986).
- [20]. L. Samaj, "Lifetime of Minority carriers in Polycrystalline Semiconductors" Phys. Stat. Vol (a) 101, 137pp. 137- 141 (1987).
- [21]. F. N. Conzalez and A. Neugroschell. IEE.E Trans. Elect. D. vol. ED. 31 pp 413-16 (1984).
- [22]. A. Romanowsky and D. B. Wltry J. Appl. Phys. 60 (8), 5 pp 2910-13 (1986).
- [23]. A. Neugroschell, J. P. Chen, S. C. Pao and F. A. Lindholm Proc. 13th Photov. Sp. Conf. 70 (1978). F. Berz and H. K. Kuntzen Solid. State Electr. Vol 19, p 437 (1976).
- [24]. J. F. Wise, "Vertical junction hardened solar cell," U.S patent 3690953, 1970.
- [25]. A. Gover and P. Stella, "Vertical multijunction solar-cell one dimensional analysis," IEEE Transactions on electron devices, 21(6), pp. 351-356, 1974.
- [26]. M. A. Green, "Silicon solar cells: Advanced principles & practice," Center for photovoltaic devices and systems university of New South Wales, pp. 259-26, 1995.
- [27]. S. Madougou, F. Made, M.S. Boukary and G. Sissoko, "I -V Characteristics For Bifacial Silicon Solar Cell Studied Under a Magnetic Field," Advanced Materials Research, Vol.18-19, pp. 303-312, 2007.
- [28]. M.I. Ngom, B. Zouma, M. Zoungrana, M. Thiame, Z.N. Bako, A. G. Camara and G. Sissoko, "Theoretical study of a parallel vertical multi-junction silicon cell under multispectral illumination: influence of external magnetic field on the electrical parameters," International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), ISSN: 2250-3536, 2(6), pp. 101- 109, 2012.
- [29]. M.S. Diouf, I. Gaye, A. Thiam, M.F.M. Fall, I. Ly and G. Sissoko, "Junction recombination Velocity Induced Open Circuit Voltage For a Silicon Solar Cell Under External Electric Field," Current Trends in Technology and Science, ISSN : 2279- 0535 3(5), pp. 372-375, 2014.
- [30]. M. Zoungrana, B. Dieng, O.H. Lemrabort, F. Touré, M.A. Ould El Moujtaba, M.L. Sow and G. Sissoko, "External Electric Field Influence on Charge Carriers and Electrical Parameters of

- Polycrystalline Silicon Solar Cell,” *Research Journal of applied sciences, Engineering and technology*, 4(17), pp. 2967-2972, 2012.
- [31]. A. Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A. S. Maiga and G. Sissoko, “Three-dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell: the influence of the applied magnetic field on the electrical parameters,” *Semiconductor Science and technology*, 26(9), pp. 473-476, 2011.
- [32]. Nd. Thiam, A. Diao, M. Ndiaye, A. Dieng, A. Thiam, M. Sarr, A.S. Maiga and G. Sissoko, “Electric equivalent models of intrinsic recombination velocities of a bifacial silicon solar cell under frequency modulation and magnetic field effect,” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(22), pp. 4646-4655, 2012.
- [33]. O. Sow, I. Zerbo, S. Mbodji, M.I. Ngom, M.S. Diouf and G. Sissoko, “Silicon solar cell under electromagnetic waves in steady state: electrical parameters determination using the i-v and p-v characteristics,” *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(4), pp. 230 – 246, 2012.
- [34]. N. Le Quang, , M. Rodot, J. Nijs, M. Ghannam and J. Coppys, 1992. Réponse spectrale de photopiles de haut rendement au silicium multicristallin. *J. Phys. III France*, 2 : 1305-1316.
- [35]. J. Furlan, and S. Amon, 1985. Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electron*, 28: 1241-1243.
- [36]. M. Bashahu and A. Habyarimana, “Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance,” *Renewable Energy*, 6(2), pp. 129- 138, 1995.
- [37]. D. Pysch, A. Mette and S.W. Glunz, “A review and comparison of different methods to determine the series resistance of the solar cells,” *Solar Energy Materials & solar cells*, 91, pp. 1698 - 1706, 2007.
- [38]. S. N. Mohammad, “An alternative method for the performance analysis of silicon solar cells,” *J. Appl. Phys*, 62(2), pp. 767-772, 1987.
- [39]. F.I. Barro, I. Zerbo, O.H. Lemrabott, F. Zougmore and G. Sissoko, “Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light,” *Proc.17th European PVSEC Munich* 36, pp. 368-371, 2001.
- [40]. G. Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A. L. Ndiaye, “Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell,” *Renewable Energy* 3, pp. 1487-1490, 1996.
- [41]. G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot and P. Mialhe, “Constant Illumination- Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization,” *11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, poster 1B, 12-16, Montreux, Switzerland, pp. 352-354, 1992.

- [42]. H. L. Diallo, A. S. Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, "New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modeling study of a polycrystalline silicon solar cell," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 42, pp. 193- 211, 2008.
- [43]. M. K. El-Adawi and I.A. Al-Nuaim, "A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance – new approach," *Vacuum*, 64, pp. 33- 36, 2002.
- [44]. K. Bouzidi, M. Chegaar and A. Bouhemadou, "Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance," *Solar Energy Materials & solar cells*, 91, pp. 1647- 1651, 2007.
- [45]. S. Mbodji, I. Ly, H.L. Diallo, M.M. Dione, O. Diasse, G. Sissoko, (2012). Modeling Study of N+/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (S_f). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 4. 1-7.
- [46]. I. Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Guèye, G. Sissoko, (2013). Concept of Recombination Velocity S_{fcc} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 5. 192-202. 10.19026/rjaset.5.5105.
- [47]. P. Marcel, S. Diouf, A. Thiam, P. Khady, P. Moussa, I. Ngom, P. Doudou, G. Sissoko, G. Sahin. (2015). Determination of The Junction Surface recombination Velocity Limiting The Open Circuit (S_{foc}) For A Bifacial Silicon Solar Cell Under External Electric Field.
- [48]. I. Wade, M. Ndiaye, A. Ehemba, D. Diallo, (2015). Junction Recombination Velocity Determination Initiating The Short-Circuit And Limiting The Open Circuit Of A Monofaciale Solar Cells Containing Thin Film Cu (In,Ga)Se₂(Cigs) Under Horizontal Illumination In Static Mode. *International Journal of Engineering Sciences & Research*. 04. 246-250.
- [49]. I. ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Guèye and G. Sissoko "Concept of Recombination Velocity S_{fcc} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition" *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 2013 1:203-208
- [50]. M. Sitor Diouf, I. Gaye, A. Thiam, M. F. M. Fall, I. Ly, G. Sissoko "Junction recombination velocity induced open circuit voltage for a silicon solar cell under external electric field". *Current Trends in Technology & Sciences (CTTS)*. Volume 3, Issue: 5, (Aug-Sept 2014), pp372-375
- [51]. E. H. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. Ly Diallo, M. Ndiaye, G. Sissoko "Study of the intrinsic recombination velocity at the junction of silicon solar under frequency modulation

- and irradiation” J Appl Math Phys, 3 (2015), pp. 1522-1535, 10.4236/jamp.2015.311177
Published Online November 2015 in Sci Res. <http://www.scirp.org/journal/jamp>,
- [52]. I. Ly, O.H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko, ‘‘Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d’une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique’’, International Journal of Emerging Trends Technology in Computer Science (IJETTCS), 1(3), pp. 2278-6856, 2012.
- [53]. M. A. Ba, S. Guèye, A. Diao, I. Diatta, Y. Traore, M. L. Ba, B. Dione, G. Sissoko ‘‘Minority Carriers’ Diffusion Length Determination in the Base of a Silicon Vertical Junction Solarcell by Use of the Short-Circuit Current Calibration Curve Technique’’ Page No. 138-145.
- [54]. F. Ahmed, and S. Garg, 1986. Simultaneous determination of diffusion length, lifetime and diffusion constant of minority carriers using a modulated beam. International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy Internal Report.
- [55]. A. Diao, N. Thiam, M. Zoungrana, M. Ndiaye, G. Sahin, and G. Sissoko, (2014) Diffusion Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits. World Journal of Condensed Matter Physics, 4, 84-92. <http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013>.

EFFET DU CHAMP ELECTRIQUE SUR UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTION VERTICALE PARALLELE SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE

THESE DE DOCTORAT UNIQUE EN PHYSIQUE

Option : Énergie Solaire

Présenté par

Mr. Mamour Amadou BA

Soutenu publiquement le 25 / 07 / 2020 devant le jury composé de :

Président	Grégoire SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Rapporteurs	Moustapha DIENG	Professeur Titulaire	FST/UCAD
	Biram DIENG	Maître de Conférences	UABD
Examineurs	Ibrahima LY	Professeur Titulaire	EPT/THIES
	Amadou DIAO	Maître de Conférences	FST/UCAD
	Mor NDIAYE	Maître Assistant	FST/UCAD
	Ibrahima DIATTA	Assistant	FST/UCAD
Directeur de thèse	Mamadou WADE	Professeur Titulaire	EPT/THIES
Invité	Masse Samba DIOP	Docteur	ASER

Résumé :

Dans la première partie de ce travail nous avons déterminé en régime statique les effets des paramètres exogènes (champ électrique externe, nombre de soleil et profondeur du matériau) sur les grandeurs électroniques caractéristiques d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairage polychromatique.

Dans la deuxième partie nous avons effectué une étude similaire sur les paramètres macroscopiques (résistance shunt et résistance série). Afin de contourner les limites observées dans la résolution analytique des relations permettant d'obtenir les vitesses de recombinaison initiant le court-circuit (Sf_{CC}), limitant le circuit ouvert (Sf_{CO}) et les résistances expérimentales shunt et série, nous avons adopté une méthode améliorée basée sur des algorithmes de la technique calibration des courbes théoriques et expérimentales en court-circuit et en circuit ouvert.

Enfin, dans l'ultime partie de ce travail nous avons utilisé les procédés adoptés dans la partie précédente pour déterminer l'influence des paramètres exogènes sur les grandeurs intrinsèques (longueur de diffusion effective L_{eff} et vitesse intrinsèque de recombinaison Sf_0 des porteurs minoritaires). Les grandeurs intrinsèques contribuent majoritairement à la baisse de performance des photopiles, afin de mieux les appréhender nous avons déterminé des corrélations entre ces grandeurs et les paramètres exogènes. Ainsi La connaissance de Sf_0 nous permet de trouver la puissance réelle de la photopile.

Mot clés : Photopile au silicium-jonction verticale - Recombinaison - Champ et paramètres électriques