



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Par :

M^{elle} BENFRID Farah

Sur le thème

Optimisation et simulation de l'efficacité des cellules solaires industrielles à émetteurs enterrés à base de silicium multicristallin

Soutenu publiquement le 02 juillet 2022 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme RAHMOUN Khadidja	Professeur	Université de Tlemcen	Présidente
Mme BENABADJI Batoul	M.C.B	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme SARI ALI Inchirah	M.C.B	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année Universitaire : 2021 ~ 2022

" وما أوتيتم من العلم إلا قليلا "


الإسراء (85)



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents qui au long de tout mon cursus se sont sacrifiés pour m'offrir bien être, compréhension, réconfort et amour.
Je vous dois tout, pour ce que je suis et ce que je serai au futur.
J'espère que je pourrai prendre soin de vous autant que vous l'avez fait pour moi.*



*A mes Sœurs et mes frères sans qui, la vie n'aurait aucun charme,
vous me remplissez de joie et de bonheur, je vous aime fort.*

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes amis.

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent mémoire.

Ce travail a été effectué au Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen.

Avant tout propos, je tiens profondément à remercier Madame BENABADJI Batoul, Maître de Conférences classe B à l'université de Tlemcen, pour la considération et la confiance qu'elle m'a accordé. Elle a su, durant cette période, partager avec moi ses connaissances scientifiques et pédagogiques.

Je remercie sincèrement Madame RAHMOUN Khadidja professeur à l'université ABOU BAKR BELKAID de l'honneur qu'elle me fait d'avoir accepté de présider le jury de cette mémoire.

Je remercie également madame SARI ALI Inchirah pour avoir accepté d'examiné ce travail et faire partie de ce jury.

Je remercie tous les enseignants qui, grâce à eux, nous sommes là aujourd'hui.

Enfin, un grand merci à toute ma famille qui m'a toujours soutenue et épaulée pour la concrétisation de ce travail.

Liste des acronymes

Acronymes	Signification
Al₂O₃	Oxyde d'aluminium
AM0	Air Mass hors atmosphère
AM1.5	Air Mass au niveau de la mer
AM1.5D	Air Mass direct
AM1.5G	Air Mass global
AsH₃	Arsine
a-Si:H	Silicium amorphe hydrogéné
B₂H₆	Diborane
BSF	Back Surface Field
C	la vitesse de la lumière
CZ	Czochralski
e	la charge électronique
E_g	l'énergie du gap
E_{ph}	L'énergie du photon
EQE	Le rendement quantique Externe
ERFC	fonction d'erreur complémentaire
EWT	Emitter Wrap Through
FF	Facteur de forme
F_n	niveau de Fermi dans la région n
F_p	niveau Fermi dans la région p
FSF	Front Surface Field
FZ	Float Zone
h	la constante de Planck
HCl	acide chlorhydrique
HF	Acide Fluorhydrique
HfO₂	Oxyde d'hafnium
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
IBC	Interdigitated Back Contacts
I_{cc}	Courant de court-circuit
I_d	le courant de saturation inverse de la diode D
IPCE	incident Photon-to-Current Conversion Efficiency
I_{ph}	le photocourant
IQE	Le rendement quantique Interne
ITO	l'oxyde d'indium et d'étain
MWA	Metallization Wrap Around
MWT	Metallization Wrap Through
n	le facteur d'idéalité de diode
nc-Si:H	le silicium nanocristallin
nc-SiO_x:H	l'oxyde de silicium nanocristallin hydrogéné
OTC	Oxyde Transparent Conducteur
P₂O₅	phosphorus pentoxide

PERC	Passivated Emitter Rear Cell
PERF	Passivated Emitter, Rear Floating-junction
PERL	Passivated Emitter Rear Locally Diffused
PERT	Passivated Emitter Rear Totally diffused
PH₃	phosphine
POCl₃	oxychlorure de phosphore
q	charge élémentaire
R (λ)	le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ
RCC	Rear Contact Cell
R_s	la résistance série
R_{sh}	la résistance shunt
SHJ	cellules solaire à hétérojonction de silicium
SiN_x	nitride de silicium
SiN_x : H	silicium hydrogéné
SiO₂	Oxyde de silicium
SRH	Shockley-Read-Hall
V	la tension aux bornes de la cellule
V_{co}	Tension de circuit ouvert
V_d	La tension de diffusion
V_n	Le potentiel dans la région n
V_p	Le potentiel dans la région p
V_t	la tension thermique
ZCE	Zone de charge d'espace
η	Le rendement
λ	la longueur d'onde
P_{in}	Puissance incidente
J_{cc}	la densité de courant de Court-circuit
θ_h	L'angle d'incidence par rapport à l'horizon
θ_z	L'angle d'incidence par rapport au zénith
φ	l'éclairement reçu par l'échantillon

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : La cellule solaire au silicium multicristallin</i>	1
1. Introduction	6
2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	6
2.1. Le spectre solaire.....	6
2.2. L'irradiation solaire	7
3. La jonction PN.....	8
4. L'effet photovoltaïque.....	9
5. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	10
6. Les paramètres électriques caractérisant une cellule PV.....	11
6.1. La modélisation électrique de cellule solaire.....	11
6.2. Les Paramètres photovoltaïques	12
6.2.1. Le courant de court-circuit I_{cc}	12
6.2.2. La tension du circuit ouvert V_{co}	12
6.2.3. La puissance maximale P_{max}	12
6.2.4. Le facteur de forme FF.....	13
6.2.5. Le rendement η	13
6.2.6. Le rendement quantique Externe EQE.	13
6.2.7. Le rendement quantique Interne IQE.	14
7. Les pertes fondamentales et technologiques d'une cellule PV	14
7.1. Les pertes fondamentales.....	14
• Absorption incomplète des photons	14
• Excès d'énergie des photons	14
• Facteur de tension	14
• Facteur de forme	14
7.2. Les pertes technologiques.....	14
• Pertes optiques	14
• Pertes par recombinaison.....	15
• Pertes résistives	16
8. Conclusion.....	16

Bibliographie du chapitre I	17
<i>Chapitre II : La structure à contacts arrières</i>	19
1. Introduction	21
2. Les types de cellules solaires au silicium	21
2.1. Les structures à contact localisé PERC	21
2.2. Cellules solaires à contact arrière interdigitées (IBC)	22
2.3. La structure HIT	23
2.4. Structure d'une cellule solaire EWT	24
3. Structure à contacts en face arrière	25
4. Formation de l'émetteur dans une cellule photovoltaïque	27
5. Les procédés de diffusion	29
5.1. A partir de sources gazeuses	29
5.2. A partir de sources liquides	30
5.3. A partir de sources solides.....	30
6. Diffusion des impuretés dans le silicium.....	31
7. Les défauts ponctuels dans le silicium	31
8. Mécanisme de diffusion dans le silicium.....	32
8.1. Mécanisme lacunaire.....	32
8.2. Mécanisme interstitiel.....	32
9. Choix du type de substrat	33
10. Le nettoyage de surface	33
11. Critères pour l'optimisation des cellules au silicium.....	34
12. Conclusion.....	35
 Bibliographie du chapitre II.....	 36
 <i>Chapitre III : Simulation des cellules solaires à contacts arrières</i>	 40
I. Introduction.....	41
II. Présentation des programmes PC1D et PC3D	41
1. Aperçu sur le logiciel PC1D.....	41
1.1. Paramètres du dispositif (Device)	41
1.2. Paramètres des régions	42
1.3. Paramètres d'excitation.....	41
1.4. Résultats.....	41
2. Aperçu sur le logiciel PC3D.....	44
2.1. Feuilles de calcul.....	44
2.1.1. La feuille « Dashboard »	44
2.1.2. La feuille « Device »	45

2.1.3.	La Feuille « Recombinaison »	48
2.1.4.	La feuille « Illumination »	48
2.1.5.	La feuille «Models»	49
III.	Simulation et optimisation.....	51
1.	La structure simulée	51
2.	Variation du dopage du substrat	52
3.	Variation de l'épaisseur du substrat	57
4.	Variation du dopage de l'émetteur	59
5.	La structure à contacts arrières optimale	62
5.1.	Caractéristique (I-V) de la structure à contacts arrières interdigitée	62
5.2.	La réponse spectrale	62
5.3.	Les valeurs des pertes le rendement optimales	62
IV.	Conclusion	64
	Bibliographie du chapitre III	65
	<i>Conclusion générale et perspectives</i>	67

Résumé :

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus attrayante et la plus intéressante parmi les énergies renouvelables. Elle concerne la transformation directe de la lumière du soleil (photons) en électricité grâce à des cellules photovoltaïques.

L'objectif de ce travail est d'étudier les cellules solaires photovoltaïques à émetteurs enterrés où tous les contacts sont en face arrière (la face non éclairée).

Dans le premier chapitre, nous allons rappeler les notions préliminaires sur le rayonnement solaire et le principe de fonctionnement des cellules solaires conventionnelles. Nous aborderons par la suite les paramètres électriques caractéristiques des cellules conventionnelles et les différentes sources de pertes influençant le rendement de conversion.

Dans le second chapitre, nous allons exposer des différentes technologies sur lesquelles se basent les cellules solaires à haut rendement (PERC, IBC, EWT, MWT...) et l'importance de la formation et la diffusion de l'émetteur dans la fabrication des cellules solaires. Nous décrirons cette technique en détail. Nous avons également abordé les mécanismes de diffusion dans le silicium, le choix du type de substrat et les différents critères permettant la fabrication de cellules à hauts rendements.

Finalement, le troisième chapitre sera consacré à la simulation numérique de la cellule solaire en silicium multicristallin à contacts arrières. Une étude sur l'influence des différents paramètres géométriques et physiques sera menée afin de comprendre le fonctionnement de ce type de cellules pour atteindre un rendement maximal. Nous nous intéressons à l'optimisation grâce à la simulation par le simulateur numérique PC3D qui peut nous aider à déterminer des paramètres critiques des cellules photovoltaïques à contacts arrières afin d'augmenter le rendement et réduire ainsi le coût de fabrication.

Mots clés : cellules solaires ; contacts arrières ; émetteur enterré, simulation numérique ; optimisation ; PC3D

Abstract:

Solar energy is the most attractive and interesting source of energy among renewable energies. It concerns the direct transformation of sunlight (photons) into electricity using photovoltaic cells.

The objective of this work is to study photovoltaic solar cells with buried emitters where all the contacts are on the rear face (the unlit face).

In the first chapter, we will recall the preliminary notions on solar radiation and the principle of operation of conventional solar cells. We will then discuss the characteristic electrical parameters of conventional cells and the different sources of losses influencing the conversion efficiency.

In the second chapter, we will expose the different technologies on which high-efficiency solar cells are based (PERC, IBC, EWT, MWT, etc.) and the importance of the formation and diffusion of the emitter in the manufacture of the cells solar. We will describe this technique in detail. We also discussed the mechanisms of diffusion in silicon, the choice of the type of substrate and the different criteria allowing the manufacture of high-efficiency cells.

Finally, the third chapter will be devoted to the numerical simulation of the multicrystalline silicon solar cell with rear contacts. A study on the influence of different geometric and physical parameters will be conducted in order to understand the functioning of this type of cells to achieve maximum efficiency. We are interested in optimization through simulation by the PC3D digital simulator which can help us determine critical parameters of photovoltaic cells with rear contacts in order to increase efficiency and thus reduce manufacturing costs.

Keywords: solar cells; back contacts; buried emitter, numerical simulation; optimization; PC3D

ملخص:

الطاقة الشمسية هي مصدر الطاقة الأكثر جاذبية وإثارة للاهتمام بين الطاقات المتجددة. يتعلق الأمر بالتحويل المباشر لأشعة الشمس (الفوتونات) إلى كهرباء باستخدام الخلايا الكهروضوئية.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخلايا الشمسية الكهروضوئية ذات بواعث مدفونة حيث تكون جميع جهات الاتصال على الوجه الخلفي (الوجه غير المضاء).

في الفصل الأول، سنتذكر المفاهيم الأولية حول الإشعاع الشمسي ومبدأ تشغيل الخلايا الشمسية التقليدية. سنناقش بعد ذلك المعلمات الكهربائية المميزة للخلايا التقليدية والمصادر المختلفة للخسائر التي تؤثر على كفاءة التحويل.

في الفصل الثاني، سنعرض التقنيات المختلفة التي تعتمد عليها الخلايا الشمسية عالية الكفاءة وأهمية تكوين وانتشار الباعث في تصنيع الخلايا. شمسي. سوف نصف هذه التقنية بالتفصيل. ناقشنا أيضًا آليات الانتشار في السيليكون، واختيار نوع الركيزة والمعايير المختلفة التي تسمح بتصنيع خلايا عالية الكفاءة.

أخيرًا، سيخصص الفصل الثالث للمحاكاة العددية لخلية السيليكون الشمسية متعددة البلورات ذات الملامسات الخلفية. سيتم إجراء دراسة حول تأثير العوامل الهندسية والفيزيائية المختلفة لفهم عمل هذا النوع من الخلايا لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة. نحن مهتمون بالتحسين من خلال المحاكاة بواسطة المحاكى الرقمي الذي يمكن أن يساعدنا في تحديد المعلمات الهامة للخلايا الكهروضوئية ذات التلامس الخلفي من أجل زيادة الكفاءة وبالتالي تقليل تكاليف التصنيع.

الكلمات المفتاحية: PC3D , الاتصالات الخلفية ،جهاز إرسال مدفون ، محاكاة رقمية ؛ تهيئة؛ الخلايا الشمسية.

Liste des figures du chapitre I

Figure I.1 : Spectres de rayonnement solaire pour la lumière solaire incidente

Figure I.2 : La zone de transition jonction PN

Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Figure I.4 : (a) Structure et (b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque

Figure I.5 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque Modèle à deux diodes

Figure I.6 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

Figure I.7 : la recombinaison radiative

Figure I.8 : La recombinaison Auger

Figure I.9: recombinaison Shockley Read Hall (SRH)

Liste des figures du chapitre II

Figure II.1 : la structure de cellule PERC

Figure II.2 : la structure IBC (a) face avant (b) face arrière

Figure II.3 : la structure HIT

Figure II.4 : la structure de la cellule solaire RISE-EWT

Figure II.5 : Structure à émetteurs enterrés ; A gauche : vue de la face avant (pas de métallisations) ; A droite : vue de la face arrière (schéma d'une coupe de la structure)

Figure II.6: Profils de diffusion du phosphore dans le silicium à 950°C à différents temps

Figure II.7: Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses

Figure II.8: Diffusion à partir de sources liquides

Figure II.9 : Procédé de dopage à partir de sources solides

Figure II.10 : Représentation de défauts ponctuels, (a) Lacune, (b) Atome interstitiel (c) Atome substitutionnel

Figure II.11 : Schéma de principe illustrant la migration du dopant selon le mécanisme lacunaire

Figure II.12 : Schéma de principe de migration du dopant via les mécanismes interstitiels :
(a) migration par paire ;(b) mécanisme de kick-out

Figure II.13 : Images MEB d'un substrat texturé, avant (à gauche) et après (à droite) nettoyage chimique

Liste des figures du chapitre III

Figure III.1 : Fenêtre du PC1D

Figure III.2 : Partie d'une feuille Dashboard de solve

Figure III.3 : La représentation graphique sur la feuille «Dashboard»

Figure III.4 : la structure de la cellule.

Figure III.5: Le circuit sur la feuille «Device»

Figure III.6 : La résistance série externe sur la feuille «Device»

Figure III.7 : Le modèle optique sur la feuille «Device»

Figure III.8 : Le modèle électrique sur la feuille «Device»

Figure III.9 : la feuille de «Recombinaison»

Figure III.10 : la feuille «Illumination»

Figure III.11 : la feuille «Models»

Figure III.12 : la structure simulée (cellule élémentaire) (L'échelle n'est pas respectée)

Figure III.13 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type n position 1

Figure III.14 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type n position 2

Figure III.15 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type p position 1

Figure III.16 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type p position 2

Figure III.17 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur du substrat

Figure III.18 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p+

Figure III.19 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+

Figure III.20 : Caractéristique I-V de la cellule à contacts arrières simulée

Figure III.21: de la réponse spectrale pour la cellule à contacts arrières simulée

Figure III.22 : Le diagramme circulaire des pertes technologiques

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Paramètres variables pendant la simulation

Tableau III.2 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type n position 1

Tableau III.3 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type n position 2

Tableau III.4 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type p position 1

Tableau III.5 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type p position 2

Tableau III.6: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur du substrat type n

Tableau III.7: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur du substrat type p

Tableau III.8: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p+ de l'épaisseur 0.3 μm .

Tableau III.9: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p+ de l'épaisseur 0.5 μm .

Tableau III.10 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+ de l'épaisseur 0.3 μm .

Tableau III.11 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+ de l'épaisseur 0.5 μm .

Tableau III.12 : Les valeurs optimales.

Tableau III.13 : les pertes technologiques en faces avant et arrière

Introduction générale

Face aux problèmes inhérents à l'utilisation des énergies fossiles, tels que les méfaits au niveau de l'environnement et l'épuisement de ces sources d'énergie, l'homme devra chercher d'autres alternatives pour produire l'énergie dont il dépend. Parmi les sources d'énergies renouvelables actuellement connues, l'énergie solaire étant l'une des technologies les plus prometteuses,[1] elle offre une solution pour répondre aux besoins énergétiques modernes, car le soleil est considéré comme une ressource inépuisable et non polluante pour rendre les cellules photovoltaïques réutilisables.

Le photovoltaïque est l'une des voies qui s'est significativement développée au cours de ces dernières années, avec un taux de croissance de 40 %. Depuis l'obtention d'un rendement voisin de 5% avec des cellules photovoltaïques à base de silicium en 1950, des travaux très concluants ont été effectués afin d'améliorer le rendement de conversion et d'élargir le champ du photovoltaïque à l'échelle industrielle[2].

Aux cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23% pour des cellules solaires à base d'arsenic de gallium et de silicium, sous la condition d'éclairement d'un soleil.[3]

Les programmes actuels de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une extrême importance aux nouveaux procédés de croissance du silicium cristallin, a la réduction de l'épaisseur des cellules qui représente 60% du cout final du module photovoltaïque, a l'optimisation du concept des structures photovoltaïques et a la minimisation des étapes technologique de fabrication. Aussi, la réduction de la réflectivité de la face avant des cellules photovoltaïques au silicium multicristallin est un des points essentiels a résoudre pour améliorer leur rendement de conversion solaire.[4]

L'activité scientifique s'exerçait jadis suivant deux modes : théorie et expérimentation les dernières décennies ont vu la simulation numérique s'imposer comme une troisième approche dans la plupart des disciplines de la recherche et du développement, des plus fondamentales aux plus proches des finalités industrielles. Parallèlement, en partie grâce a la simulation, la science prédictive a progressé au dépend de l'empirisme.

La simulation numérique touche presque l'ensemble des domaines des énergies renouvelables, aujourd'hui la production d'énergie à partir de ces derniers est considérée dans

plusieurs pays, comme étant un objectif stratégique pour les années à venir. Pour cette raison, il est obligatoire de perfectionner notre savoir faire et nos connaissances dans ce domaine.[5]

Le coût du substrat de silicium représentant environ 40% du coût final du module, l'une des solutions consiste à produire des cellules sur des substrats plus économiques, comme du silicium multicristallin de faible longueur de diffusion en fine épaisseur, tout en conservant un rendement acceptable.[6]

La société Advent Solar développe depuis quelques années une structure innovante pour atteindre cet objectif. Il s'agit des cellules à contacts arrière interdigités. Ces structures permettent d'obtenir de très bons rendements sur des substrats fins de faible longueur de diffusion.[7]

Ce mémoire a pour objectif l'étude d'une cellule solaire en silicium multicristallin à émetteur enterré et à contacts arrière en utilisant le simulateur à trois dimensions PC3D pour optimiser le rendement énergétique.

Bibliographie de l'introduction générale

- [1] S. Cherifi et M. Haddad, « L'énergie solaire: Un moteur du développement durable en Algérie », *Cah. Cread*, vol. 35, n° 3, p. 95-127, 2019.
- [2] E. Observ, « Baromètre du solaire photovoltaïque », *Systèmes Sol*, vol. 160, p. 69-83, 2004.
- [3] D. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices: basic principles*. McGraw-hill, 2003.
- [4] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [5] I. Reghiss et M. Zaabat, « Simulation des cellules solaires », 2013,
- [6] S. Glunz *et al.*, « High-efficiency cell structures for medium-quality silicon », 2001, p. 1287-1292.
- [7] J. M. Gee, P. Hacke, M. W. Sumner, et R. R. Schmit, « Towards a manufacturable back-contact emitter-wrap-through silicon solar cell », 2005, p. 1663-1666.

Chapitre I :
La cellule solaire au silicium
multicristallin

1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement solaire (photons) en énergie électrique à partir des cellules photovoltaïques.

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension des phénomènes intervenant dans la conversion photovoltaïque. Nous abordons quelques notions sur l'énergie solaire et son application dans le domaine photovoltaïque.

Ensuite, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leur modélisation électrique et les caractéristiques principales sont exposés.

En fin de chapitre, nous présentons les pertes physiques et technologique influençant sur le rendement de cellules solaires photovoltaïques pour amélioration de l'efficacité ou rendement de conversion.

2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques passent par la compréhension de la source d'énergie utilisée : le soleil. Sa surface se comporte comme un corps noir à des températures voisines de 5800 K, ce qui se traduit par un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm . [1]

Le rayonnement solaire est la source d'énergie la plus largement partagée sur terre. L'énergie dégagée par le soleil (captée par la Terre) pendant une heure suffit à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Le soleil émet constamment des radiations dans toutes les directions de l'espace. Ces radiations se déplacent à la vitesse de la lumière C ; il faut donc en moyenne 499 secondes ou 8 minutes 19 secondes pour atteindre notre atmosphère. [2]

Les photons peuvent pénétrer certains matériaux et même traverser des objets transparent dans le visible et laisse passer la lumière visible. Il existe quatre types de rayonnement. [2]

- **Le rayonnement direct** qui est le rayonnement reçu directement du soleil.
- **Le rayonnement diffus** qui est le rayonnement provenant de tout le ciel.
- **Rayonnement solaire réfléchi** ou albédo du sol.
- **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus à un emplacement.

2.1. Le spectre solaire :

En 1900, Planck propose une nouvelle approche attestant que la lumière est composée de paquets d'énergie, appelés plus tard photons par Einstein, où chaque paquet d'énergie est lié à une longueur d'onde par la relation :

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où

h : est la constante de Planck ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$) ;

λ : est la longueur d'onde en mètre ;

ν : la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon.

Dans le domaine du photovoltaïque (PV), nous nous intéressons au second aspect, qui atteste que la lumière se propage sous forme de paquets d'énergie. La figure I.1 montre le flux lumineux émis par le soleil en fonction de la longueur d'onde, appelée irradianance du spectre solaire.[3]

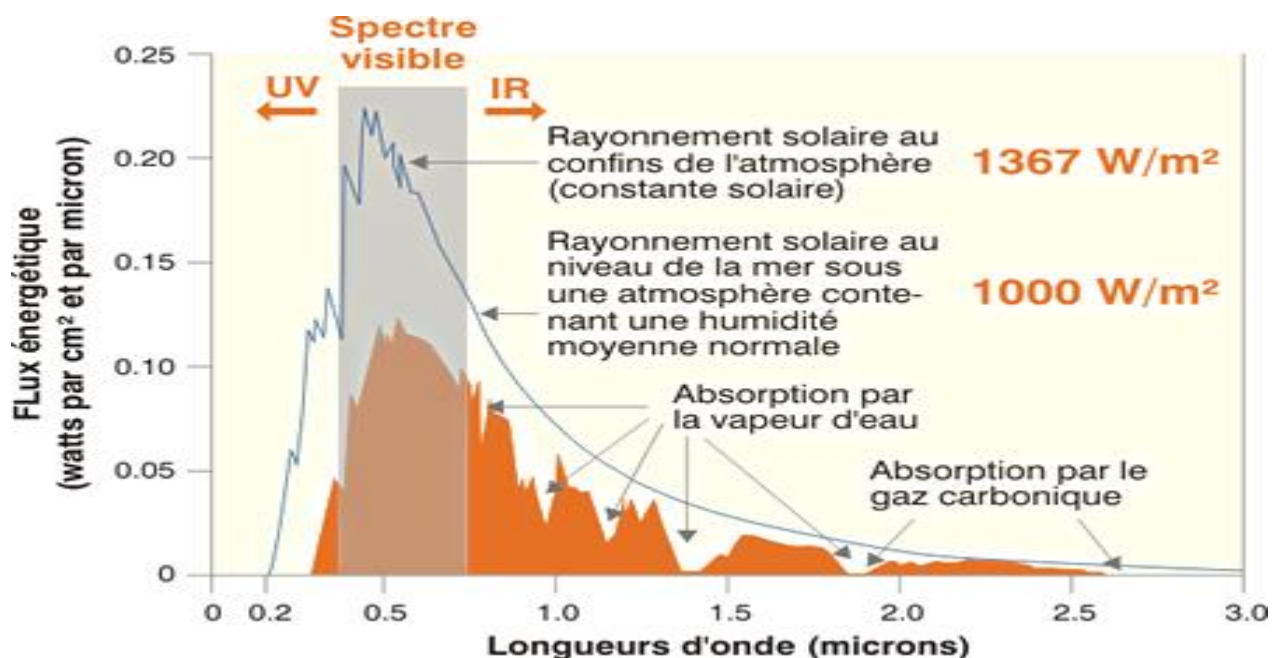


Figure I.1 : Spectres de rayonnement solaire pour la lumière solaire incidente.[4]

2.2. L'irradiation solaire :

L'irradiation solaire traverse plusieurs couches de l'atmosphère, ce qui modifie l'irradiation spectrale solaire en fonction de la position dans le globe. Ce phénomène est estimé par la masse d'air traversée, AM (Air Mass), qui se calcule par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} = \frac{1}{\sin \theta_h} \quad (\text{I.2})$$

Où

θ_z et θ_h sont les angles d'incidence par rapport au zénith et par rapport à l'horizon respectivement.

Le spectre AM1.5, qui correspond à un angle $\theta_z = 48,2^\circ$, a été choisi comme spectre solaire standard pour les tests de cellules solaires et la mesure des rendements est basée sur ce spectre. Il existe des AM1.5G et des AM1.5D où les lettres G et D désignent respectivement le faisceau lumineux global et le faisceau lumineux direct. Le faisceau global prend en compte les faisceaux lumineux réfléchis par le sol ou diffusés par les nuages ou autres particules dans l'air, alors que le faisceau direct est celui qui arrive directement à travers l'atmosphère. AM1.5D est utilisé pour tester les cellules solaires sous concentration. AM0 signifie que la masse d'air est nulle, c'est-à-dire que le spectre solaire se trouve en dehors de l'atmosphère.[3]

3. La jonction PN :

Les cellules solaires fonctionnent en obéissant au principe de l'effet de jonction dans les diodes à jonction P-N. Commençons par parler des matériaux de type p et de type n pour comprendre l'effet de jonction. Les matériaux de type p et de type n sont les semi-conducteurs, par exemple le silicium ou le germanium, qui sont constitués de certaines impuretés atomiques, et le type de semi-conducteur (de type p ou de type n) dépend du type de dopage.[5]

La formation de jonctions p-n permet de contrôler les propriétés électriques du matériau. Une jonction p-n est formée en dopant le matériau avec des impuretés. Il comporte deux parties, l'une accepteur dopé (p) et l'autre donneur dopé (n).[6]

Lorsque le semi-conducteur de type n et le semi-conducteur de type p sont en contact, un état d'équilibre est établi par la diffusion des porteurs. Les porteurs majoritaires (trous) diffusent de la région de type p vers la région de type n, où ils se recombinent avec des électrons. Les

porteurs majoritaires (électrons) de la région de type n diffusent dans la région de type p. Par conséquent, les régions contenant des charges fixes positives et négatives sont appelées la zone de charge d'espace (ZCE) d'une faible épaisseur W_0 . Cela crée un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs de charge.[7][8][9][10]

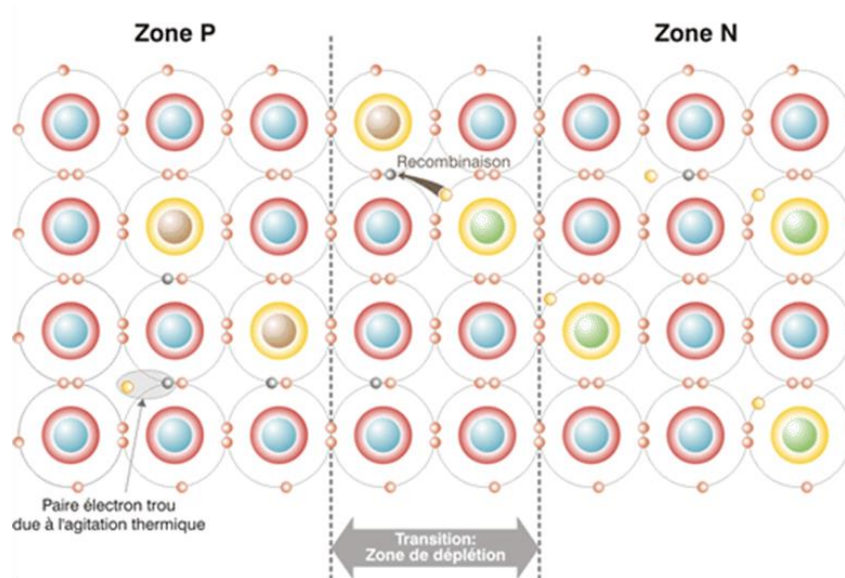


Figure I.2 : La jonction PN[11]

La zone de charge d'espace est caractérisée par une tension potentielle liée au champ électrique. Cette différence de potentiel est appelée tension de diffusion V_D . Il passe du potentiel V_p dans la région p au potentiel V_n dans la région n.

$$V_D = V_n - V_p \quad (\text{I.3})$$

$$V_D = \frac{E_{F_n} - E_{F_p}}{q} \quad (\text{I.4})$$

E_n : niveau de Fermi dans la région n

E_p : niveau Fermi dans la région p

q : charge élémentaire.

4. L'effet photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur l'effet photoélectrique, découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905.[12]

Les "grains de lumière"- les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince. Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. C'est l'effet photovoltaïque. Du fait de l'énergie qu'ils gagnent, les électrons "s'excitent". Ils reviennent généralement à l'état d'équilibre - leur niveau initial - en libérant l'énergie des photons sous forme de chaleur : le matériau chauffe au soleil. Mais il est aussi possible de récupérer cette énergie sous forme électrique. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont des charges de signes opposés ($-q$; $+q$). Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champs". [13]

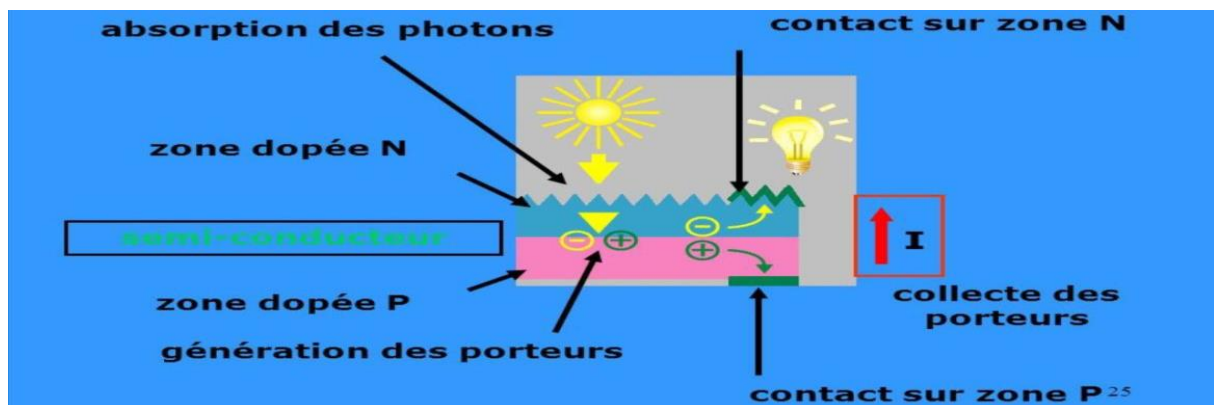


Figure I.3: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire[14]

La conversion photovoltaïque repose donc sur trois principes :

- L'absorption de photons;
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres;
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique.

5. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsqu'elle est éclairée, la jonction PN reçoit le rayonnement des photons incidents, et lorsque le photon est absorbé par le matériau, il transfère une partie de son énergie aux électrons par collisions, l'arrachant du matériau. Ce phénomène ne se produit que lorsque l'énergie du photon est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau (E). Dans ce cas, les photons sont capables de déplacer des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction du matériau semi-conducteur, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.[15]

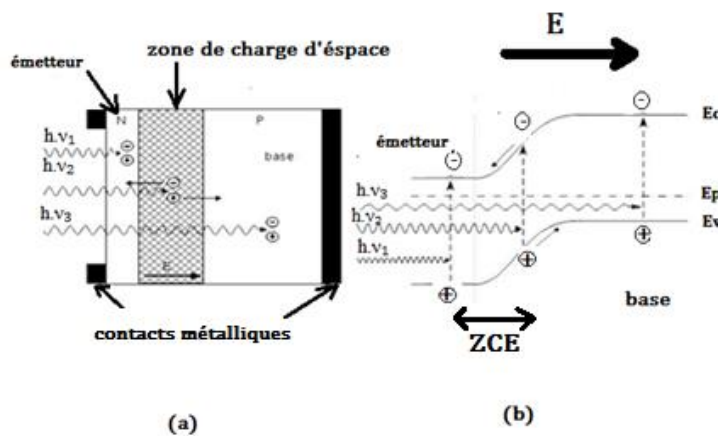


Figure I.4 : (a) Structure (l'échelle n'est pas respectée) et (b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.[16]

Les particules générées dans le dispositif sont collectées entre la grille (face avant) et le contact ohmique réalisé (face arrière) et délivrées à une charge externe. [17]

D'une manière générale, la zone de charge d'espace (ZCE) est très mince. Cependant, les électrons peuvent se déplacer sur la longueur de diffusion L_n au cours de leur vie, et les électrons collectés correspondent à ceux qui peuvent diffuser vers le ZCE. Par conséquent, l'absorbeur d'une cellule solaire a typiquement une épaisseur proche ou inférieure à sa longueur de diffusion des porteurs. [18]

Les photons incidents génèrent des porteurs dans chacune des régions P, N et ZCE. Ces porteurs libres se comportent différemment selon l'endroit où ils ont été créés.

Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent, et les photo-porteurs atteignant la zone de charge d'espace sont poussés par le champ électrique

vers la région où ils deviennent majoritaires. Ainsi, ces photo-porteurs contribuent au courant par leur diffusion, ce qui produit un photo-courant de diffusion.

Dans ZCE, les paires électron-trou générées par les photons sont dissociées par un champ électrique, les électrons sont poussés vers la région de type N et les trous sont poussés vers la région de type P. Le photo-courant généré par ces porteurs est d'une génération.[19]

6. Les paramètres électriques caractérisant une cellule PV

6.1. La modélisation électrique de cellule solaire :

L'utilisation des circuits équivalents est adaptée pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Deux modèles sont principalement utilisés: le modèle à une diode et le modèle à deux diodes [20].

Le modèle idéal d'une cellule est une source de courant en parallèle avec une diode. Le modèle à une diode est facile à mettre en œuvre, mais moins précis que le modèle à deux diodes.[21]

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être schématisé ci-dessous :

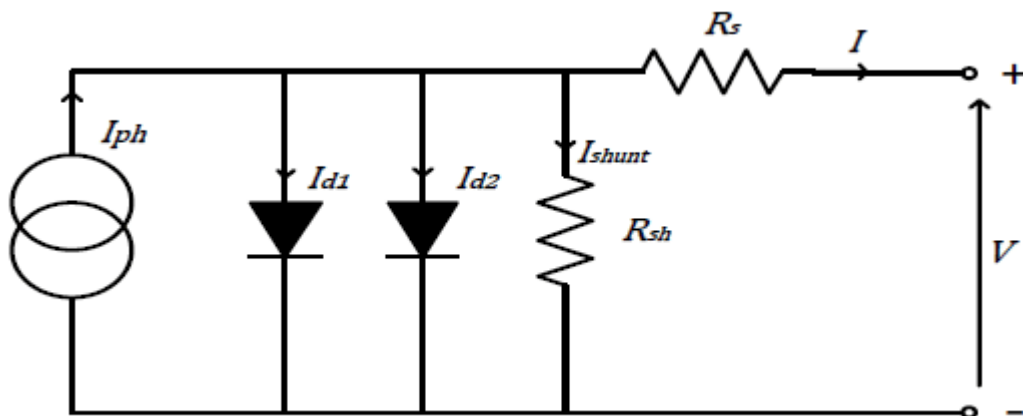


Figure I.5 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque Modèle à deux diodes[22]

Le courant de sortie est donné par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left(\exp \left(\frac{(V+R_s I)}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{d2} \left(\exp \left(\frac{(V+R_s I)}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

I_{d1} et I_{d2} : sont les courants de saturation inverse de la diode d_1 et de la diode d_2 respectivement.

n_1 et n_2 : représentent les facteurs d'idéalité des diodes.

R_s : la résistance série

R_{sh} : la résistance shunt

I_{ph} : le photocourant

V_t : est la tension thermique du module pour un nombre N_s de cellules en série,

V : la tension aux bornes de la cellule.

6.2. Les Paramètres photovoltaïques :

La figure I.6 montre la caractéristique courant-tension $I(V)$ à l'obscurité et sous éclaircement typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Cette courbe Permet d'accéder à un grand nombre de paramètres physiques caractéristiques de la cellule solaire.

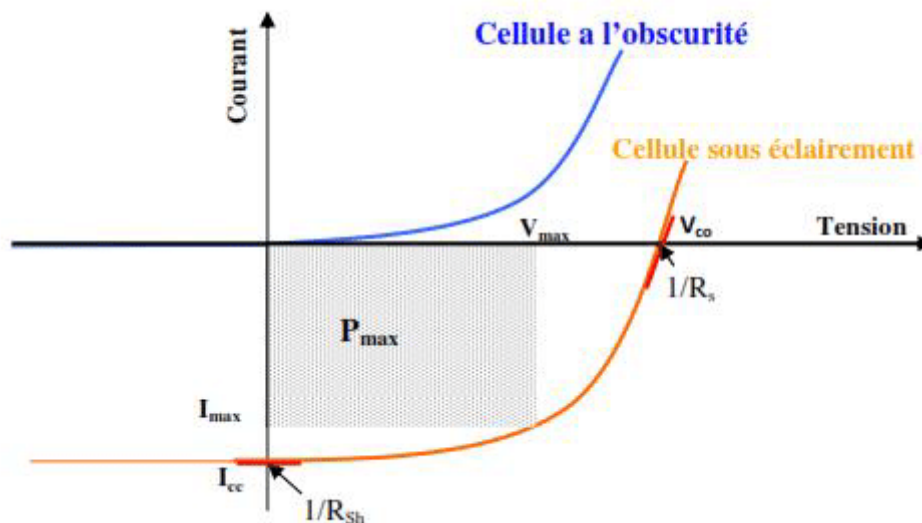


Figure I.6 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.[23]

Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire sont

6.2.1. Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ en schéma équivalent). Elle augmente linéairement avec l'intensité lumineuse de la cellule et dépend de La surface irradiée, la longueur d'onde du rayonnement, la mobilité des porteurs et la température[22]

6.2.2. Tension de circuit ouvert (V_{co}) :

La tension en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle dépend de la barrière énergétique et de la résistance shunt. elle varie avec la température et Peu de changement avec l'intensité lumineuse.[25]

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I.6})$$

6.2.3. La puissance maximale :

Lorsque le produit $V.I$ est le plus grand, la puissance fournie par la cellule solaire est la plus grande. Si V_{max} et I_{max} sont les tensions et courants pour lesquels on a ce maximum, alors la puissance maximale est l'aire du plus grand rectangle de côtés I_{max} et V_{max} [26]

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (\text{I.7})$$

6.2.4. Facteur de forme FF :

On appelle facteur de forme FF (fill factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite (I_m, V_m) de la cellule sous les conditions de mesures standardisées, et la puissance formée par le rectangle (I_{cc}, V_{co}) [27]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{I.8})$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70% [26].

6.2.5. Le rendement η :

Le rendement d'une cellule PV représente le rendement de conversion de puissance. il est définie comme la puissance maximale fournie par la cellule avec Puissance lumineuse incidente P_{in}

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \cdot FF \quad (\text{I.9})$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. L'efficacité de conversion est un paramètre important.

En effet, il n'est possible d'évaluer les performances d'une cellule que si l'on connaît sa valeur[27].

6.2.6. Le rendement quantique Externe EQE :

L'efficacité quantique externe, notée EQE (External Quantum Efficiency), également appelée IPCE (incident Photon-to-Current Conversion Efficiency), est le rapport du nombre d'électrons collectés au nombre de photons incidents dans un circuit externe. Cette efficacité ne tient pas compte des photons réfléchis et transmis. Elle est donnée par la relation suivante[28] :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \times \frac{J_{cc}}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad (\text{I. 10})$$

J_{cc} : est la densité de courant de Court-circuit ($A.cm^{-2}$).

φ : est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w.cm^{-2}$)

λ : est la longueur d'onde monochromatique(nm).

h : est la constante de Planck(J.s).

C : est la vitesse de la lumière ($J.m.s^{-1}$).

e : la charge électronique.

E_{ph} :L'énergie du photon.

6.2.7. Le rendement quantique Interne IQE :

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est lié à l'efficacité quantique externe IQE par l'équation[29] :

$$IQE = \frac{EQE}{1 - R(\lambda)} \quad (\text{I. 11})$$

$R(\lambda)$: le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ

7. Les pertes fondamentales et technologiques d'une cellule PV :

Bien évidemment, le rendement de la cellule solaire est limité par différents facteurs, qu'ils soient théoriques ou technologiques. Nous allons ici les passer en revue. Dans chaque cas, nous verrons sur quels paramètres électriques ils influent.

7.1. Pertes fondamentales :

Il existe tout d'abord des pertes fondamentales qui sont inévitables. Ces pertes limitent le rendement théorique de la cellule solaire silicium à 29,8% [30].

- **Absorption incomplète des photons :**

Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite (c'est-à-dire 1,12 eV) ne peuvent pas être absorbés par le silicium. Ils ne contribuent alors pas à la génération de paires électron-trou. Cela a entraîné une perte de rendement d'environ 27%.

- **Excès d'énergie des photons :**

Les photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite perdent l'énergie en excès par thermalisation, qui ne participe donc pas à la création de paires électron-trou. Cette perte représente environ 28% de perte sur le rendement sous AM1.5.

Ces deux premières limitations, influant sur le courant de court-circuit I_{cc} et sur la tension de circuit ouvert V_{co} , réduisent le rendement théorique à 45% [31].

- **Facteur de tension :**

La tension de court circuit V_{co} ne peut dépasser l'énergie du gap, soit E_g/q . A cela s'ajoute les recombinaisons Auger, qui limitent le V_{co} à 0,65V pour une cellule solaire épaisse, et à 0,72V pour une cellule de 20 μm d'épais[30][32].

- **Facteur de forme :**

Constituants idéalement, si la courbe $I(V)$ est carrée, le facteur de forme serait de 1. Cependant, la forme exponentielle de la caractéristique $I(V)$ limite le facteur de forme à 0,89 en raison des statistiques de Boltzmann

7.2. Pertes technologiques :

Même dans le cas d'une cellule solaire idéale, les pertes ci-dessus ne peuvent être évitées. Cependant, d'autres phénomènes réduisent encore les rendements. Ces limitations sont pour la plupart techniques, ce qui signifie que des efforts peuvent être faits pour les améliorer. Ils se présentent sous trois formes : optique, par recombinaison et résistif.

- **Pertes optiques :**

Les pertes optiques sont des pertes techniques dues aux photons non absorbés dans le matériau :

– La face avant de la cellule solaire est recouverte d'une grille métallique (dans le cas des cellules industrielles standards, elle recouvre environ 10% de la face avant), qui empêche les photons de pénétrer dans le matériau.

– Le silicium a un indice de réfraction très élevé, ce qui provoque des réflexions de surface importantes. Ceci peut être amélioré avec une couche antireflet, qui a une réflectivité d'environ 10 %.

– Si la cellule n'est pas suffisamment épaisse, il se peut que les photons de faible énergie (ou de grande longueur d'onde) ne soient pas absorbés dans l'épaisseur du matériau.

Les pertes optiques ont un effet important sur le courant de court-circuit. Si nous cherchons à réduire l'ombrage, nous serons confrontés au problème de la résistance série (et donc du facteur de forme), et la collecte du porteur se fait sur la surface réduite

- **Pertes par recombinaison :**

Une fois la paire électron-trou créée, les charges doivent diffuser jusqu'aux contacts de la cellule. Cependant, s'ils se recombinent avant d'atteindre les contacts, ils ne participeront plus à la génération de courant. Différents mécanismes existent entraînant la recombinaison de la paire, en volume ou en surface [33].

En volume, il existe trois mécanismes :

– Les recombinaisons radiatives correspondent à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, donnant naissance à une radiation, sous forme de photon. Dans le cas du silicium, on considère que la recombinaison radiative est négligeable comparée aux autres mécanismes de recombinaison.

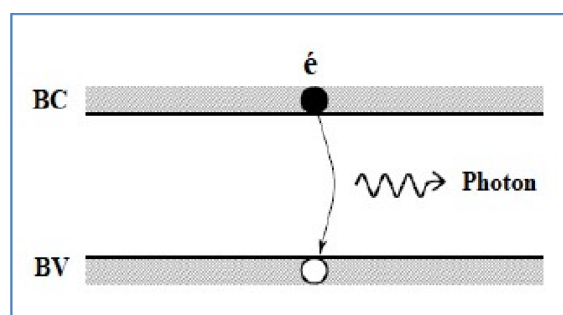


Figure I.7 : la recombinaison radiative[34]

– La recombinaison Auger est un mécanisme à trois particules : un électron de la bande de conduction, se recombinant avec un trou de la bande de valence, transfère l'énergie excédentaire à une troisième particule, ou dans la bande de conduction, ou dans la bande de

valence. Remarquons ici que les recombinaisons Auger seront d'autant plus élevées que le dopage est élevé[35].

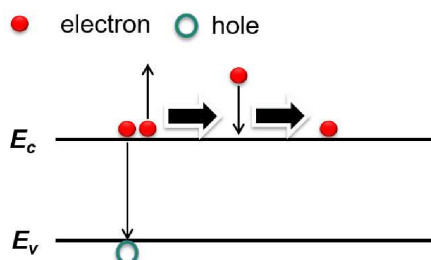


Figure I.8 : La recombinaison Auger[36]

– Les recombinaisons par défauts, couramment appelées recombinaisons Shockley Read Hall(SRH), sont dues à la création de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite, par des défauts présents dans le substrat (impuretés, dislocations). Ces niveaux facilitent alors les recombinaisons[37].

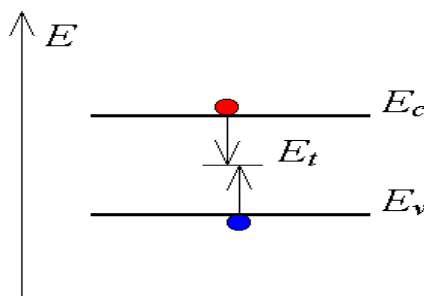


Figure I.9: recombinaison Shockley Read Hall(SRH)[38]

Les recombinaisons radiatives et Auger sont des recombinaisons intrinsèques au matériau, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas du procédé de fabrication mais plutôt du semi-conducteur lui-même. Par contre, les recombinaisons SRH, sont dites extrinsèques.

En surface, les recombinaisons sont majoritairement dues à la présence d'un grand nombre de niveaux d'énergie dans la bande interdite, car la surface constitue une zone de fortes discontinuités (liaisons pendantes).

Les recombinaisons ont un effet sur la tension de circuit ouvert via le courant de saturation J_{01} , ainsi que sur le courant de court circuit, lorsque les charges se recombinent avant d'avoir atteint la ZCE. Les recombinaisons, lorsqu'elles ont lieu dans la ZCE, auront un effet sur le courant de saturation J_{02} . Ces deux paramètres ont également un effet direct sur le facteur de forme [39]

- **Pertes résistives :**

L'efficacité des cellules est également affectée par les pertes résistives. Ils sont causés par une résistance parallèle, par exemple par une fuite au bord de la cellule photovoltaïque ou lorsque

le métal sur la face avant court-circuite l'émetteur. Le deuxième type de perte est la perte de puissance due à la résistivité des différents éléments de la cellule solaire : la résistance série.

8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire comme source d'énergie utile au Photovoltaïque. Ensuite, nous avons décrit la jonction p-n le cœur de fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque. Nous avons expliqué le principe de l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement. Puis, après avoir exposé la modélisation électrique et ses paramètres caractérisant une cellule PV.

Après nous avons présenté les pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement de cellule solaire photovoltaïque.

Bibliographie de chapitre I

- [1] Christiana. Honsberg Bowden, Stuart. ,, *Photovoltaics : [devices, systems & applications]. Part 1, Part 1.* [S.l.]: The University of New South Wales Photovoltaics Centre, 1999.
- [2] P. Bessemoulin et J. Olivieri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », *La Météorologie*, vol. 2000, n° 31, p. 42-59, doi: 10.4267/2042/36135.
- [3] T. Ayari, « DESIGN AND FABRICATION OF NITRIDE-BASED SOLAR CELLS AND INTEGRATION FOR TANDEM CELL », phdthesis, École Doctorale de génie électrique et informatique, 2018. [4] S. Zouabi, « Optimisation par Greenius d'une centrale photovoltaïque dans la région de Tataouine en Tunisie », Université du Québec à Rimouski, 2022.
- [5] L. T. Duy, Q. A. Sial, et H. Seo, « Improvement of Stretchable and Washable Carbon-Nanotube-Based Textile Supercapacitors by using Molybdenum Trioxide Nanoflakes and Prewashing Treatment », *Advanced Materials Technologies*, p. 2101204, 2021.
- [6] Defense Technical Information Center, *DTIC ADA470036: Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas.* 2007.
- [7] I. MALLEM, « Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO. », masters, Université Mohamed Khider - Biskra, 2014.
- [8] « Etude Et Modélisation Des Performances Des Cellules Photovoltaïques À Multi Couches À Base Des Se | PDF | Cellule photovoltaïque | Semi-conducteurs », *Scribd*. <https://fr.scribd.com/document/541189304/Etude-Et-Modelisation-Des-Performances-Des-Cellules-Photovoltaïques-a-Multi-Couches-a-Base-Des-Se> .
- [9] B. Miloud, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités. », Thesis, 2016.
- [10] T. Schutz-Kuchly, « Investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques », phdthesis, Aix-Marseille Université, 2011.
- [11] I. Calderon Perez, S. Hoyois, et V. Truyens, « ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AVEC ET SANS BATTERIE ».
- [12] A. Ababsa, A. Meskher, et L. Boulbir, « Production autonome d'énergie au niveau d'un quartier ecologue », 2020.
- [13] « Effets photoélectrique et électroluminescent », *Energie Plus Le Site*, 9 août 2010. <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/effets-photoelectrique-et->

electroluminescent/.

[14] M. Ben Ali, S. RAHMOUNI, et M. Mostefaoui, « Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In, Ga) Se₂ », 2018.

[15] « LE FONCTIONNEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAIQUES ET THERMIQUES - TPE ». <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/fonctionnement.html>

[16] J. H. N. TCHOGNIA, B. HARTITI, J.-M. NDJAKA, A. RIDAH, et P. THEVENIN, « Performances des cellules solaires à base de Cu₂ZnSnS₄ (CZTS): Une analyse par simulations numériques via le simulateur SCAPS », *Afrique Science*, vol. 11, n° 4, p. 16-23, 2015.

[17] « 1 -Schémas de principe du fonctionnement d'une cellule solaire. | Download Scientific Diagram ». https://www.researchgate.net/figure/Schemas-de-principe-du-fonctionnement-dune-cellule-solaire_fig2_281984791 (consulté le 10 mai 2022).

[18] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2012.

[19] L. Ribeaucourt, « Electrodeposition et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se₂ pour cellules solaires », phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011.

[20] « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques : Cours et exercices corrigés - PDF Drive ».

[21] T. Ahmad, S. Sobhan, et M. F. Nayan, « Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency », *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 4, n° 3, Art. n° 3, mars 2016, doi: 10.4236/jpee.2016.43004.

[22] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.

[23] MISSOUM MOHAMMED, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie ». 11 décembre 2011.

[24] N. Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », 2015.

[25] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.

- [26] BOUKLI-HACENE Omar, « Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ». Université Abou Bakr Belkaid-tlemcen.
- [27] BENDJELLOULI Zakaria, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire ». université de bechar, 28 août 2009.
- [28] S. J. Fonash, *Solar cell device physics*. Burlington, MA: Academic Press/Elsevier, 2010.
- [29] Y. MAROUF, « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V. », Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [30] J.-P. Colinge, J. C. Greer, et J. Greer, *Nanowire Transistors: Physics of Devices and Materials in One Dimension*. Cambridge University Press, 2016.
- [31] D. Macdonald, « Recombination and trapping in multicrystalline silicon solar cells », 2001.
- [32] N. D. Kaushika, A. Mishra, et A. K. Rai, *Solar Photovoltaics: Technology, System Design, Reliability and Viability*. Springer, 2018.
- [33] Jean-François LELIEVRE, « Elaboration de SiNx:H par PECVD: optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques ». L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 24 avril 2007.
- [34] N. Ounissi et M. LEDRA, « SIMULATION MONTE CARLO DU COURANT INDUIT PAR FAISCEAU D'ELECTRONS D'UN NANO CONTACT SCHOTTKY », 2020.
- [35] M. J. Kerr, « Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells », 2002, doi: 10.25911/5d7a29c09cd46.
- [36] E. Blandre, « Thermal radiation at the nanoscale: near-field and interference effects in few-layer structures and on the electrical performances of thermophotovoltaic devices », 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.16662.14406.
- [37] S. H. Voldman, *Latchup*. John Wiley & Sons, 2008.
- [38] E. A. Kouadri Boudjelthia, « Piégeage des impuretés métalliques présentes dans le silicium destiné au photovoltaïque par plasma immersion ion implantation (PIII) », 2012. doi: 10.13140/2.1.2665.7281.
- [39] M. M. Hilali, « Understanding and Development of Manufacturable Screen-Printed Contacts on High Sheet-Resistance Emitters for Low-Cost Silicon Solar Cells », juill. 2005,

Chapitre II :
La structure à contacts
arrières

1. Introduction

Les cellules solaires à contacts arrières sont des cellules à haut rendement. Elles peuvent atteindre des rendements de conversion de plus de 20%[1].

Dans ce chapitre nous allons voir un aperçu sur les principales structures à contacts arrières (IBC, EWT, PERC, PERL, MWT) et leurs caractéristiques principales pour un meilleur rendement.

Selon la quantité de dopants actifs dans le silicium, les propriétés électriques de la cellule fabriquée dépendront les régions dopées sont réalisées par diffusion car le procédé présente de nombreux avantages, dont son faible coût de production.

Les cellules solaires ont été fabriquées à partir de tranches de silicium, ce qui montre l'importance de ce matériau dans la fabrication des cellules solaires. Cette importance nous oblige à avoir une connaissance très approfondie de ce semi-conducteur, bien qu'il soit le plus connu de la gamme de ces composants.

Compte tenu de l'importance de la formation et la diffusion de l'émetteur dans la fabrication des cellules solaires, nous allons décrire brièvement cette technique et les mécanismes de diffusion dans le silicium.

Nous avons également abordé, le choix du type de substrat et le nettoyage de surface, et les différents critères permettant la fabrication de cellules à hauts rendements.

2. Les types de cellules solaires au silicium :

2.1. Les structures à contact localisé PERC :

Sous l'acronyme PERC (Passivated Emitter Rear Cell), on trouve en fait aussi les technologies des cellules solaires nommées PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused), PERT (Passivated Emitter Rear Totally diffused), PERF (Passivated Emitter Rear Floating-junction). Même si, à l'origine, elles n'étaient pas prises en compte dans la nomenclature des PERC, elles sont désormais généralement considérées comme faisant partie de la même famille.[1]

L'architecture PERC n'est en fait pas nouvelle du tout. La première évocation de cette technologie remonte à l'Université de New South Wales en Australie en 1983 et le premier article a été publié en 1989.[2]

La grande majorité des cellules solaires cristallines produites suivent la structure présentée

- Pâte d'argent sérigraphiée pour former les contacts
- Revêtement antireflet
- tranches de silicium dopées au bore et diffusées au phosphore qui forment la jonction P-N
- champ arrière en aluminium (Al-BSF)
- pâte d'aluminium sérigraphiée

Le principal avantage de la structure des cellules PERC est qu'elle permet aux fabricants d'atteindre des rendements plus élevés qu'avec la cellule solaire standard qui atteignent leurs limites physiques.

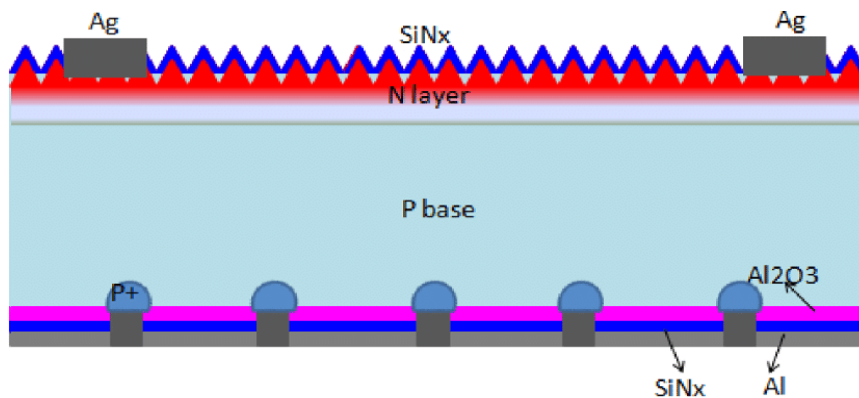


Figure II.1 : la structure de cellule PERC[3]

Dans l'état actuel de la technologie, il est possible d'obtenir jusqu'à 1% de gain absolu de rendement.

les cellules PERC représentaient 20 % de l'industrie photovoltaïque en 2017 et atteindront 50 % de l'industrie photovoltaïque mondiale dans les années 2020.[4]

Ces structures peuvent réduire les pertes optiques et résistives et réduire la recombinaison de surface. Le rendement de cette cellule est plus de 20%. [5]

2.2. Cellules solaires à contact arrière interdigitées (IBC) :

La cellule à contact arrière interdigitées (IBC) a été étudiée pour la première fois à la fin des années 1970. La cellule à contact ponctuel (PC), développée par l'université de Stanford dans les années 1980, a atteint des rendements supérieurs à 20 % dès le départ. Également appelées cellules solaires BJ-BC, les cellules solaires à jonction arrière possèdent une jonction

collectrice sur la surface arrière de la cellule solaire, tandis que la surface avant est passivée. Les porteurs minoritaires qui se forment sur la surface avant doivent se diffuser jusqu'à la surface. Ces cellules nécessitent donc un rapport plus élevé entre la longueur de diffusion globale et l'épaisseur de la cellule. [6]

Les cellules solaires à contact arrière éliminent totalement les pertes dues à l'ombrage en plaçant les deux contacts à l'arrière de la cellule. En utilisant une cellule solaire mince faite d'un matériau de haute qualité, les paires électron-trou générées par la lumière qui est absorbée à la surface avant peuvent encore être collectées à l'arrière de la cellule. Ces cellules sont particulièrement utiles dans les applications de concentrateur où l'effet de la résistance en série de la cellule est plus important.[7]

Un avantage supplémentaire est que les cellules avec les deux contacts à l'arrière sont plus faciles à interconnecter et peuvent être placées plus près les unes des autres dans le module puisqu'il n'y a pas besoin d'espace entre les cellules.[7] Leur rendement ne dépasse pas les 28%. [8]

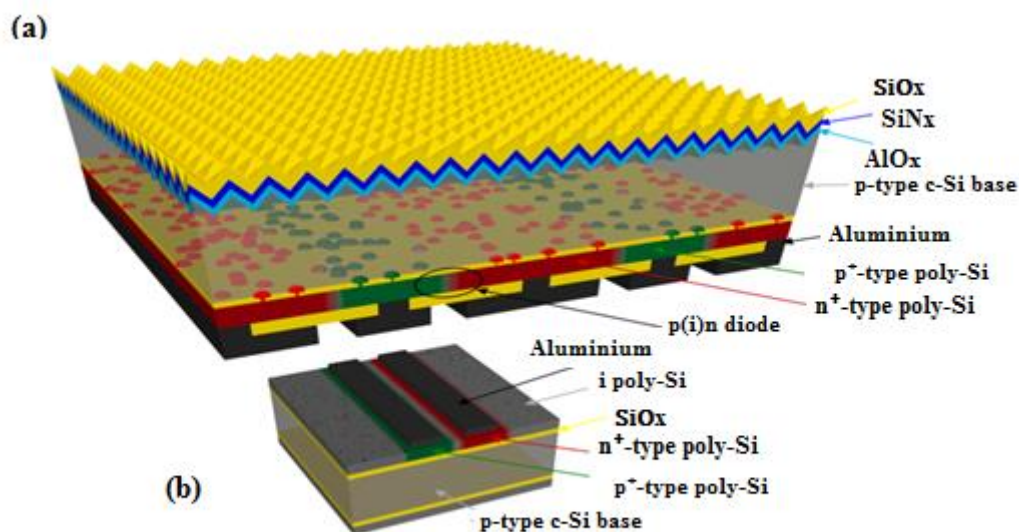


Figure II.2 : la structure IBC (a) face avant (b) face arrière[9]

2.3.La structure HIT :

La découverte des cellules solaires à hétérojonction (HJ) et à hétérojonction avec couche intrinsèque (HIT) par Sanyo Ltd[10].La cellule solaire HIT (Heterojunction with Intrinsic

2.4. Structure d'une cellule solaire EWT

Le concept de la cellule EWT fut développé pour la première fois par J.Gee et al en 1993 [15]. De grands efforts ont été faits par Sandia National Laboratories pendant de nombreuses années, le record de rendement par lithographie. L'université de Konstanz (Allemagne) et ECN (Pays -Bas) ont développé la technologie EWT en utilisant différents procédés. Le rendement obtenu par le Fraunhofer ISE est de 21.4% sur une surface de 4 cm² par photolithographie sur substrat FZ. Nous pouvons noter que la structure RISE-EWT réalisée sur substrat FZ, a permis d'obtenir 20% sur 93cm²[16]

Une représentation schématique de la cellule solaire au silicium RISE-EWT est présentée à la figure II.4. La structure arrière est constituée de doigts de grille métalliques interdigités comme sur la cellule solaire IBC.

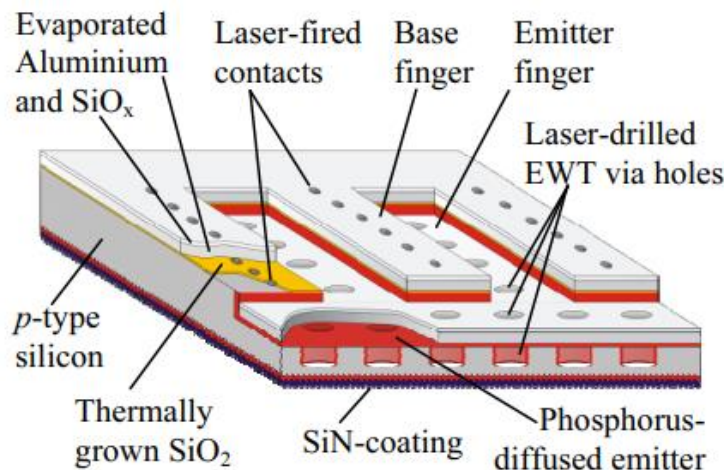


Figure II.4 : la structure de la cellule solaire RISE-EWT[16]

La cellule solaire est dessinée à l'envers afin de l'envers afin d'offrir une vue claire sur la disposition de la face arrière.

Les barres omnibus sont placées à l'arrière des cellules solaires, à bords opposés. Une caractéristique de la structure RISE-EWT est la différence de niveau entre l'émetteur et la base à la surface arrière. Les différents niveaux sont produits par ablation laser du Si recouvert de SiO₂. Le processus laser optimisé et la gravure supplémentaire permettent d'obtenir des surfaces très homogènes et lisses et des flancs abrupts aux élévations.

Ces flancs abrupts sont utilisés pour la séparation auto-alignée des contacts arrière après une seule opération. des contacts arrière après une seule étape de métallisation par évaporation. La

séparation des contacts peut être encore facilitée en introduisant une barrière de gravure fine supplémentaire sur le contact métallique avec le silicium et en procédant à une gravure ultérieure du métal[15].

La conception de l'EWT est réalisée en reliant les émetteurs avant et arrière par des trous percés au laser. Afin de maintenir une faible complexité du processus de la cellule, les vias et la structuration de la surface arrière sont réalisés en une seule étape de traitement laser avant la diffusion de l'émetteur.

3. Structure à contacts en face arrière :

Les cellules à contacts en face arrière (« Rear Contact Cells » RCC) représentent un terrain d'investigation idéal pour atteindre de hauts rendements. Sur ces structures, les zones d'émetteur et de BSF sont localisées sur la face arrière. Ceci permet d'éviter l'ombrage des métallisations en face avant. Cette géométrie est également intéressante pour sa mise en module facilitée par l'interconnexion coplanaire des cellules. Les RCC à hauts rendements développées jusqu'à maintenant ont une technologie de contacts arrières interdigités (Interdigitated Back Contact IBC). D'autres structures, telles que les EWT (Emitter Wrap Through), MWT (Metallization Wrap Through), et MWA (Metallization Wrap Around), conservent un émetteur en face avant, tout en ayant les bus de collecte en face arrière. Ceci permet l'utilisation de substrats de moins bonne qualité par rapport aux cellules IBC. Cet état de l'art est focalisé sur les cellules IBC, cependant un aperçu exhaustif de toutes les technologies RCC existe dans la littérature[17].

L'architecture IBC a été présentée pour la première fois en 1975 par Schwartz pour une utilisation sous concentration [17]. Sur les structures IBC, la jonction p-n et le BSF, ainsi que leurs métallisations, sont localisés sur la face arrière sous forme de peignes interdigités. On évite ainsi le compromis inévitable sur les cellules standard entre le taux d'ombrage (nécessité de métallisations fines) et les pertes résistives des contacts (nécessité de métallisations larges). La Figure II.5 montre que cette structure possède également un avantage esthétique dans la mesure où sa face avant est libre de toute métallisation.

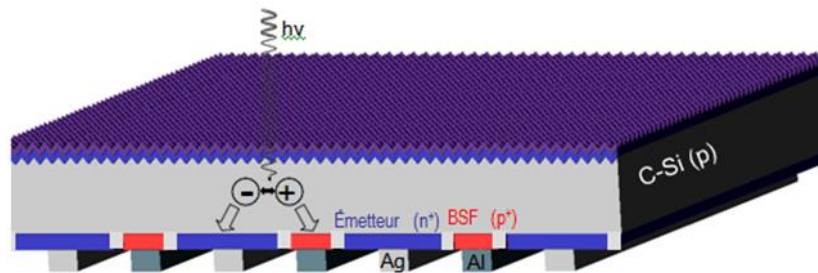


Figure II.5 : Structure à émetteurs enterrés [18]

Dans une cellule solaire sous éclairage, la majorité des porteurs sont photogénérés à proximité de la face avant. Ceci implique deux caractéristiques importantes pour l'obtention de hauts rendements sur les structures IBC[19]:

- La passivation de la face avant doit être extrêmement bonne, afin de limiter le mécanisme de recombinaison surfacique des porteurs[20]. Malgré ses excellentes propriétés de passivation de surface, le SiO_2 thermique n'est pas stable sous illumination[21]. Il convient de passiver la surface avec une couche de SiO_2 , puis de déposer une couche de $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ pour ses propriétés anti-réfléctives et sa stabilité sous éclairage [21][22]. Une légère diffusion Phosphore permet la création d'un champ de surface avant (FSF) qui diminue les recombinaisons de surface et augmente la stabilité de la passivation [23]. Ce FSF limite les pertes électriques, notamment en termes de V_{co} et de FF comparé aux surfaces uniquement passivées par un oxyde[24]. Cependant, un dopage thermique peut introduire des défauts, ou une couche morte (sur concentration de dopants) à la surface. Ceci réduit fortement la durée de vie des porteurs. Pour éviter cela, le FSF peut aussi être simplement induit par des charges fixes présentes dans la couche diélectrique de passivation[25].
- La longueur de diffusion des porteurs doit être assez élevée pour permettre leur collecte par la jonction en face arrière. Plusieurs études ont souligné l'influence de la durée de vie, et par conséquent de la qualité initiale du substrat, sur les paramètres électriques des cellules IBC[6][26][27].
- Les paramètres géométriques de la cellule doivent satisfaire la condition suivante: entre leur génération et leur collecte doit être plus petite que la longueur de diffusion des porteurs (directement liée à leur durée de vie)

D'autres paramètres sont à considérer dans l'optimisation des cellules IBC:

- La résistivité du substrat et la géométrie de la face arrière sont à optimiser simultanément pour atteindre d'excellents FF ($\geq 80\%$). L'épaisseur et la résistivité du substrat, la géométrie et le dopage des zones actives, ainsi que les métallisations, apparaissent en effet comme les principaux paramètres influençant les pertes résistives des cellules IBC[28].
- Pour la fabrication des cellules industrielles, les substrats utilisés sont fins (150 à 200 μm) et les zones localisées assez larges (1 mm) du fait des procédés de fabrication à bas coût[29]. Les porteurs de charge ont alors une longueur importante à parcourir latéralement dans le substrat de section réduite. Ceci peut entraîner des pertes résistives non négligeables. L'utilisation d'un Front Surface Field (FSF) permet d'augmenter la conductivité de la base, et donc de relâcher les contraintes sur la résistivité du substrat et la géométrie de la cellule[30].
- La passivation de la face arrière est également capitale pour réduire le courant de saturation des cellules. Sous les contacts métalliques, la vitesse de recombinaison est très élevée, c'est pourquoi Swanson a développé la technologie de « point contact » qui limite la surface des zones de contact. Ceci permet une très bonne passivation d'une grande partie de la face arrière de la cellule [21]. Les oxydes thermiques représentent une excellente couche de passivation pour la face arrière lorsque des régions de polarités différentes sont présentes.
- La surface d'émetteur doit être suffisamment importante pour permettre la collecte des porteurs. Ce paramètre dépend cependant de la qualité du substrat et de la passivation de surface dans les zones autres que l'émetteur. Cependant, sur la plupart des cellules IBC, les métallisations des zones de l'émetteur et du BSF ont les mêmes proportions que les zones elles-mêmes. Une asymétrie trop importante entre ces zones peut provoquer des pertes résistives dans la métallisation du BSF. La structure IBC à émetteur enterré, proposée récemment, permet de découpler la largeur zones dopées de celle de leurs métallisations[31].
- Cette structure présente donc beaucoup d'avantages par rapport aux cellules conventionnelles, et permet d'atteindre des très hauts rendements sur de grandes surfaces (150cm²). Les procédés de localisation doivent cependant être assez

fiables et précis pour éviter tout court-circuit entre les zones de polarité différente. Les principales techniques de localisation, dans le domaine du photovoltaïque, utilisent la photolithographie, la sérigraphie et le LASER.

4. Formation de l'émetteur dans une cellule photovoltaïque

Dans la technologie des semi-conducteurs, deux procédures de base sont utilisées pour la formation des jonctions p-n, ce sont : la diffusion de dopants et l'implantation ionique.

Dans le processus de diffusion, on utilise généralement, un foyer chauffé électriquement, où un tube en quartz est utilisé. Dans la technologie des cellules solaires photovoltaïques, la température de diffusion varie entre 800°C et 1200°C.

Les plaquettes en silicium à traiter sont déposées dans la partie à température constante du four sur un plateau en quartz.[32]

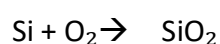
La température augmente d'une façon remarquable la longueur de diffusion des dopants, tout en prenant en considération d'autres facteurs.

le principe général d'un processus de diffusion usuel. Un liquide contenant les dopants est utilisé, ainsi que des gaz de transport (oxygène et azote).

Il faut noter que les proportions de chaque élément faisant partie du processus de diffusion sont minutieusement contrôlées.

Au début, les plaquettes de silicium sont dopées avec du bore (dopage p) concentré aux alentours de 10^{15} à 10^{17} cm^{-3} . Ensuite l'émetteur est formé avec un dopage de type n. Le phosphore est couramment utilisé.

Le processus de diffusion à partir d'un gaz est utilisé presque exclusivement, par lequel le phosphore est introduit sous forme de phosphine (PH_3) ou d'oxychlorure de phosphore (POCl_3). Ce dernier est introduit en présence d'un gaz de transport neutre (l'azote). Aux hautes températures (environ 800°C), les gaz dopants réagissent avec la surface du silicium où l'oxygène est rajouté suivant la réaction[32] [33]:



L'oxyde de silicium est formé à la surface, ensuite (dans le cas du PH), la réaction suivante est établie :



Le P_2O_5 formé se combine avec l'oxyde de silicium pour former un verre de phosphore « phosphorus silicate glass » liquide, qui devient par la suite la source dopant

Dans le cas de l'utilisation du POCl_3 , le processus est similaire, où un « phosphorus pentoxide » P_2O_5 est aussi créé, ainsi que le chlorite.

Des profils de concentrations sont obtenus par plusieurs méthodes de caractérisations, mettant en fonction la concentration des dopants avec la longueur de diffusion et ce en fonction d'un autre paramètre essentiel dans le processus de diffusion : le temps.

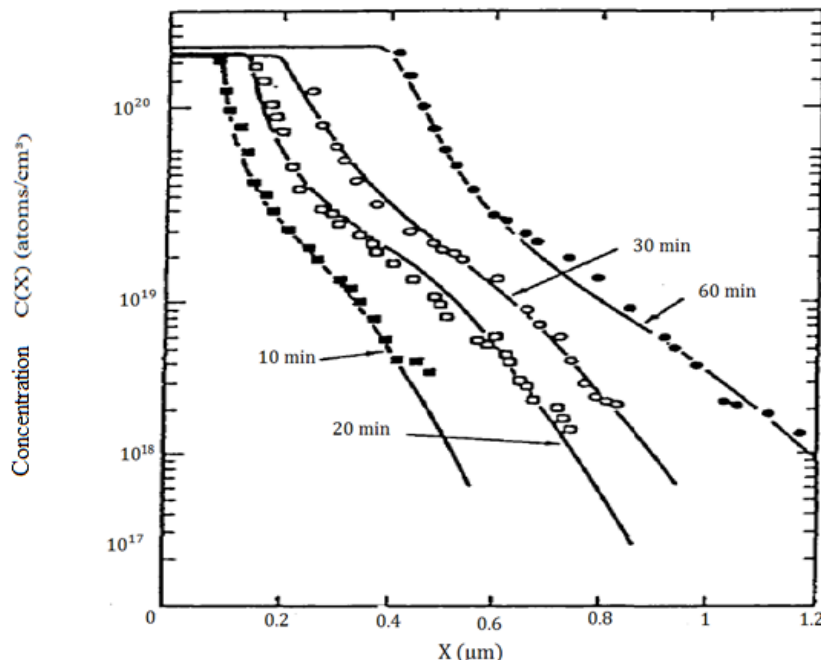


Figure II.6: Profils de diffusion du phosphore dans le silicium à 950°C à différents temps[32]

5. Les procédés de diffusion

Les procédés de diffusion vont dépendre de la nature des sources de dopants. Il existe trois grands types de sources : gazeuses, liquides ou solides.[34]

5.1.A partir de sources gazeuses

Les sources gazeuses sont les gaz tels que l'Arsine, AsH_3 , la phosphine, PH_3 ou le diborane B_2H_6 . Notons qu'une circulation en permanence d'un gaz neutre (azote), permet d'éviter toute

pollution par des éléments venant de l'atmosphère ambiante. Cet azote doit être très pur aussi afin de ne pas polluer le four.

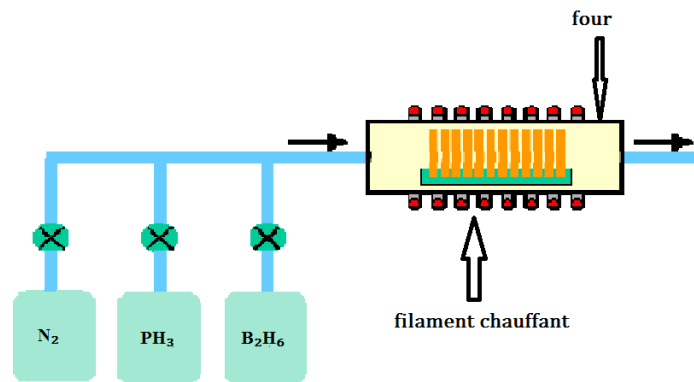


Figure II.7 : Diffusion dans un four a partir de sources gazeuses.[35]

5.2.A partir de sources liquides

Bien qu'a priori, les gaz de dopage soient simples a mettre en œuvre, ils sont par contre très dangereux pour l'homme a même quelques ppm de concentration. On préfère donc, utiliser des sources liquides, telles que $POCl_3$ ou BBr_3 qui sont liquides a température ambiante mais facilement vaporisées pour être introduites dans les fours de diffusion.

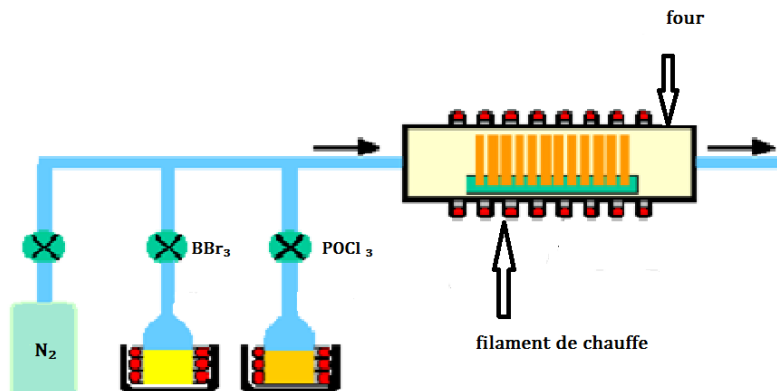


Figure II.8: Diffusion à partir de sources liquides.[35]

5.3.A partir de sources solides

On peut aussi utiliser des sources solides, tels que les verres contenant les dopants : nitrure de bore ou verre dope au phosphore.

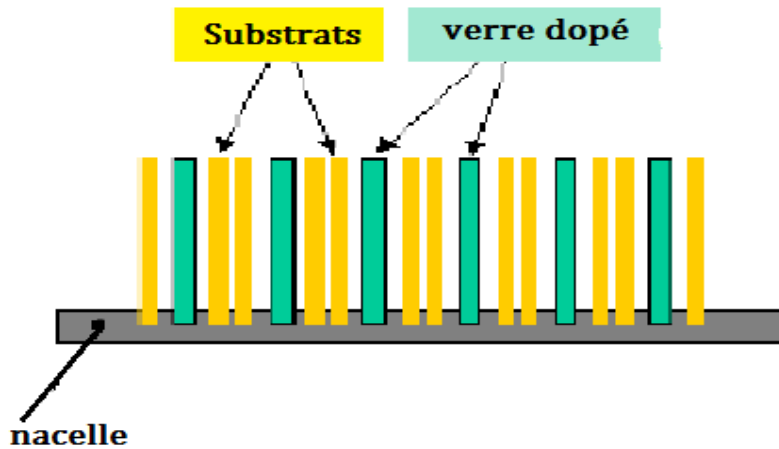


Figure II.9 : Procédé de dopage à partir de sources solides.[35]

6. Diffusion des impuretés dans le silicium

Le silicium intrinsèque (dépourvu de toutes impuretés susceptibles de modifier la densité des porteurs) a sa bande de valence presque totalement pleine et sa bande de conduction presque totalement vide. Dans cet état, on peut affirmer qu'à température ambiante, il est presque un isolant.[36]

Compte tenu des caractéristiques électriques nécessaires à la conception de la jonction, celle-ci ne peut pas être utilisée telle quelle. C'est pourquoi nous utilisons une étape technologique importante dans la conception des composants électroniques : le dopage.

Le processus de dopage implique l'introduction contrôlable d'impuretés (c'est-à-dire d'éléments dopants) dans le silicium. Ces éléments introduiront des porteurs libres capables de "sauter" entre les États locaux.

Les dopants sont de deux natures :

- **Donneurs** : ils sont alors responsables de la présence de charges négatives en excès (électrons e^-). L'ionisation de l'élément dopant existe parce que l'élément dopant a donné des électrons dans le réseau par agitation thermique

- **Accepteurs** : Ils sont responsables de la présence de charges positives en excès (trous h^+). L'ionisation se produit parce que l'élément dopant a reçu des électrons dans le réseau par agitation thermique.

Dans le cas du silicium, qui est situé dans la colonne IV de la classification périodique des éléments, les éléments dopants sont Bore et Aluminium (Accepteurs) Phosphore et Arsenic (Donneurs).

On peut aussi retenir que les coefficients de diffusion dépendent de la concentration. [37]

7. Les défauts ponctuels dans le silicium

Le silicium possède une structure cubique diamant avec un paramètre de maille égal à environ 5.43 Å. Sa densité atomique est de $5.1022 \text{ at.cm}^{-3}$ et la distance interatomique est de 2.35Å. La caractéristique de ce réseau est qu'il est « ouvert », c'est-à-dire avec une faible densité atomique. Les liaisons silicium-silicium sont covalentes entraînant une faible solubilité des impuretés métalliques sauf pour les impuretés qui font des liaisons covalentes avec les donneurs et les accepteurs. [38][39]

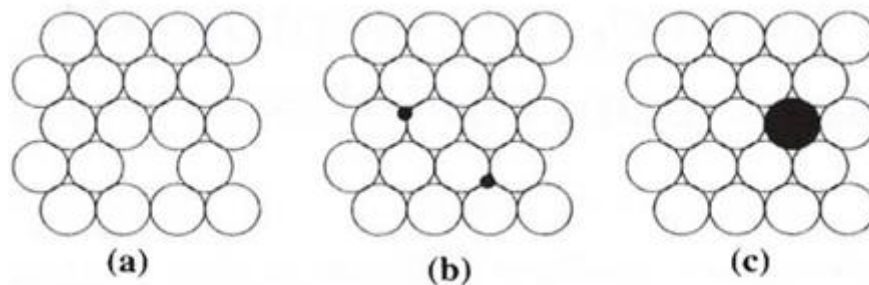


Figure II.10 : Représentation de défauts ponctuels [40].

(a) Lacune, (b) Atome interstitiel (c) Atome substitutionnel

8. Mécanisme de diffusion dans le silicium

Un dopant est une impureté dont la configuration stable se situe dans des sites substitutionnels du réseau lorsque ces impuretés sont placés exclusivement pour Silicium, ils deviennent actifs et peuvent alors faire du dopage. Cependant La diffusion de ces impuretés ne peut se faire qu'en exploitant les défauts ponctuels et les propriétés intrinsèques du silicium. Ces défauts sont soit les lacunes, soit des auto-interstitiels, Ces défauts sont soit des postes vacants, soit des auto-interstitiels, Cela donne lieu à deux types de mécanismes de diffusion de base, que nous allons Présent maintenant.

8.1.Mécanisme lacunaire

Le mécanisme lacunaire est présente sur la figure II.11 .L'impureté ne peut diffuser que si une lacune se présente en position de premier voisin. La diffusion se fait par échange sites entre les impuretés et les lacunes. Dans le cas le plus général, cette lacune peut ensuite s'éloigner de l'atome d'impureté par échange avec les atomes de silicium voisins. Le processus doit alors se renouveler pour que l'impureté dopante effectue un saut supplémentaire.[41]

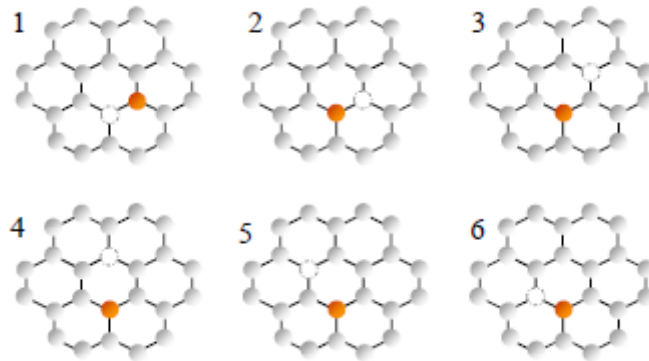


Figure II.11 : Schéma de principe illustrant la migration du dopant selon le mécanisme lacunaire.[42]

Le cas du silicium est en revanche différent. La lacune va rester liée à l'impureté et c'est le complexe dopant-lacune qui va diffuser en tant que tel dans le réseau cristallin du silicium. Ce fut Masayuki Yoshida[43] puis plus tard Fair et Tsai[44]qui décrivent les premiers le mécanisme de diffusion par paire dopant-lacune. En effet, le processus ne se suffira pas d'un simple échange de position, mais en raison de la forte énergie de liaison existante entre la lacune et le dopant.

8.2.Mécanisme interstitiel

Le mécanisme interstitiel simple correspond à la déformation locale des liaisons atomiques obtenue par le couplage entre un atome interstitiel intrinsèque et l'impureté.

Le second mécanisme, le plus souvent appelé "kick-out", est d'une importance particulière puisqu'il est notamment le mécanisme prépondérant de la diffusion dans le silicium. Il correspond à la dissociation assistée par un auto-interstitiel d'une impureté substitutionnelle en une impureté interstitielle mobile.

L'impureté peut alors diffuser dans le cristal de site interstitiel en site interstitiel sur une longue distance jusqu'à se repositionner dans un site substitutionnel du cristal en libérant un

nouvel interstitiel. Pour les deux mécanismes décrits, le coefficient de diffusion des impuretés considérées est proportionnel à la concentration de ce type de défauts ponctuels.[45]

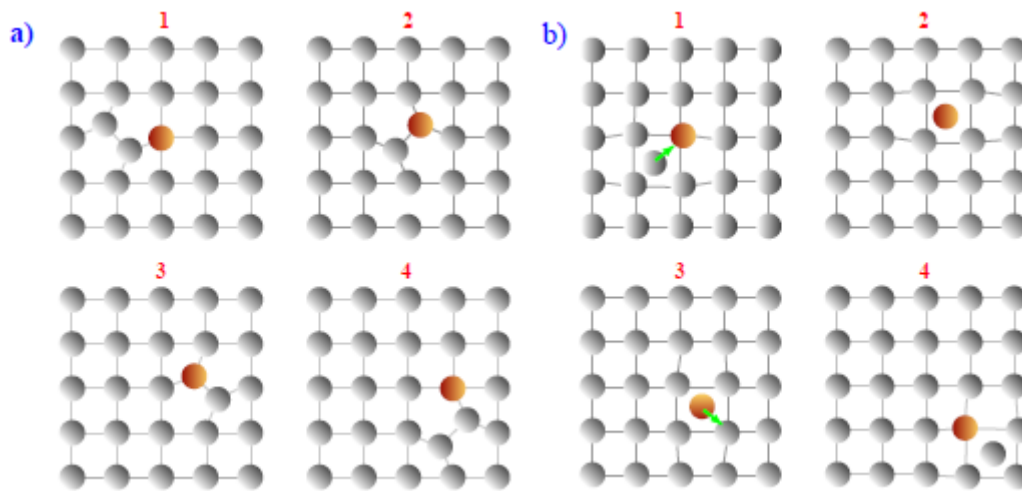


Figure II.12 : Schéma de principe de migration du dopant via les mécanismes interstitiels

a) migration par paire ; b) mécanisme de kick-out.[42]

La figure II.12a présentée le mécanisme de diffusion par paire assistée par les auto-interstitiels. Quand un auto-interstitiel arrive au voisinage d'une impureté substitutionnelle, il peut interagir avec elle pour former une paire dopant-interstitiel. L'auto-interstitiel et l'atome de dopant se partagent alors un site du réseau et cette entité est appelée un interstitiel mixte dissocie.

9. Choix du type de substrat

La plupart des laboratoires travaillent sur les deux types de substrat et des rendements supérieurs à 19% ont été obtenus sur type n et sur type p. Au niveau théorique, il est possible de déterminer quel type de substrat est préférable.

La différence d'énergie de gap entre le (E_{G1}) et le (E_{G2}) entraîne des discontinuités (« Band Offsets ») au niveau de la bande de valence (ΔE_V) et de conduction (ΔE_C). Ces discontinuités ont une influence sur les barrières de potentiel (V_{bn}) et (V_{bp}) de part et d'autre de la jonction. Elles permettent donc théoriquement d'augmenter le potentiel de diffusion (V_D) de la jonction. Larègled'Andersonpermetderelielepentielinternedelajonction,lesdiscontinuités de bandes, les niveaux de dopage et l'énergie de gap.[46]

Les valeurs de la littérature indiquent en moyenne des valeurs de ΔE_V nettement supérieures à celles de ΔE_C (~0.45 eV contre ~0.15 eV). Un potentiel de diffusion plus élevé permet l'augmentation de la V_{co} , mais également une moindre sensibilité aux défauts d'interface[46].

Ceci confirmerait le potentiel de rendement plus élevé des cellules sur type n [47]. Les oxydes thermiques représentent une excellente couche de passivation pour la face arrière lorsque des régions de polarités différentes sont présentes. Les oxydes thermiques représentent une excellente couche de passivation pour la face arrière lorsque des régions de polarités différentes sont présentes.

10. Le nettoyage de surface

Lors de l'étude de la passivation de surface, une des premières étapes à prendre en compte est le nettoyage des plaquettes, car il intervient au tout début du processus de correction des états de surface. En effet, le choix de la technique de nettoyage va conditionner la capacité de la couche de passivation à donner pleinement son potentiel de correction des défauts de surface.[48]

L'optimisation d'une technique de passivation ne peut alors s'envisager que par l'intégration du processus de nettoyage. Lors du procédé de passivation du silicium de type p par Al_2O_3 , une couche d'oxyde de silicium entre le silicium et l'alumine est invariablement observée.[49] C'est pourquoi l'étude de la passivation par Al_2O_3 inclut nécessairement l'impact de cette couche de SiO_2 à l'interface. La nature de cette couche de SiO_2 , est très influencée par la technique de nettoyage appliquée[50]. Plusieurs études ont montré que cette couche de SiO_2 , quelle que soit la technique de dépôt de la couche d' Al_2O_3 (chimique [50], thermique ou plasma [51]), pouvait amener un excédent de charges positives à l'interface avec le silicium, venant contrebalancer les charges négatives de l' Al_2O_3 , réduisant voire annulant la passivation par effet de champ.

Trois procédés de nettoyage, susceptibles d'être utilisés pour la préparation de substrats précurseurs de cellules, ont été testés ici. Tout d'abord un nettoyage standard de la microélectronique appelé nettoyage « piranha », puis deux nettoyages plus simples à mettre en œuvre industriellement, à savoir un mélange d'acide fluorhydrique (HF) à 2% et d'acide chlorhydrique (HCl) à 1%, et un simple bain HF (5%). Ces nettoyages permettent de retirer tout oxyde natif du substrat et laisse une surface de silicium "nu", hydrophobe. Après le bain, les échantillons sont séchés grâce à un flux d'azote.

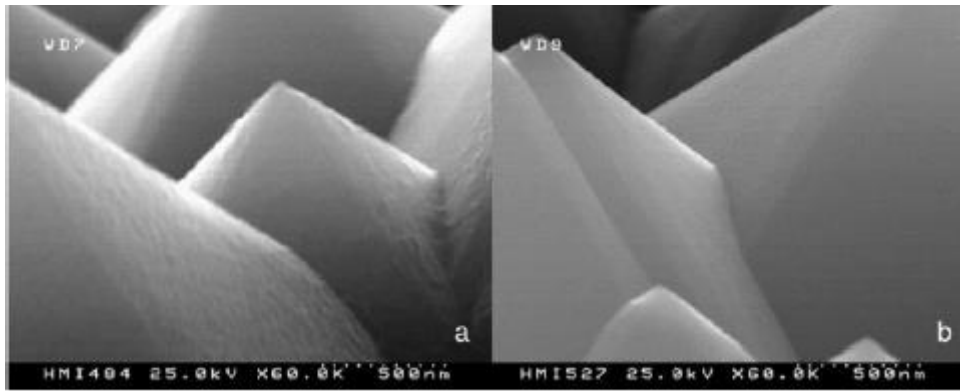


Figure II.13 :Images MEB d'un substrat texturé, avant (à gauche) et après (à droite) nettoyage chimique[52].

11. Critères pour l'optimisation des cellules au silicium

Il est possible de définir différents critères permettant la fabrication de cellules à hauts rendements. Ces dispositifs doivent être optimisés en fonction de plusieurs exigences:

1. Une densité d'états d'interface minimale est nécessaire. Pour cela, le nettoyage de la surface est une étape cruciale afin d'éviter toute contamination avant le dépôt des couches.
2. Le dopage des couches (n) et (p) doit être suffisant pour assurer un champ électrique élevé ainsi qu'un bon contact.
3. Dans la mesure où les couches dopées sont très défectueuses, il est nécessaire d'insérer une couche de passivation à l'interface. Cette couche tampon ou «buffer» doit permettre la diminution des recombinaisons de surface, tout en ne gênant pas la conduction des charges.
4. Les valeurs des discontinuités de bandes doivent être contrôlées dans la mesure du possible pour trouver un compromis entre propriétés de passivation (forte discontinuité) et de conduction (faible discontinuité).
5. Les couches d'OTC (Oxyde Transparent Conducteur) ainsi que les électrodes métalliques sont soumises à un compromis entre propriétés optiques (réflectivité, absorption, ombrage) et propriétés électriques (conductivité).[53]

12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les principaux types des cellules solaires à haut rendement (PERC, IBC, HIT, EWT) et leur fonctionnement

Nous avons, ensuite, expliqué la formation de l'émetteur d'une cellule solaire par diffusion est une étape très importante dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Aussi, nous fournissons tous les outils nécessaires pour bien décrire ce phénomène et ainsi comprendre son mécanisme. La compréhension du phénomène de diffusion des dopants nécessite une bonne compréhension des défauts ponctuels dans le silicium.

La prise en compte des défauts ponctuels résultants est essentielle pour comprendre, ou simuler les profils de diffusion. Ceux-ci sont impliqués dans le mécanisme de diffusion des dopants au sein de la matrice de silicium.

Par conséquent, il est important d'attirer l'attention sur les propriétés physiques et thermodynamiques de ces défauts inhérents présents dans le réseau de silicium.

Bibliographie de chapitre II

- [1] C. Yu, S. Xu, J. Yao, et S. Han, « Recent Advances in and New Perspectives on Crystalline Silicon Solar Cells with Carrier-Selective Passivation Contacts », *Crystals*, vol. 8, n° 11, Art. n° 11, nov. 2018, doi: 10.3390/cryst8110430.
- [2] G. Lund, *Light and enhanced Temperature Induced Degradation, LeTID*. 2019.
- [3] F. Ye, N. Yuan, J. Ding, et Z. Feng, « The performance of thin industrial passivated emitter and rear contacts solar cells with homogeneous emitters », *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, p. 013122, janv. 2015, doi: 10.1063/1.4906911.
- [4] A. Blakers, « Development of the PERC Solar Cell », *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, n° 3, p. 629-635, mai 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2899460.
- [5] E. Wang, H. Wang, et H. Yang, « Comparison of the Electrical Properties of PERC Approach Applied to Monocrystalline and Multicrystalline Silicon Solar Cells », *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016, p. e8982376, oct. 2016, doi: 10.1155/2016/8982376.
- [6] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, et B. Hallam, « Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption », *Energy & Environmental Science*, vol. 14, n° 11, p. 5587-5610, 2021.
- [7] Verlinden, R. M. Swanson, et R. A. Crane, « 7000 High Efficiency Cells for a Dream », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 2, p. 143-152, 1994.
- [8] A. Mekemeche Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », Thesis, 2017.
- [9] C. Hollemann *et al.*, « Separating the two polarities of the POLO contacts of an 26.1%-efficient IBC solar cell », *Sci Rep*, vol. 10, n° 1, Art. n° 1, janv. 2020, doi: 10.1038/s41598-019-57310-0.
- [10] N. Dwivedi, S. Kumar, A. Bisht, K. Patel, et S. Sudhakar, « Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve ~27% efficiency », *Solar Energy*, vol. 88, p. 31-41, févr. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2012.11.008.
- [11] H.-Z. B. für M. und Energie, « PVcomB Si Heterojunction solar cells », *HZB Website*.
- [12] 陆中丹 et 崔艳峰, « HIT solar cell structure », CN203260611U, 30 octobre 2013 .
- [13] X. Yang, J. Bian, Z. Liu, S. Li, C. Chen, et S. He, « HIT Solar Cells with N-Type Low-Cost Metallurgical Si », *Advances in OptoElectronics*, vol. 2018, p. e7368175, janv. 2018, doi: 10.1155/2018/7368175.

- [14] D. Lachenal *et al.*, « High efficiency silicon heterojunction solar cell activities in neuchâtel, Switzerland », *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, janv. 2010.
- [15] X. Wang et Z. M. Wang, Éd., *High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials, and Devices*, vol. 190. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-01988-8.
- [16] N. Harder *et al.*, « Laser-processed high-efficiency silicon RISE-EWT solar cells and characterisation », *Phys. Status Solidi (c)*, vol. 6, n° 3, p. 736-743, mars 2009, doi: 10.1002/pssc.200880720.
- [17] E. V. Kerschaver et G. Beaucarne, « Back-contact solar cells: a review », *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 14, n° 2, p. 107-123, mars 2006, doi: 10.1002/pip.657.
- [18] C. Lerouge, R. Herino, R. Delville, et R. Allegre, « Research and photovoltaic industry at the United States; Recherche et industrie photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis », 2006.
- [19] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigtés », *Institut national des sciences appliquée de Lyon*, 2005.
- [20] R. A. Sinton et R. M. Swanson, « Design criteria for Si point-contact concentrator solar cells », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 34, n° 10, p. 2116-2123, oct. 1987, doi: 10.1109/T-ED.1987.23205.
- [21] R. M. Swanson, « Back side contact solar cell with doped polysilicon regions », déc. 2008.
- [22] P. Engelhart *et al.*, « Laser processing of 22% efficient back-contacted silicon solar cells », 2006, p. 773-776.
- [23] P. Gruenbaum, R. Sinton, et R. Swanson, « Stability problems in point contact solar cells », 1988, p. 423-428.
- [24] P. Taylor *et al.*, « Electronic processes in thin film PV materials », *Annual Report Photovoltaic Program Branch*, p. 245, 1990.
- [25] R. Schwartz, J. Bouknight, et M. Worley, « The effects of surface potential on surface recombination and the performance of silicon solar cells », 1978, p. 74-77.
- [26] J. Dicker, J. Schumacher, W. Warta, et S. Glunz, « Analysis of one-sun monocrystalline rear-contacted silicon solar cells with efficiencies of 22.1% », *Journal of Applied Physics*, vol. 91, n° 7, p. 4335-4343, 2002.
- [27] K. R. McIntosh, M. J. Cudzinovic, D. D. Smith, W. P. Mulligan, et R. M. Swanson, « The choice of silicon wafer for the production of low-cost rear-contact solar cells », 2003, vol. 1, p. 971-974.
- [28] P. Verlinden, « Backside-contact silicon solar cells with improved efficiency for the'96 world solar challenge », *Proc. 15th EU-PVSEC*, 1997, 1997.

- [29] D. De Ceuster, P. Cousins, D. Rose, D. Vicente, P. Tipones, et W. Mulligan, « Low cost, high volume production of > 22% efficiency silicon solar cells », 2007, p. 816-819.
- [30] F. Granek, M. Hermle, D. M. Huljić, O. Schultz-Wittmann, et S. W. Glunz, « Enhanced lateral current transport via the front N^+ diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells », *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 17, n° 1, p. 47-56, janv. 2009, doi: 10.1002/pip.862.
- [31] N.-P. Harder, V. Mertens, et R. Brendel, « Buried emitter solar cell structures: Decoupling of metallisation geometry and carrier collection geometry of back contacted solar cells », *phys. stat. sol. (RRL)*, vol. 2, n° 4, p. 148-150, août 2008, doi: 10.1002/pssr.200802113.
- [32] S. Rein, *Lifetime Spectroscopy: A Method of Defect Characterization in Silicon for Photovoltaic Applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [33] S. Q. Xiao et S. Xu, « High-Efficiency Silicon Solar Cells—Materials and Devices Physics », *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, vol. 39, avr. 2014, doi: 10.1080/10408436.2013.834245.
- [34] C. Gontrand, *Composants en micro-nanoélectronique: Modélisation des processus de diffusion et du fonctionnement*. ISTE Group, 2018.
- [35] N. Benadla, « Optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc_si », mars 2012.
- [36] H. K. LACHACHI, « Étude de la diffusion du bore et de la passivation des défauts dans les cellules solaires au silicium type N à haut rendement », Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- [37] D. Réaux, « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface », phdthesis, Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [38] F. Boucard, « Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines », Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2003.
- [39] N. Rodriguez, « Diffusion des dopants dans les dispositifs de la microélectronique : codiffusion de l'arsenic et du phosphore dans le silicium, étude unidimensionnelle et bidimensionnelle. », phdthesis, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2008.
- [40] J.-C. Tolédano, *Bases physiques de la plasticité des solides*. Editions Ecole Polytechnique, 2007.
- [41] R. O. Simmons et R. W. Balluffi, « Measurements of Equilibrium Vacancy Concentrations in Aluminum », *Phys. Rev.*, vol. 117, n° 1, p. 52-61, janv. 1960, doi: 10.1103/PhysRev.117.52.
- [42] F. Boucard, « Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines », phdthesis, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2003.

- [43] M. Yoshida, E. Arai, H. Nakamura, et Y. Terunuma, « Excess vacancy generation mechanism at phosphorus diffusion into silicon », *Journal of Applied Physics*, vol. 45, n° 4, p. 1498-1506, avr. 1974, doi: 10.1063/1.1663450.
- [44] R. B. Fair et J. C. C. Tsai, « A Quantitative Model for the Diffusion of Phosphorus in Silicon and the Emitter Dip Effect », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 124, n° 7, p. 1107-1118, juill. 1977, doi: 10.1149/1.2133492.
- [45] M. B. El, « Modélisation physique et simulation de défauts étendus et diffusion des dopants dans le Si, Soi et SiGe pour les MOS avancés », phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010.
- [46] N. Jensen, R. M. Hausner, R. B. Bergmann, J. H. Werner, et U. Rau, « Optimization and characterization of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells », *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 10, n° 1, p. 1-13, janv. 2002, doi: 10.1002/pip.398.
- [47] A. Froitzheim, R. Stangl, L. Elstner, M. Schmidt, et W. Fuhs, « Interface recombination in amorphous/crystalline silicon solar cells, a simulation study », in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, New Orleans, LA, USA, 2002, p. 1238-1241. doi: 10.1109/PVSC.2002.1190832.
- [48] « Z-Library ». <https://zh.booksc.eu/ireader/32645537>.
- [49] « Z-Library ». <https://ur.booksc.me/ireader/30416501>.
- [50] N. Ikeno *et al.*, « Investigation of new stacking surface passivation structures with interfacial tuning layers on p-type crystalline silicon », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, p. 04ES03, avr. 2016, doi: 10.7567/JJAP.55.04ES03.
- [51] N. N. Terlinden, G. Dingemans, V. Vandalon, R. R. Bosch, et W. Kessels, « Influence of the SiO₂ interlayer thickness on the density and polarity of charges in Si/SiO₂/Al₂O₃ stacks as studied by optical second-harmonic generation », 2014, doi: 10.1063/1.4857075.
- [52] H. Angermann *et al.*, « Optimisation of electronic interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells by wet-chemical surface pre-treatment », *Thin Solid Films*, vol. 516, n° 20, p. 6775-6781, août 2008, doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.033.
- [53] MAHAMMEDI MOHAMMED & DEGLA BACHIR, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction de structure HIT : a-Si:H (n) / a-Si:H (i) / c-Si (p) ». UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 07 2019.

Chapitre III :
Simulation des cellules solaires
à contacts arrières

I. Introduction

La simulation numérique des cellules solaires permet de réduire considérablement les cycles d'élaboration, de définir les objectifs technologiques et minimiser ainsi les coûts de développement. La simulation numérique de la structure photovoltaïque étudiée a été effectuée par le logiciel PC3D.

Pour étudier l'influence des différents paramètres, on fait varier un paramètre tout en maintenant les autres fixes, puis on génère la caractéristique de sortie courant-tension I-V, ainsi que la réponse spectrale sous illumination AM1.5 dans le but d'extraire les paramètres électriques à savoir : la tension en circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion électrique de cellule photovoltaïque étudiée.

II. Présentation des programmes PC1D et PC3D

1. Aperçu sur le logiciel PC1D

Le logiciel de simulation numérique de cellules solaires PC1D est largement utilisé dans le domaine photovoltaïque. Il a une grande réputation dans la communauté de la recherche solaire. Il a été développé par l'Université « New South Wales » de Sydney en Australie. Son succès repose sur sa rapidité d'exécution, son interface d'utilisation et ses mises à jour continues (la dernière étant la version 5.9). Les structures photovoltaïques peuvent être simulées en introduisant les différents paramètres tels que le dopage, les paramètres géométriques, les paramètres électriques, les paramètres optiques, etc...La fenêtre du logiciel PC1D est illustrée à la figure III.1 le logiciel se compose de quatre parties. Les trois premières sont dédiées à la programmation qui nécessite une introduction aux paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.[1]

1.1. Paramètres du dispositif (Device)

Ils sont comme suit:

- La surface du dispositif,
- La texturisation,
- La densité de charge surfacique,
- La couche de passivation,

- La réflectance externe,
- La réflectance interne,
- Les résistances séries,
- Les résistances shunt.

1.2. Paramètres des régions

On peut introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants :

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Dans ces fichiers, les paramètres prédéfinis sont : les mobilités, la constante diélectrique, la permittivité électrique, l'énergie de gap, l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque, le coefficient d'absorption optique et l'absorption des porteurs libres.
- Le type et la concentration du dopage,
- Les durées de vie des porteurs,
- Les vitesses de recombinaison dans chaque région.

1.3. Paramètres d'excitation

- Le logiciel contient deux fichiers intégrés :
 - le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant-tension, puissance-tension, etc...),
 - le fichier « Scan-qe.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale,
- Mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire),
- Température,
- Circuit (résistance, tension),

- Eclairement (intensité, fichier d'air masse).

1.4. Résultats

Les résultats visualisés lorsqu'on utilise le fichier « OneSun.exc» comme excitation, sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la tension en circuit ouvert,
- La valeur de la puissance maximale.

Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la puissance maximale.

La figure ci-dessous représente la fenêtre de PC1D :

DEVICE
 Device area: 1 cm²
 Front surface texture depth: 3 μm
No surface charge
 Exterior Front Reflectance: 5%
No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: 0.8 Ω
 Internal conductor: 1×10⁻³ S

REGION 1
 Thickness: 180 μm
 Material modified from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 1×10¹⁶ cm⁻³
 1st front diff.: N-type, 2×10²⁰ cm⁻³ peak
No 2nd front diffusion
 1st rear diff.: P-type, 3×10¹⁸ cm⁻³ peak
No 2nd rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 30 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 100 cm/s
 Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 1×10⁷ cm/s

EXCITATION
 Excitation from light iv.exc
 Excitation mode: Transient, 50 timesteps
 Temperature: 25°C
 Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V
Collector circuit: Zero
 Primary light source enabled
 Constant intensity: 0.1 W cm⁻²
 Spectrum from am15g.spc
Secondary light source disabled

RESULTS
 Short-circuit I_b: 0.0373 amps
 Max base power out: 0.0180 watts
 Open-circuit V_b: 0.6189 volts

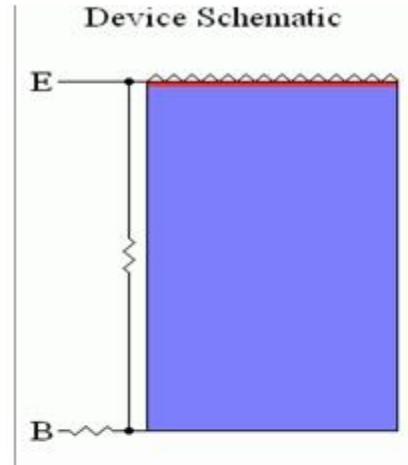


Figure III.1 : Fenêtre du PC1D[1]

2. Aperçu sur le logiciel PC3D

PC3D est un programme qui permet d'explorer le fonctionnement interne des cellules solaires au silicium en 2D ou 3D. Il nécessite Microsoft Excel fonctionnant sur Windows ou MacOS.

PC3D a été initialement développé en 2019 par Paul BASORE dans le but de combiner les meilleures caractéristiques d'interface utilisateur de PC1D et PC2D dans un programme capable de modéliser efficacement les cellules solaires au silicium en trois dimensions et de fournir un moyen visuel efficace pour explorer la solution résultante. Microsoft Excel fournit l'interface utilisateur de PC3D, mais tous les calculs sont effectués en code plutôt qu'en formules de tableur pour des solutions plus rapides. La première version publique a été la version 1.3 à la fin du mois d'octobre 2019. Le code du programme est entièrement open-source et est disponible gratuitement.[2]

Ce travail a été effectué par le logiciel PC3D version 1.7.

2.1. Feuilles de calcul

2.1.1. La feuille «Dashboard » :

On commence par cliquer sur Solve (Dashboard A5). Cette notation désigne la cellule A5 de la feuille Dashboard. Ce bouton résout le problème du courant à la tension de contact actuelle (Dashboard G1).

Les problèmes 3D prennent plus de temps à résoudre qu'un problème 2D, et beaucoup plus longtemps si la résolution la plus élevée est sélectionnée (Dashboard D2). Pour la plupart des problèmes, la résolution Auto offre le temps de solution le plus court tout en maintenant une précision à trois chiffres.


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		Filename:	nitter wrap_3D_origir	Contact Voltage:	0,602 V	Mode:	Contact						
2	Load	Resolution (3D):	Auto	Generation:	0,00E+00 A/cm2								
3	Save	Convergence Goal:	1,0E-03	Recombination:	0,00E+00 A/cm2								
4		Residual Error:		Terminal Voltage:		V (forward)							
5	Solve	Iteration Counter:		Terminal Current:		A/cm2 (out)							
6		Status Indicator:		Terminal Power:		W/cm2 (out)							
7													

Figure III.2 : Partie d'une feuille « Dashboard »

PC3D détecte automatiquement si une solution 3D est nécessaire (comme indiqué dans Dashboard C2).

De nombreux graphiques sont disponibles à l'aide des boutons situés dans la partie supérieure droite de la feuille Dashboard. Certains d'entre eux comportent plusieurs options qu'on peut sélectionner à partir de listes déroulantes. Certains tracés n'ont de sens que pour les surfaces avant et arrière. Le tracé de la disposition est particulier car il ne s'agit pas d'un résultat de solution, mais plutôt d'une représentation graphique des contacts métalliques et des régions diffusées sur chaque surface (gris pour le métal, orange pour le type n, bleu pour le type p et vert pour les surfaces non dopées).

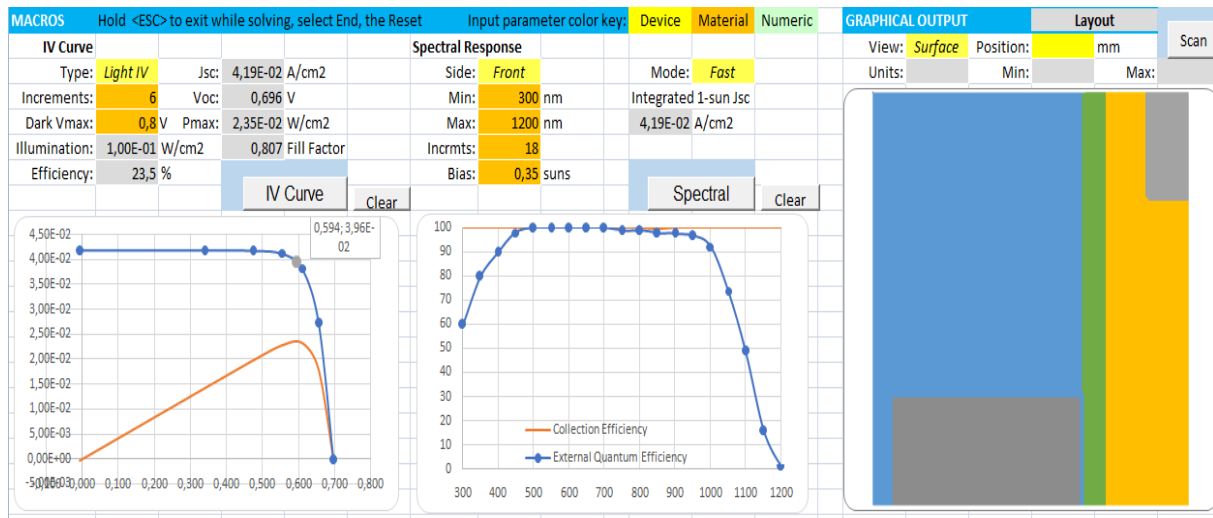


Figure III.3 : La représentation graphique sur la feuille «Dashboard»

2.1.2. La feuille «Device »:

1. La structure :

La structure de la cellule photovoltaïque est définie par la hauteur (**H2**), la longueur (**E2**) et la largeur (**B2**) de la région à simuler, Ces paramètres sont donnés à la température ambiante de 25 °C.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	SOLUTION VOLUME Mirror symmetric on all four sides															
2	Width:	0,50	mm	Length:	0,50	mm	Height:	140	µm	Area:	0,0025	cm2	3D layout	T:	25	deg C
3																

Figure III.4 : la structure de la cellule

2. Circuit :

On définit les contacts en mettant un « 1 » là où il y a un contact métallique et « 0 » là où il n'y existe pas. Une fois le volume de solution identifié, on utilise la feuille « Device » pour spécifier les dimensions de ce volume, y compris les contacts métalliques et les régions diffusées. La surface peut être divisée jusqu'à 25 zones distinctes. Ce cloisonnement peut être différent sur la surface avant et arrière. Le cloisonnement n'a aucun effet sur la solution, si ce n'est de définir les dimensions de chaque élément de la surface.

	Front Surface					Rear Surface							
4													
5	CIRCUIT 0 = no contact. >0 is contact resistance in mΩcm ²										0 = no contact. >0 is contact resistance in mΩcm ²		
6	0	0	0	0	0	0,10	fit mm	0	0	0	0	1	20,00 %
7	0	0	0	0	0	0,10	fit mm	0	0	0	0	0	0,10 fit mm
8	0	0	0	0	0	0,10	fit mm	0	0	0	0	0	0,10 fit mm
9	0	0	0	0	0	0,10	fit mm	0	0	0	0	0	0,10 fit mm
10	0	0	0	0	0	0,10	fit mm	0	1	0	0	0	20,00 %
11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10			10,00	50,00	0,10	10,00	10,00	
12	fit mm	fit mm	fit mm	fit mm	fit mm			%	%	fit mm	%	%	
13													

La figure III.5: Le circuit sur la feuille « Device »

La tension de contact est la tension directe appliquée entre les contacts positif et négatif au volume de solution. Elle diffère de la tension aux bornes du dispositif lorsqu'une résistance série externe (DeviceT8) a été ajoutée pour tenir compte de la résistance série supplémentaire entre le volume de solution et les bornes du dispositif.

R	S	T	U
<i>Enter a description of the device here:</i>			
This is a 3D model of a back contacts cell			
EXTERNAL RESISTANCE			
Series Resistance:		0,20	Ωcm ²
<i>Columns and rows set to "fit" will adjust automatically to match the solution volume's width and height.</i>			

Figure III.6 : La résistance série externe sur la feuille « Device »

3. Paramètres optiques :

Le modèle optique suppose que les surfaces peuvent être représentées comme un mélange de composantes planes et lambertiennes. Contrairement à PC1D et à la plupart des autres programmes, l'absorption de la lumière dans PC3D n'est pas approximée par un seul angle de parcours effectif mais la distribution des angles de parcours change avec la distance parcourue et est unique pour chaque longueur d'onde.

OPTICS														
100	100	100	100	100	100	%			0	0	100	0	0	%
100	100	100	100	100	100				0	0	100	0	0	
100	100	100	100	100	100		Transmission		0	0	100	0	0	
100	100	100	100	100	100				0	0	100	0	0	
100	100	100	100	100	100				0	0	100	0	0	
80	80	80	80	80	80	%			20	20	20	20	20	%
80	80	80	80	80	80				20	20	20	20	20	
80	80	80	80	80	80		Haze		20	20	20	20	20	
80	80	80	80	80	80				20	20	20	20	20	
80	80	80	80	80	80				20	20	20	20	20	
50	50	50	50	50	50	%			90	90	20	90	70	%
50	50	50	50	50	50				90	90	20	90	90	
50	50	50	50	50	50		Specular Reflectance		90	90	20	90	90	
50	50	50	50	50	50				90	90	20	90	90	
50	50	50	50	50	50				70	90	20	90	90	
92	92	92	92	92	92	%			95	95	92	95	70	%
92	92	92	92	92	92				95	95	92	95	95	
92	92	92	92	92	92		Diffuse Reflectance		95	95	92	95	95	
92	92	92	92	92	92				95	95	92	95	95	
92	92	92	92	92	92				70	95	92	95	95	

Figure III.7 : Le modèle optique sur la feuille « Device »

Ce sont la transmission, la réflexion spéculaire (directe ou unidirectionnelle, obéissant aux lois optiques de Snell-Descartes), la réflexion diffuse (déviation d'un faisceau unidirectionnel dans de nombreuses directions) et facteur de brume (surface haze). Ce dernier nous renseigne sur la nature de la surface (par exemple un facteur de brume de 80% signifie qu'autant de pourcentage de la surface est diffuse et 20% est spéculaire).

4. Le modèle électrique :

Le modèle électrique suppose que la densité de dopage et les mobilités (diffusivités) des électrons et des trous sont uniformes sur toute la tranche de silicium, mais il n'impose aucune restriction sur le niveau d'injection des porteurs. Pour le dopage de type p, on met le signe «+», et pour le dopage de type n on met le signe «-».

BULK	neg=n-type pos=p-type
Silicon	Doping: 1,00E+14 cm-3
Electron Diffusivity:	36,3 cm2/s
Hole Diffusivity:	12,2 cm2/s
Resistivity:	131,82 Ωcm
Minority:	7,33E+05 cm-3

La figure III.8 : Le modèle électrique sur la feuille « Device »

2.1.3. La Feuille « Recombinaison » :

La partie supérieure de la feuille concerne la recombinaison volumique (tau n, tau p, la longueur de diffusion, la concentration intrinsèque des porteurs, le coefficient de recombinaison Auger), ainsi que la recombinaison superficielle pour les deux faces avant et arrière. La partie centrale concerne les défauts de volume (largeur, longueur, profondeur). La partie inférieure concerne les défauts superficiels de surface avant et arrière aux alentours de chaque nœud de la structure à simuler.

BULK RECOMBINATION						0,00E+00 A/cm2	0,0%						
tau-n:	2	ms	Minority Diffusion Length:			4914 μm	Intrinsic carrier concentration:			8,56E+09	cm-3		
tau-p:	20	ms	Ambipolar Diffusion Length:			6291 μm	Auger recombination coefficient:			8,30E-31	cm6/s		
SURFACE RECOMBINATION						0,00E+00 A/cm2	0,0%						
Front Surface								Rear Surface					
	10	10	10	10	10	fA/cm2		50	50	20	50	400	fA/cm2
	10	10	10	10	10			50	50	20	50	50	
Jo1	10	10	10	10	10			50	50	20	50	50	
	10	10	10	10	10			50	50	20	50	50	
	10	10	10	10	10			400	50	20	50	50	
BULK DEFECTS						0,00E+00 A/cm2	0,0%						
			Orientation	width(%)	length(%)	depth(%)	PreFactor		n	Damping			
	Point:	Disable	N/A	50	50	50	1,00E-09 A		2	0,5			
	Line:	Disable	Face	50	100	50	1,00E-08 A/cm		2	0,5			
	Plane:	Disable	Side	50	100	100	1,00E-07 A/cm2		2	0,5			
SURFACE DEFECTS						0,00E+00 A/cm2	0,0%						
Front Surface								Rear Surface					
	0	0	0	0	0	nA/cm2		1	1	0	0	0	nA/cm2
	0	0	0	0	0			1	1	0	0	0	
Jo2	0	0	0	0	0			1	1	0	0	0	
	0	0	0	0	0			1	1	0	0	0	
	0	0	0	0	0			1	1	0	0	0	

La figure III.9 : la feuille « Recombinaison »

La concentration intrinsèque est ajustée à l'aide des paramètres du modèle, indépendamment de la valeur précédemment saisie pour la concentration intrinsèque sur la feuille « Recombinaison ». Les modèles d'absorption et de recombinaison se comportent différemment, en ajustant les valeurs précédemment saisies.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	TEMPERATURE MODEL <i>If enabled, any change to device temperature (Device!O2) triggers adjustment of material and device parameters using the following model:</i>																	
2	<i>Disable</i>																	
3	Intrinsic concentration			Optical absorption			Bulk recombination			Surface Recombination								
4	T (kelvin)	ni (cm-3)		beta:	0,473	meV/K		exponent:	1		Jo1:	proportional to ni ^	2					
5	200	4,70E+04		gamma:	636	kelvin					Jo2:	proportional to ni ^	1					
6	300	1,00E+10									Gsh:	proportional to ni ^	0					
7	400	5,60E+12		Diffusivity changes with temperature whenever Si model is selected (Device!R15)														
8	Temperature effects not included in this model: Sheet resistance, Auger recombination, Bulk defects, Contact resistance, Device dimensions, External series resistance, Device optics																	
9																		
10	DOPING MODEL <i>If enabled, any change to device doping (Device!T15) triggers adjustment of material and device parameters using the following model:</i>																	
11	<i>Disable</i>																	
12	Bulk recombination			Undoped surface recombination			Diffusivity changes with doping whenever Si model is selected (Device!R15)											
13	onset:	5,00E+15	cm-3	Nref:	9,00E+15	cm-3												
14	exponent:	-0,8		alpha:	0,75		Doping effects not included in this model: Bulk defects, Optical absorption											
15																		
16	CIRCUIT MODEL <i>Best-fit two-diode circuit model of the currently plotted IV data</i>																	
17																		
18	JL:	4,24E-02	A/cm2	Gsh:	0,00	mS/cm2	MS error of curve fit:	4,30E-05	A/cm2	A minimum of 5 data points are required for the fit								
19	Jo1:	67,5	fA/cm2	Rs:	0,401	ohm-cm2	Circuit model Pmax:	2,38E-02	W/cm2	DarkIV and SunsVoc data are weighted inversely to current-squared								
20	Jo2:	5,9	nA/cm2	Temp:	25,00	deg C	Circuit model Voc:	0,695	V	Change the circuit parameters to see the impact on Pmax and Voc								
21																		

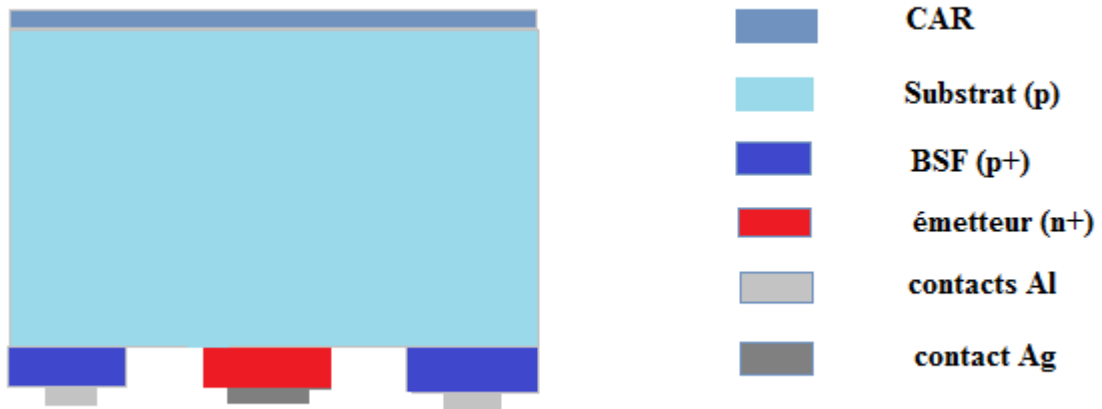
La figure III.11 : la feuille « Models »

Le modèle de circuit est toujours activé et remplit deux fonctions. Des valeurs pour les éléments d'un modèle de circuit à deux diodes sont introduites et PC3D calcule la puissance maximale Pmax et la tension en circuit ouvert Voc. Lorsque la courbe I-V (claire ou foncée) est balayée, PC3D trouve les valeurs des éléments qui fournissent la meilleure adéquation aux données I-V par la méthode des moindres carrés.

Après une analyse I-V, les valeurs des éléments du circuit peuvent être modifiées pour voir leur impact sur Pmax et Voc.

III. Simulation et optimisation

1. La structure simulée :



La figure III.12 : la structure simulée (cellule élémentaire) (L'échelle n'est pas respectée)

L'ensemble des variations des différents paramètres est résumé dans le tableau III.1.

Paramètre	La valeur
Substrat (p)	Dopage : de $5.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Epaisseur : $150 \mu\text{m}$ à $300 \mu\text{m}$
Emetteur (n+)	Dopage : de $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à $5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ Epaisseur : $0.3 \mu\text{m}$ et $0.5 \mu\text{m}$
Distances entre les contacts	Position 1 : 0.3 mm Position 2 : 0.2 mm

Tableau III.1 : Paramètres variables pendant la simulation

Pour la simulation, nous avons procédé de la manière suivante : pour les deux types de cellules n et p et pour les deux positions distinctes des contacts, nous avons fait varier les paramètres géométriques à savoir les épaisseurs des substrats et émetteur ainsi que leur niveau de dopage et nous avons calculé les différents paramètres électriques de la cellule.

Les graphes sont tracés par le logiciel : OriginPro8.

2. Variation du dopage du substrat

a) Cellule de type n :

➤ **Position 1 de contact (distance entre les deux contacts 0.3 mm)**

En faisant varier les paramètres de simulation, on dresse les tableaux suivants :

Dopage de substrat(cm^{-3})	I_{cc} (A/ Cm^2)	V_{co} (V)	FF	P_{max} (W/ Cm^2)	η (%)
5.10^{13}	$4.19.10^{-2}$	0.695	0.801	$2.33.10^{-2}$	23.3
1.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.695	0.801	$2.33.10^{-2}$	23.3
5.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.696	0.802	$2.33.10^{-2}$	23.3
1.10^{15}	$4.17.10^{-2}$	0.695	0.804	$2.33.10^{-2}$	23.3
5.10^{15}	$4.10.10^{-2}$	0.696	0.812	$2.31.10^{-2}$	23.1
1.10^{16}	$4.01.10^{-2}$	0.695	0.815	$2.27.10^{-2}$	22.7
5.10^{16}	$3.37.10^{-2}$	0.695	0.821	$1.92.10^{-2}$	19.2
1.10^{17}	$2.70.10^{-2}$	0.689	0.825	$1.54.10^{-2}$	15.4

Tableau III.2 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type n position 1

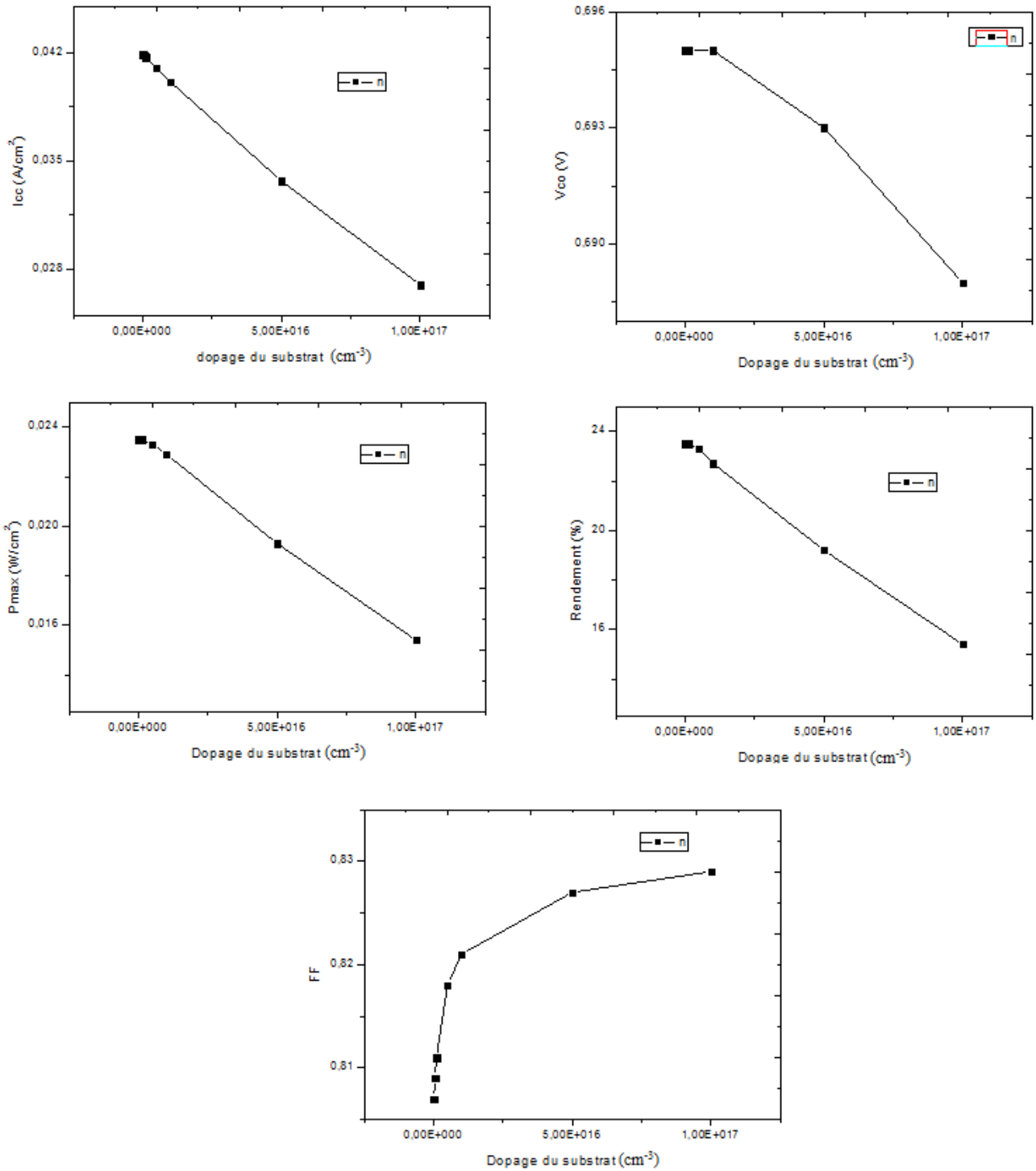


Figure III.13 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type n position 1

➤ **Position 2 de contact (distance entre les deux contacts 0.2 mm)**

Dopage de substrat(cm^{-3})	$I_{cc}(\text{A}/\text{Cm}^2)$	$V_{co}(\text{V})$	FF	$P_{\max}(\text{W}/\text{Cm}^2)$	η (%)
5.10^{13}	$4.19.10^{-2}$	0.696	0.807	$2.35.10^{-2}$	23.5
1.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.696	0.807	$2.35.10^{-2}$	23.5
5.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.696	0.809	$2.35.10^{-2}$	23.5
1.10^{15}	$4.17.10^{-2}$	0.696	0.811	$2.35.10^{-2}$	23.5
5.10^{15}	$4.10.10^{-2}$	0.696	0.818	$2.33.10^{-2}$	23.3
1.10^{16}	$4.01.10^{-2}$	0.695	0.821	$2.29.10^{-2}$	22.9
5.10^{16}	$3.37.10^{-2}$	0.693	0.827	$1.93.10^{-2}$	19.3
1.10^{17}	$2.70.10^{-2}$	0.689	0.829	$1.54.10^{-2}$	15.4

Tableau III.3 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type n position 2

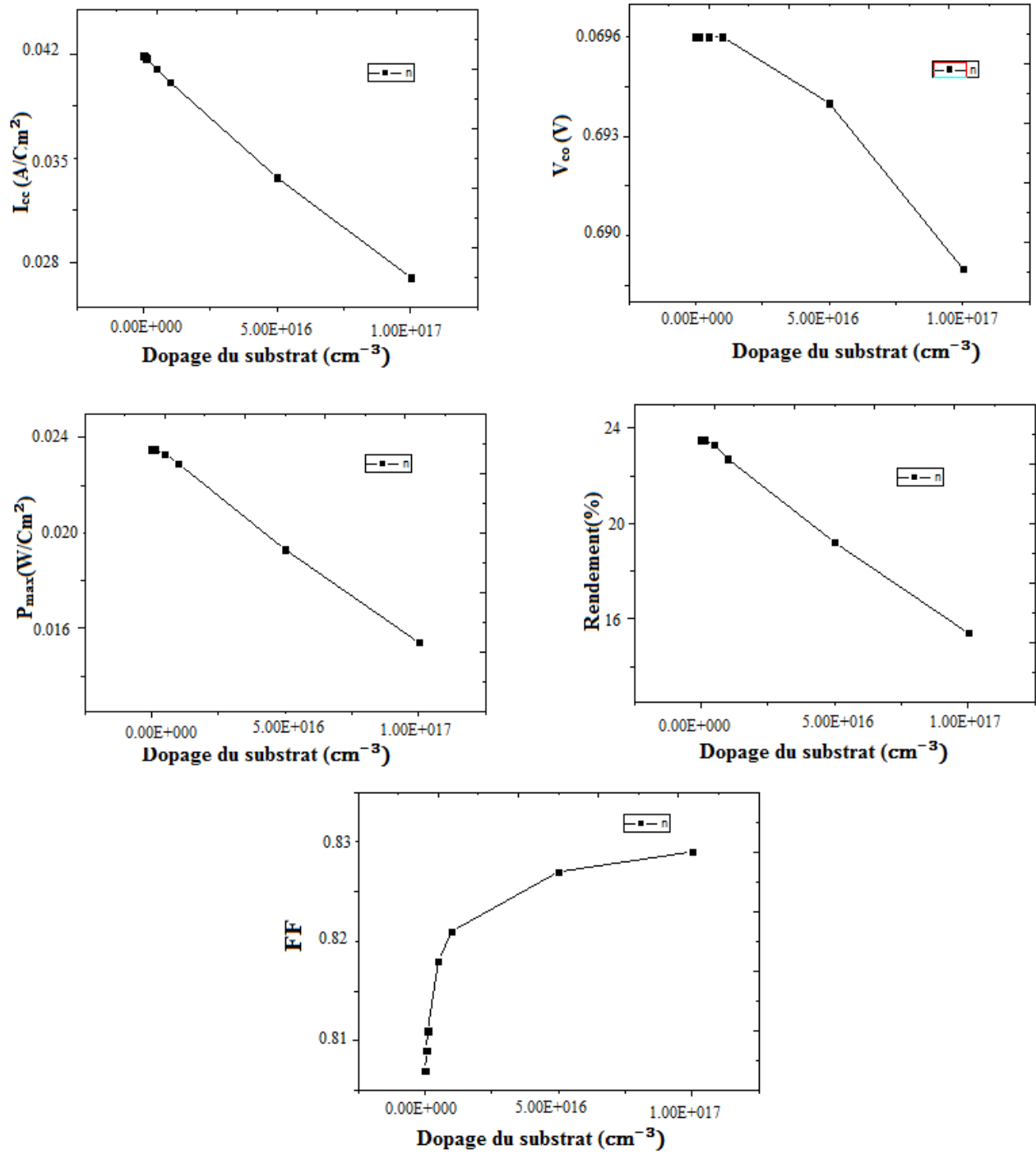


Figure III.14 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type n position 2

b) Le type p :

➤ **Position 1 de contact (distance entre les deux contacts 0.3 mm)**

Dopage de substrat(cm^{-3})	I_{cc} (A/Cm^2)	V_{co}(V)	FF	P_{max}(W/Cm^2)	η (%)
5.10^{13}	$4.19.10^{-2}$	0.695	0.800	$2.33.10^{-2}$	23.3
1.10^{14}	$4.19.10^{-2}$	0.695	0.800	$2.33.10^{-2}$	23.3
5.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.695	0.800	$2.33.10^{-2}$	23.3
1.10^{15}	$4.16.10^{-2}$	0.695	0.801	$2.32.10^{-2}$	23.2
5.10^{15}	$4.07.10^{-2}$	0.695	0.804	$2.27.10^{-2}$	22.7
1.10^{16}	$3.94.10^{-2}$	0.695	0.807	$2.21.10^{-2}$	22.1
5.10^{16}	$3.00.10^{-2}$	0.693	0.820	$1.70.10^{-2}$	17.0
1.10^{17}	$2.16.10^{-2}$	0.690	0.828	$1.23.10^{-2}$	12.3

Tableau III.4 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type p position 1

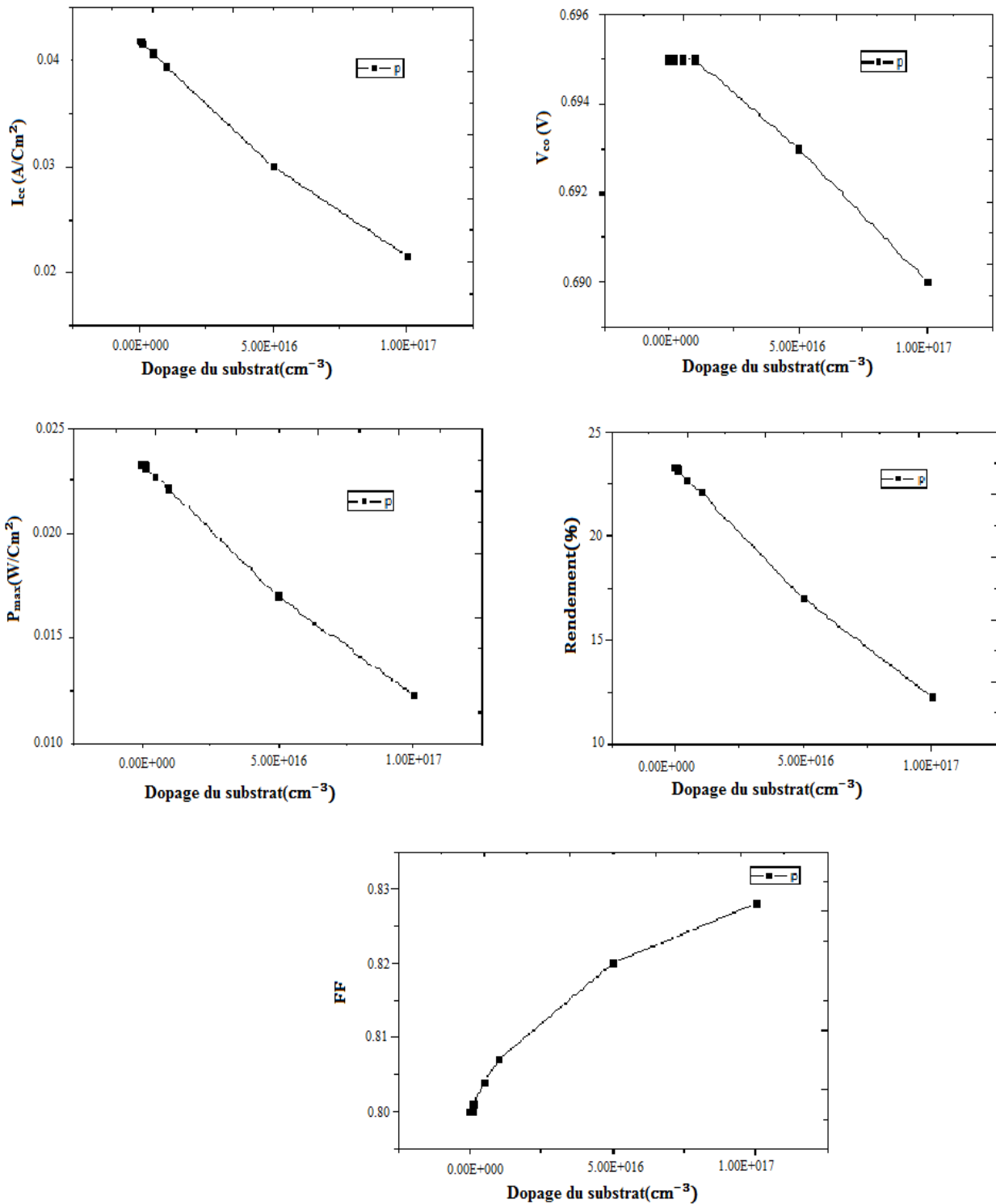


Figure III.15 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage du substrat type p position 1

➤ Position 2 de contact (distance entre les deux contacts 0.2 mm)

Dopage de substrat(cm^{-3})	I_{cc} (A/Cm^2)	V_{co} (V)	FF	P_{max} (W/Cm^2)	η (%)
5.10^{13}	$4.19.10^{-2}$	0.696	0.806	$2.35.10^{-2}$	23.5
1.10^{14}	$4.19.10^{-2}$	0.696	0.807	$2.35.10^{-2}$	23.5
5.10^{14}	$4.18.10^{-2}$	0.696	0.807	$2.35.10^{-2}$	23.5
1.10^{15}	$4.16.10^{-2}$	0.696	0.808	$2.34.10^{-2}$	23.4
5.10^{15}	$4.06.10^{-2}$	0.696	0.811	$2.29.10^{-2}$	22.9
1.10^{16}	$3.93.10^{-2}$	0.695	0.813	$2.22.10^{-2}$	22.2
5.10^{16}	$2.99.10^{-2}$	0.693	0.820	$1.71.10^{-2}$	17.1
1.10^{17}	$2.16.10^{-2}$	0.690	0.828	$1.24.10^{-2}$	12.4

Tableau III.5 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type p position 2

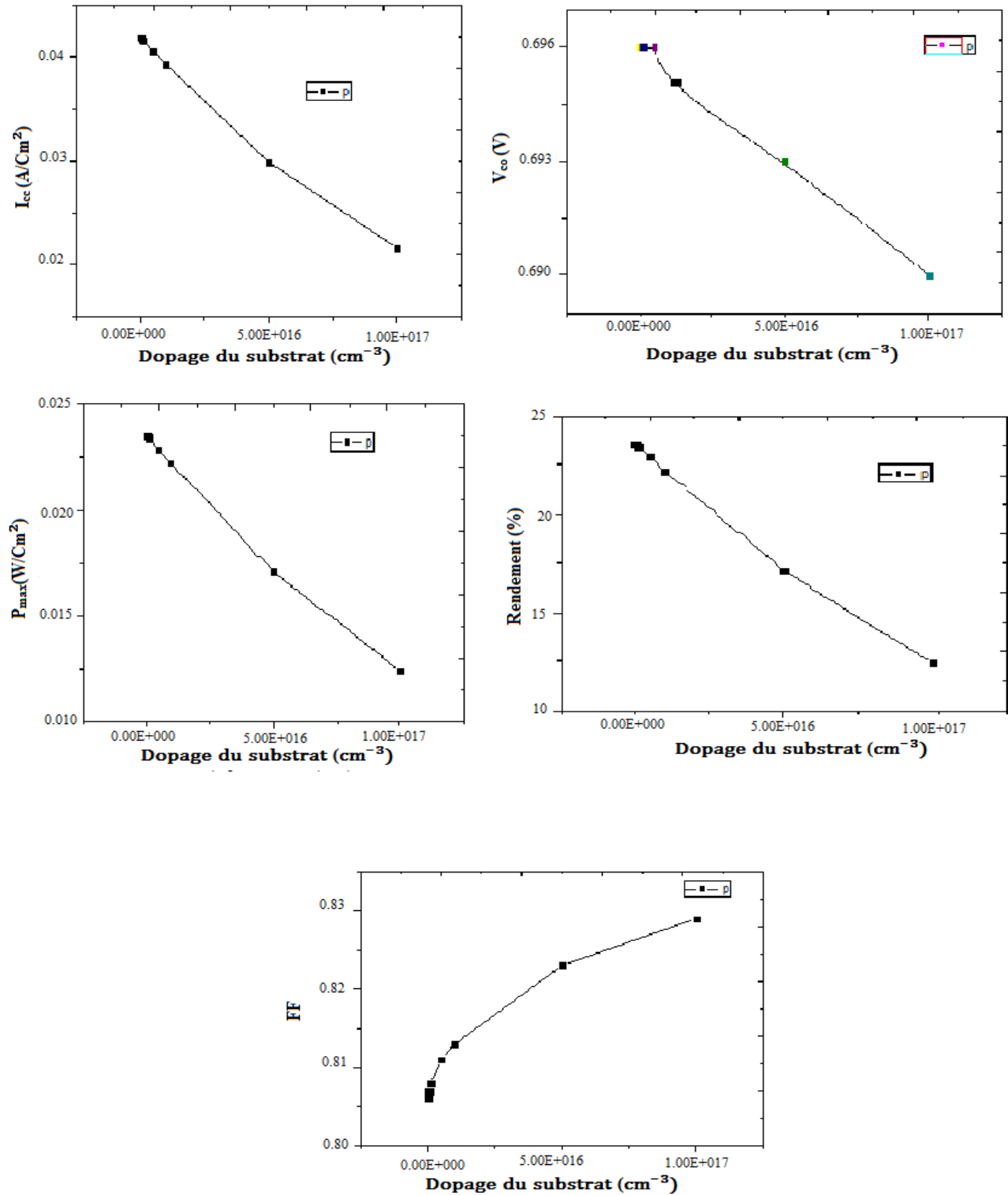


Figure III.16 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de substrat type p position 2

Que ce soit de type n ou p, on constate qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat qui correspond au maximum de rendement de conversion de la cellule. Pour une épaisseur du substrat de 140 μm , le dopage optimal est de $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ pour le type n et de $4.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ pour le type p. Avec l'augmentation du dopage du substrat, la durée de vie des porteurs et la mobilité se dégradent et les taux de recombinaison SRH et Auger augmentent ce qui entraîne une diminution importante de I_{cc} et du rendement dans le cas de substrats fortement dopés.

3. Variation de l'épaisseur du substrat

a) Le type n :

La position 2 du contact (distance entre les deux contacts 0.2 mm) et le dopage du substrat $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Epaisseur (μm)	$I_{cc}(\text{A}/\text{Cm}^2)$	$V_{co}(\text{V})$	FF	$P_{max}(\text{W}/\text{Cm}^2)$	η (%)
150	$4.18.10^{-2}$	0.696	0.811	$2.36.10^{-2}$	23.6
180	$4.20.10^{-2}$	0.696	0.811	$2.37.10^{-2}$	23.7
210	$4.21.10^{-2}$	0.695	0.811	$2.37.10^{-2}$	23.7
240	$4.22.10^{-2}$	0.695	0.810	$2.38.10^{-2}$	23.8
270	$4.23.10^{-2}$	0.695	0.810	$2.38.10^{-2}$	23.8
300	$4.24.10^{-2}$	0.695	0.810	$2.39.10^{-2}$	23.9

Tableau III.6: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur de substrat type n

b) Le type p :

La position 2 du contact (distance entre les deux contacts 0.2 mm) et le dopage du substrat $5.10^{14} \text{ cm}^{-3}$

Epaisseur (μm)	$I_{cc}(\text{A}/\text{Cm}^2)$	$V_{co}(\text{V})$	FF	$P_{max}(\text{W}/\text{Cm}^2)$	η (%)
150	$4.20.10^{-2}$	0.696	0.806	$2.35.10^{-2}$	23.5
180	$4.22.10^{-2}$	0.696	0.806	$2.36.10^{-2}$	23.6
210	$4.23.10^{-2}$	0.695	0.805	$2.37.10^{-2}$	23.7
240	$4.24.10^{-2}$	0.695	0.805	$2.37.10^{-2}$	23.7
270	$4.26.10^{-2}$	0.695	0.804	$2.38.10^{-2}$	23.8
300	$4.26.10^{-2}$	0.695	0.803	$2.38.10^{-2}$	23.8

Tableau III.7: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur de substrat type p

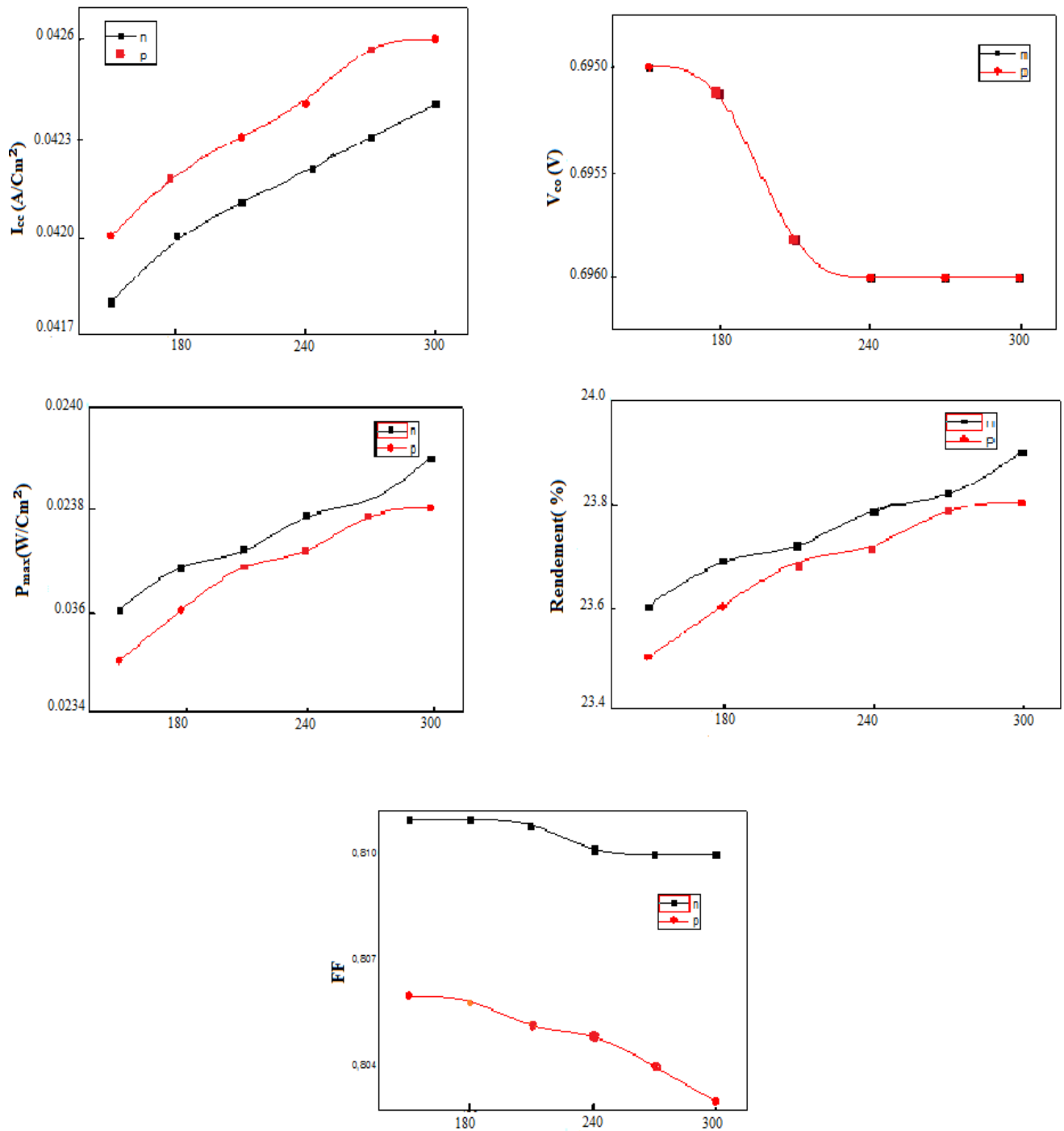


Figure III.17 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction de l'épaisseur de substrat

L'épaisseur du substrat est un paramètre qui influe sur le rendement des cellules solaires à contacts arrières. Les paramètres électriques tels que I_{cc} , V_{co} et η dépendent de l'épaisseur du substrat qui doit être suffisante pour une collecte satisfaisante et acceptable des porteurs générés près de la face avant.

4. Variation du dopage de l'émetteur

➤ Substrat de type n (Phosphore) et l'émetteur de type p⁺ position 2 de contact

a) Pour l'épaisseur = 0.3 μm et dopage de substrat 5.10^{15}

Dopage (cm^{-3})	R_{sheet} (Ω/sq)	I_{cc} (A/Cm^2)	V_{co} (V)
1.10^{18}	180	$3,84.10^{-3}$	0,696
5.10^{18}	140	$4,92.10^{-3}$	0,696
1.10^{19}	110	$6,25.10^{-3}$	0,696
5.10^{19}	60	$1.14.10^{-2}$	0,696
1.10^{20}	40	$1,69.10^{-2}$	0,696
5.10^{20}	10	$4.17.10^{-2}$	0,696

Tableau III.8: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p de l'épaisseur 0.3 μm .

b) Pour épaisseur = 0.5 μm et dopage de substrat 5.10^{15}

Dopage (cm^{-3})	R_{sheet} (Ω/sq)	I_{cc} (A/Cm^2)	V_{co} (V)
1.10^{18}	160	$4.31.10^{-3}$	0,696
5.10^{18}	110	$6.25.10^{-3}$	0,696
1.10^{19}	90	$7.62.10^{-3}$	0,696
5.10^{19}	40	$1.69.10^{-2}$	0,696
1.10^{20}	20	$3.21.10^{-2}$	0,696
5.10^{20}	10	$4.17.10^{-2}$	0,696

Tableau III.9: Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p de l'épaisseur 0.5 μm .

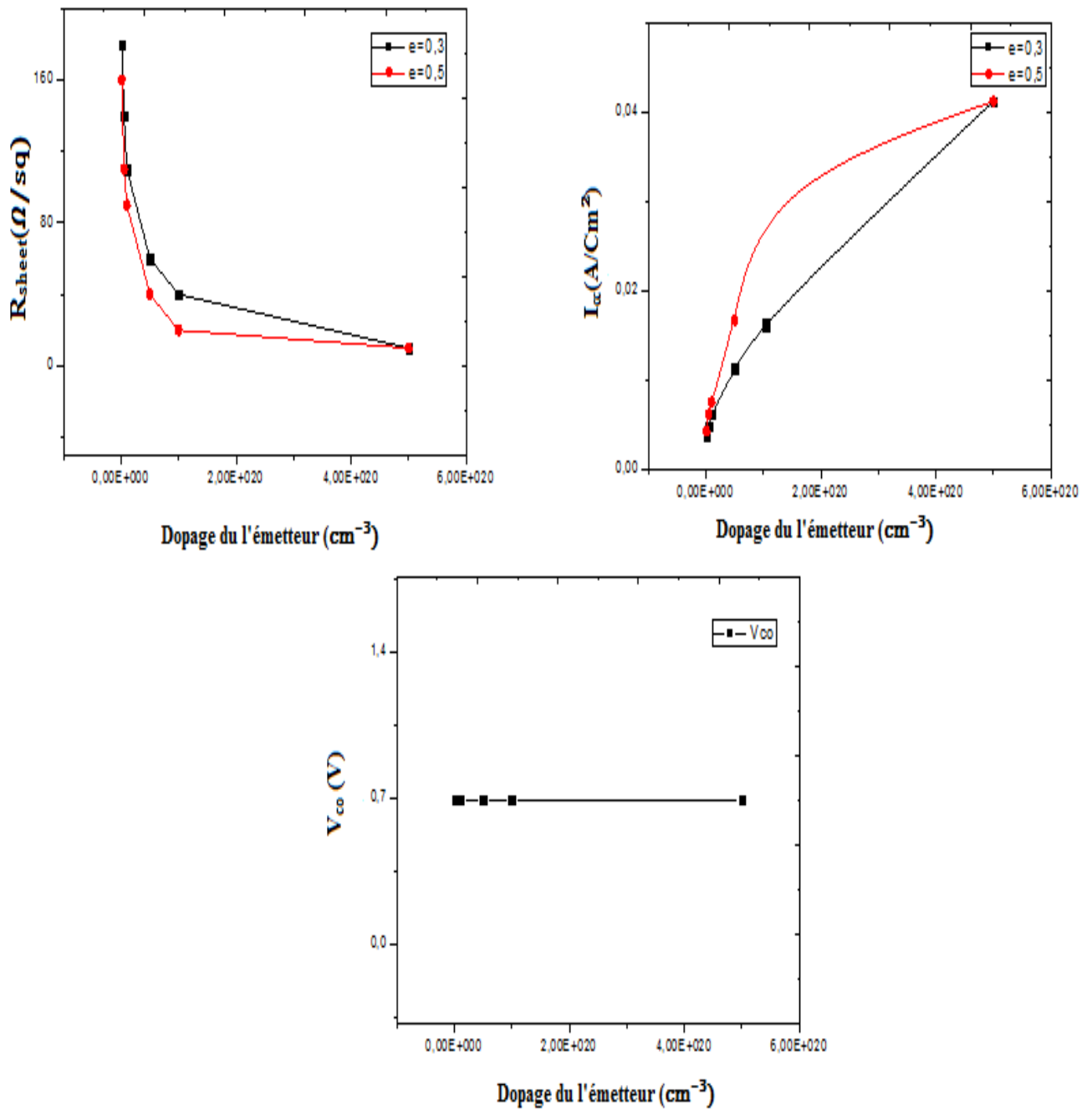


Figure III.18 : Caractéristiques électriques de la cellule à contact arrière interdiguée simulée en fonction du dopage de l'émetteur type p+.

➤ Substrat de type p (Bore) et l'émetteur de type n⁺ position 2 de contact

a) Pour l'épaisseur =0.3 μm et dopage de substrat 5.10¹⁴

Dopage (cm ⁻³)	R _{sheet} (Ω/sq)	I _{cc} (A/Cm ²)	V _{co} (V)
1.10 ¹⁸	920	7.55.10 ⁻⁴	0,696
5.10 ¹⁸	360	1.93.10 ⁻³	0,696
1.10 ¹⁹	230	3.10.10 ⁻³	0,696
5.10 ¹⁹	70	9.76.10 ⁻³	0,696
1.10 ²⁰	40	1.69.10 ⁻²	0,696
5.10 ²⁰	10	4.81.10 ⁻²	0,696

Tableau III.10 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+ de l'épaisseur 0.3 μm.

b) Pour l'épaisseur =0.5μmet dopage de substrat5.10¹⁴

Dopage (cm ⁻³)	R _{sheet} (Ω/sq)	I _{cc} (A/Cm ²)	V _{co} (V)
1.10 ¹⁸	560	1.24.10 ⁻³	0,696
5.10 ¹⁸	220	3.14.10 ⁻³	0,696
1.10 ¹⁹	140	4.92.10 ⁻³	0,696
5.10 ¹⁹	40	1.69.10 ⁻²	0,696
1.10 ²⁰	30	2.22.10 ⁻²	0,696
5.10 ²⁰	10	4.18.10 ⁻²	0,696

Tableau III.11 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+ de l'épaisseur 0.5 μm.

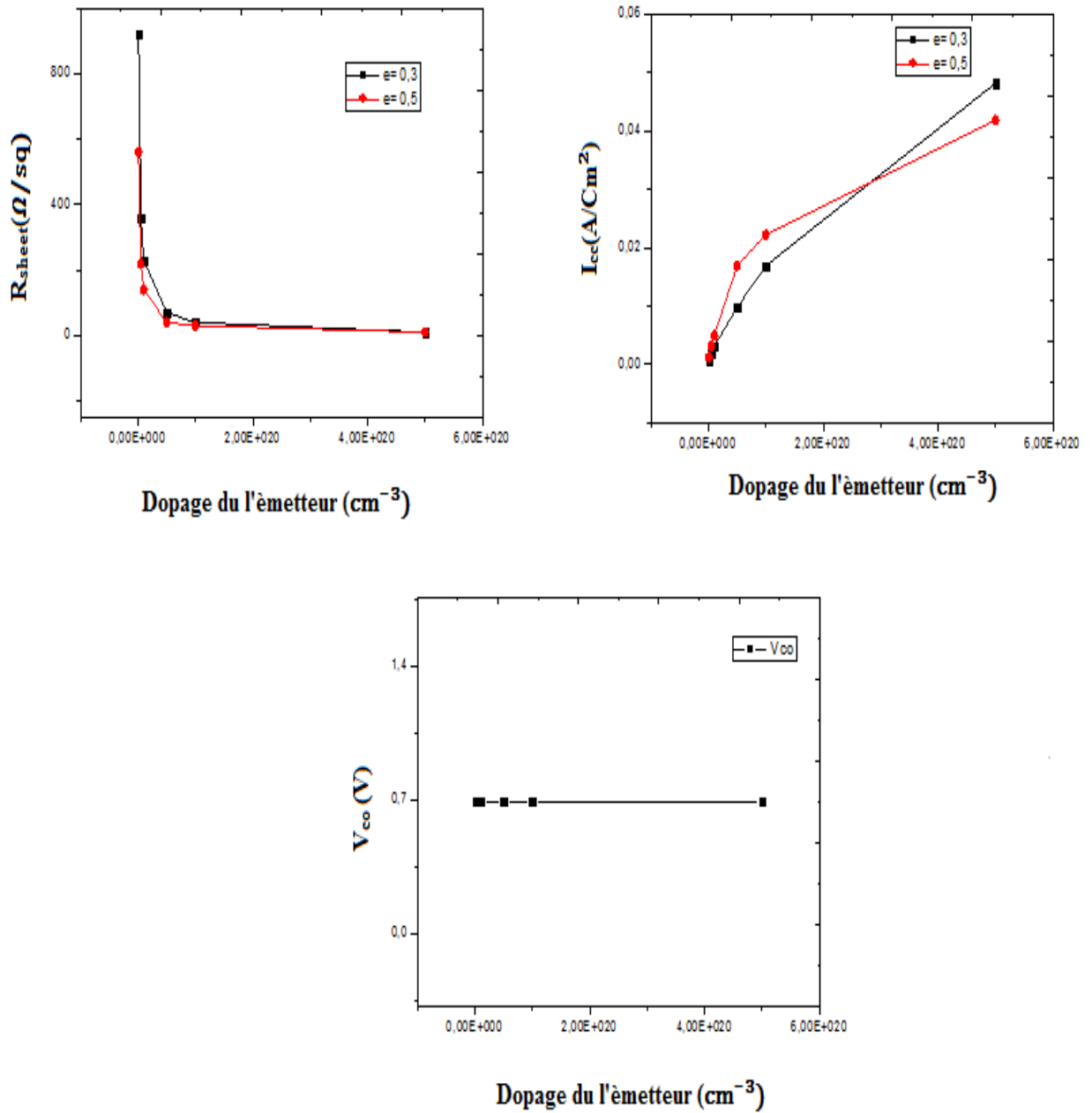


Figure III.19 : Caractéristiques électriques de la cellule à contacts arrières simulée en fonction du dopage de l'émetteur type n+.

On remarque que la tension en circuit ouvert ne varie pratiquement pas alors que le courant de court circuit varie considérablement pendant la variation du dopage de l'émetteur. Etant donné l'emplacement de l'émetteur en face arrière de la cellule à contacts arrières et de sa faible épaisseur par rapport à l'épaisseur de la cellule, la recombinaison dans l'émetteur est négligeable en comparaison à la recombinaison totale dans la cellule considérée.

5. La structure à contacts arrières optimale :

Après simulation, les valeurs optimales sont résumées dans le tableau ci-dessous:

paramètre	Dopage du substrat		L'épaisseur du substrat e = 300 μm	
	n = 5.10 ¹⁵ cm ⁻³	p = 5.10 ¹⁴ cm ⁻³	n = 5.10 ¹⁴ cm ⁻³	p = 5.10 ¹⁴ cm ⁻³
Le type				
Le rendement (%)	23.5	23.5	23.9	23.8

Tableau III.12 : Les valeurs optimales

5.1. Caractéristique (I-V) de la structure à contacts arrières

La figure III.20 représente la caractéristique (I-V) optimale d'une cellule à contacts arrières simulée par PC3D

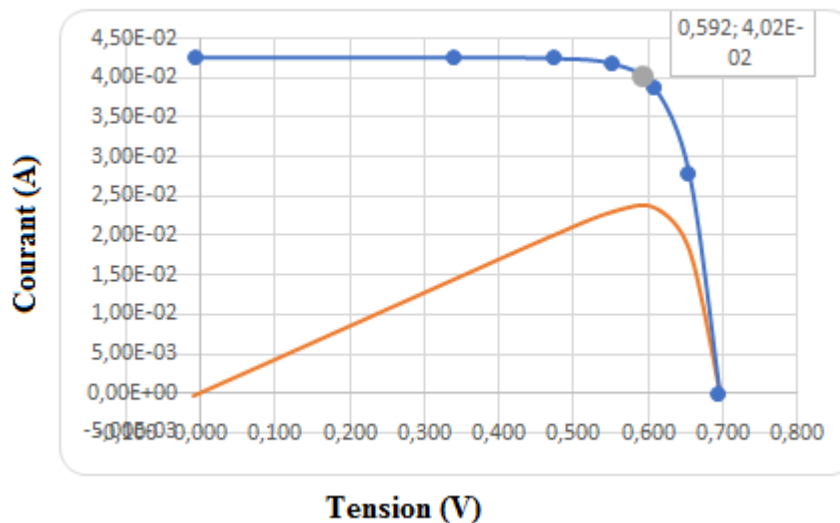


Figure III.20 : Caractéristique I-V de la cellule à contacts arrières simulée

5.2. La réponse spectrale :

La figure III.21 représente la réponse spectrale de la cellule à contacts arrières simulée pour le dopage de type n d'une valeur de $1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

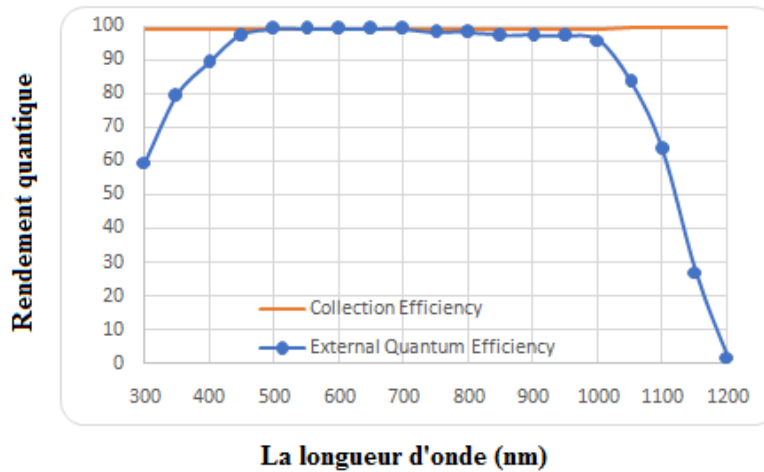


Figure III.21: La réponse spectrale pour la cellule à contacts arrières simulée

5.3. Evaluation des différentes pertes de la structure optimale

A partir des résultats de la simulation, et pour la structure optimale, nous avons calculé les différentes pertes que nous avons représentées sur le diagramme circulaire ci-dessous :

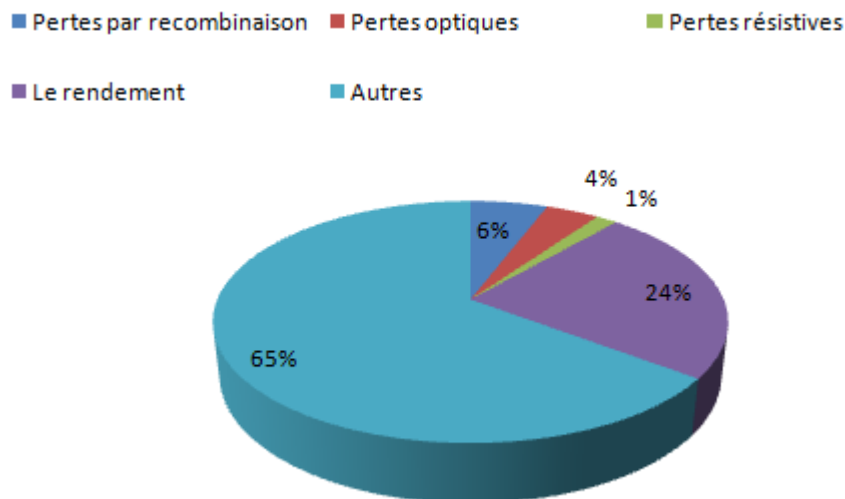


Figure III.22 : Le diagramme circulaire des différentes pertes

Et le tableau suivant représente les pertes technologiques en faces avant, arrière et en volume

	Face avant	Face arrière	En volume	Total
Pertes par recombinaison	1.1%	3.8%	0.9%	5.8%
Pertes optiques	0.0%	0.9%	3.1%	4.0%
Pertes résistives	0.0%	0.4%	1.2%	1.6%
Totale	1.1%	5.2%	5.2%	11.5%

Tableau III.13 : les pertes technologiques

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de quelques paramètres géométriques et physiques de la cellule à contacts arrières et à émetteur enterré sur le rendement de conversion en utilisant le simulateur numérique PC3D.

Le but de cette étude était de trouver les paramètres qui donnaient un rendement de conversion maximum. Nous avons constaté qu'il existe des valeurs optimales pour certains paramètres tels que l'épaisseur et le dopage du substrat ainsi que l'épaisseur et le dopage de l'émetteur, le tout en fonction de la distance entre les contacts (2 positions sont étudiées).

Le rendement de conversion maximal atteint est de 23.9% avec un total de 11.5% de pertes technologiques.

Bibliographie du chapitre III

- [1] M. Abdelkader, « Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D. », Thesis, 2013.
- [2] « About PC3D ». <https://www.pc3d.info/about-pc3d>.

Conclusion générale
et
Perspectives

La production mondiale de l'énergie photovoltaïque progresse de façon vertigineuse depuis plusieurs années mais sa croissance reste limitée par son coût élevé par rapport aux énergies fossiles et nucléaires.

Afin d'augmenter le rendement de conversion, une alternative consiste à utiliser des cellules solaires à contacts arrières (émetteurs enterrés) où le taux d'ombrage est nul.

Le travail réalisé dans ce mémoire a pour but de simuler des cellules solaires de type P et de type N à contacts arrières en utilisant le logiciel PC3D développé en 2019 par P. BASORE.

Par rapport aux cellules solaires conventionnelles ayant des contacts sur les faces avant et arrière, ces cellules présentent des avantages tel que :

- pas de taux d'ombre dû aux métallisations sur la face avant,
- l'émetteur placé en face arrière entraîne moins de recombinaisons que lorsqu'il est situé en face avant,
- l'interconnexion des cellules dans le module est facilitée
- les principales étapes de fabrication sont réalisées sur une seule face : face arrière (seule la couche anti-reflet est réalisée sur la face avant).

Pour l'optimisation des cellules solaires à contacts arrières, nous avons utilisé le logiciel PC3D pour simuler numériquement le rendement de conversion en fonction de la géométrie de la cellule (épaisseurs de la base et de l'émetteur ainsi que la distance entre les contacts) ainsi que les profils de dopage du substrat et de l'émetteur ; une fois pour des cellules de type N et une fois pour des cellules de type P.

Un rendement optimal de 23.9% est obtenu avec un total de 11.5% de pertes technologiques.

Comme perspectives, il serait intéressant de voir l'impact de la passivation de la face avant sur la structure à contacts arrières ; faire des analyses supplémentaires concernant l'influence d'autres paramètres tels que l'épaisseur et le dopage du BSF (Back Surface Field). Enfin, lors de l'exécution des simulations des cellules solaires, l'augmentation de la température n'a pas été prise en compte. C'est-à-dire que nous avons exécuté les simulations à température ambiante (300 K), ce qui est la valeur par défaut dans PC3D. Cependant, il serait intéressant d'inclure le comportement thermique dans les simulations, c'est-à-dire étudier la distribution de chaleur dans un échantillon de silicium multicristallin.