

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN PHYSIQUE

SPECIALITE

Physique des Matériaux

THEME

**Etude comparative des cellules solaires en
mono-silicium à différents profils d'émetteurs
via des simulations PC1D**

Présenté par : **GRAZEM Khadidja & AICHOUN Manel**

Soutenu le 18/06/2023

Devant le jury :

Président	M. ZERIGUI D.	MCB	Univ. Bouira
Rapporteur	M. MADI D.	Prof.	Univ. Bouira
Examineur	Mme MAHDID S.	MAA	Univ. Bouira
Invitée	Mlle OULED AMER R.	Doctorante	Univ. Bouira

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{يَرْفَعُ اللَّهُ لَكَ لَكُمْ لَكُمْ لَكُمْ لَكُمْ لَكُمْ لَكُمْ لَكُمْ}

صَلِّ عَلَى الْعَظِيمِ



Remerciements

Avant tout développement de cette expérience d'apprentissage, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, pour la force et la santé qu'il nous a accordées pour mener ce travail à terme.

*Je tiens également à exprimer à notre encadreur, **MADI Djamel**, nos respectueuses gratitude. Nous avons été très sensibles à sa grande disponibilité, ses nombreux conseils et orientations. Ses précieux encouragements a permis le bon déroulement de ce travail.*

*Aussi, Nous adressons nos vifs remerciements à Mlle **OULED AMER Roza** pour son aide précieuse et de nous avoir fourni toutes les informations nécessaires à la réalisation de ce projet.*

*De même, nos remerciements vont à **M. ZERIGUI Djamel**, Maître de conférences à l'Université de Bouira, pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le jury de notre soutenance.*

*Que **Mme MAHDID Saïda**, Maître Assistante à l'Université de Bouira, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance d'avoir accepté de faire partie du jury de notre soutenance.*

Pareillement, nos remerciements sont dédiés à tous ceux qui ont contribué à notre formation, en particulier nos enseignants du département de physique.



Dédicace

A ma chère mère Messaouda, je tiens à dédier ce mémoire à ma mère bien-aimée, dont la présence et le soutien m'ont toujours inspiré. Malheureusement, elle n'est plus parmi nous physiquement, mais son amour, sa sagesse et ses valeurs continuent de guider ma vie.

Ma mère me manque chaque jour, mais son amour continue de m'entourer et de m'inspirer. Je suis profondément reconnaissant(e) d'avoir eu une mère si extraordinaire, dont l'influence perdurera tout au long de ma vie. Ce mémoire est dédié à sa mémoire et à tout l'amour qu'elle m'a donné.

*A celui qui a réalisé mes rêves,
qui a sacrifier sa vie pour ma réussite
mon précieux offre du dieu, mon exemple éternel ...*

Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

*Je suis très reconnaissante
pour mon chère père tayeb*

*Mes frères et mes sœurs
(ramzi . nourddine . siham . afaf)*

Pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leur conseil et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, Merci d'avoir toujours soutenu et merci pour tous les bons moments passé ensemble, et ce n'est pas fini...

A tous les membres de la famille aichoun

A khadidja, ma chère amie avant d'être binôme

A tous mes amies et mes collègues

Et tous ceux qui m'aiment



Manel

Dédicace

A ma chère mère Akila, qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études, pour que je puisse atteindre mes ambition...

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir ...

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœurs ma vie et mon bonheur...

qui n'a jamais cessé de faire des douas a mon prévu...

A celui qui a réalisé mes rêves

qui a sacrifier sa vie pour ma réussite

mon précieux offre du dieu, mon exemple éternel ...

Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Je suis très reconnaissante

pour mon chère père nourredine

Mes frères et mes sœurs

(said. abdelwahab. Mohamed, amin. Alaa rahma)

Pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, Merci d'avoir toujours soutenu et merci pour tous les bons moments passé ensemble, et ce n'est pas fini...

A tous les membres de ma famille grazem et krazem

A tous mes amies et mes collègues

A manel, chère amie avant d'être binôme

A grand-mère et grand père

Et tous ceux qui m'aiment

Khadija



Résumé

Nous avons examiné, via le simulateur PC1D, les effets des paramètres clés de conception d'un émetteur, tels que le pic de dopage (N_0) du phosphore (P) et le facteur de profondeur (x_d) des différents profils de diffusion de P (uniforme, exponentiel, gaussien et Erfc), sur les performances des cellules solaires en mono-silicium. Le pic de dopage a été varié de $2,5 \times 10^{19}$ à $2,5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ pour tous ces profils et un examen attentif de la tension en circuit-ouvert, du courant de court-circuit et de la puissance électrique maximale a révélé que la valeur optimisée de N_0 est de $2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ pour chacun des quatre profils de diffusion considérés. Avec cette valeur optimisée de N_0 , x_d a été altéré de 0,05 à 0,15 μm afin d'identifier sa valeur adéquate à des émetteurs idéaux. Après dépouillement des résultats, une valeur de 0,05 μm a été retenue. De plus, avec les valeurs optimales de N_0 et de x_d , une comparaison a été faite entre les performances de ces profils et il a été observé que les profils Erfc et uniforme sont les plus efficaces avec une puissance électrique maximale de 1,38 W.

Abstract

We have examined, via the PC1D simulator, the effects of emitter design key parameters, such as the doping peak (N_0) of phosphorus (P) and the depth factor (x_d) of different P diffusion profiles (uniform, exponential, Gaussian and Erfc), on the performance of monosilicon solar cells. The doping peak was varied from $2,5 \times 10^{19}$ to $2,5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ for all these profiles and a careful examination of the open circuit voltage, short circuit current and maximum electrical power revealed that the optimized value of N_0 is $2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ for each of the four diffusion profiles considered. With this optimized value of N_0 , x_d was altered from 0,05 to 0,15 μm in order to identify its adequate value of ideal emitters. After results analysis step, a value of 0,05 μm was taken. Moreover, with the optimal values of N_0 and x_d , a comparison was made between the performance of these profiles and it was observed that the Erfc and uniform profiles are the most efficient with a maximum electrical power of 1.38 W.

ملخص

الحل الأكثر فعالية لتلبية مطالب المعمورة من الطاقة هو انتاجها مباشرة من أشعة الشمس. يتم هذا عبر عنصر كهربائي يسمى الخلية الشمسية. تتمثل هذه الأخيرة في تجاوز لمنطقتين، واحدة مشحونة سلباً وغنية بذرات الشوائب كالفوسفور، تسمى الباعث، والأخرى ذات شحنة موجبة، تسمى القاعدة. من خلال تعريض سطح الباعث للشمس، يولد جزء من الفوتونات الممتصة شحنات كهربائية حرة في مناطق مختلفة من الخلية. إلا أنه قد تم التأكيد على أن خصائص الباعث تؤثر بشكل كبير على أداء الخلية الشمسية المصنوعة من السليسيوم أحادية البلورة. بالتالي، الهدف من هذا البحث هو الوصول إلى انتاج خلايا شمسية ذات كفاءة عالية عبر تحليل معمق لتأثير نسبة الشوائب في الباعث N_0 ، عامل عمقها x_d ونمط توزيعها. في هذا السياق، توصلنا باستعمال برنامج محاكاة بأن الباعث المثالي يتميز ب: $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{سم}^{-3}$ ، $x_d = 0,05$ ميكرومتر وشوائب تتوزع بشكل موحد ومتجانس أو وفق دالة الخطأ التكميلية. مثل هذا الباعث في خلية شمسية تنتج لنا 1,38 واط.

<i>Introduction générale</i>	1
CHAPITRE I : Notions fondamentales de la conversion photovoltaïque	5
I.1 Introduction	6
I.2 Rappels du fonctionnement d'une cellule solaire	6
I.3 Rendement quantique	12
I.4 Caractéristiques sous éclairage d'une cellule solaire	13
I.5 Pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement d'une cellule solaire	15
I.5.1 Pertes fondamentales	15
I.5.2 Pertes technologique	16
I.6 Conclusion	20
II.7 Références bibliographiques	21
CHAPITRE II : Généralités sur les émetteurs dopés au phosphore	23
II.1 Introduction	24
II.2 Propriétés des émetteurs pour une performance optimale	24
II.3 Inconvénients majeurs d'un émetteur fortement dopée en face avant d'une cellule solaire	26
II.4 Méthodes de formation d'émetteurs pour des cellules solaires en silicium cristallin	27
II.4.1 Emetteurs formés par diffusion thermique	27
II.4.2 Emetteurs formés par implantation ionique suivi d'un recuit thermique	30
II.4.3 Emetteurs formés par épitaxie	31
II.5 Conclusion	34
II.6 Références bibliographiques	35
CHAPITRE III : Résultats et discussions	39
III.1 Introduction	40

Sommaire

III.2	Aperçu global du logiciel PC1D version 5.9	41
III.3	Dépouillement et discussion des résultats	45
III.3.1	Effet du pic de dopage	47
III.3.2	Effet du facteur de profondeur	50
III.4	Interprétation des résultats	52
III.5	Conclusion	58
III.6	Références bibliographiques	60
	<i>Conclusion générale</i>	62

Introduction générale

Le flux lumineux rayonné par le soleil et aboutissant à la surface de la Terre peut fournir une énorme quantité d'énergie suffisante pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux des générations actuelles et futures [1]. Les cellules solaires ou photovoltaïques sont l'une des options les plus utiles pour exploiter efficacement la lumière du soleil en absorbant ses photons et en les convertissant en une énergie électrique utilisable. L'amélioration du rendement des cellules solaires peut contribuer de manière significative à l'énergie photovoltaïque totale générée dans le monde.

La structure d'une cellule solaire à base du silicium cristallin (c-Si) se présente comme une jonction n^+p , où une fine couche de silicium fortement dopée en atomes donneurs (n^+), appelée émetteur, est présente sur la surface avant d'une tranche modérément dopée en atomes accepteurs (p), appelée base. Dans le procédé standard actuel, l'émetteur est formé par diffusion à haute température du phosphore (P) dans la région de surface d'une tranche dopée au bore (B). Outre la diffusion, l'émetteur peut être aussi formé par implantation ionique et épitaxie. Cependant, l'émetteur n^+ est caractérisé par deux paramètres physiques importants : son courant de saturation et sa résistance série [2]. Le courant de saturation est étroitement lié aux vitesses de recombinaison tandis que la résistance série traduit l'état ohmique de la région de l'émetteur et des contacts métalliques à sa surface. En conséquence, l'émetteur est le siège des sources de pertes des porteurs de charge majoritaire et minoritaire. Cependant, la minimisation des recombinaisons passe par l'utilisation d'un émetteur le plus faiblement dopé alors que la réduction des pertes résistives nécessite un fort dopage. Ainsi, ces deux phénomènes s'opposent et requiert leur optimisation pour améliorer la qualité de l'émetteur et par la suite l'efficacité des cellules solaires [3].

Le profil de diffusion du dopant est un facteur d'une grande importance qui décide de la qualité de la région de l'émetteur. Il reproduit la distribution de la densité du phosphore en profondeur de l'émetteur. Un bon contrôle du profil de diffusion est souhaitable en raison du compromis entre une concentration élevée de P en surface de l'émetteur pour un bon contact ohmique et un volume légèrement dopé pour une bonne réponse spectrale de la lumière bleu [4].

En se référant au processus conventionnel d'élaboration des cellules solaires, la formation de l'émetteur est une étape fastidieuse et coûteuse qui motive les chercheurs à effectuer des simulations avant de vérifier expérimentalement les performances des configurations d'émetteurs optimisées [5]. Le PC1D (Personnel Computer One Dimension) est l'un des simulateurs de cellules solaires largement utilisés car il est un outil de modélisation gratuit et extrêmement informatif qui aide à l'évaluation de tous les facteurs cruciaux constituant une cellule solaire [6].

Dans le présent travail, nous allons utiliser le programme PC1D pour étudier l'effet des paramètres clés de conception de l'émetteur tels que la concentration maximale du phosphore (P) à sa surface, nommée pic de dopage (N_0), et le facteur de profondeur (x_d) sur les performances des cellules solaires à base du mono-silicium (mono-Si) et ceci pour différents profils de diffusion de P tels que : uniforme, exponentiel, gaussien et fonction erreur complémentaire (Erfc). Pour ce faire, nous définirons une cellule de base en mono-Si dans l'environnement PC1D et par la suite nous varierons les valeurs de N_0 et de x_d afin de suivre l'évolution de la tension en circuit-ouvert (V_{co}), du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la puissance électrique P_{max} délivrée par les différentes cellules. Ainsi, via un examen comparatif des résultats obtenus, on identifiera les caractéristiques optimales d'un émetteur donnant lieu à de meilleures performances. Par ailleurs, nos investigations ont permis de développer un manuscrit s'étalant sur trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à rappeler quelques notions fondamentales de la filière photovoltaïque qui sont indispensables pour de notre travail. Dans une première partie, nous aborderons le principe de conversion de l'énergie solaire en électricité, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques et les différents facteurs causant la dégradation de leur performance. Ensuite, nous parlerons des divers mécanismes de recombinaison des porteurs de charge et leurs origines dans une cellule solaire.
- Le deuxième chapitre est dédié aux méthodes de formation des émetteurs des cellules solaires en silicium. Dans ce contexte, chaque méthode sera rappelée en mettant l'accent sur ses avantages et ses inconvénients. Aussi, les propriétés d'émetteurs limitant le fonctionnement efficace des cellules solaires seront mises en avant.
- Le troisième chapitre portera sur la simulation des cellules solaires en mono-silicium dans l'environnement du logiciel PC1D. En conséquence, on étudiera l'effet des paramètres de conception d'un émetteur tels que le pic de dopage en atomes de phosphore

à sa surface et le facteur de profondeur sur les performances des cellules solaires et ceci pour différents profils de diffusion de P tels que : uniforme, exponentiel, gaussien et fonction d'erreur complémentaire (Erfc). Après, un dépouillement détaillé des différents résultats sera entrepris afin de sélectionner les caractéristiques optimales d'un émetteur donnant lieu des conversions photovoltaïques élevées.

Enfin, nous achèverons ce mémoire par une conclusion générale et des recommandations sous formes de perspectives pour de futurs travaux de recherche dans le domaine photovoltaïque.

Références bibliographiques

- [1] F. A. Kraemer, D. Palma, A. E. Braten, D. Ammar, “Operationalizing Solar Energy Predictions for Sustainable, Autonomous IoT Device Management”, *IEEE Internet Things J.*, Vol. 7, pp.11803–11814, (2020).
- [2] J. Bultman, I. Cesar, B. Geerligs, Y. Komatsu, W. Sinke, “Methods of emitter formation for crystalline silicon solar cells”, *Cell Processing, Photovoltaics International*, Vol. 8, pp. 69-80, (2010).
- [3] B. B. Bachi, “Développement et mise au point d’un procédé innovant de diffusion des dopants N et P pour la fabrication de cellules photovoltaïques au silicium”, *Thèse de Doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de l’Université de Lyon, France, 2010.
- [4] R. Chaoui, B. Mahmoudi, A. Messaoud, Y. Si Ahmed, A. Mefoued, Br. Mahmoudi, “Silicon Solar Cell Emitter Profile Tailoring Using the DOSS Diffusion Technique” *1st Africa Photovoltaic Solar Energy Conference Proceedings*, Durban, South Africa, 27 - 29 March 2014, pp. 14–18, (2014).
- [5] J. Oh, H. C. Yuan, H. M. Branz, “An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures”, *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 7, pp.743–748, (2012).
- [6] D. A. Clugston, P. A. Basore, “PC1D version 5: 32-bit solar cell modelling on personal computers”, In *Proceedings of the Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference- Anaheim, CA, USA, 29 September–3 October*, pp. 207–210, (1997).

Chapitre I :

Notions

fondamentales de la

conversion

photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil représente une source d'énergie significative et renouvelable pouvant servir d'alternative aux sources d'énergie classiques. Elle peut répondre aux besoins énergétiques au futur qui ne cessent d'augmenter. Cependant, en raison du faible rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité, cette forme d'énergie est seulement réservée aux applications à petite et moyenne échelle dans les zones éloignées des lignes électriques. Il est donc nécessaire que la communauté scientifique mène des recherches pour améliorer le rendement de conversion et en conséquence explorer les applications à grande échelle. Dans ce chapitre, nous présentons les notions fondamentales de la technologie photovoltaïque. Nous discutons du principe de conversion de l'énergie solaire en électricité, du fonctionnement des cellules photovoltaïques, de leurs caractéristiques principales, ainsi que des différentes causes de la baisse de leur rendement. Nous examinons également, les divers mécanismes de recombinaison des porteurs de charge, leurs origines et les effets apparents sur les grandeurs photovoltaïques.

I.2 Rappels du fonctionnement d'une cellule solaire

Pour décrire le fonctionnement d'une cellule solaire à base de silicium, il est nécessaire d'expliquer la physique d'une jonction P-N qui est produite sur une plaquette de structure mono- ou poly-cristalline, ayant une large surface et une épaisseur limitée (voir la figure I.1). La fabrication de la cellule solaire implique la création d'un émetteur de type N sur une base en silicium de type P, ainsi que le dépôt d'une couche antireflet en face avant de la cellule et des contacts métalliques sur les deux faces avant et arrière, afin de collecter les porteurs de charges.

Le dopage est le processus pour lequel des impuretés (dopants) sont délibérément ajoutées à un semi-conducteur pur afin d'améliorer significativement ses propriétés électriques [1, 2].

La quantité de porteurs de charge dans un semi-conducteur est directement liée au niveau de son dopage en impuretés. Dans les matériaux de type N, la majorité des porteurs de charge sont des électrons chargés négativement, tandis que dans les matériaux de type P, la majorité des porteurs de charge sont des trous chargés positivement.

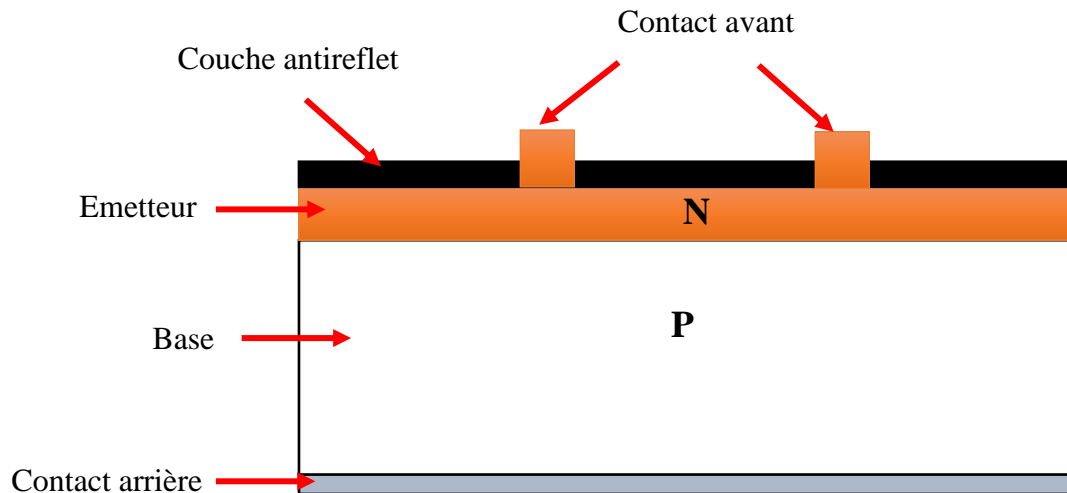


Figure I.1 : Schéma simplifié d'une cellule photovoltaïque

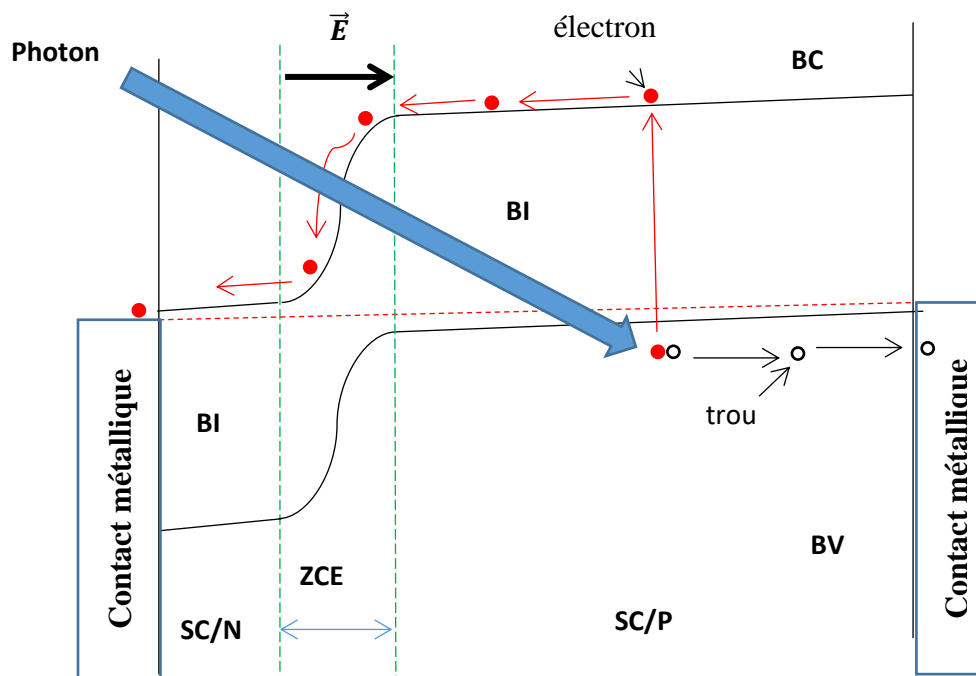


Figure I.2 : Mode de fonctionnement d'une cellule solaire à jonction P-N lorsqu'elle est éclairée.

SC/N : Semi-Conducteur type N (émetteur), SC/P : Semi-Conducteur type P (base)

BV : Bande de Valence, BI : Bande Interdite, BC : Bande de Conduction, ZCE : Zone de Charge d'Espace.

Lorsqu'un semi-conducteur de type P et N est en contact, il se forme une région d'appauvrissement, également appelée zone de charge d'espace, en raison de la différence de

densités de porteurs de charge majoritaires et minoritaires à l'interface du silicium. Cette zone de charge d'espace induit un champ électrique \vec{E} qui peut affecter le mouvement des porteurs de charge minoritaires dans les régions P et N, selon leur mécanisme de transport. Les trous, porteurs de charge minoritaires dans la région N, vont migrer vers la région P dans le sens de \vec{E} , tandis que les électrons de la région P se déplaceront vers la région N dans un sens opposé à \vec{E} . Cela augmente la mobilité des porteurs de charge mobiles dans les deux régions, ce qui augmente leur probabilité de collecte par les contacts métalliques. Un tel comportement est régi par des équations dynamiques dont les principales sont :

- Equations de continuité concernant les phénomènes de génération et de recombinaison des porteurs de charge :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n - \frac{1}{|e|} \text{div}(\vec{J}_n) \quad (I.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{|e|} \text{div}(\vec{J}_p) \quad (I.2)$$

où les indices n et p réfèrent aux électrons et aux trous, respectivement. G , R et \vec{J} désignent respectivement le taux de génération, le taux de recombinaison et la densité de courant. e est la charge élémentaire de l'électron.

- Equation de poisson qui décrit la dépendance du champ électrique de la densité de charge (électrons, trous et dopants ionisés) :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{|e|}{\varepsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (I.3)$$

où \vec{E} est le champ électrique, ε est la permittivité électrique, N_d est la densité volumique des atomes donneurs ionisés, N_a est la densité volumique d'atomes accepteurs ionisés, n et p représentent les concentrations des électrons et des trous, respectivement

- Le courant dû à l'un des porteurs de charge est la somme du courant de conduction sous l'effet d'un champ électrique et du courant de diffusion :

$$\vec{J}_n = |e| \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + |e| D_n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (I.4)$$

$$\vec{J}_p = |e| \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - |e| D_p \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (I.5)$$

où D_n et D_p sont les coefficients de diffusion, respectivement, des électrons et des trous. μ_n et μ_p sont, respectivement, les mobilités des électrons et des trous.

- La relation d'Einstein relie les mobilités des porteurs aux coefficients de diffusion par :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{|e|} \quad (I.6)$$

k_B est la constante de Boltzmann. Elle vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

- Les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux peuvent être étudiés à travers les théories ondulatoires, représentées par les équations de Maxwell, ou les théories corpusculaires de la lumière. Selon cette dernière, le quantum d'énergie du rayonnement lumineux est appelé photon. En utilisant la mécanique quantique, l'énergie du photon associée à une radiation donnée peut être liée à sa longueur d'onde grâce à une relation [3] :

$$E_{ph} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,24 \text{ eV}}{\lambda} \quad (I.7)$$

ν est la fréquence de la radiation, λ est sa longueur d'onde en μm , c est la vitesse de la lumière dans la vide, E_{ph} est l'énergie du photon en eV et h est la constante de Planck.

- Lorsqu'un semi-conducteur est exposé à des photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite, des paires électron-trou sont générées par absorption, conformément à la loi de Lambert-Bouguer [3]. Cette loi est exprimée par :

$$I(x) = I \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha x} = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (I.8)$$

x est la profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur, R est le coefficient de réflexion. Il représente la part, de l'énergie lumineuse incidente I , réfléchi à la surface du semi-conducteur, α est le coefficient d'absorption. Il correspond au nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau pour chaque longueur d'onde.

Les spectres d'absorption du silicium et de l'arséniure de gallium à température ambiante sont présentés à la figure I.3 [4]. La quantité minimale d'énergie requise pour provoquer une transition électronique lorsqu'un photon est absorbé dépend de la largeur de la bande interdite E_g du matériau. En utilisant la relation (I.7), on peut déterminer un seuil d'absorption intrinsèque. Dans le cas du silicium, ce seuil est atteint pour $\lambda=1,2 \mu\text{m}$, tandis que dans le cas de l'arséniure de gallium, il est atteint pour $\lambda=0,93 \mu\text{m}$. Lorsque les photons ont une énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Cependant, d'autres types d'absorption peuvent survenir dans le cristal, tels que l'absorption extrinsèque par les atomes d'impuretés, par les

porteurs libres ou par le réseau. Le spectre d'absorption du semi-conducteur peut donc varier en fonction de la température, de la pression et des champs électriques et/ou magnétiques, en raison de l'interaction complexe de ces processus dans des conditions ambiantes spécifiques [3].

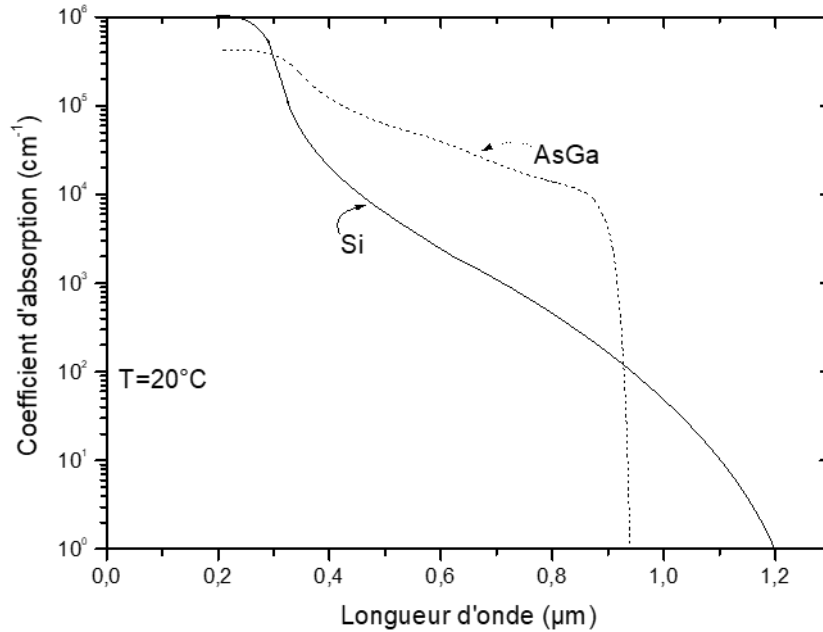


Figure I.3 : Illustre l'absorption de la lumière en fonction de la longueur d'onde pour le silicium (Si) et l'arséniure de gallium (AsGa) à température ambiante, tel que mesuré par leur spectre d'absorption [3].

- En utilisant les équations mentionnées précédemment pour résoudre la concentration des porteurs de charge n et p , il est possible de calculer la caractéristique courant-tension (I - V) d'une jonction idéale en l'absence de lumière. [3]

$$I = I_0 \left[e^{\frac{|e|V}{mk_B T}} - 1 \right] \quad (I.9)$$

avec :

V est le potentiel aux bornes de la jonction.

T est la température en Kelvin (K).

I_0 est le courant de saturation de la jonction.

- Le courant de saturation, qui est la somme du courant de base et du courant d'émetteur, peut être calculé en prenant en compte :

- ✓ Le courant de diffusion des porteurs minoritaires qui parviennent à la zone de charge d'espace.
- ✓ Le courant de génération thermique des paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace.

Si l'on suppose que la recombinaison dans la zone de charge d'espace est négligeable, alors la formule pour le courant de saturation est donnée par [3] :

$$I_0 = |e| \left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) = |e| \left(\frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} + \frac{n_i^2 D_n}{N_A L_n} \right) \quad (II.10)$$

où :

p_{n0} et n_{p0} sont les densités, respectivement, des trous dans la région type N et des électrons dans la région type P.

L_n et L_p sont respectivement les longueurs de diffusion des électrons et des trous.

N_D : la concentration des atomes donneurs ionisés.

N_A : la concentration des atomes accepteurs ionisés.

n_i : la concentration des électrons (ou des trous) dans un semi-conducteur intrinsèque.

m est le facteur d'idéalité de la jonction P-N. Il est compris entre 1 et 2. Ce facteur permet de quantifier les différentes composantes du courant lorsque la jonction est polarisée en direct [3] :

- ❖ $m = 1$: le courant dû aux recombinaisons dans les régions N et P constitue le courant de diffusion des électrons et des trous
- ❖ $m = 2$: le courant dû aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de saturation.

En présence de lumière, le courant photo-généré dans une cellule photovoltaïque est la somme de deux courants de porteurs majoritaires. Le premier courant est le photo-courant de génération, où les paires électron-trou photo-générées sont séparées par le champ électrique interne de la jonction. Chaque type de charge est accéléré vers la région où il est majoritaire. Le deuxième courant est le photo-courant de diffusion, où les porteurs minoritaires diffusent dans la cellule sous un gradient de concentration. S'ils atteignent la zone de charge d'espace sans se recombiner, ils la traversent pour atteindre la région où ils sont majoritaires. Le courant photo I_{ph} s'ajoute au courant d'obscurité, ce qui modifie la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque [3].

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{|e|V}{mk_B T}} - 1 \right] \quad (I.11)$$

où I_{ph} est la somme des courants dans les différentes régions de la cellule (base, ZCE, émetteur).

I.3 Rendement quantique

Le rendement quantique (QE) d'une cellule solaire est défini comme le rapport entre le nombre de porteurs de charge collectés par la cellule et le nombre de photons, ayant une énergie donnée, qui ont atteint la cellule solaire. Le rendement quantique peut être exprimé en fonction de la longueur d'onde ou de l'énergie. Lorsque tous les photons d'une longueur d'onde donnée sont absorbés et que les porteurs minoritaires résultants sont collectés, le QE correspondant est égal à un. Cependant, le rendement quantique des photons ayant une énergie inférieure à la largeur de la bande interdite est nul, comme illustré dans la figure I.4.

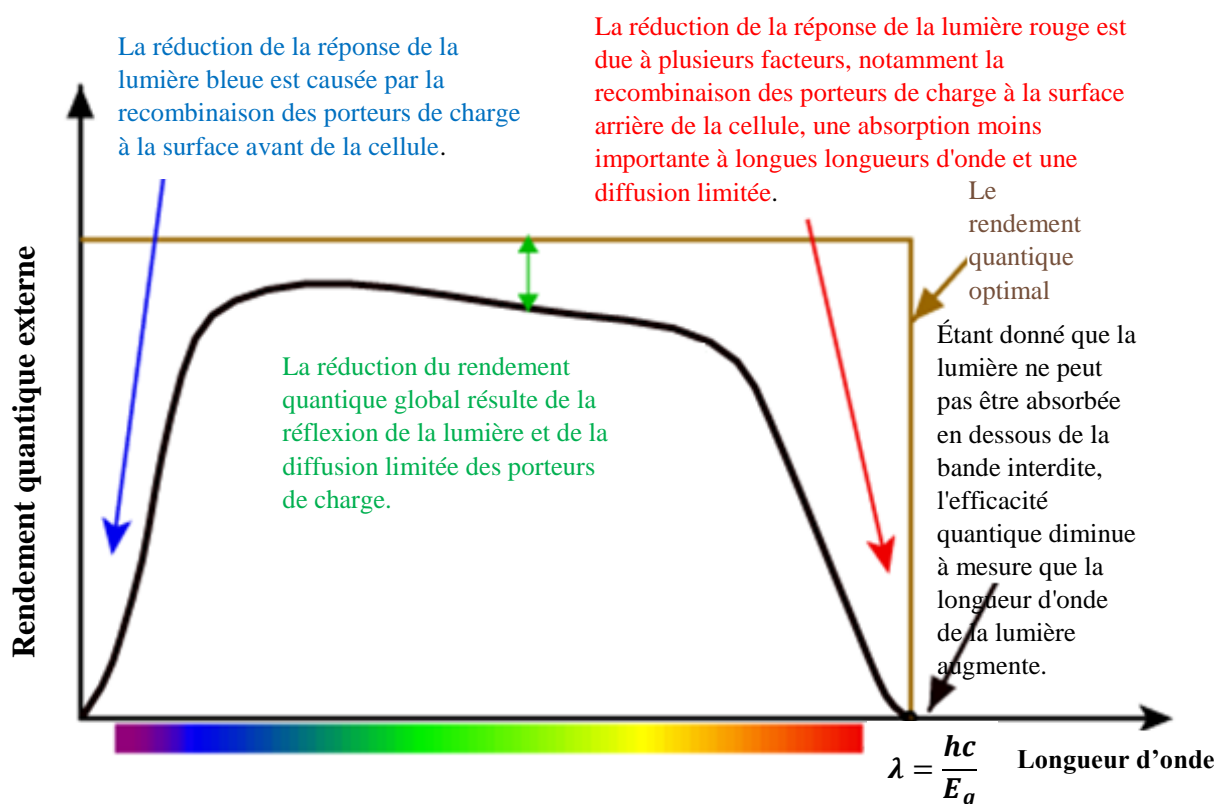


Figure I.4: La relation entre le rendement quantique externe et une cellule solaire en silicium [5].

Bien que le rendement quantique d'une cellule idéale ait une forme carrée, comme illustré ci-dessus, la plupart des cellules solaires ont un QE réduit en raison des effets de recombinaison. Les mécanismes qui affectent la probabilité de collecte des porteurs de charge ont également une incidence sur l'efficacité quantique de la cellule solaire [5]. La passivation de la surface avant de la cellule solaire a un impact sur les porteurs de charge générés à proximité de cette surface. Étant donné que la lumière bleue est absorbée à une faible profondeur sous la surface, une vitesse de recombinaison élevée à la surface avant affectera la partie de la lumière bleue du rendement quantique (QE). De même, la lumière verte est absorbée dans une plus grande mesure en profondeur à l'intérieur de la cellule solaire [5]. Si la longueur de diffusion des porteurs de charge est faible, la probabilité de collecte de ces porteurs à partir du volume de la cellule solaire sera réduite, ce qui aura pour effet de diminuer le rendement quantique pour la partie verte du spectre solaire. Par conséquent, le rendement quantique peut être considéré comme la probabilité de collecte des porteurs de charge pour une longueur d'onde donnée, en fonction du profil de génération des porteurs de charge, de l'épaisseur de la cellule et du nombre de photons incidents normalisé à cette longueur d'onde.

I.4 Caractéristiques sous éclairage d'une cellule solaire

La figure I.5 présente les courbes caractéristiques de courant-tension ($I - V$) et de puissance-tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque sous éclairage, où les points clés (V_{co} , I_{cc} , V_{max} , I_{max} , P_{max}) sont indiqués. Ces points sont essentiels pour déterminer les paramètres photovoltaïques caractéristiques [6].

Le courant de court-circuit I_{cc} est mesuré lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle ($V = 0$). Ce courant correspond au flux des paires électron-trou créées dans la zone de cellule et qui traversent la jonction sans subir de recombinaison. La valeur de I_{cc} est principalement déterminée par les longueurs de diffusion des électrons et des trous, représentées respectivement par L_n et L_p :

$$I_{cc} = |e| \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (I.12)$$

La tension en circuit-ouvert V_{co} est la tension pour laquelle $I = 0$. Dans le cas idéal, elle est déterminée par l'expression :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{|e|} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.13)$$

Le facteur de forme est fonction des résistances série R_s et parallèle R_p ainsi que du facteur d'idéalité de la diode. Il est défini par le rapport de la puissance maximal $P_M = V_M \cdot I_M$ et de la valeur du produit $I_{cc} \cdot V_{co}$:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.14)$$

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance maximale générée par la cellule et la puissance lumineuse qu'elle reçoit $P_0 = P_i \cdot S$:

$$\eta = \frac{V_M \cdot I_M}{P_i \cdot S} \quad (I.15)$$

S est la surface de la cellule solaire.

P_i est la densité de puissance de la lumière incidente reçue sur la surface de la cellule qui dépend des conditions météorologiques et la hauteur du soleil.

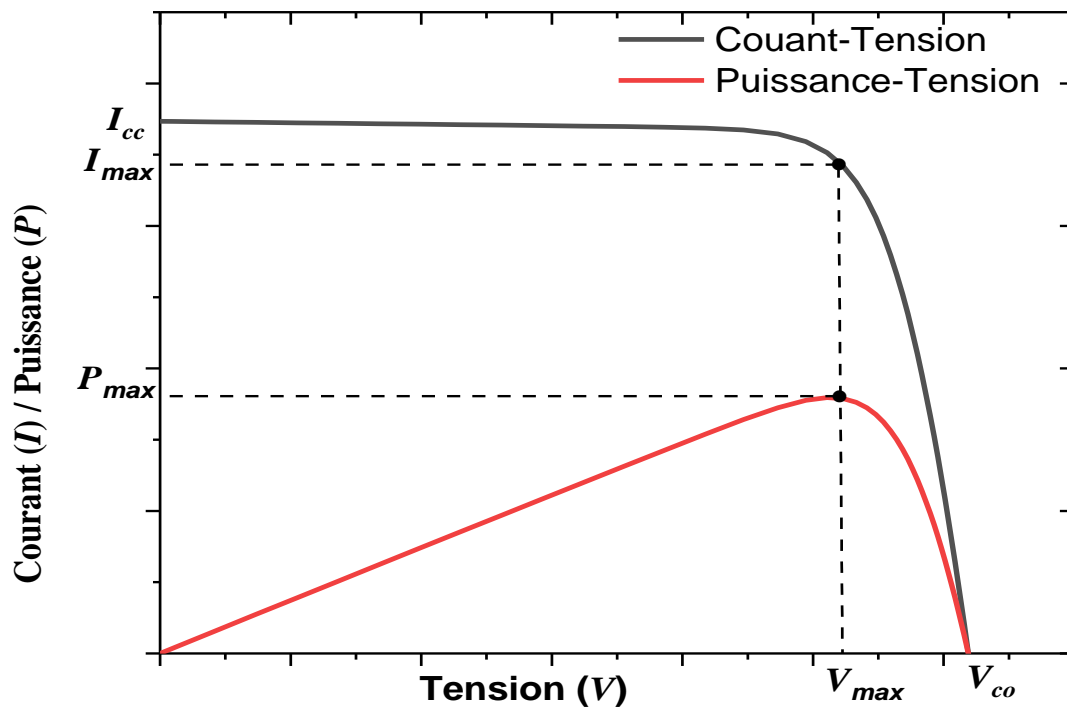


Figure I.5 : Les propriétés de courant-tension (I-V) et de puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à un éclairage donné [6].

I.5 Pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement d'une cellule solaire

Nous allons dans la suite passer en revue les facteurs théoriques et technologiques qui limitent le rendement des cellules solaires en silicium. Pour chacun de ces facteurs, nous examinerons les paramètres électriques affectés.

I.5.1 Pertes fondamentales

Le rendement maximal théorique d'une cellule solaire en silicium est limité par plusieurs phénomènes physiques, ce qui le fixe à 29,8% [7, 8]. On peut citer de part et d'autre :

a) Absorption incomplète du spectre solaire

Les photons dont l'énergie est inférieure à celle de la bande interdite du silicium (1,12 eV) ne peuvent pas être absorbés par le matériau. Par conséquent, ils ne participent pas à la création de paires électron-trou, entraînant ainsi une perte d'environ 27% du rendement de la cellule solaire (la zone A de la figure I.6) [9].

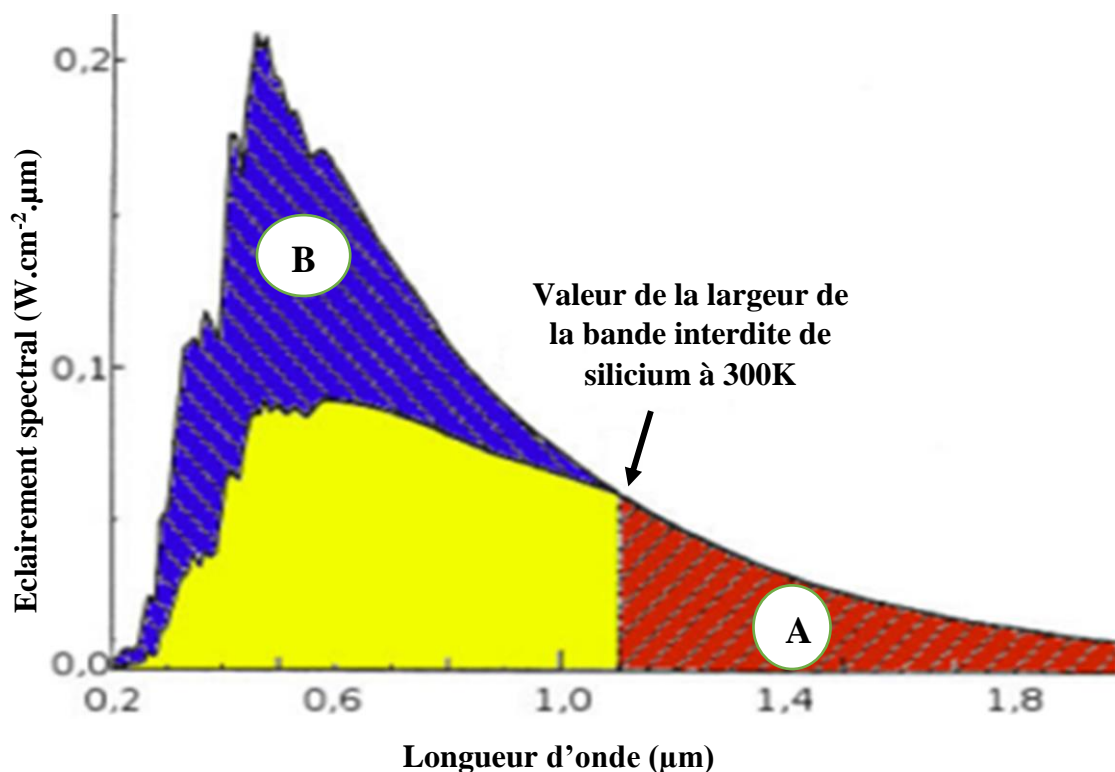


Figure I.6 : Irradiance en fonction de la longueur d'onde solaire [9].

b) 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 (puissance solaire arrivant à la surface de la terre est environ de 1000 W/m^2). Ces deux premières limitations, influant sur le courant de court-circuit I_{cc} et sur la tension de circuit ouvert V_{CO} , réduisant ainsi le rendement théorique à 45% [10].

c) Facteur de tension

La tension de circuit-ouvert (V_{CO}) d'une cellule solaire ne peut excéder l'énergie de son gap, soit E_g/q . Toutefois, en raison des recombinaisons Auger, la tension effective de la cellule est souvent inférieure à sa tension de gap. Pour une cellule solaire épaisse, le V_{CO} est limitée à environ 0,65V, tandis que pour une cellule de 20 μm d'épaisseur, elle est limitée à environ 0,72V [8, 11].

I.5.2 Pertes technologique

Les pertes mentionnées précédemment sont dues à des limitations physiques et ne peuvent donc pas être complètement éliminées. Cependant, d'autres phénomènes limitent également le rendement des cellules solaires, mais ces limitations sont principalement technologiques, ce qui signifie qu'il est possible de les améliorer. Ces limitations se présentent sous trois formes de pertes, à savoir, optique, par recombinaison et résistive.

a) Perte optique

Les pertes optiques se produisent lorsque les photons ne sont pas absorbés par le matériau à cause :

- Des taux d'ombrage à la surface de la face avant de la cellule solaire qui est recouverte d'une grille métallique (contact électrique), représentant environ 10 % de la surface totale dans le cas d'une cellule industrielle standard. Cette grille empêche les photons de pénétrer dans le matériau, ce qui peut entraîner des pertes optiques. Cependant, les dimensions de la grille métallique sont un compromis entre les pertes optiques dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes liées à la résistance série, qui sont influencées par la taille de la grille métallique [9].

- Des réflexions de la lumière en face avant de la cellule. Cela peut être amélioré grâce à l'utilisation d'une couche antireflet ainsi que par des traitements de surface qui favorisent les réflexions multiples [9].
- Des épaisseurs des cellules solaires. En effet, si la cellule est trop mince, elle peut ne pas absorber les photons de faible énergie (ou de longueur d'onde élevée) en traversant l'épaisseur du matériau. Ce phénomène devient plus important lorsque la cellule est très fine (moins de $100\ \mu\text{m}$). Néanmoins, de telle perte peut être réduite en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (appelée réflecteur arrière) [9].

b) Pertes par recombinaison

Une fois que la paire électron-trou est créée, il est nécessaire que les charges se déplacent jusqu'aux contacts de la cellule solaire. Toutefois, si elles se recombinent avant d'atteindre les contacts, elles ne contribueront plus à la production de courant électrique. Il existe plusieurs mécanismes qui peuvent entraîner la perte des porteurs de charge, que ce soit en volume ou en surface de la cellule solaire [12, 13]. On dénombre :

❖ La recombinaison radiative

Elle correspond 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. La recombinaison radiative est généralement prédominante dans les semi-conducteurs à structure de bande directe, étant donné qu'elle est à la base du fonctionnement des diodes lumineuses. Cependant, dans les semi-conducteurs à structure de bande indirecte comme le silicium, sa contribution est jugée insignifiante par rapport à d'autres processus de recombinaison [14].

❖ La recombinaison Auger

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 [13].

❖ Les recombinaisons Shockley Read Hall (SRH)

Les recombinaisons en volume sont causées par la présence des défauts tels que les impuretés et/ou les dislocations dans le substrat, ce qui crée des niveaux d'énergies discrets dans la bande interdite. Ces niveaux peuvent faciliter les recombinaisons entre les porteurs de charges [14, 15]. Les électrons commencent par passer du niveau de la bande de conduction au niveau d'énergie associé au défaut, avant d'atteindre en final la bande de valence où ils peuvent se recombiner.

❖ Les recombinaisons en surface

Elles sont appelées également recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH). Elles résultent de la présence de nombreux niveaux d'énergie dans la bande interdite étant donné que la surface d'une cellule solaire est considérée comme une zone de discontinuités du réseau cristallin en raison des liaisons pendantes.

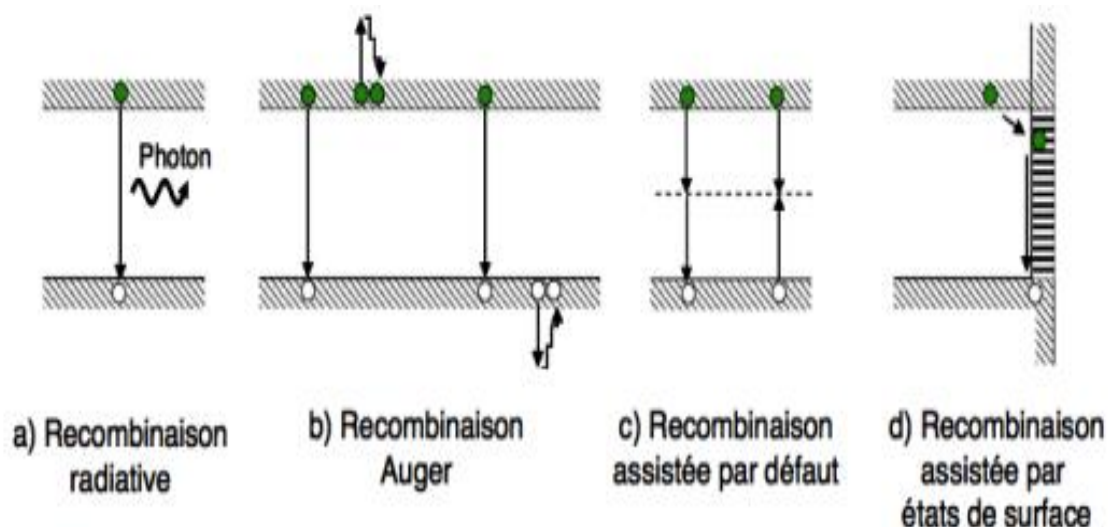


Figure I.7 : Représentation des différents mécanismes de recombinaisons [9].

Il convient de souligner que les recombinaisons radiatives et Auger sont des processus de recombinaison inhérents au matériau, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas influencés par le processus de fabrication, mais plutôt déterminés par les propriétés du semi-conducteur. En revanche, les recombinaisons SRH sont considérées comme extrinsèques car elles sont influencées par la qualité du processus de fabrication utilisé.

Les recombinaisons ont un effet négatif sur plusieurs paramètres de la cellule solaire, notamment la tension en circuit-ouvert et le courant de court-circuit. Si les charges se recombinent avant d'atteindre la zone de charge d'espace, cela affectera également le courant de saturation. Ces paramètres ont également une incidence directe sur le facteur de forme [9].

c) Pertes résistives

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est également affecté par les pertes résistives. Elles sont dues aux résistances parallèles R_p , telles que les fuites par les bords de la cellule ou lorsque le métal de la face avant court-circuite l'émetteur. Le deuxième type de perte est dû aux pertes en puissance dues à la résistivité des différents éléments de la cellule solaire : les résistances séries R_s . L'équation I.11 néglige les effets parasites dus aux différentes résistances. En prenant en compte les résistances série et parallèle, l'équation I.11 devient alors [16] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{|e| \cdot (V + IR_s)}{mk_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (I.16)$$

Les figures I.8 et I.9 montrent les effets de ces résistances parasites sur la caractéristique I-V de la cellule. Au vu de ces figures, on constate que la résistance série n'a pas d'effet sur la tension en circuit ouvert. Cependant, si elle est trop élevée (200 mΩ sur la figure), elle peut entraîner une réduction du courant de court-circuit. Quant à la résistance parallèle, elle aura d'autant plus d'effet qu'elle est faible. Dans le cas d'une résistance parallèle très faible, elle peut de plus entraîner une diminution de la tension de circuit ouvert. Dans les deux cas, les pertes résistives influenceront évidemment sur le facteur de forme.

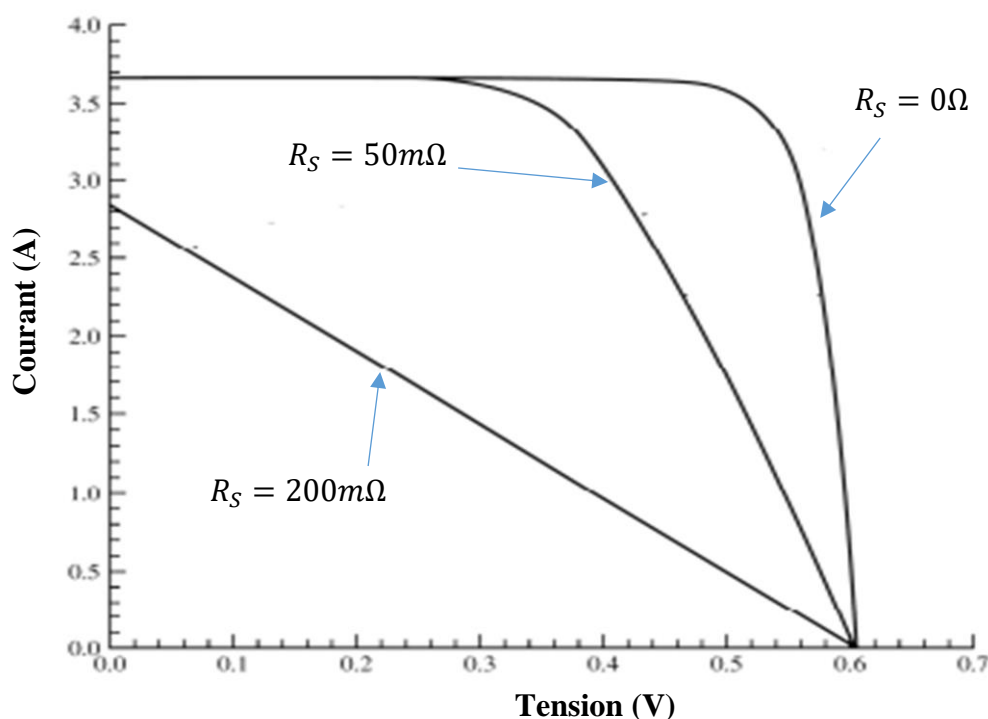


Figure I.8 : Caractéristiques IV sous éclairage mettant en valeur les effets de la résistance série [16].

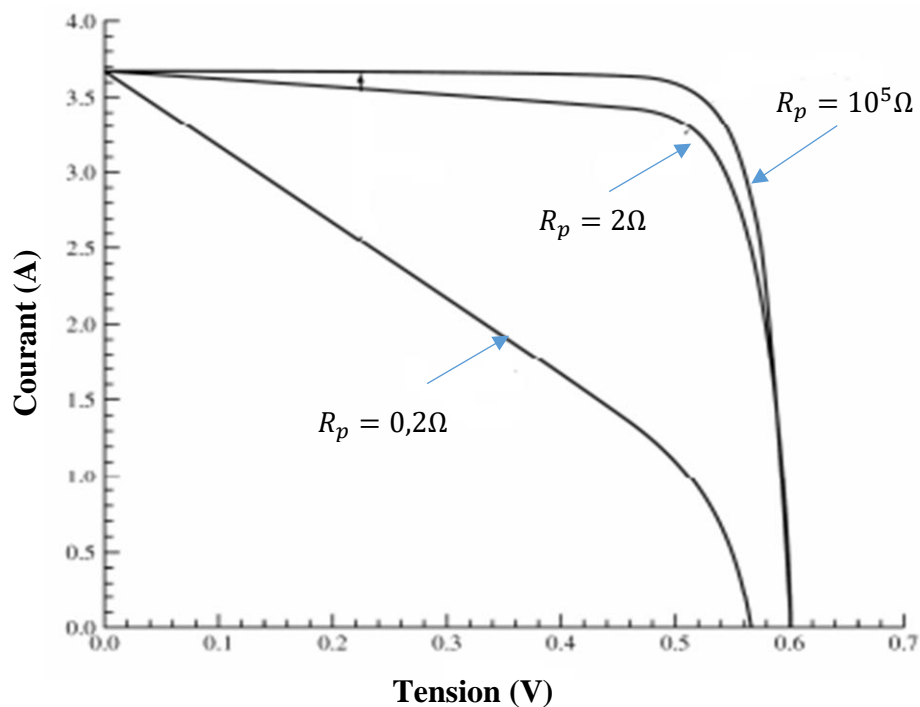


Figure I.9 : Impact de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque sous éclairement [16].

I.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exploré les concepts physiques qui régissent le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Nous avons examiné en détail les différentes parties constitutives d'une cellule solaire, ainsi que les bases théoriques de son fonctionnement. Une attention particulière a été accordée aux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge minoritaires, ainsi qu'à leurs origines. Nous avons également discuté de la modélisation électrique précise du fonctionnement d'une cellule solaire sous éclairement, ainsi que des grandeurs photovoltaïques qui peuvent être extraites et calculées à partir des caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

II.7 Références bibliographiques

- [1] S. Fonash, *Solar Cell Device Physics*, 2nd Edition. Elsevier, (2010).
- [2] O. Isabella, K. Jäger, A. H. M. Smets, R. van, M. Zeman, “Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion”, Technologies and Systems. UIT Cambridge, (2016).
- [3] M. SZE, “Physics of semiconductors devices”, 3^{ème} Ed. Wiley, New York, (1997).
- [4] G. ASTM, “Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface”, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [5] J.S. Hartman, M.A. Lind, “Spectral Response Measurements for Solar Cells, Solar Cells”, Vol. 7, pp. 147–157, (1982).
- [6] M. Orgeret, “les piles solaires : le composant et ses applications”, Ed. Masson, pp.1-45, (1985).
- [7] T. Tiedje, E. Yablonovitch, G.D. Cody, B.G. Brooks, “Limiting efficiency of silicon solar cells”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 31, pp. 711–716, (1984).
- [8] J. Szlufcik, S. Sivoththaman, J.F. Nijs, R.P. Mertens, R. Van Overstraeten, “Low- cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells”, In *Proceedings of the IEEE conference*, Vol. 85, pp. 711–730, (1997).
- [9]. G. Poulain, “Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement”, thèse de doctorat, L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon (France), (2012).
- [10] D. H. MacDonald, “Recombination and trapping in multicristalline silicon solar cells”, PhD thesis, Australian National University, (2001).
- [11] A. M. Green, “Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic auger processes”, *IEEE Trans. electron devices*, Vol. 31, pp. 671–678, (1984).
- [12] J. F. Lelievre, “Elaboration de {SiNx:H} par {PECVD} : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques”, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, (France), (2007).
- [13] M. J. Kerr, “Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells”, PhD thesis, Australian National University, (2002).
- [14] W. Shockley, W. Read, “Statistics of the Recombination of Holes and Electrons”, *Phys. Rev.*, Vol. 87 N° 5, pp. 835–842, (1952).
- [15] R.N. Hall, “Electron-hole recombination in germanium”, *Phys. Rev.*, Vol. 87, pp. 387-392, (1952).

[16] A. Luque, S. Hegedus, “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley & Sons, Ltd, New York (USA), (2003).

Chapitre II :

Généralités sur les émetteurs dopés au phosphore

II.1 Introduction

La lumière du soleil incidente à la surface de la terre peut fournir une énorme quantité d'énergie suffisante pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux des générations actuelles et futures [1]. Les cellules solaires ou photovoltaïques sont l'une des options les plus actives pour exploiter efficacement la lumière du soleil en absorbant les photons et en les convertissant en une énergie électrique utilisable. L'amélioration de l'efficacité des cellules solaires peut contribuer de manière significative à l'énergie photovoltaïque totale générée dans le monde. Un rapport publié par l'Institut Fraunhofer montre que l'industrie des cellules solaires est dominée par les cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) avec une part de marché mondiale de 93 % [2]. En effet, les rendements les plus élevés confirmés récemment pour les monocristallins et les multicristallins sont respectivement 26,7 % et 21,9 % [3-5]. En conséquence, la nécessité d'améliorer l'efficacité des cellules solaires est une voie à investiguer par la communauté scientifique.

Une cellule solaire en c-Si se compose principalement d'une tranche de type p modérément dopée au bore, appelée base, et une couche n^+ fortement dopée au phosphore nommée émetteur. Ces deux couches sont séparées par une zone de charge d'espace (ZCE). En plus de cela, on y trouve un revêtement antireflet de la surface de l'émetteur et des contacts ohmiques sur les faces avant et arrière de la structure de la cellule solaire [6]. D'après la littérature, lors de la fabrication d'une cellule solaire, un réglage minutieux des caractéristiques de l'émetteur est nécessaire pour atteindre un gain d'efficacité significatif [7-9]. Dans ce contexte, le présent chapitre est un rappel des méthodes de formation de l'émetteur et ses différentes propriétés via des investigations des différents travaux de recherches disponibles dans la littérature. Aussi, on essaiera de rappeler les divers concepts physiques entrant en jeu lors de sa formation.

II.2 Propriétés des émetteurs pour une performance optimale

La région de l'émetteur est considérée comme étant la partie la plus importante d'une cellule solaire en silicium cristallin. En général, elle est formée par diffusion thermique des dopants de type n dans un substrat de silicium de type p à haute température. La diffusion de ces dopants à des concentrations beaucoup plus élevées par rapport au niveau de dopage du substrat, transforme la région de surface en silicium de type n donnant lieu ainsi à la formation d'une jonction p-n. Les éléments de la quinzième colonne du tableau périodique tels que le phosphore (P), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb) et le bismuth (Bi) sont utilisés comme impuretés

pentavalentes (dopants de type n) dans l'industrie des dispositifs au silicium [10-14]. Le choix des éléments dopants est l'un des facteurs importants qui régissent la qualité de l'émetteur. Dans l'industrie des cellules photovoltaïques en c-Si, le phosphore et l'arsenic sont les deux dopants les plus largement utilisées pour la formation des émetteurs [10]. Pour un bon émetteur, il a été rapporté que la résistance carrée R_{\square} , une mesure directe des concentrations des dopants, doit être aussi faible que possible. Couramment, les travaux rapportés dans la littérature [10, 11, 15], pour un environnement de diffusion similaire, ont notifié que la résistance carrée mesurée sur du silicium dopé au phosphore est inférieure d'un facteur de cinq à celle obtenue avec un dopage en As. Également, ils ont soutenu la nécessité que la résistance des contacts métal/émetteur soit aussi faible que possible [10, 11]. Ceci peut avoir lieu si la concentration du phosphore en surface de l'émetteur est élevée [10]. Dans ce contexte, Larsen et al. [10] ont dévoilé que le phosphore s'accumule en grande concentration en surface de silicium comparé à l'arsenic et par la suite un V_{co} de 586 mV a été mesuré sur une cellule solaire avec un émetteur en phosphore contre une valeur plus faible pour un émetteur en arsenic. Néanmoins, un émetteur légèrement dopé est aussi souhaitable pour une bonne absorption de la lumière bleue [16]. En conséquence, le profil de diffusion de l'émetteur qui reproduit la distribution du phosphore dans le substrat est d'une grande importance étant donné que la qualité de la région de l'émetteur peut influencer le rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires en silicium.

Pour un processus de diffusion thermique donné, la concentration de dopant en un point quelconque de l'émetteur dépend fortement du niveau dopage en surface et du facteur de profondeur qui est défini comme étant la distance sous la surface de l'émetteur pour laquelle le pic est réduit d'un dixième de sa valeur en surface [17]. Ainsi, R_{\square} , I_{cc} et V_{co} sont régies par la distribution du dopant $N(x)$ dans la région de l'émetteur qui peut se présenter sous différents profils. La modélisation, aussi fidèle que précise, de cette distribution prévoit le choix de quatre profils de diffusion définis comme suit [17] :

- Un profil uniforme : $N(x) = N_0$ avec $x_p < x < x_p + x_d$
- Un profil exponentiel : $N(x) = N_0 e^{-\frac{|x-x_p|}{x_d}}$
- Un profil gaussien : $N(x) = N_0 e^{-\frac{(x-x_p)^2}{x_d^2}}$
- Un profil d'une fonction d'erreur complémentaire (erfc) : $N(x) = N_0 \operatorname{erfc} \left[\frac{x-x_p}{x_d} \right]$

Où : x_p et N_0 désignent, respectivement, la position et la concentration du pic du dopant, et x_d est le facteur de profondeur pour un profil de diffusion donné.

II.3 Inconvénients majeurs d'un émetteur fortement dopée en face avant d'une cellule solaire

La structure d'une cellule solaire en silicium cristallin la plus couramment utilisée est une diode, où une fine couche de silicium fortement dopé (n^+) est présente sur la surface avant d'une tranche moyennement dopée de type p. La région fortement dopée est souvent appelée émetteur, tandis que la tranche modérément dopée est appelée base. Le procédé standard habituel révèle que l'émetteur est formé par diffusion à haute température d'un dopant de type n (le phosphore, P) dans la région de surface d'une tranche de type p dopée au bore (B). Cependant, le fort dopage de cette région induit des limitations sur les performances de l'émetteur et par conséquent de la cellule solaire. En effet, elle est considérée comme étant une zone où les recombinaisons Auger sont maximales. La référence [18] rapporte que la durée de vie des porteurs de charge est inversement proportionnelle au carré du dopage et devient prépondérante pour des dopages supérieurs à 10^{19} cm^{-3} . Elle trouve une valeur très réduite de $4 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ dans le cas d'une concentration en surface de 10^{21} cm^{-3} [18]. Aussi, Si la concentration du phosphore en surface de l'émetteur excède sa limite de solubilité dans le silicium, les atomes de P en excès sont incorporés sous forme de précipités [19]. En conséquence, des niveaux de recombinaisons dans la bande interdite de silicium se forment et la durée de vie des porteurs de charge minoritaire devient significativement réduite. Ostoja et al. [20] trouvent une valeur de l'ordre de $2 \cdot 10^{-11} \text{ s}$, pour un émetteur ayant une concentration en surface de 10^{21} cm^{-3} . Les précipités font donc perdre deux décades à la durée de vie des porteurs de charge dans la région de l'émetteur comparée à la valeur évaluée dû au recombinaison Auger. C'est pourquoi la zone contenant les précipités est souvent appelée zone morte (Dead Layer en anglais), du fait de sa grande sensibilité aux recombinaisons. Ainsi, la probabilité de collection, définie comme étant la probabilité qu'une charge minoritaire photogénérée contribue au courant de court-circuit, est alors réduite aux faibles longueurs d'ondes [21]. De plus, le courant de saturation de l'émetteur à son tour devient important. Or, ces deux facteurs affectent simultanément le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

A première vue, la diminution du niveau de dopage de l'émetteur semble donc une solution pour limiter les pertes par recombinaisons. Cependant, un faible dopage entraîne une augmentation des pertes résistives via une baisse de la conductivité de l'émetteur ainsi qu'une hausse de la résistance de contact entre les métallisations de la face avant et l'émetteur. De ce fait, le dopage de l'émetteur a donc des effets opposés sur les grandeurs caractéristiques d'une

cellule solaire. Son profil doit être optimisé afin diminuer la résistance série tout en minimisant les recombinaisons.

II.4 Méthodes de formation d'émetteurs pour des cellules solaires en silicium cristallin

L'émetteur ou la jonction p-n est le cœur des cellules solaires en silicium cristallin. Il est formé par le dopage en surface de silicium par des atomes possédant une valence différente de celle des éléments composant le semi-conducteur. En conséquence, le dopage permet de contrôler le type et la concentration de charges et ainsi la conductivité du semi-conducteur. Il existe différentes méthodes utilisées pour le dopage des matériaux semi-conducteurs dont nous pouvons retenir [22] :

- l'implantation ionique,
- la croissance de couche par épitaxie,
- la diffusion thermique.

II.4.1 Emetteurs formés par diffusion thermique

La diffusion thermique est le moyen le plus courant pour développer un émetteur pour les cellules solaires en c-Si. Il ne nécessite pas d'équipement sous vide et un grand nombre de d'échantillons (500 wafers) peuvent être traitées à la fois. La consommation d'électricité est faible malgré la température élevée du procédé. Par conséquent, le prix de revient d'un émetteur diffusé est faible par rapport au coût global de la fabrication d'une cellule solaire. Cette technologie a été transférée de l'industrie de la micro-électronique vers la technologie des cellules solaires. Néanmoins, le processus de diffusion thermique est impopulaire dans l'industrie des circuits intégrés en raison de sa contrôlabilité limitée du profil de dopage [23].

Pour la plupart des cellules solaires, le phosphore (P) est appliqué comme dopant de type n [20]. Avant que le phosphore ne soit diffusé dans le silicium, il doit être fixé sur la surface du silicium car la température de diffusion du phosphore dans le silicium est supérieure à 800°C. A cette température, la plupart des composés simples du phosphore (par exemple P_4 , P_8 , P_2O_5 , etc.) sont en phase vapeur [23]. C'est pourquoi un film de verre phosphosilicate (PSG), ou de $SiO_2:(P_2O_5)_x$ est nécessaire comme source de dopant. Une formation d'un film stable et uniforme de PSG à la surface de c-Si est essentielle à la génération reproductible d'une couche d'émetteur. Si la concentration de P_2O_5 dans le PSG n'est pas uniforme, le profil de dopage ne sera pas uniforme non plus, ce qui peut réduire l'efficacité des cellules solaires [23].

L'approvisionnement excessif en phosphore est une méthode facile pour obtenir une formation uniforme de PSG avec une concentration saturée de P_2O_5 [20].

A l'interface du PSG et du silicium, le P_2O_5 est réduit et le phosphore est cédé au silicium [23]. Bien que la solubilité solide du phosphore dans le silicium soit connue dans la littérature comme étant inférieure à $5\sim 8\times 10^{20}cm^{-3}$, les mesures SIMS indiquent que la concentration de phosphore près de l'interface PSG/Si est d'environ $2\times 10^{21}cm^{-3}$, ce qui correspond à environ 4 % de la valeur de saturation de P_2O_5 dans le SiO_2 [23].

Il existe plusieurs méthodes de formation d'un film de verre phosphosilicate. La plupart des PSG sont formés par décomposition d'oxychlorure de phosphore gazeux ($POCl_3$) [20]. Ce dernier est un matériau liquide incolore avec un point d'ébullition de $106^\circ C$. Il est normalement introduit dans une chambre de traitement par barbotage via un gaz inerte. Une fois que les tranches de silicium sont chauffées à $800^\circ C$, $POCl_3$ est introduit simultanément avec une petite quantité d'oxygène, ce qui entraîne la décomposition de $POCl_3$ en P_2O_5 qui est capturé dans le film de SiO_2 qui se développe à la surface de silicium par oxydation [23]. Ce processus nécessite une chambre de réaction fermée pour isoler les sous-produits nocifs et corrosifs, principalement le Cl_2 . Couramment, un four à tube en quartz est utilisé car il peut supporter à la fois des températures élevées et une atmosphère corrosive. La formation de PSG et les processus de drive-in ultérieurs (diffusion du phosphore en volume de Si) sont effectués en une seule étape continue [23].

Une autre méthode de formation d'un film de PSG est le dépôt, sur une plaquette de silicium cristallin, d'une source liquide riche en phosphore comme l'acide phosphorique dilué ou un sol-gel (solution-gélification) qui consiste à des silicates dopés au phosphore c'est-à-dire un réseau de SiO_2 et de P_2O_5 liés, dissous dans un solvant [23]. Le revêtement par un sol-gel s'effectue normalement par centrifugation de quelques gouttes sur une plaquette de c-Si. Plus tard, un processus de recuit génèrera une couche de PSG sur la surface de c-Si. L'étape de diffusion du phosphore à haute température pour former la région de l'émetteur peut être exécuter dans le même four où le film de PSG est formé ou séparément dans des fours conçus à ce type de processus [23].

À titre d'exemple des profils du phosphore dans le silicium cristallin, obtenu par la spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), sont donnés à la figure II-1 pour une diffusion thermique à $890^\circ C$ et une durée de 1218s [24]. Comme on peut le voir, la distribution de P montre clairement un profil en coude et en queue qui est une caractéristique des diffusions

de P à forte concentration dans le silicium à des températures relativement basses [23]. De plus, à part un léger écart aux concentrations les plus élevées, les profils de diffusion mesurés sur les échantillons mc-Si et Cz-Si sont presque identiques [24].

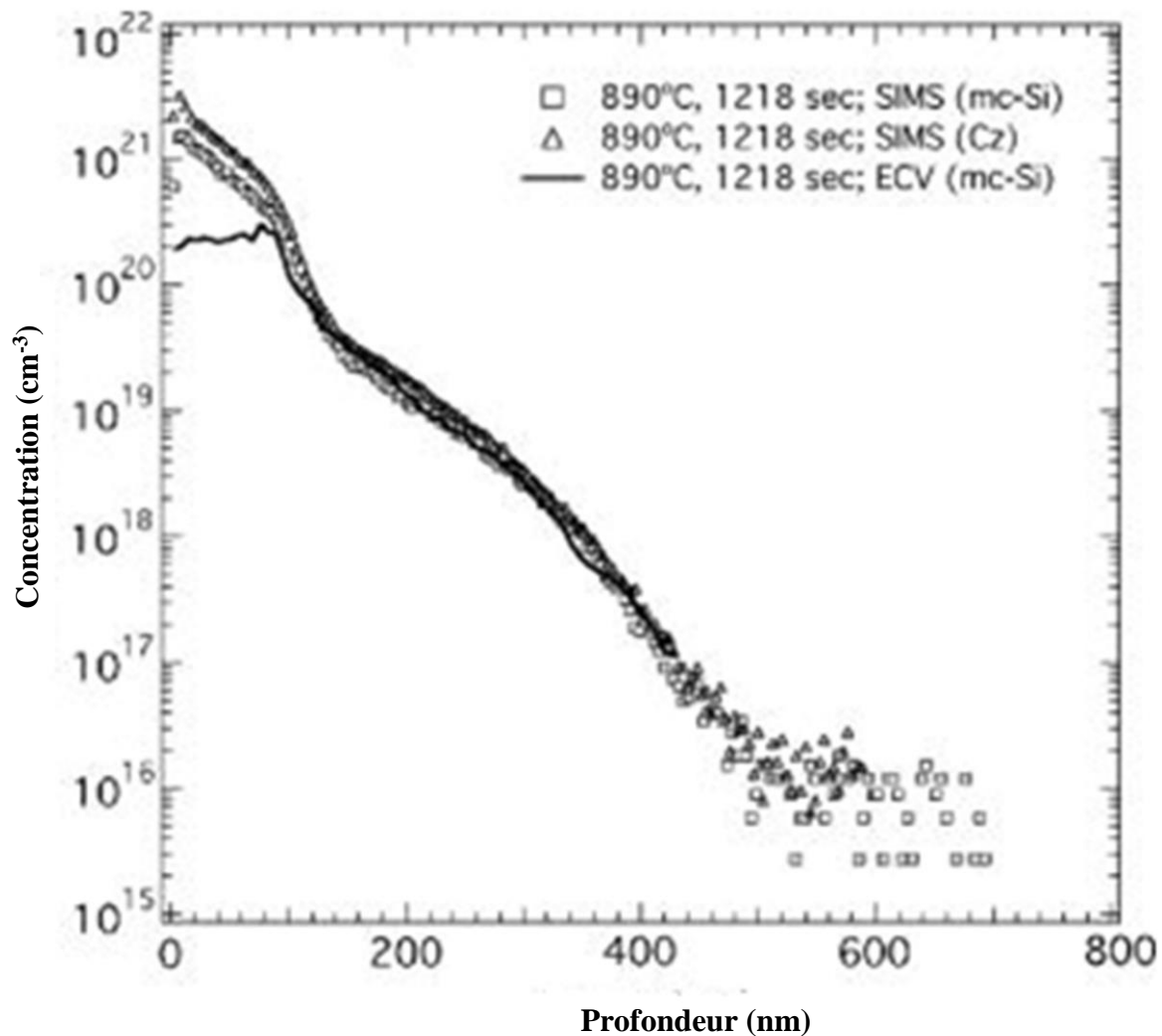


Figure II.1 : Profils de concentration en phosphore en fonction de la profondeur obtenus par SIMS après diffusion à 890°C pour 1218s dans le silicium multicristallin (mc-Si) et dans le silicium monocristallin Cz-Si, ainsi que la concentration de dopants électriquement actifs mesurée par ECV sur le mc-Si [24].

En plus, du profil de la concentration chimique de phosphore, la figure II.1 rapporte la distribution des dopants actifs via la technique de mesure capacité-tension électrochimique (ECV). Il ressort de la figure que les deux profils se confondent étroitement pour des concentrations inférieures à $3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Aux concentrations supérieures à ce niveau, la courbe ECV se sature et révèle un plateau pratiquement plat près de la surface. Ce constat suggère la présence de précipités SiP et d'atomes neutres mobiles proches de la surface de l'émetteur qui

est non favorable en raison d'une activité de recombinaison élevée des porteurs de charge dans cette région [25]. Néanmoins, une telle concentration en P est souvent exigée pour faciliter le contact ohmique et réduire les pertes résistives.

II.4.2 Emetteurs formés par implantation ionique suivi d'un recuit thermique

Une méthode alternative pour créer un profil de dopant pour un émetteur consiste à utiliser l'implantation ionique. Dans les années 1980, des cellules solaires avec des émetteurs peu profonds [26] et profonds [27] implantés sur des substrats de silicium monocristallins ont été réalisées et des tensions en circuit-ouvert de 640mV ont été mesurées.

L'implantation ionique est utilisée en microélectronique en raison de son bon contrôle du processus et de la répétabilité de la quantité et de la position du dopant [27]. Elle est basée sur la création d'un faisceau d'ions dopants, à partir d'une source gazeuse tel que PH_3 , qui sont généralement accélérés par des tensions de l'ordre de keV pour bombarder une surface de silicium.

Par rapport à la méthode de diffusion thermique, l'implantation ionique permet un excellent contrôle du profil de dopage. En effet, ce dernier peut être commandé en modifiant la dose ou l'accélération lors de l'implantation ou en jouant sur les conditions de recuits, qui font office d'étape de diffusion du dopant en volume du silicium [28]. Néanmoins, le bombardement ionique détruit la surface et produit des défauts ponctuels dans le réseau [28–34]. Ces dommages nécessitent une réparation, qui se fait en effectuant un processus thermique post-implantation. Ce processus thermique active également les ions dopants en les établissant sur des sites de substitution où ils sont capables d'apporter des trous (électrons) à la bande de valence (conduction) [22, 29].

Un exemple de profil SIMS des émetteurs implantés au phosphore est illustré à la figure II-2 [35]. Il montre que lorsque les recuits thermiques sont effectués à partir de 950 °C, le pic de dopage, mesuré sur l'échantillon non recuit (as-implanted), se dissipe et la jonction pn est poussée en profondeur de la cellule. Ainsi, les doses de phosphore implantés peuvent être activées à 950°C et peuvent être considérées comme des points de diffusion des électrons, diminuant leur mobilité lorsque la concentration en dopants est élevée [25, 26]. Cependant, cette situation exclut la formation d'un émetteur fortement dopé en surface bien désiré pour les contacts métalliques et qui est nécessaire pour une surface texturée. De toute façon,

l'implantation à des doses élevées seront nécessaires pour le une meilleure conversion photovoltaïque.

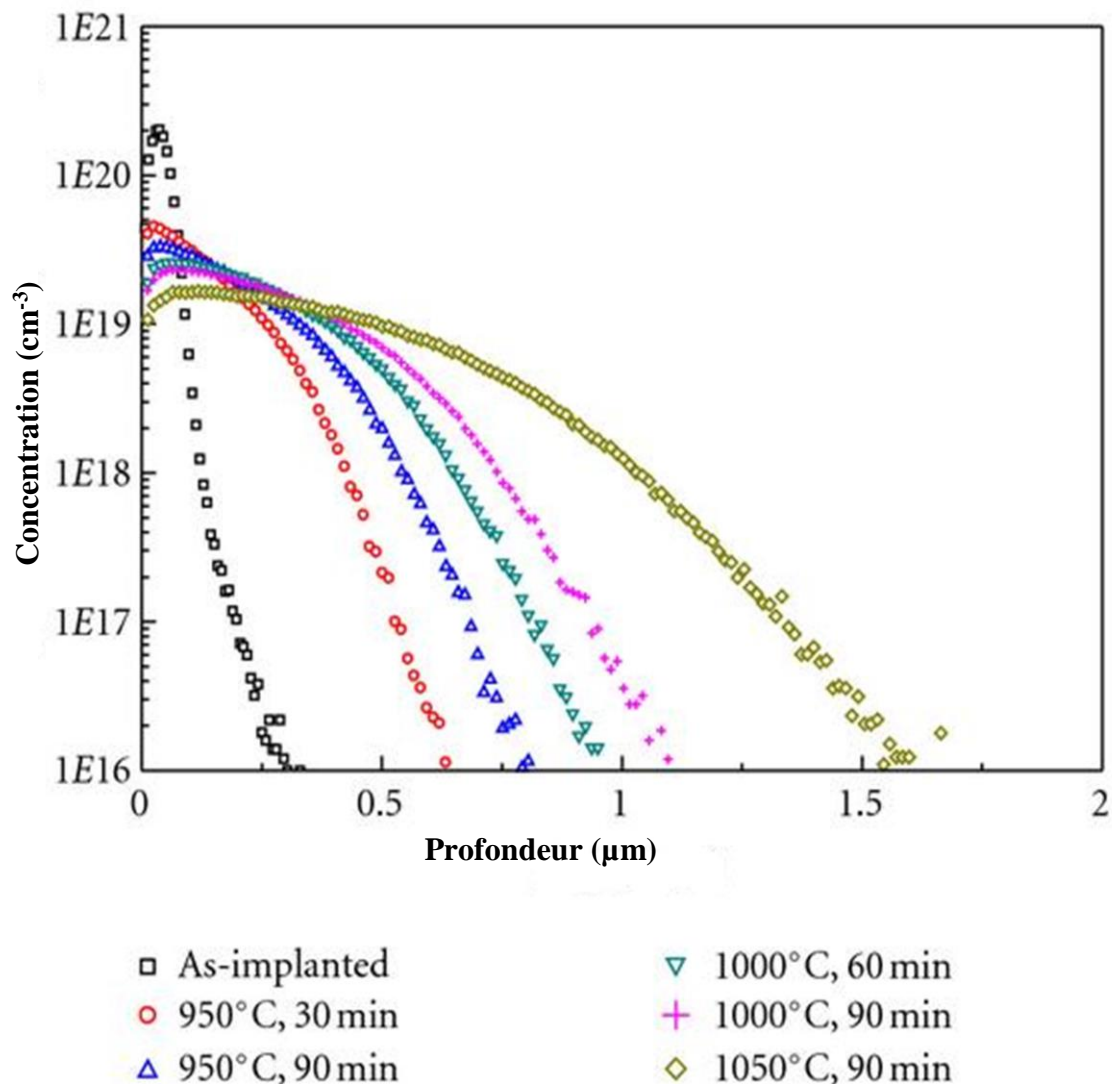


Figure II.2 : Profils SIMS des émetteurs implantés de phosphore en fonction des conditions de recuit [35].

II-4-3 Emetteurs formés par épitaxie

Le terme épitaxie a été créé en 1928 par Louis Royer [36], il provient étymologiquement des mots grecs epi, qui signifie au-dessus, et taxis, qui signifie ordonné. L'épitaxie correspond à la croissance d'un cristal sur un autre, selon l'ordonnement cristallin de ce dernier [37]. La croissance épitaxiale peut s'appliquer à une grande variété de matériaux : silicium, alliage silicium-germanium, métaux, oxydes, etc. Lorsque la nature de la couche épitaxiée est la même que celle du substrat, on parle d'homoépitaxie mais quand elles sont différentes, il s'agit

d'hétéroépitaxie. En conséquence, différentes technologies sont employées dont les principales sont [38] :

- Epitaxie par jet moléculaire (ou MBE pour Molecular Beam Epitaxy) qui se produit sous vide poussé (de l'ordre de 10^{-10} Torr) et à température allant de 400 à 800°C. Les sources de matière sont évaporées par effet Joule. La vitesse de croissance est très faible et la qualité cristalline est très élevée. Néanmoins, ce procédé est très coûteux et par conséquent il est réservé à des applications à plus forte valeur.
- Epitaxie en phase liquide (LPE pour Liquid Phase Epitaxy) qui est le premier procédé d'épitaxie à avoir été développé. La croissance est effectuée à l'équilibre thermodynamique et est basée sur la solubilité de l'espèce à déposer dans un solvant. Le refroidissement de la solution va donc causer le dépôt épitaxial. Cette technique a apporté de bons résultats en laboratoire mais elle n'est pas encore industrialisée.
- Epitaxie en phase vapeur (VPE pour Vapour Phase Epitaxy). C'est un procédé bien industrialisé en raison de sa grande vitesse de croissance. Elle est parfois désignée par la CVD (Chemical Vapour Deposition), qui permet le dépôt d'une couche amorphe ou cristalline par réaction chimique entre espèces gazeuses. Un grand nombre de réacteurs CVD existent. On peut citer: APCVD (Atmospheric Pressure), LPCVD (Low Pressure), UHVCVD (Ultra High Vacuum), RTCVD (Rapid Thermal), PECVD (Plasma Enhanced). La source d'énergie permettant la réaction peut être un chauffage résistif, inductif, par lampes ou un plasma, etc.

La croissance épitaxiale d'un émetteur par CVD à haute température présente de nombreux avantages. En effet, c'est un processus rapide de moins d'une minute, contrairement au procédé de diffusion thermique qui prend environ 50 minutes pour former un émetteur [39]. De plus, des émetteurs pourraient être réalisés après la croissance de la base. Dans ce contexte, des chercheurs ont constaté que pour une bonne passivation en surface, des émetteurs épais et modérément dopés entraînent des rendements élevés [27, 40]. Par ailleurs, l'épitaxie permet de faire varier le profil de dopage et donc un émetteur modérément dopé, sensible au bleu, peut facilement être réalisé [41]. De plus, aucun dépôt préalable de dopant n'est nécessaire lors de l'épitaxie, car l'émetteur est formé en croissance in-situ c'est-à-dire en ajoutant le gaz dopant (par exemple le PH_3) au précurseur de silicium. Ainsi, aucun oxyde de silicate de phosphore n'est formé, comme dans le cas de l'utilisation d'un dopant contenant de l'oxygène [42]. Par conséquent, aucune gravure chimique n'est nécessaire après la formation de l'émetteur. Par ailleurs, malgré l'épitaxie utilise du silicium de haute pureté, elle est cependant réalisée à des

températures supérieures à 1000°C, de sorte qu'une diffusion d'impuretés des parois du réacteur CVD vers le substrat ou la couche épitaxiale peut se produire [43]. Aussi, différents gaz sont utiles afin d'assurer une meilleure croissance, la sécurité de l'appareillage et sa pureté. Citons de part et d'autre [38] :

- ✓ N₂ pour purger le réacteur en début et à la fin du cycle de dépôt : suite à l'introduction de l'échantillon, le réacteur est sous air. La purge sert donc à éliminer cet air afin d'éviter qu'il réagisse avec l'hydrogène. En fin de cycle, le tube est mis sous azote de sorte de ne plus avoir de gaz inflammable dans le tube entre deux cycles.
- ✓ H₂ utilisé comme gaz de dilution.
- ✓ SiH₂Cl₂ qui sert de précurseur gazeux au silicium.
- ✓ B₂H₆ et PH₃ qui sont les précurseurs des gaz dopants.
- ✓ HCl est utilisé pour nettoyer le réacteur. Il permet notamment de graver le silicium involontairement déposé sur les parois du réacteur. Un dépôt trop épais sur ces zones va détériorer la qualité de l'épitaxie, c'est pourquoi un cycle de gravure HCl est lancé tous les 100 µm d'épitaxie cumulés. De plus, le réacteur est régulièrement démonté pour être nettoyé par voie humide pour garantir un bon nettoyage.

Un exemple de profils d'émetteurs épitaxiés, mesurés par SIMS, sur des substrats de silicium monocristallin de type p sont donnés à la figure II.3 [38]. On peut constater que selon les conditions expérimentales d'épitaxies, différentes distributions du phosphore peuvent être obtenus. En effet, on constate que le profil de l'émetteur 1 présente, au voisinage de sa surface, une concentration de P inférieure à 10²⁰ cm⁻³ et ceci via sa faible concentration dans la phase gazeuse. Une telle situation laisse prédire que la métallisation en face avant présentera un contact électrique désagréable. En maintenant la présence de phosphore dans la phase gazeuse pendant le refroidissement de l'échantillon, une fois que la phase d'épitaxie est terminée, le phosphore va diffuser vers l'échantillon et former un surdopage en surface (Emetteurs 2 et 3), ainsi un bon contact électrique sera possible. Par ailleurs, on remarque que le dopage est néanmoins beaucoup plus faible que celui formé par une diffusion thermique classique au POCl₃, ce qui permet d'avoir moins de recombinaisons, mais qui peut causer des pertes résistives dans l'émetteur. Enfin, un refroidissement long (Emetteur 2, par rapport à l'Emetteur 3) laisse apparaître que les dopants vont migrer par diffusion en phase solide et l'émetteur sera alors plus profond. Ce phénomène cause une légère augmentation de la résistance carrée [38].

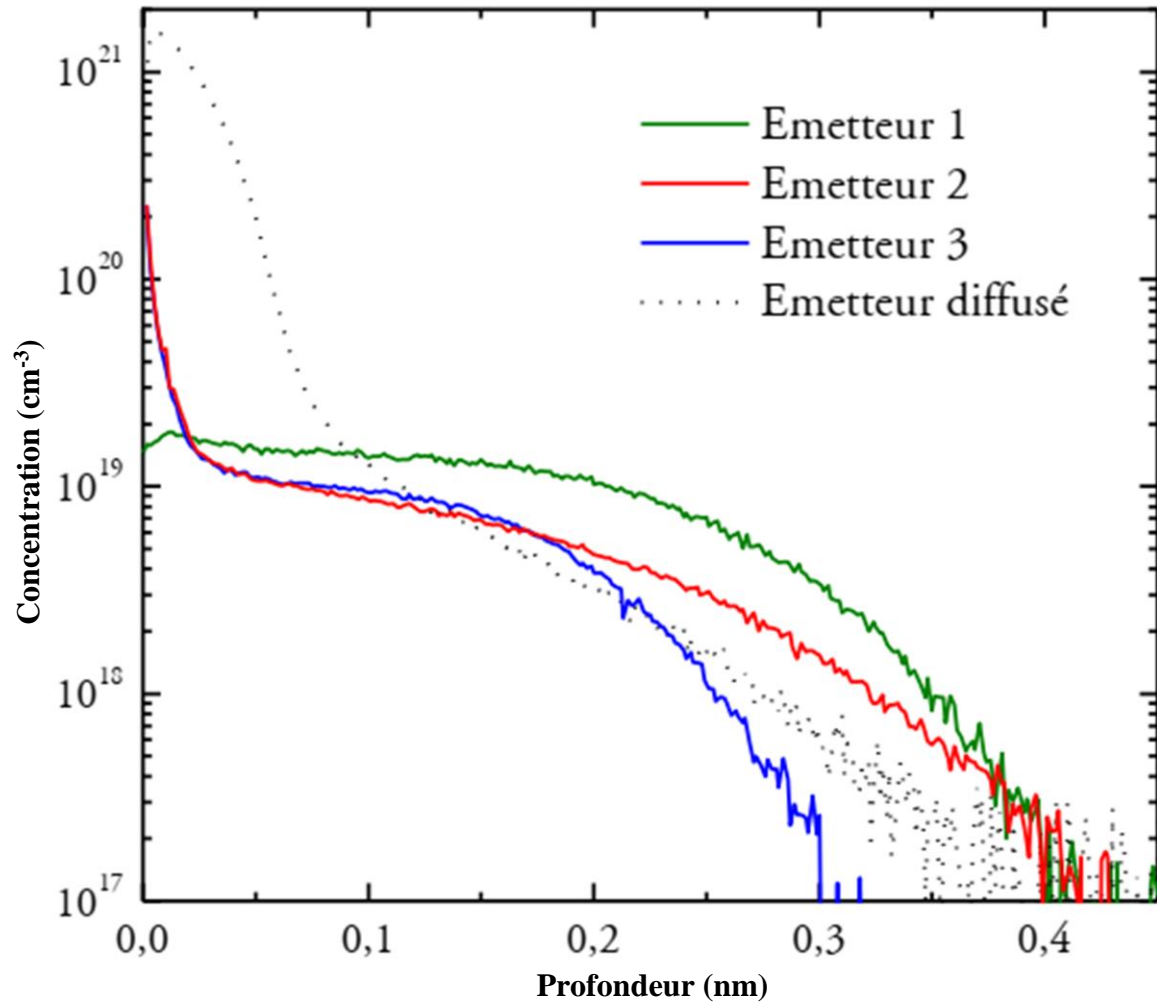


Figure II.3 : Profils SIMS des émetteurs épitaxiaux au phosphore [35].

II.5 Conclusion

Le présent chapitre donne au lecteur une image plus ou moins claire de la région de l'émetteur d'une cellule solaire en silicium cristallin. Pour ce faire, nous avons rappelé ses propriétés pour une efficacité meilleure et en conséquence atteindre des rendements photovoltaïques élevés. Aussi, la nécessité de signaler les inconvénients majeurs que peut manifester un émetteur étaient l'objet de ce chapitre et ceci dans le but de proposer des solutions via de la recherche et du développement. A notre niveau, on a jugé que la voie d'investiguer les propriétés des cellules solaires en mono-silicium pour différents profils d'émetteurs type n est prometteuse. Ces derniers, d'après la littérature, sont étroitement liés aux méthodes expérimentales dédiées à leurs formations. Pour cette raison, nous avons achevé ce chapitre par évoquer les points forts et faibles des techniques expérimentales juger dans la littérature comme les plus communément utilisées pour la formation des émetteurs des cellules solaires.

II.6 Références bibliographiques

- [1] Basic Photovoltaic Principles and Methods, Solar Information Module, SERI/SP-290- 1448, (1982).
- [2] S. Philipps, Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE and Werner Warmuth, PSE AG, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/PhotovoltaicsR eport.pdf>, (2023).
- [3] M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, A. W. H. Ho-Baillie, “Solar Cell Efficiency Tables (version 50)”, Prog. Photovoltaics, vol. 25, pp. 668- 676, (2017).
- [4] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%,” Nat. Energy, vol. 2, no. 5, (2017).
- [5] J. Benick, A. Richter, R. Müller, H. Hauser, F. Feldmann, P. Krenckel, S. Riepe, F. Schindler, M. C. Schubert, M. Hermle, A. W. Bett, S. W. Glunz “High-Efficiency n-Type HP mc Silicon Solar Cells” IEEE J. Photovoltaics, vol. 7, no. 5, pp.1171–1175, (2017).
- [6] M. Subramanian, B. Nagarajan, A. Ravichandran, V. S. Betageri, G. S. Thirunavukkarasu, E. Jamei, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, S. Mekhilef, V. R. Minnam Reddy, “Optimization of Effective Doping Concentration of Emitter for Ideal c-Si Solar Cell Device with PC1D Simulation” Crystals, Vol. 12, no. 244, pp. 1-10, (2022).
- [7] A. Bentzen, A. Holt, "Correspondence between sheet resistance and emitter profile of phosphorus diffused emitters from a spray-on dopant," Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, FL, USA, pp. 1153-1156, (2005).
- [8] H. Ghembaza, A. Zerga, R. Saïm, M. Pasquinelli, "Optimization of Phosphorus Emitter Formation from POCl₃ Diffusion for p-Type Silicon Solar Cells Processing", *Silicon*, vol.10, no.2, pp.377-386, (2018).
- [9] H. B. Normann, L. Vines, V. Privitera, W. Skorupa, T. Schumann, B. G. Svensson, E. V. Monakhov, "Phosphorus in-diffusion from a surface source by millisecond flash lamp annealing for shallow emitter solar cells", Applied Physics Letters, vol.102, no.13, pp.132108-1-132108-3, (2013).
- [10] A. N. Larsen, V. E. Borisenko, L. D. Nielsen, “Doping of silicon with arsenic and phosphorus from spin-on sources exposed to incoherent light”, J. Phys. Colloq. Vol. 44 pp. C5-427-C5-431, (1983).

- [11] K. Yuan, Y. Sun, Y. Lu, X. Liang, D. Tian, X. Ma, D. Yang, “Comparison on mechanical properties of heavily phosphorus- and arsenic-doped Czochralski silicon wafers”, AIP Adv. Vol. 8 pp. 045301-1-045301-9, (2018).
- [12] K. N. Manjunatha, S. Paul, “Carrier selective metal-oxides for self-doped silicon nanowire solar cells”, Appl. Surf. Sci. vol. 492, pp. 856–861, (2019).
- [13] T. Alzanki, R. Gwilliam, N. Emerson, Z. Tabatabaian, C. Jeynes, B. J. Sealy, “Concentration profiles of antimony-doped shallow layers in silicon”, Semicond. Sci. Technol. Vol. 19, pp. 728-732, (2004).
- [14] A. O. Evwaraye, “Electron-irradiation damage in antimony-doped silicon”, J. Appl. Phys. Vol. 48, pp. 734-738, (1977).
- [15] S. Kobayashi, “in Properties of Crystalline Silicon”, edited by R. Hull, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, pp. 16–22, (1999).
- [16] R. Chaoui, B. Mahmoudi, A. Messaoud, Y. Si Ahmed, A. Mefoued, Br. Mahmoudi, “Silicon Solar Cell Emitter Profile Tailoring Using the DOSS Diffusion Technique”, 1st Africa Photovoltaic Solar Energy Conference Proceedings March, 27th to 29th, Durban, South Africa, pp 14–18, (2014)
- [17] P. S. Mukesh, A. Mohd, “A comparative study of different emitter diffusion profiles on the performance of Si solar cells”, Eng. Res. Express Vol. 4, pp. 018001-1-15, (2022).
- [18] J.G. Fossum and M.A. Shibib. An analytic model for minority-carrier transport in heavily doped regions of silicon devices, IEEE Transaction on electron devices, Vol. 28, pp.1018 – 1025, (1981).
- [19] H. Wagner, A. Dastgheib-Shirazi, B. Min, A. E. Morishige, M. Steyer, G. Hahn, C. del Canizo, T. Buonassisi, P. P. Altermatt, “Optimizing phosphorus diffusion for photovoltaic applications: Peak doping, inactive phosphorus, gettering, and contact formation”, J. Appl. Phys. Vol. 119, pp. 185704-1-185704-10, (2016).
- [20] J. Ostojka, F. Gueri, P. Negrini, and S. Solmi. The effects of phosphorus precipitation on the open circuit voltage in n+/p silicon solar cells. Solar Cells Vol. 11, pp. 1–12, (1984).
- [21] M.A. Green, “Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic auger processes”, IEEE Transaction on electron devices, Vol. 31, pp. 671–678, (1984).
- [22] S. M. Sze, “Semiconductor Devices Physics and Technology”, 2nd edition, Wiley, New York, (2002).

- [23] J. Bultman, I. Cesar, B. Geerligs, Y. Komatsu, W. Sinke, "Methods of emitter formation for crystalline silicon solar cells", *Cell Processing, Photovoltaics International*, Vol. 8, pp. 69-80, (2010).
- [24] A. Bentzen, A. Holt, J. S. Christensen, B. G. Svensson, "High concentration in-diffusion of phosphorus in Si from a spray-on source", *J. of Appl. Phys.*, Vol. 99, pp.064502-1-064502-8 (2006).
- [25] S. Solmi, A. Parisini, R. Angelucci, A. Armigliato, D. Nobili, L. Moro, "Dopant and carrier concentration in Si in equilibrium with monoclinic SiP precipitates", *Phys. Rev. B* 53, pp. 7836-7841 (1996).
- [26] M. B. Spitzer, C. J. Keavney, "Low recombination P^+ and n^+ regions for high performance silicon solar cells", *Proc. 18th IEEE PVSC*, pp. 43-49 (1985).
- [27] A. Cuevas, M. Balbuena, "Thick-Emitter Silicon Solar Cells", in *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Las Vegas, NV, USA, pp.429-434, (1988).
- [28] J. F. Ziegler, "Ion Implantation Science and Technology", 2nd Ed., *Ion Implantation Technology*, Edgewater, Md, USA, pp. 491-498 (2000).
- [29] J. Narayan, O. W. Holland, R. E. Eby, J. J. Wortman, V. Ozguz, and G. A. Rozgonyi, "Rapid thermal annealing of arsenic and boron-implanted silicon," *Applied Physics Letters*, vol. 43, no. 10, pp. 957–959 (1983).
- [30] R. Angelucci, F. Cembali, P. Negrini, M. Servidori, and S. Solmi, "Temperature and time dependence of dopant enhanced diffusion in self-ion implanted silicon," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 134, no. 12, pp. 3130–3134 (1987).
- [31] T. E. Seidel and A. U. Mac Rae, "Isothermal annealing of boron implanted silicon," *Radiation Effects*, vol. 7, no. 1-2, pp. 1–6 (1971).
- [32] J. C. C. Tsai, "Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon," *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 9, pp. 1499–1506 (1969).
- [33] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, "Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-doped, phosphorus-doped, and boron-doped silicon," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 30, no. 7, pp. 764–769 (1983).
- [34] R. A. Sinton and A. Cuevas, "Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data," *Applied Physics Letters*, vol. 69, no. 17, pp. 2510–2512 (1996).
- [35] H. Boo, J. H. Lee, M. G. Kang, K. D. Lee, S. Kim, H. C. Hwang, W. J. Hwang, H. O. Kang, S. Park, S. J. Tark, D. Kim, "Effect of High-Temperature Annealing on Ion-Implanted Silicon Solar Cells", *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, pp. 6, (2012).

- [36] L. Royer, “Recherches expérimentales sur l’épitanie ou orientation mutuelle des cristaux d’espèces différentes”, Bulletin de la Société française de minéralogie et de cristallographie, vol. 51, pp. 7–159, (1928).
- [37] W. C. O’Mara, R. B. Herring, L. P. Hunt, Handbook of Semiconductor Silicon Technology. Noyes Publications, (1990).
- [38] M. Grau, “Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres”, Thèse de Doctorat, Institut des Nanotechnologies de Lyon – INSA de Lyon, Université de Lyon, France (2012).
- [39] D. Biro, “Durchlaufdiffusion für die Photovoltaik”, Ph.D. Thesis, Universität Freiburg, Deutschland. (2003).
- [40] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, “Emitter Design for High-Efficiency Silicon Solar Cells. Part 1: Terrestrial Cells”, Prog. Photovolt., Vol. 1, pp.193-202, (1993).
- [41] S. Reber, J. Dicker, D. M. Huljic, S. Bau, “Epitaxy of Emitters for Crystalline Silicon Solar Cells”, in Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany, pp.1612-1616, (2001).
- [42] S. M. Sze, Semiconductor Devices - Physics and Technology, New York, Wiley (1985).
- [43] E. K. Schmich, “High-temperature CVD processes for crystalline silicon thin-film and wafer solar cells”, Ph.D. Thesis, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, university of Freiburg, Germany, (2008).

Chapitre III :

Résultats et discussions

III.1 Introduction

La source d'énergie renouvelable la plus appréciable est l'énergie solaire en raison de sa propreté, de sa compatibilité avec l'environnement, de ses grandes réserves et de sa disponibilité à la surface de la Terre. Dans ce contexte, le rapport annuel, d'analyse du secteur d'énergie, de Solar Power Europe suggère que la capacité totale de production d'énergie solaire installée dans le monde dépassera 1,2 TW en 2023 [1]. Par conséquent, l'énergie solaire va être l'une des principales sources d'énergie du monde futur. Les cellules photovoltaïques (PV) sont le meilleur choix pour exploiter l'énergie solaire. Ces cellules convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque découvert par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel en 1839 [2]. Actuellement, les cellules solaires au silicium (Si) détiennent la part du marché PV la plus élevée en raison de leur bonne efficacité de conversion, de leur stabilité et des industriels qui ont développés convenablement des dispositifs PV à base de silicium [1]. Néanmoins, l'efficacité de ces cellules reste bien inférieure à celle prévue théoriquement [3]. Par conséquent, différentes techniques et concepts sont proposés dans la littérature pour améliorer le rendement de ces cellules [3].

Les investigations expérimentales sur l'évaluation des performances des cellules solaires en Si sont complexes, coûteuses et nécessitent des étapes de fabrications assez lentes [4, 5]. Cependant, les investigations numériques en utilisant des outils assistés par ordinateur tels que le logiciel de simulation PC1D (Personal Computer One Dimension) (PC1D) offrent une alternative rentable et efficace aux expériences. Le PC1D est l'un des programmes de simulation des dispositifs à semi-conducteurs les plus largement utilisés dans le domaine de la recherche. Il est basé sur une technique numérique d'éléments finis à convergence rapide et présente une interface simple à utiliser ainsi qu'une large gamme de paramètres photovoltaïques d'entrée et de sortie [6-8].

Une cellule solaire en Si comprend deux régions principales : la base et l'émetteur. Ses performances dépendent fortement de la concentration de dopant et de sa distribution dans la région de l'émetteur [9-11]. La concentration totale du dopant en un point donné à l'intérieur de la région de l'émetteur dépend de sa concentration à sa surface (pic de dopage) et du facteur de profondeur qui est défini comme étant la

distance sous la surface de l'émetteur à laquelle la concentration du dopant est réduite à $(1/e)$ du pic de concentration [7]. Par conséquent, pour une cellule solaire formellement efficace, l'optimisation du profil de diffusion de l'émetteur est une exigence essentielle. Pour cela, le présent chapitre est dédié à étudier, via le PC1D, l'influence des paramètres de conception d'un émetteur tels que le pic de dopage N_0 en atomes de phosphore à sa surface et le facteur de profondeur x_d sur les performances des cellules solaires en silicium monocristallin et ceci pour différents profils de diffusion tels que : uniforme, exponentiel, gaussien et fonction d'erreur complémentaire (Erfc). Ainsi, un dépouillement des résultats obtenus permettra d'identifier les caractéristiques optimales d'un émetteur pour un fonctionnement efficace des cellules.

III.2 Aperçu global du logiciel PC1D version 5.9

Le PC1D est un programme informatique unidimensionnel, basé sur la technique numérique des éléments finis, utilisé pour modéliser les dispositifs à semi-conducteurs. Le programme est basé sur la résolution des équations non linéaires entièrement couplées des phénomènes de transport des électrons et des trous dans les semi-conducteurs utilisés comme des matériaux de base des cellules photovoltaïques. En conséquence, il est largement utilisé dans le domaine de la recherche et du développement. La première version du programme a vu le jour en 1985. Depuis, de nombreuses versions avec des fonctionnalités améliorées ont été introduites. La dernière version (PC1Dmod Ver. 6.2) a été publiée par Halvard Haug et son équipe [8]. Le programme est très rapide et dispose d'une interface utilisatrice intuitive et d'une large gamme de paramètres d'entrée et de différentes options de sortie.

La fenêtre principale du logiciel PC1D est donnée en figure III.1. Elle comporte cinq sections énumérées sur la figure. Les trois premières sont destinées à la programmation où on peut introduire les paramètres non seulement des régions qui composent le dispositif mais aussi ceux de l'environnement où il se trouve en particulier l'excitation lumineuse et la température. La quatrième section est utilisée pour dévoiler les résultats de la simulation. Une cinquième section nommée « device schematic » donne une image de la structure du dispositif qui change simultanément avec la variation de ses paramètres.

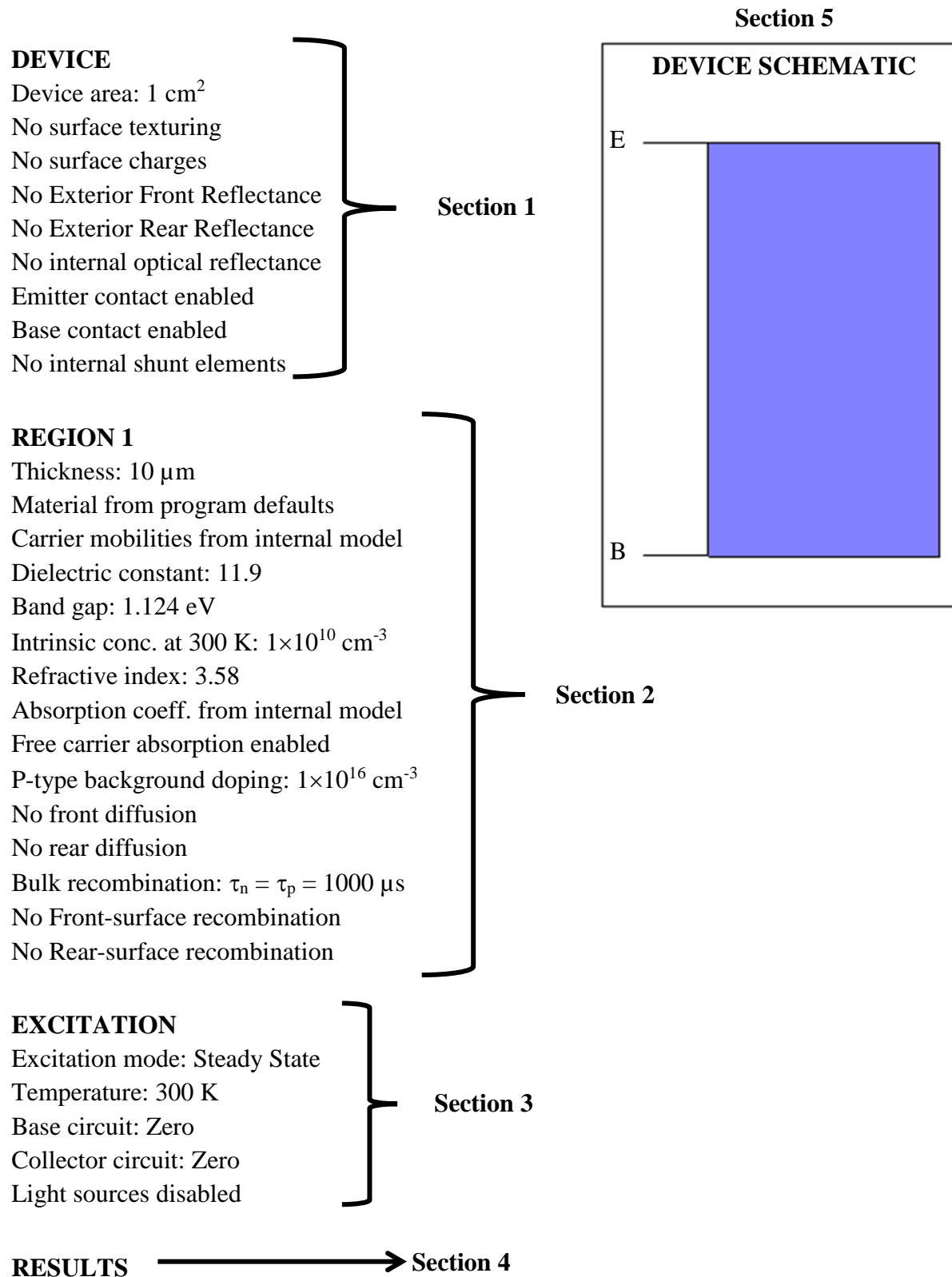


Figure III.1 : Fenêtre du logiciel de simulation PC1D qui s'affiche lors de son exécution.

A. Paramètres liés à la section Device

Cette section nommée device présente les paramètres suivants :

- La surface du dispositif est un paramètre critique car elle a un impact significatif sur le photo-courant. Sur la figure III.1, une surface de 1 cm² est affichée.
- La texture en surface permet aux utilisateurs de choisir entre une surface non texturée et une surface texturée. Dans ce dernier cas, la texture est définie comme étant des micro-pyramides enracinées en profondeur de l'émetteur avec un certain angle facial. Cette texturisation permet de réduire considérablement les pertes dues à la réflexion du rayonnement incident.
- Les charges électriques sur les surfaces avant et arrière : les deux faces du dispositif sont considérées comme neutres, ce qui signifie qu'il n'y a pas de barrière de potentiel aux surfaces.
- La réflectance optique interne : elle exprime les types de réflexion (diffuse pour une surface lisse ou spéculaire pour une surface rugueuse) du flux lumineux qui se produisent sur les surfaces avant et arrière du dispositif.
- Le choix des contacts métalliques aux niveaux de l'émetteur et de la base.
- L'impact des éléments qui ont la capacité de court-circuiter la cellule solaire est souvent associé aux impuretés métalliques qui peuvent se propager dans le volume du dispositif pendant sa fabrication.

B. Paramètres de la section 2 (REGION 1)

Cette section est dédiée à l'introduction des paramètres liés à la cellule solaire, tels que les types de matériaux utilisés, leur épaisseur, leur dopage, etc. On y mentionne notamment :

- L'épaisseur de la cellule solaire, qui inclut l'épaisseur de la base et de l'émetteur. Ce dernier est considéré comme fin par rapport à la base et varie généralement autour de 10 micromètres pour le silicium.
- Les fichiers d'extension (*.mat) utilisés pour stocker les paramètres des matériaux employés pour fabriquer la cellule solaire, tels que la mobilité, la constante diélectrique, l'énergie du gap, la concentration intrinsèque, l'indice de réfraction, le profil des dopants, le type et le niveau de dopage.

- Les recombinaisons des porteurs de charge qui peuvent se produire en volume ainsi qu'aux surfaces avant et arrière de la cellule solaire.

C. Paramètres de la section 3 (EXCITATION)

Dans cette section, on peut trouver des fichiers nécessaires à la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) ainsi que d'autres caractéristiques telles que la réponse spectrale. Elle contient également trois modes d'excitation : l'excitation en mode équilibre, ainsi que les modes transitoire et stationnaire. De plus, la température T de l'environnement est prise en compte dans la simulation. Le logiciel contient aussi plusieurs spectres solaires standards, chacun est spécifique à l'endroit où se déroule l'étude. Par exemple, pour une étude spatiale, on choisira le spectre air-mass AM0, tandis que sur la surface terrestre, on utilisera le spectre air mass AM1.5.

Par ailleurs, le logiciel PC1D propose, dans cette section, deux fichiers pour lancer la simulation et ceci selon les grandeurs photovoltaïques recherchées. En effet, il s'agit des fichiers :

- i. one-sun.exc qui permet de fournir :
 - ✓ La valeur du courant de court-circuit I_{cc} .
 - ✓ La valeur de la tension en circuit-ouvert V_{oc} .
 - ✓ La valeur de la puissance maximale P_{max} .
 - ✓ Les allures des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).
- ii. scan-qe.exc qui rend possible de divulguer :
 - ✓ La valeur du courant de court-circuit I_{cc} .
 - ✓ La valeur de la puissance maximale P_{max} .
 - ✓ Les graphes des caractéristiques de réflexion, de rendement quantique interne (IQE) et de rendement quantique externe (EQE) en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire.

D. Section 4 nommée RESULTS

Cette section permet de présenter les résultats de la simulation que ce soit graphiquement comme la courbe courant-tension (I-V) et/ou les valeurs des grandeurs

photovoltaïques, particulièrement le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et la puissance électrique délivrée par la cellule.

E. Section nommée Device schematic

Ladite section affiche la configuration du dispositif photovoltaïque à modéliser, qui peut être modifiée instantanément en ajustant les paramètres des composants du dispositif et de la région 1 (par exemple, en changeant les couleurs pour représenter différents types de dopage).

Une fois que tous les paramètres relatifs à la cellule à étudier sont incorporées dans la fenêtre de la figure précédentes, il est possible de lancer les calculs en cliquant sur l'icône « Run ». Après quelques secondes, de nouvelles fenêtres s'ouvrent pour afficher les résultats numériques et/ou graphiques souhaités. Cependant, pour que le logiciel PC1D fonctionne correctement, il est important de respecter le choix des gammes des valeurs des différents paramètres qui doivent être en bonne concordance avec l'expérience.

III.3 Dépouillement et discussion des résultats

L'objectif de notre étude est de comparer les effets des différents profils de diffusion d'émetteurs dopés au phosphore sur les performances des cellules solaires en mono-silicium et ceci dans l'environnement du simulateur PC1D. Pour ce faire, il a été prévu d'examiner l'évolution de la tension en circuit-ouvert (V_{co}), du courant de court-circuit (I_{cc}), et de la puissance électrique maximale (P_{max}) délivrée par les cellules en faisant varier le pic de dopage (N_0) à la surface des émetteurs et du facteur de profondeur (x_d). Ainsi, nous avons généré une cellule de base dont les caractéristiques sont données à la figure III.2. Signalons, que pour cette cellule, la région de l'émetteur présente une épaisseur de $0,2975\mu m$, un profil de dopage reflétant une fonction d'erreur complémentaire (Erfc) avec un pic en surface de $2,5 \times 10^{20} cm^{-3}$ et un facteur de profondeur de $0,1049\mu m$. Finalement, la simulation de ladite cellule dans l'environnement PC1D révèlent les résultats regroupés dans le tableau III.1. Ces derniers s'insèrent bien parmi ceux rapportés dans la littérature pour des cellules solaires de laboratoire [12].

Device

Device area : 100 cm^2
 Front surface texture depth: $3 \text{ }\mu\text{m}$
 No surface charges
 Exterior Front Reflectance: 10%
 No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: $0.015 \text{ }\Omega$
 Internal conductor: 0.3 S

REGION 1

Thickness: $300 \text{ }\mu\text{m}$
 Material from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: $1.513 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 1st front diff.: N-type, $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 7.208 \text{ }\mu\text{s}$
 Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^6 \text{ cm/s}$
 Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^5 \text{ cm/s}$

EXCITATION

Excitation from one-sun.exc
 Excitation mode: Transient, 16 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 Wcm^{-2}
 Spectrum from am15g.spc

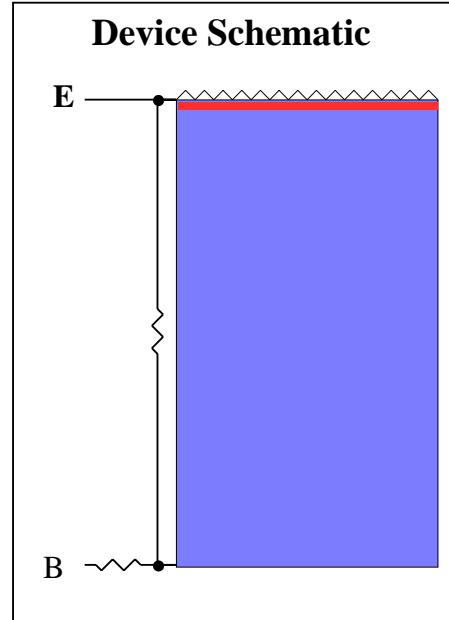


Figure III.2 : Fenêtre du logiciel PC1D dévoilant les paramètres de la cellule solaire de base utilisée pour le présent travail.

Court-circuit I_{cc}	Tension en circuit-ouvert V_{co}	Puissance électrique maximale P_{max}	Résistance carrée R_{\square}
3,186 A	0,5914 V	1,362 W	56,46 ohms/ \square

Tableau III.1 : Valeurs des grandeurs photovoltaïques issues de la simulation de la cellule de base dans l'environnement PC1D.

Une étude comparative des différents profils de diffusion d'émetteurs sur les performances des cellules solaires en mono-silicium sera l'objet du reste de ce chapitre. On investira dans l'évolution des grandeurs photovoltaïques, en particulier la tension en circuit-ouvert, le courant de court-circuit et la puissance électrique maximale et ceci en faisant varier le pic de dopage du phosphore (P) à la surface de l'émetteur et le facteur de profondeur pour différentes distributions de P, à savoir les distributions uniforme, gaussienne, exponentielle et Erfc.

III. 3.1 Effet du pic de dopage

Pour faire apparaître l'influence du pic de dopage N_0 sur les caractéristiques d'une cellule solaire en mono-silicium, nous avons fixé le facteur de profondeur à 0,1049 μm et on a tracé les variations de V_{co} , de I_{cc} et de P_{max} pour tous les profils d'émetteurs susmentionnés. Trois valeurs de N_0 ont été choisies. Il s'agit de $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et $2.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

III.3.1.a Effet sur la tension en circuit-ouvert V_{co}

La courbe représentant la tension en circuit-ouvert en fonction du pic de dopage du phosphore à la surface de l'émetteur est donnée à la figure III.3. On distingue aisément que V_{co} augmente au fur et à mesure que N_0 passe de $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Néanmoins, pour des valeurs supérieures, on constate que V_{co} , mesurée sur des cellules ayant un profil Erfc, présente une légère amélioration tandis que les cellules ayant un profil différent leur tension se voit dégrader. Aussi, il est à signaler que les valeurs maximales de V_{co} sont mesurées sur des cellules ayant un profil de diffusion exponentiel.

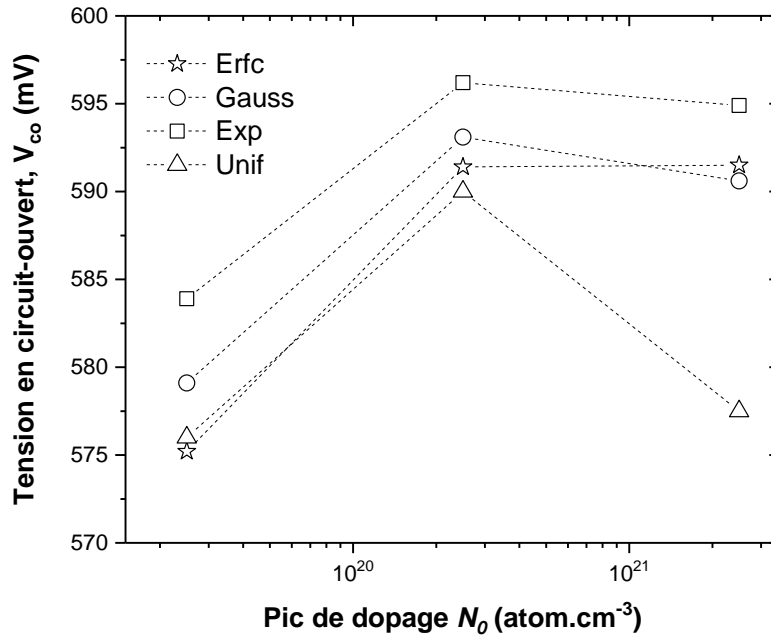


Figure III.3 : Effet du pic de dopage du phosphore N_0 à la surface de l'émetteur sur la tension en circuit-ouvert V_{co} mesurée sur des cellules solaires en mono-silicium ayant des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc.

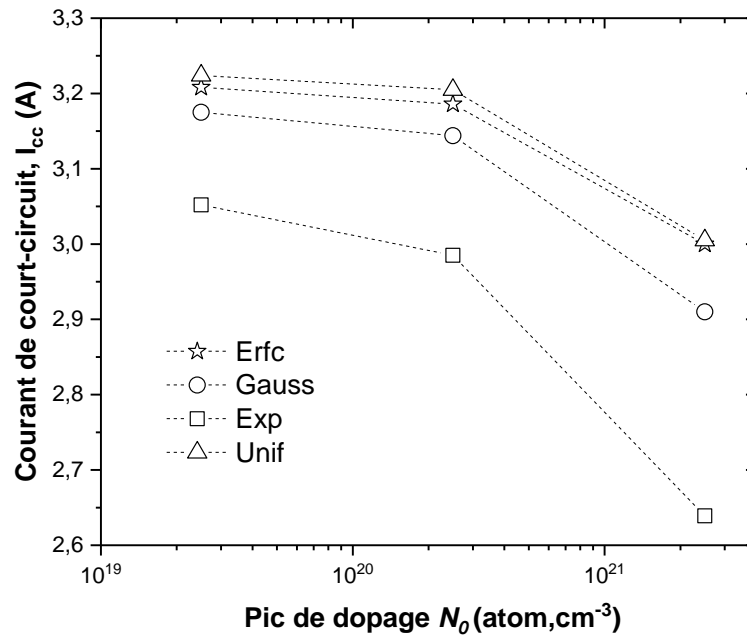


Figure III.4 : Effet du pic de dopage du phosphore N_0 à la surface de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{cc} mesurée sur des cellules solaires en mono-silicium ayant des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc.

III.3.1.b Effet sur le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit en fonction du pic de dopage du phosphore à la surface de l'émetteur est montré à la figure III.4. Pour les valeurs du pic usées dans cette étude, I_{cc} diminue progressivement avec l'augmentation de N_0 . Cependant, les cellules ayant des profils de diffusion uniforme et Erfc divulguent des valeurs de courant de court-circuit les plus élevées comparé à ceux avec des profils gaussien et exponentiel. Malgré cela, il est à remarquer que ces deux derniers profils fournissent, via la figure III.3, de meilleures valeurs de V_{co} . En conséquence, ils sont bien recommandés pour l'usage dans des cellules solaires jouant le rôle de générateurs de tensions.

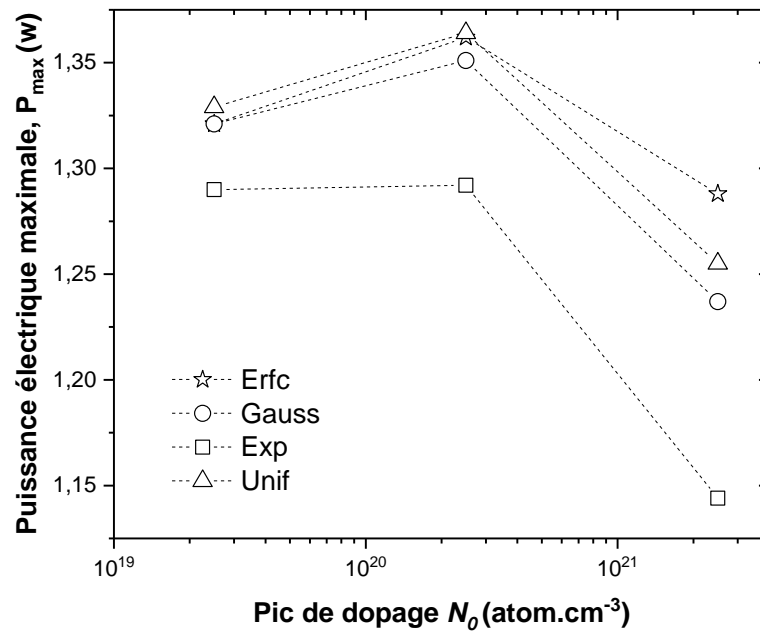


Figure III.5 : Effet du pic de dopage du phosphore N_0 à la surface de l'émetteur sur la puissance électrique maximale P_{max} délivrée par des cellules solaires en mono-silicium ayant des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc.

III.3.1.c Effet sur la puissance électrique P_{max} délivrée par une cellule

Dans les conditions standardisées de test de laboratoire (émission lumineuse de 1000 W/m² et à température 25 °C), la puissance électrique maximale délivrée par une cellule solaire en silicium de 100 cm² est comprise entre 1 et 1,5 W [12]. En conséquence, les résultats présentés à la figure III.5, exprimant l'effet du pic de phosphore à la surface de l'émetteur sur la puissance électrique maximale délivrée par

une cellule, témoignent du bon choix des paramètres utilisés dans la simulation PC1D et ceci pour différents profils de dopage. En effet, on peut lire des valeurs de P_{\max} allant de 1,10 W jusqu'à 1,40 W. Aussi, on constate clairement que, pour les quatre profils étudiés, P_{\max} augmente avec N_0 pour atteindre des valeurs maximales à $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Cependant, au-delà de cette valeur, P_{\max} décroît. Toutefois, il est à signaler, d'après la figure III.5, qu'une cellule avec un émetteur ayant un profil de diffusion uniforme ou Erfc donnera lieu à des valeurs de P_{\max} les plus hautes. Par conséquent, nos résultats témoignent que les profils uniforme et Erfc sont les plus avantageux par rapport aux autres profils.

III.3.2 Effet du facteur de profondeur

Pour cette partie de notre étude, nous avons fixé le pic du dopage à la surface de l'émetteur à $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ dans la cellule de base définie précédemment et par la suite nous avons analysé l'effet du facteur de profondeur x_d pour 0,05 μm , 0,1049 μm et 0,15 μm sur les grandeurs V_{co} , I_{cc} et P_{\max} . Cette démarche a été appliquée pour les quatre profils de dopage afin d'identifier les paramètres optimaux d'un émetteur idéal.

III.3.2.a Effet sur la tension en circuit-ouvert V_{co}

La figure III.6 illustre la variation de V_{co} en fonction du facteur de profondeur x_d pour différents profils de dopage simulés dans l'environnement PC1D. On remarque que la tension en circuit-ouvert augmente avec le facteur de profondeur pour atteindre des valeurs maximales dans le cas d'un émetteur ayant un profil de diffusion exponentiel.

III.3.2.b Effet sur le courant de court-circuit I_{cc}

Contrairement à l'évolution de la tension en circuit-ouvert présentée ci-dessus, le courant de court-circuit diminue avec la croissance du facteur de profondeur. En effet, sur la figure III.7, on observe que plus le dopage est élevé en profondeur, les valeurs de I_{cc} sont amoindries. Un tel constat est d'autant plus accentué sur un émetteur ayant un profil de dopage exponentiel comparé à celui présentant une distribution du phosphore uniforme ou Erfc.

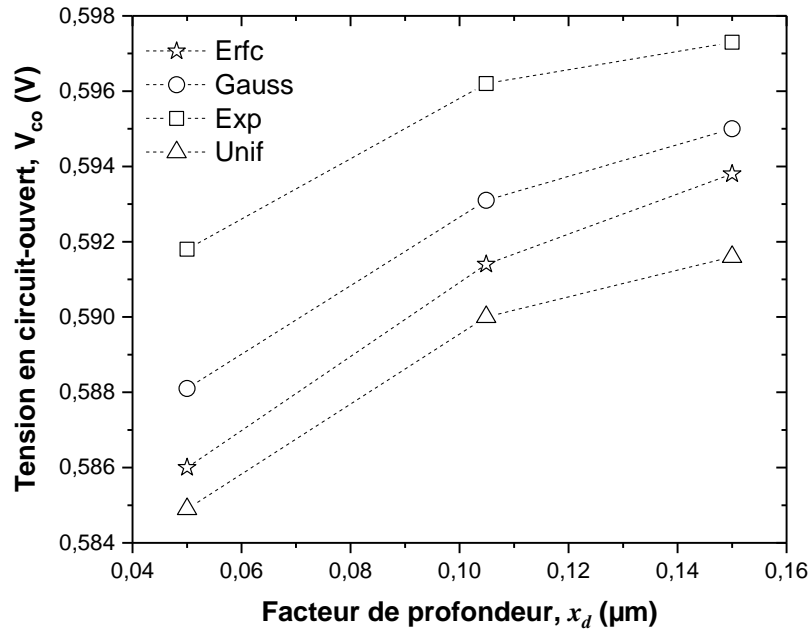


Figure III.6 : Effet du facteur de profondeur x_d sur la tension en circuit-ouvert V_{co} mesurée sur des cellules solaires en mono-silicium pour des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc avec $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

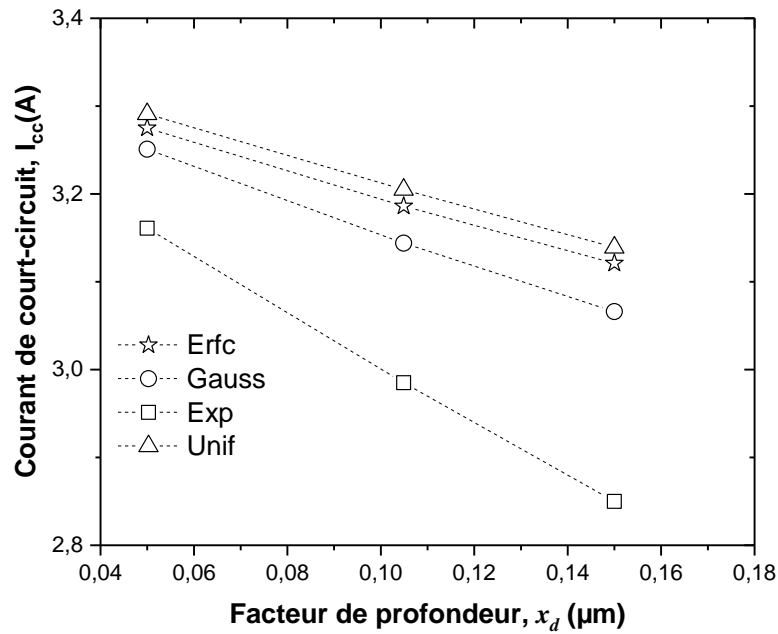


Figure III.7 : Effet du facteur de profondeur x_d sur le courant de court-circuit I_{cc} mesurée sur des cellules solaires en mono-silicium pour des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc avec $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

III.3.2.c Effet sur la puissance maximale P_{\max}

A son tour, l'effet du facteur de profondeur x_d sur la puissance électrique maximale P_{\max} délivrée par une cellule solaire en mono-silicium est bien révélée par la simulation PC1D à la figure III.8. Il est à noter la dégradation de P_{\max} au fur et à mesure que le fort dopage au phosphore s'étale en profondeur de l'émetteur. Toutefois, cette détérioration est plus remarquable pour un profil de dopage exponentiel comparé à l'uniforme ou l'Erfc.

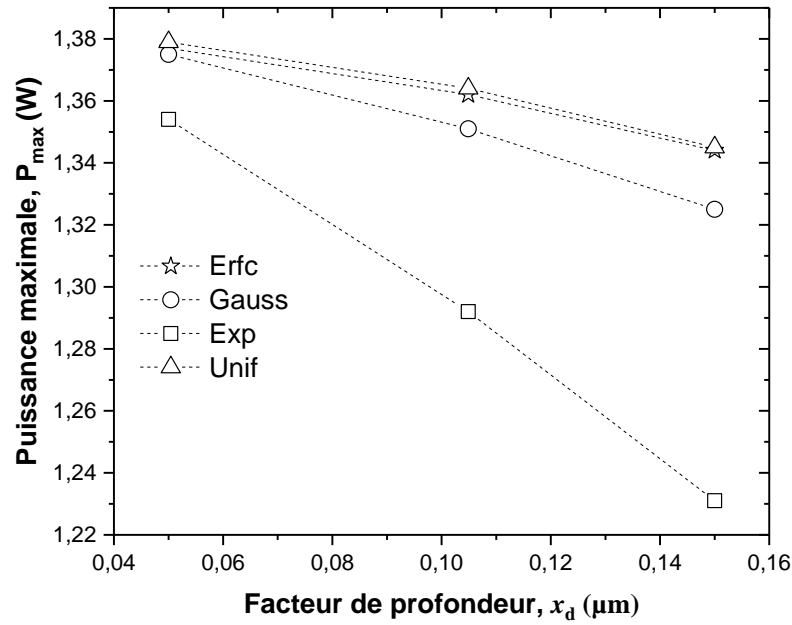


Figure III.8 : Effet du facteur de profondeur x_d sur la puissance maximale P_{\max} délivrée par des cellules solaires en mono-silicium ayant des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc avec $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

III.4 Interprétation des résultats

Les deux paramètres principaux concernant la région de l'émetteur d'une cellule solaire, à savoir son courant de saturation et sa résistance série, s'opposent [13]. En effet, la minimisation des recombinaisons passe par l'utilisation d'un émetteur le plus faiblement dopé possible. Par contre, si on veut avoir des pertes résistives minimales, il faut augmenter le dopage. En conséquence, de nombreux chercheurs proposent un compromis dans la formation de l'émetteur où ils rapportent qu'un émetteur idéal présente une résistance carrée comprise entre 80 et 150 Ω/\square [14, 15].

Afin d'interpréter les résultats dénombrés ci-dessus, nous avons examiné les effets du pic de dopage et du facteur de profondeur sur la résistance carrée R_{\square} de l'émetteur et sur la courbe du rendement quantique externe (EQE) de nos cellules solaires. Rappelons que les valeurs de R_{\square} nous renseignera sur la barrière de potentiel dans l'émetteur et à l'interface émetteur/contacts métalliques et la forme de la courbe de EQE comme une empreinte des vitesses de recombinaison des porteurs de charges dans les différentes régions de la cellule solaire.

Pour différents profils de diffusion du dopant de l'émetteur, l'effet du pic de dopage N_0 sur R_{\square} , obtenu dans l'environnement de simulation PC1D, est donné ci-dessous au tableau III.2. On peut aisément constater que les valeurs de R_{\square} croissent au fur et à mesure que l'allure du phosphore dans l'émetteur change du profil de l'exponentiel à l'Erfc en passant par les profils gaussien et uniforme. Aussi, pour un profil de dopage donné, R_{\square} diminue avec l'augmentation de N_0 . De tels comportements s'expliquent par le fait que la diminution de R_{\square} est un caractère reflétant l'abaissement de la barrière de potentiel à l'interface émetteur/contacts métalliques, ce qui améliore la tension en-circuit ouvert V_{co} [16]. Cette explication est en très bonne concordance avec les conclusions dégagées de la figure III.3. Néanmoins, sur la même figure, V_{co} diminue pour $N_0 > 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Dans ce cas, le phosphore dans l'émetteur dépasse sa solubilité limite et par la suite une couche morte se forme et des vitesses de recombinaison des porteurs de charges dominant [17]. En conséquence, les valeurs de la tension en circuit-ouvert et du courant de court-circuit se trouvent dégradées. Cette expertise explique bien les résultats des figures III.3 et III.4. Par ailleurs, l'évolution du graphe de la puissance maximale de la figure III.5 indique bien que pour $N_0 < 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (valeurs inférieures à la limite de solubilité du phosphore dans le silicium), une tendance à minimiser la barrière de potentiel à l'interface émetteur/contacts métalliques l'emporte devant les pertes des porteurs de charge par recombinaison que ce soit par Auger ou par des défauts dans la couche morte. Pour vérifier notre thèse, nous avons analysé l'impact du pic de dopage sur la courbe de EQE des quatre profils de diffusion (voir les figures III.9, III.10 et III.11). Ces dernières montrent que l'augmentation de N_0 provoque une diminution de EQE dans la gamme des longueurs d'onde du bleu (300–500 nm). Ceci est un témoignage que les taux de recombinaison des porteurs de charge libres dans l'émetteur et à sa surface sont d'autant plus élevés que N_0 est grand. Ceci explique la détérioration de I_{cc} avec l'augmentation de N_0 de la

figure III.4. Cependant, les profils uniforme et Erfc sont les plus convenables pour la formation d'émetteurs idéaux.

Profil de dopage	Erfc	Gaussien	Uniforme	Exponentiel
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($N_0 = 2,5 \times 10^{19} \text{ atom. cm}^{-3}$)	345,4	239,8	255,8	172,7
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ atom. cm}^{-3}$)	56,46	37,24	35,36	30
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($N_0 = 2,5 \times 10^{21} \text{ atom. cm}^{-3}$)	6,666	4,283	3,864	3,699

Tableau III.2 : Effet du pic de dopage du phosphore N_0 à la surface de l'émetteur sur sa résistance carrée R_{\square} pour différents profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc.

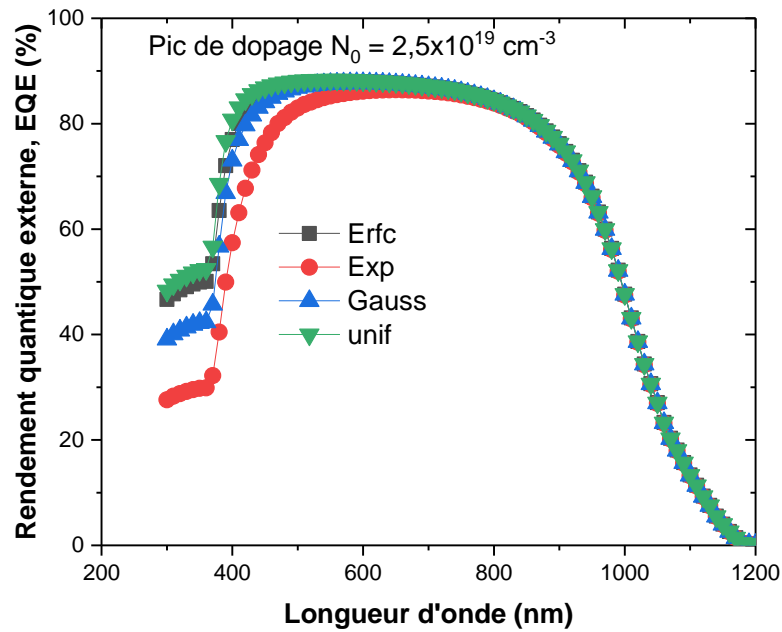


Figure III.9 : Rendement quantique externe des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage à leurs surfaces $N_0 = 2,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

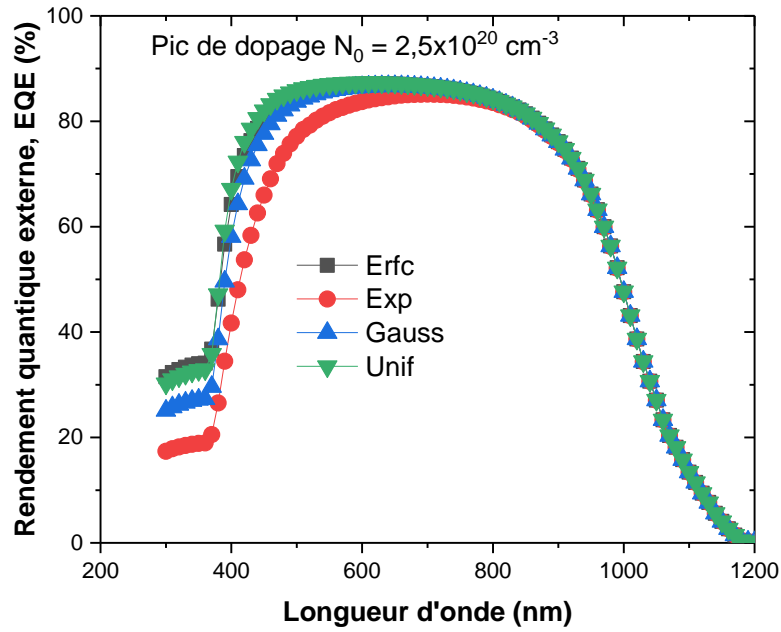


Figure III.10 : Rendement quantique externe des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage à leurs surfaces $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

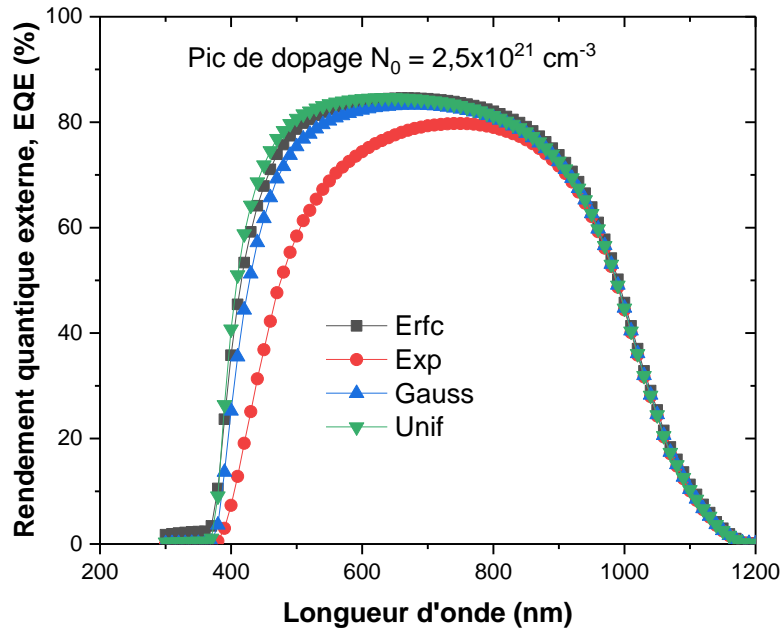


Figure III.11 : Rendement quantique externe des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage à leurs surfaces $N_0 = 2,5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

Le tableau III.3 rapporte l'effet du facteur de profondeur x_d sur la résistance carrée R_{\square} de l'émetteur pour différents profils de diffusion du phosphore P. On note des valeurs de R_{\square} de même ordre de grandeur pour un x_d donné. De plus, ces valeurs décroissent avec l'augmentation de x_d pour entraîner une augmentation de V_{co} à cause d'une diminution des pertes de tension interne à la région de l'émetteur [16]. Ce constat est en harmonie avec les résultats de la figure III.6.

Profil de dopage	Erfc	Gaussien	Uniforme	Exponentiel
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($x_d = 0,05\mu\text{m}$)	118,5	78,14	74,19	62,95
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($x_d = 0,1049\mu\text{m}$)	56,46	37,24	35,36	30
$R_{\square} (\Omega/\square)$ ($x_d = 0,15\mu\text{m}$)	39,48	26,04	24,73	20,98

Tableau III.3 : Effet du facteur de profondeur x_d sur la résistance carrée R_{\square} mesurée sur des émetteurs ayant des profils de diffusion : uniforme, gaussien, exponentiel et Erfc. Le pic de dopage N_0 à la surface des émetteurs est fixée à $2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Également, la compréhension du comportement du courant de court-circuit I_{cc} avec la variation de x_d passe par l'analyse minutieuse du rendement quantique externe (EQE) des cellules solaires ayant différents profils de diffusion. Les résultats sont illustrés sur les figures III.12 à III.14. On relève bien que, pour un profil de diffusion fixe, EQE diminue avec l'élargissement de x_d . Néanmoins, on enregistre des valeurs de EQE élevées pour des profils uniforme et Erfc comparé à celles d'exponentiel et gaussien. Ce bilan découle du fait que l'émetteur est une région fortement dopée comparé à la base. En conséquence, il renferme des vitesses de recombinaison élevées, ce qui entraîne une courte longueur de diffusion des porteurs minoritaires [18]. Aussi, plus la valeur de x_d est grande, plus l'émetteur est profond [16]. Par la suite, pour un pic de dopage donné, plus d'électrons et de trous se recombinent dans la région de l'émetteur au fur et à mesure que les valeurs du facteur de profondeur sont grandes. D'un autre côté, des vitesses de recombinaison élevées signifient moins de porteurs de charge seront collectés au niveau de leurs électrodes et, donc, la densité de courant sera réduite. Par conséquent, une région d'émetteur mince est nécessaire pour minimiser les pertes par recombinaison et conduire par la suite à une augmentation de la probabilité

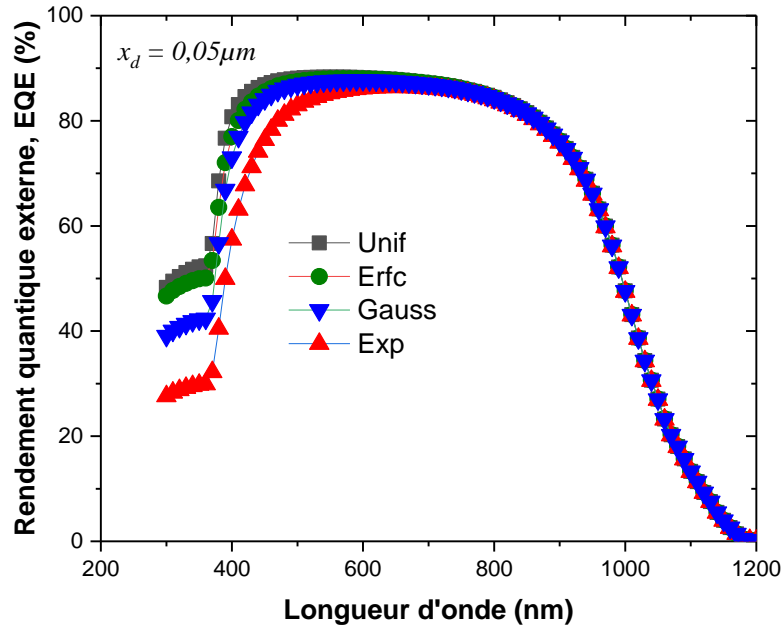


Figure III.12 : Rendement quantique externe des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, un facteur de profondeur $x_d = 0,05 \mu\text{m}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

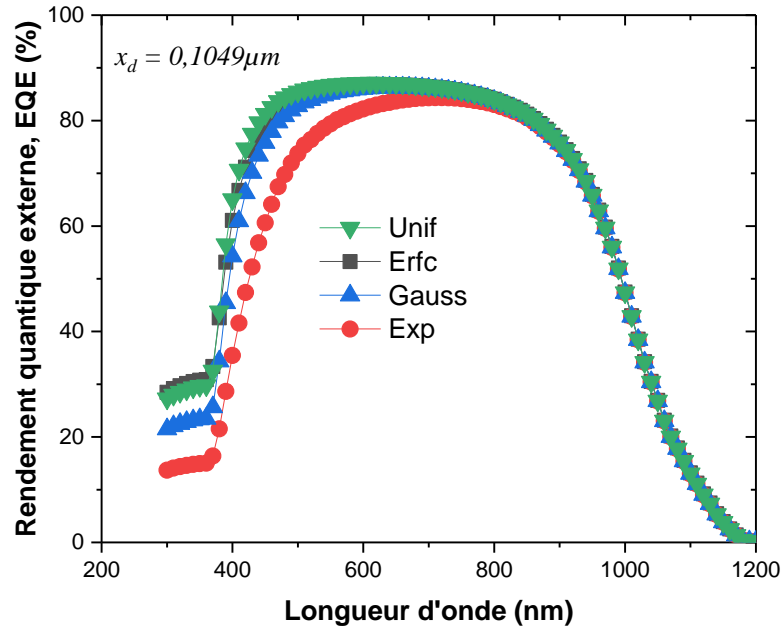


Figure III.13 : Rendement quantique des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, un facteur de profondeur $x_d = 0,1049 \mu\text{m}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

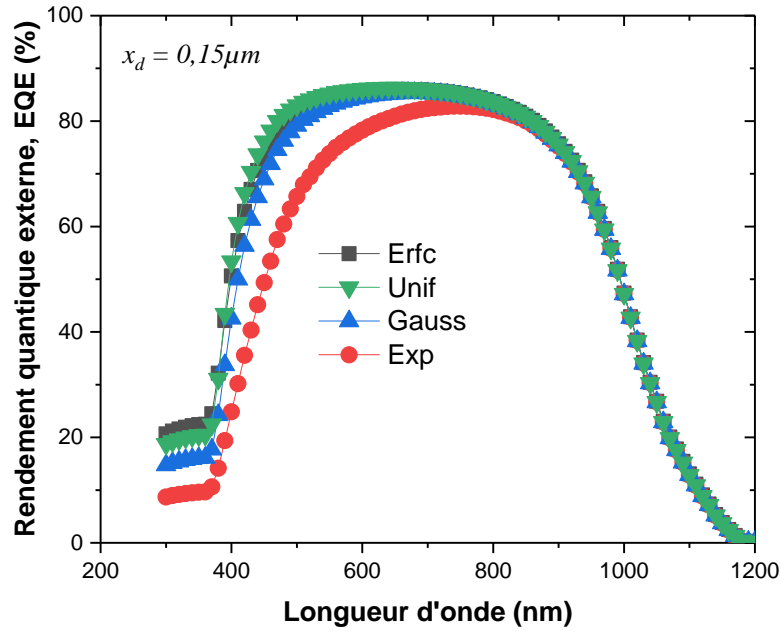


Figure III.14 : Rendement quantique externe des cellules solaires en mono-silicium avec des émetteurs ayant un pic de dopage $N_0 = 2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, un facteur de profondeur $x_d = 0,15 \mu\text{m}$ et des profils de diffusion : exponentiel, gaussien, uniforme ou Erfc.

de collecte des porteurs de charge. En utilisant un faible x_d , nous pouvons avoir un émetteur fin et donc une probabilité de collecte accrue des porteurs de charge photogénérés. C'est pourquoi le I_{cc} et le P_{max} augmentent avec la diminution du facteur de profondeur de l'émetteur, comme le montre respectivement les figures III.7 et III.8.

III.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons examiné, via le simulateur PC1D, les effets des paramètres clés de conception d'un émetteur, tels que le pic de dopage du phosphore et le facteur de profondeur des différents profils de diffusion (uniforme, exponentiel, gaussien et Erfc), sur les performances des cellules solaires en mono-silicium. Le pic de dopage a été varié de $2,5 \times 10^{19}$ à $2,5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ pour tous ces profils et un examen attentif de la tension en circuit-ouvert (V_{co}), du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la puissance électrique maximale (P_{max}) a révélé que la valeur optimisée de la concentration maximale (N_0) à la surface de l'émetteur est de $2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ pour chacun des quatre profils de diffusion considérés. Avec cette valeur optimisée de N_0 , le

facteur de profondeur (x_d) a été altéré de 0,05 à 0,15 μm afin d'identifier la valeur adéquate de x_d donnant lieu à des émetteurs idéaux. Après avoir étudié l'évolution de V_{co} , de I_{cc} et de P_{max} , la valeur optimisée du facteur de profondeur est de 0,05 μm pour les quatre profils de diffusion. De plus, une comparaison a également été faite entre les performances de ces profils avec leurs valeurs optimales respectives du facteur de profondeur et de la concentrations maximale du phosphore à la surface des émetteurs et il a été observé que les profils de diffusion Erfc et uniforme donnent les meilleures performances avec une puissance électrique maximale de 1,38 W.

Également, pour une analyse approfondie des divers résultats obtenus, les résistances carrées des émetteurs (R_{\square}) et les rendements quantiques externes (EQE) ont été rigoureusement examinées pour les quatre profils de diffusion. Les observations ont révélé que les profils Erfc et uniforme sont les meilleurs choix pour la formation d'émetteurs dans les cellules solaires en mono-silicium avec des EQE améliorés, spécialement dans la gamme des longueurs d'ondes courtes. Enfin, nous songeons qu'un émetteur fin et fortement dopé au phosphore avec un profil de diffusion Erfc peut être une option pour atténuer d'avantage les pertes résistives et les vitesses de recombinaison.

Conclusion générale

Bien que les technologies des cellules solaires à base du silicium (Si) dominent le marché mondial, les performances de ces structures peuvent encore être améliorées. En effet, les performances d'une cellule solaire en Si dépendent fortement de la distribution des concentrations du dopant dans la région de l'émetteur. Précisément, cette dernière est le siège des pertes non négligeables des porteurs de charge que ce soit en son volume ou au niveau des contacts métalliques localisés à sa surface. Pour minimiser ces pertes, les effets des paramètres clés de conception d'un émetteur sur les performances des cellules solaires en silicium doivent être minutieusement optimiser.

Dans le présent travail, nous avons utilisé le programme de simulation PC1D pour étudier l'influence de la concentration maximale du phosphore (N_0) à la surface de l'émetteur (pic de dopage) et le facteur de profondeur (x_d) sur les performances des cellules solaires en silicium pour différents profils de diffusion tels que : uniforme, exponentiel, gaussien et Erfc. Afin d'optimiser N_0 , nous l'avons fait varier de $2,5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ à $2,5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ avec un x_d fixe de $0,1049 \mu\text{m}$ pour les quatre profils de diffusion et les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) correspondantes ont été obtenues. Après avoir examiné la tension en circuit-ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}) et la puissance électrique maximale (P_{max}) délivrée par les différentes cellules, la valeur optimisée du pic de dopage est obtenue à $2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ pour tous ces profils de diffusion d'émetteurs. Par la suite, afin d'identifier la valeur appropriée du facteur de profondeur donnant lieu à des meilleurs performances de nos cellules, x_d a été changé de $0,05 \mu\text{m}$ à $0,15 \mu\text{m}$ tandis que la valeur du pic de dopage a été maintenue à $2,5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, soit la valeur obtenue en première étape d'optimisation. En conséquence, une valeur de $0,05 \mu\text{m}$ est retenue pour les quatre profils de diffusion. Plus tard, avec ces valeurs optimales obtenues, il s'est avéré qu'une meilleure efficacité des cellules solaires en silicium ne peut avoir lieu que si le profil du phosphore dans leurs émetteurs est uniforme ou suit une fonction d'erreur complémentaire (Erfc). Également, les divers résultats obtenus ont été interprétés via un examen attentif de l'évolution des résistances carrées (R_{\square}) des différents profils d'émetteurs et de la forme des courbes du rendement quantique externe (EQE) de nos cellules. Les observations ont montré d'avantage que les profils Erfc et uniforme

sont les meilleurs choix dans le but de minimiser les sources de pertes des porteurs de charge dans la région de l'émetteur. Cependant, en vertu de ce travail, on projette à l'avenir de combiner entre les différents profils de diffusion du phosphore dans l'émetteur afin de parvenir à une distribution donnant lieu à un rendement photovoltaïque élevé.