

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



**Thèse de Doctorat**  
En Physique

Présentée à

L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem  
Faculté des Sciences Exactes et Informatique  
Département de Physique

Pour obtenir le Diplôme de

**Docteur en Physique**

Option : « **Conversions Photovoltaïques** »

Par

**Mekemeche Abdelkader**

Sujet

*« Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques  
de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n.  
Étude de quelques cas particuliers de cellules  
innovantes. ».*

Soutenu le 04/07/2017

Devant le jury composé des :

|                           |  |             |
|---------------------------|--|-------------|
| Pr SENOUCI Khaled,        | Professeur, Université de Mostaganem,                | Président,  |
| Pr BOUSLAMA M'hammed,     | Professeur, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran,    | Examineur,  |
| Pr BENMANSOUR Abdelhalim, | Professeur, Université de Tlemcen,                   | Examineur,  |
| Pr BASSOU Ghaouti,        | Professeur, Université de Sidi Bel Abbès,            | Examineur,  |
| Pr BENTOUNES Hadj Adda,   | Professeur, Université de Mostaganem,                | Examineur,  |
| Dr BEGHADAD Mohammed.     | M.C.A, Université de Mostaganem, Directeur de thèse. | Rapporteur. |

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

- *A la mémoire de ma mère*
- *A mon père, à ma belle mère*
- *A ma femme, à mes trois enfants*
- *A tous les membres de ma grande famille*
- *A tous mes amis*

## **Remerciements**

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

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire Signaux-Systèmes et au Département de Physique, de la Faculté des Sciences Exactes et Informatique, à l'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

Avant tout propos, je tiens à remercier profondément Monsieur BEGHADAD Mohammed, Maître de Conférences classe A à l'Université de Mostaganem, d'avoir été durant ces quatre années de recherches mon directeur de thèse, dont la considération et la confiance qu'il me les a accordées, m'ont grandement soutenu. Il a su durant cette période me faire partager ses connaissances scientifiques et pédagogiques. J'ai été très sensible aux idées qu'il m'a prodigué, à la sollicitude avec laquelle il m'a orienté, et aux conseils avisés qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude à Monsieur SENOUCI Khaled, Professeur à l'Université de Mostaganem pour m'avoir offert l'opportunité de présider ce jury.

Je remercie également Monsieur BOUSLAMA M'hammed, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Monsieur BENMANSOUR Abdelhalim, Professeur à l'Université de Tlemcen et Monsieur BASSOU Ghaouti, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude pour leur participation au jury.

Je tiens aussi à remercier Monsieur BENTOUNES Hadj Adda, Professeur à l'Université de Mostaganem pour nous avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Un grand Merci est adressé au Dr SEMMACHE Bachir de Semco-Technologies de Montpellier (France) pour sa coopération et de nous avoir enrichi par sa grande expérience internationale dans le domaine malgré ses nombreuses occupations.

Que Dr CUMINAL Yvan, de L'Institut d'Electronique du Sud de l'Université II de Montpellier (France) soit également remercié ici pour sa coopération scientifique dans le sujet.

Enfin, un grand merci pour ceux que je n'ai pu désigner par leurs noms et qui m'ont aidé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

## Résumé

Jusqu'à une certaine période, toutes les cellules solaires commercialisées de la filière silicium ont été réalisées sur du silicium à substrat de type p puisque la technologie de sa fabrication est beaucoup plus facilement industrialisée et accessible. Néanmoins, à technologie équivalente, les meilleurs résultats des cellules sont obtenus pour le silicium cristallin de type n. La principale cause est la présence de défauts très recombinaisons dans le silicium de type p, notamment les paires bore-oxygène créées sous illumination et responsables de la perte de rendement des cellules les premiers mois de fonctionnement. Les cellules avec silicium cristallin de type n dopé au phosphore ne sont pas influencées à ce type de défauts et dans le temps, elles sont beaucoup plus stables. Dans ce travail de cette thèse, on a étudié la cellule solaire de type n à émetteurs homogène et sélectif. Pour cela, on a analysé l'influence de divers paramètres de la cellule solaire de silicium monocristallin de type n expérimentée par l'institut allemand ISE (Institute for Solar Energy Systems) de Fraunhofer, en particulier les paramètres de la base (durée de vie, résistivité et épaisseur), les résistances de couche de l'émetteur et de la surface arrière (BSF). Pour optimiser cette cellule, on a utilisé PC2D de P. Basore qui est un nouveau simulateur, permettant la modélisation des effets bidimensionnels des cellules solaires. La cellule à émetteur homogène, dopé au bore par diffusion thermique avec une résistance de couche de  $90 \Omega/\square$  (notée HE90), est passivée avec l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) puis recouverte d'une couche antireflet de nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ). En optimisant la métallisation de cette cellule, Kalio et al ont obtenu un rendement de conversion de 19.60 %, validée ensuite par notre travail à 19.68 %. Nous avons par la suite optimisé les paramètres de cette cellule obtenant un gain absolu de 0.37 % pour la cellule solaire à émetteur homogène d'une résistance de couche de  $75 \Omega/\square$  (notée HE75). L'introduction de l'émetteur sélectif (notée SE50-100) a également amélioré le rendement de conversion en montant à 20.20% pour une résistance de couche de  $50 \Omega/\square$  sous les contacts et  $100 \Omega/\square$ , entre les contacts. Enfin, nous avons comparé les performances de ces cellules étudiées de type n par rapport aux cellules de type p d'Irsolar. On a constaté clairement, l'avantage des cellules à substrat de type n pour les deux structures HE et SE avec des améliorations d'environ 2.5 % en rendement de conversion  $\eta$ .

**Mots-clés:** cellules solaires au silicium; n-type; p-type; Emetteur sélectif (SE); PC2D.

## **Abstract**

Up to a certain period, all commercialized silicon solar cells were realized on p-type silicon substrate because the technology of their production was easily industrialized and accessible. Nevertheless, with equivalent technology, the best results of the cells are obtained for the n-type crystalline silicon. The main cause is the presence of very recombinant defects in the p-type silicon, in particular the boron-oxygen pairs created under illumination and responsible for the loss of cell efficiency in the first months of operation. Cells with phosphorus-doped n-type crystalline silicon are not influenced by this type of defects and over time are much more stable. In this work of this thesis, we studied the n-type solar cells with homogeneous and selective emitters. For this purpose, we analyzed the influence of various parameters of the n-type monocrystalline silicon solar cells experimented by Fraunhofer's Institute for Solar Energy Systems (ISE), in particular the parameters of the base (lifetime, resistivity and thickness), the emitter and back surface field (BSF). To optimize this cell, P. Basore's PC2D program was used, which is a new simulator, allowing the modeling of the two-dimensional effects of solar cells. The homogeneous emitter cell, doped with boron by thermal diffusion with a sheet resistance of  $90 \Omega/\square$  (noted HE90), is passivated with aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and then covered with silicon nitride ( $\text{SiN}_x$ ) antireflective coating layer. By optimizing the metallization of this cell, Kalio et al obtained a conversion efficiency of 19.60 %, validated by our work at 19.68 %. Then, we optimized the parameters of this cell obtaining an absolute gain of 0.37 % for the solar cell with homogeneous emitter of a  $75 \Omega/\square$  sheet resistance (noted HE75). The introduction of the selective emitter (SE50-100) improved the conversion efficiency to 20.20 % with sheet resistance of  $50 \Omega/\square$  under the contacts and  $100 \Omega/\square$ , between the contacts. Finally, we compared the performance of these n-type studied cells with Irysolar p-type cells. The advantage of n-type substrate cells for the two HE and SE structures has been clearly seen with improvements of about 2.5% of efficiency.

**Keywords:** Silicon solar cells; n-type; p-type; Selective Emitter (SE); PC2D.

## الملخص

حتى فترة معينة، جميع الخلايا الشمسية للسيليكون البلوري التي تم تسويقها كانت ضمن تكنولوجيا السيليكون ذو الأساس p حيث ان صناعتها كانت أكثر سهولة وتحكماً. ومع ذلك، فالحصول على أفضل النتائج كانت لخلايا السيليكون البلوري ذو الأساس n. السبب الرئيسي هو ضعف حساسيتها لمعظم الشوائب المعدنية، بالإضافة إلى ذلك، فإن أداءها لا يضعف تحت الإضاءة مع مرور الزمن (الأشهر الأولى من العملية) بسبب زوج البور-أكسجين عكس خلايا السيليكون البلوري ذو الأساس p التي تتأثر بذلك، فخلايا السيليكون البلوري ذو أساس n أكثر استقراراً. في هذا العمل لهذه الأطروحة، تم دراسة الخلايا الشمسية للسيليكون البلوري الاحادي ذو اساس n ذات البواعث المتجانسة والانتقائية. لهذا، قمنا بتحليل تأثير العوامل المختلفة على خلايا السيليكون البلوري الاحادي ذو اساس n التي تم اختبارها من طرف المعهد الألماني ISE (معهد أنظمة الطاقة الشمسية) فراونهورف، وخاصة معايير الأساس (الحياة، المقاومة والسلك)، و المقومات الورقية للباعث والسطح الخلفي. لتحسين كفاءة هذه الخلية استخدمنا المبرمج الجديد ثنائي الأبعاد PC2D الذي يحاكي عمل الخلايا الشمسية. هذه الخلية المتجانسة الباعث، ذات المقاومة الورقية  $90 \Omega/\square$  (الرمز HE90) تم تحييدها بأكسيد الألومنيوم ( $Al_2O_3$ ) ثم تغطيتها بطبقة مضادة للانعكاس لنيتريد السيليكون ( $SiNx$ ). تحسين معدنة هذه الخلية، من طرف الباحث Kalio أدى الى الحصول على مردود 19.60٪، تم التصديق عليه من قبل عملنا ب 19.68٪. البرمجة التي قمنا بها في وقت لاحق لتحسين كفاءة هذه الخلية سمحت بالحصول على ربح مطلق يعادل 0.37٪ للخلية الشمسية ذات الباعث المتجانس ذو المقاومة الورقية  $75 \Omega/\square$  (الرمز HE75). إدخال الباعث الانتقائي (الرمز SE50-100) أدى الى الحصول على المردود 20.20٪ لباعث الخلية الشمسية ذو المقاومة الورقية  $50 \Omega/\square$  تحت النواقل الكهربائية و  $100 \Omega/\square$  بين النواقل الكهربائية. وأخيراً، قارنا أداء هذا النوع من الخلايا المدروسة ذو الأساس n مع خلايا السيليكون البلوري ذو الأساس p لشركة Irysolar. لوحظ بشكل واضح، تقدم مردود خلايا السيليكون البلوري ذو الأساس n بنوعها اي ذات الباعث المتجانس (HE) و ذات الباعث الانتقائي (SE) بتحسين في المردود  $\eta$  قدر بحوالي 2.5٪.

**كلمات البحث:** خلايا شمسية للسيليكون; نوع n; نوع p; باعث انتقائي (SE); PC2D .

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>Chapitre I Energie photovoltaïque.....</b>                       | <b>11</b> |
| I.1 Définition et historique.....                                   | 11        |
| I.2 Avantages et inconvénients du PV .....                          | 15        |
| I.3 Développement du photovoltaïque dans le monde .....             | 15        |
| I.3.1 Installations de systèmes solaires dans le monde .....        | 18        |
| I.4 Développement du photovoltaïque en Algérie.....                 | 19        |
| I.5 Générations du photovoltaïque .....                             | 21        |
| I.5.1 1 <sup>ère</sup> Génération .....                             | 21        |
| I.5.2 2 <sup>ème</sup> Génération .....                             | 21        |
| I.5.3 3 <sup>ème</sup> Génération .....                             | 22        |
| I.6 Le rayonnement solaire .....                                    | 22        |
| I.6.1 Le Soleil .....   | 22        |
| I.6.2 Le rayonnement solaire hors atmosphère .....                  | 23        |
| I.6.3 Le rayonnement solaire au sol .....                           | 26        |
| I.7 Conclusion.....   | 29        |
| <b>Chapitre II Théorie de la cellule solaire.....</b>               | <b>32</b> |
| II.1 Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire ..... | 32        |
| II.2 Les semi-conducteurs .....                                     | 32        |
| II.2.1 Transitions directe et indirecte.....                        | 33        |
| II.2.2 Structure cristalline .....                                  | 34        |
| II.2.3 Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique .....      | 35        |
| II.2.4 Semi-conducteur hors équilibre .....                         | 39        |
| II.3 Structure et fonctionnement d'une cellule solaire.....         | 46        |
| II.3.1 L'homojonction PN à l'équilibre .....                        | 46        |
| II.3.2 La jonction PN polarisée.....                                | 49        |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| II.3.3  | Le courant de génération-recombinaison.....   | 52         |
| II.3.4  | La jonction PN sous illumination .....  | 53         |
| II.4  | Conclusion.....   | 64         |
| <b>Chapitre III Technologie de la cellule solaire de type n et outils de caractérisations .....</b> |   | <b>66</b>  |
| III.1   | Silicium cristallin.....  | 66         |
| III.1.1   | Silicium métallurgique.....   | 67         |
| III.1.2   | Purification du silicium métallurgique.....   | 68         |
| III.1.3   | Cristallisation du silicium .....   | 70         |
| III.1.4   | Types de silicium cristallin .....  | 72         |
| III.1.5   | Production des plaquettes (wafers) .....  | 72         |
| III.2   | Elaboration de la cellule solaire en silicium monocristallin de type n .....                    | 73         |
| III.2.1   | Procédé standard de réalisation d'une cellule solaire en silicium monocristallin de type p..... | 73         |
| III.2.2   | Fabrication des cellules photovoltaïques sur substrat de silicium de type n                     | 84         |
| III.3   | Cellule solaire à émetteur sélectif.....  | 91         |
| III.3.1   | Principe et avantages.....  | 92         |
| III.3.2   | Technologie de la réalisation de l'émetteur sélectif .....                                      | 92         |
| III.4   | Outils de caractérisations .....  | 93         |
| III.4.1   | Mesure de la résistivité par la méthode des quatre pointes.....                                 | 94         |
| III.4.2   | Mesure de la durée de vie par la méthode PCD.....   | 94         |
| III.4.3   | Mesure de la réflectivité.....  | 96         |
| III.4.4   | Mesure de la réponse spectrale .....  | 97         |
| III.4.5   | Mesure de la caractéristique J(V) .....   | 98         |
| III.5   | Conclusion .....  | 99         |
| <b>Chapitre IV Présentation du programme PC2D .....</b>   |   | <b>102</b> |
| IV.1  | Principe général de la simulation.....  | 102        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| IV.2   | Le simulateur PC1D .....  | 104        |
| IV.2.1   | Paramètres du dispositif.....   | 106        |
| IV.2.2   | Paramètres des régions.....   | 106        |
| IV.2.3   | Paramètres d'excitation.....  | 106        |
| IV.2.4   | Résultats.....  | 107        |
| IV.3   | Le simulateur PC2D .....  | 107        |
| IV.3.1   | Méthode numérique .....   | 108        |
| IV.3.2   | Feuilles de calcul.....   | 110        |
| IV.3.3   | Simulation.....   | 114        |
| IV.4   | Conclusion.....   | 119        |
| <b>Chapitre V Modélisation et optimisation des cellules solaires de type n .....</b> |   | <b>121</b> |
| V.1  | Etat de l'art.....  | 121        |
| V.2  | Etapas de calculs .....   | 124        |
| V.2.1  | Calculs intermédiaires.....   | 124        |
| V.3  | Simulation .....  | 127        |
| V.3.1  | Paramètres de la cellule à étudier.....                                   | 127        |
| V.3.2  | Résultats et comparaison.....   | 128        |
| V.4  | Optimisation.....   | 129        |
| V.4.1  | Effet des paramètres de la base.....                                      | 130        |
| V.4.2  | Effet de la résistance de couche de l'émetteur.....                       | 133        |
| V.4.3  | Effet du champ de surface arrière (BSF) .....                             | 136        |
| V.5  | Performances de la cellule solaire optimisée .....                        | 137        |
| V.6  | Comparaison avec les performances de la cellule à substrat de type p..... | 139        |
| V.6.1  | Paramètres des cellules d'Irysolar .....                                  | 140        |
| V.6.2  | Résultats.....  | 142        |
| V.6.3  | Comparaison avec les cellules solaires de type n .....                    | 143        |
| V.7  | Effets bidimensionnels sur les cellules de type n.....                    | 144        |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| V.7.1 | Potentiels de quasi-niveaux de Fermi .....  | 144        |
| V.7.2 | Densité des porteurs .....  | 146        |
| V.8   | Conclusion.....   | 148        |
|       | <b>Conclusion générale.....</b>   | <b>151</b> |
|       | <b>Annexe : Méthode des éléments finis pour la résolution des équations de transport d'une cellule solaire.....</b> | <b>156</b> |
|       | <b>Bibliographie.....</b>   | <b>163</b> |
|       | <b>Productions Scientifiques de l'auteur.....</b>   | <b>175</b> |

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque est particulièrement bien adaptée aux enjeux majeurs de notre société : diminution des gisements fossiles et nécessité de lutter contre le changement climatique. L'énergie solaire est inépuisable, disponible partout dans le monde et ne produit ni déchets, ni gaz polluants. C'est la raison pour laquelle le parc photovoltaïque se développe considérablement dans le monde depuis des dizaines d'années.

Dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998. L'industrie photovoltaïque solaire mondiale a connu une croissance de plus de 50 GW en 2015 (40 GW en 2014) atteignant une capacité totale de 229 GW (227 GW selon ([Renewable Energy Policy Network 2016](#))) (Figure 0-1), soit plus de 100 fois la capacité en 2000. Les prévisions pour 2016 et 2017 sont respectivement, de 61 GW et 67 GW d'installations mondiales nouvelles ([SolarPower Europe 2016](#)).

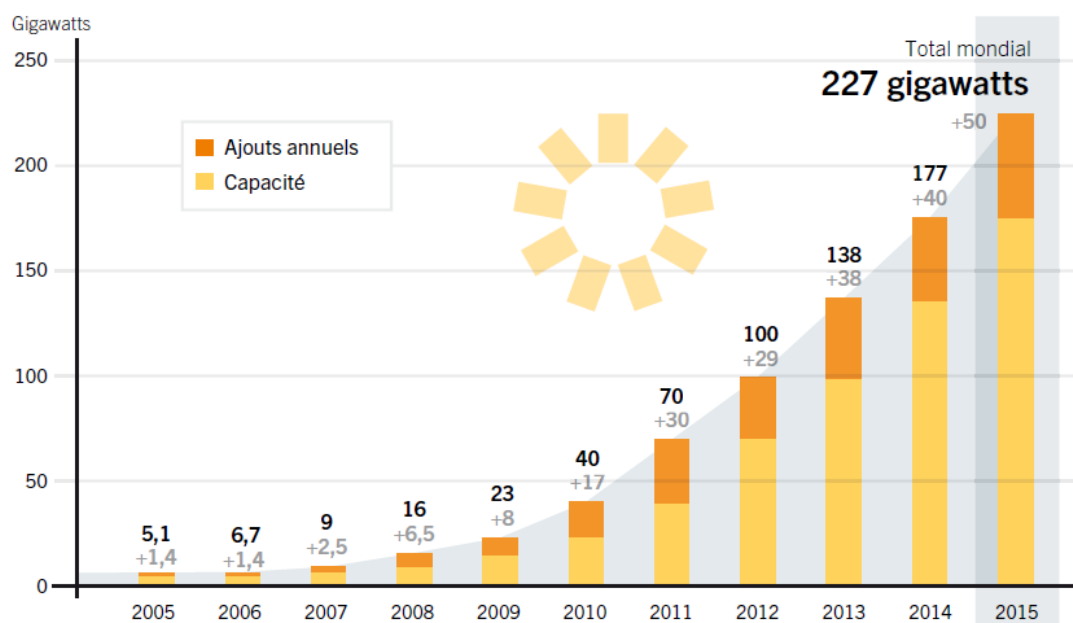


Figure 0-1 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque ([Renewable Energy Policy Network 2016](#))

Jusqu'en 2020, d'importants nouveaux marchés solaires devraient se développer en Algérie, au Brésil, en Egypte, au Mexique, au Pakistan, aux Philippines, en Arabie Saoudite et aux Emirats Arabes Unis. Aujourd'hui, la plupart de ces pays ont très peu de capacité installée ([SolarPower Europe 2016](#)).

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision de l'Algérie compte s'appuyer sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie en s'engageant dans une ère énergétique durable. Le photovoltaïque représente 62 % de ce programme contre 23 % pour l'éolien et 9 % pour le solaire thermique ([Ministère de l'Energie 2016](#)).

Cette grande concurrence dans la production de l'énergie photovoltaïque pousse les recherches dans le domaine à se développer très rapidement avec de nouvelles technologies atteignant des rendements très élevés.

Les principales technologies photovoltaïques sur le marché sont aujourd'hui basées sur le silicium cristallin (1<sup>ère</sup> génération : silicium monocristallin, multicristallin et ruban), les couches minces (2<sup>ème</sup> génération : tellure de cadmium (CdTe), silicium amorphe (a-Si)...etc.). À partir de 2009, les technologies de silicium cristallin (c-Si) représentaient 84% du marché PV (37% monocristallin, 2% ruban et 45% multicristallin), et les films minces occupaient les 16% restants du marché. D'autres nouvelles technologies photovoltaïques (3<sup>ème</sup> génération) telles que les cellules photovoltaïques organiques et les nanotubes, sont au stade préindustriel ([Environment Canada 2012](#)).

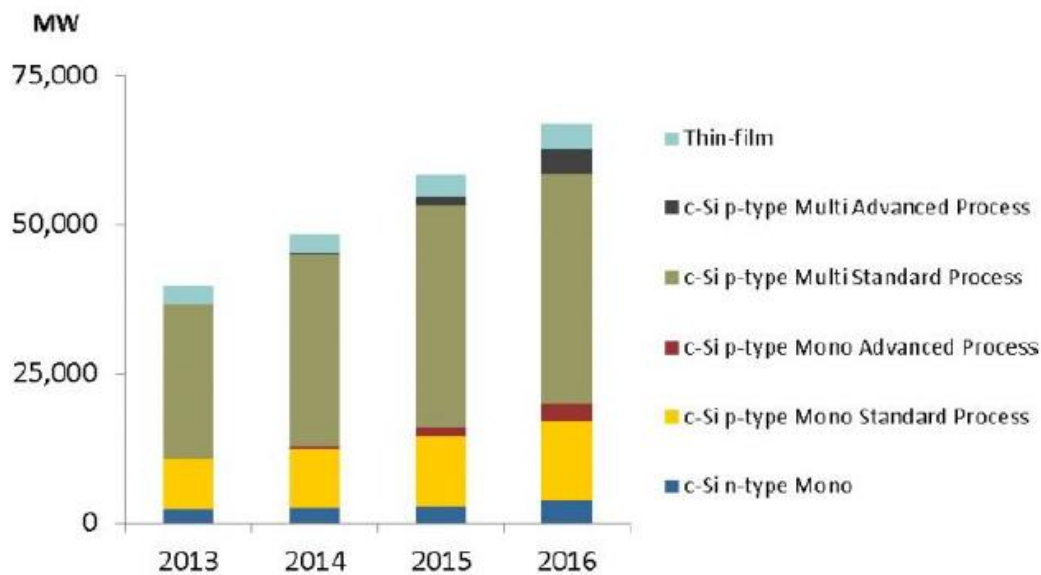
Jusqu'à une certaine période, toutes les cellules solaires commercialisées de la filière silicium ont été réalisées sur du silicium à substrat de type p puisque la technologie de sa fabrication est beaucoup plus facilement industrialisée et accessible. L'industrie silicium pour le photovoltaïque s'est donc développée autour de cette idée et le marché terrestre est encore alimenté aujourd'hui majoritairement par des cellules en silicium de type p.

Une autre raison parfois mise en avant pour expliquer que le silicium cristallin de type p domine le marché, se base sur le principe de la mobilité des électrons qui est plus élevée que celle des trous (environ trois fois plus). Ce qui a donc privilégié jusqu'à présent l'utilisation du silicium de type p.

Néanmoins, à technologie équivalente, les meilleurs résultats de cellules sont obtenus pour le silicium cristallin de type n. La principale cause est la présence de défauts très

recombinants dans le silicium de type p, notamment les paires bore-oxygène créées sous illumination et responsables de la perte de rendement des cellules les premiers mois de fonctionnement (on parle alors de vieillissement causé par la lumière). Les cellules avec silicium cristallin de type n dopé au phosphore ne sont pas influencées à ce type de défauts et dans le temps, elles sont beaucoup plus stables.

Par conséquent, il est théoriquement possible d'améliorer le rendement de conversion énergétique des cellules solaires en optant pour des substrats de type n (Figure 0-2).



© PV-Tech & Solar Media Ltd, February 2016  
Data taken from Solar Media Ltd.'s *PV Manufacturing & Technology Quarterly report*, February 2016



**Figure 0-2 : Production annuelle des cellules solaires par technologie (PVTECH 2016)**

L'objectif principal dans ce travail porte essentiellement sur l'étude de cellules solaires en silicium à substrat de type n par le simulateur PC2D, un nouveau programme bidimensionnel conçu à l'aide du tableur Excel de Microsoft établi par P.A. Basore et K. Cabanas-Holmen ([Basore & Cabanas-Holmen 2011](#)).

Ce travail est articulé en cinq chapitres qui sont décrits ci-après.

On commence par développer dans le premier chapitre l'historique de l'effet photovoltaïque ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire et également la description de ses trois générations. Ensuite, on présente l'évolution de cette énergie et sa place par rapport aux autres énergies dans le monde ainsi qu'en

Algérie. Enfin, on décrit le rayonnement solaire hors atmosphère et au sol en déterminant le spectre solaire de référence AM1.5 G.

Dans le deuxième chapitre, on rappelle des notions générales sur les semi-conducteurs. Ensuite, on expose la théorie de la jonction PN (structure de base de la cellule solaire) à l'équilibre, sous obscurité et sous éclairage avec ses différentes équations. Les caractéristiques IV obtenues permettent, par conséquent, de définir les quatre paramètres de la cellule que sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). On conclut ce chapitre par l'étude des différentes pertes limitant la conversion photovoltaïque.

On aborde le chapitre suivant par la description des différents procédés de purification et de cristallisation du silicium dans le but d'obtenir des substrats monocristallin ou multicristallin, de type p ou de type n. On passe, par la suite, au procédé standard de la fabrication de la cellule solaire de type p avec toutes ses différentes phases. Ensuite, on étudie de manière détaillée la cellule solaire de type n qui est une des composantes du sujet de notre étude, tout en expliquant le choix de ce substrat selon ses avantages et de ses inconvénients par rapport à celui de type p. Enfin, on expose quelques outils de caractérisation utilisés pour mesurer certains paramètres et caractéristiques des photopiles.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des programmes PC1D et PC2D en décrivant la méthode numérique dont sont basés ces simulateurs. PC1D est un simulateur des cellules solaires en une dimension. PC2D est un nouveau simulateur bidimensionnel conçu à l'aide du tableur Excel de Microsoft, utilisé à l'étude de nos cellules. On explique aussi la méthode d'introduction des données de la cellule dans PC2D ainsi que l'exploitation des résultats.

Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre, on expose d'abord l'état de l'art du développement de l'élaboration des cellules solaires de type n. Ensuite, un résumé des étapes de calcul du programme PC2D est présenté. En dernier lieu, on s'est intéressé à l'étude et la simulation en deux dimensions de cellules solaires de type n, respectivement à émetteurs homogène et sélectif dans l'objectif d'optimiser leurs paramètres et d'améliorer leurs performances, mettant en évidence leurs avantages par rapport aux cellules solaires classiques de type p.

# **Chapitre I : Energie photovoltaïque**

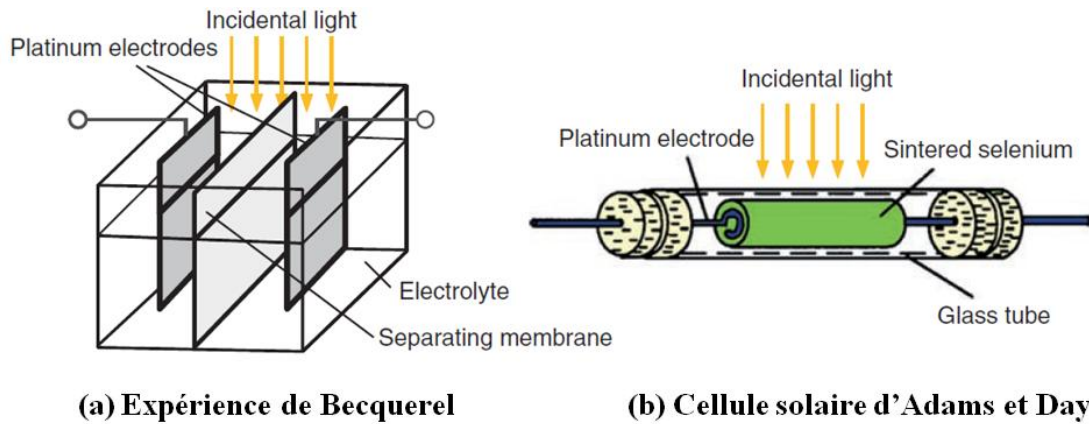
## Chapitre I Energie photovoltaïque

On rappelle dans ce chapitre l'histoire de l'effet photovoltaïque ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire et également ses trois générations d'évolutions technologiques. Ensuite, on décrit le développement cette énergie dans le monde et spécifiquement en Algérie, et de sa comparaison avec les autres énergies. Enfin, on présente le rayonnement solaire hors atmosphère et au sol et plus particulièrement le spectre solaire de référence AM1.5 G.

### I.1 Définition et historique

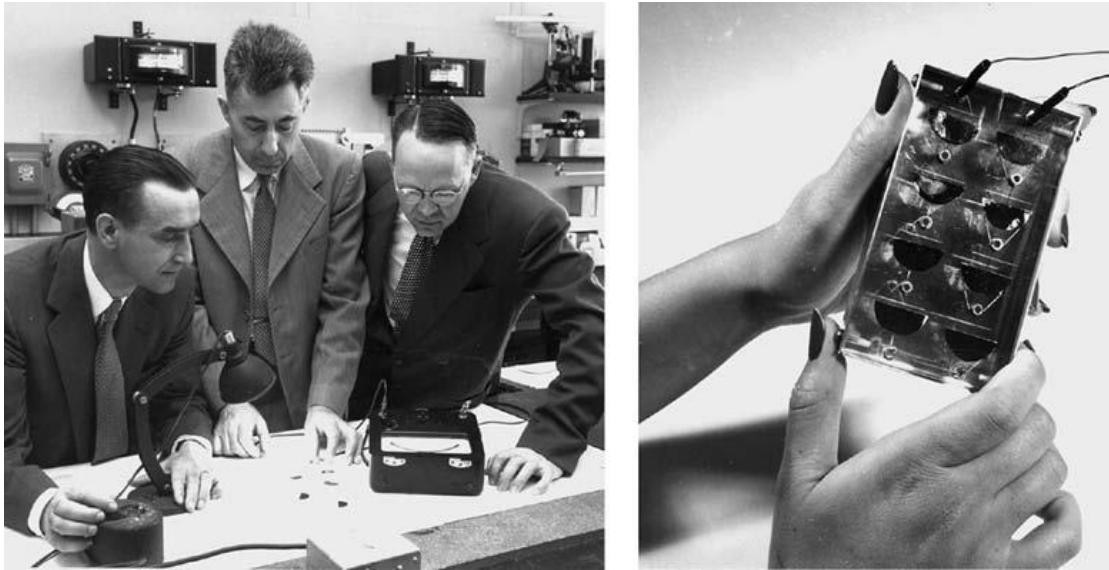
Le mot « photovoltaïque » (PV) est composé de deux mots ; « photo » qui veut dire lumière et « voltaïque » (d'après le nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825) qui a découvert la première batterie électrochimique) qui veut dire électricité. Donc la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil.

- L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel (1788-1878) en 1839. Il plaçait deux électrodes enrobées de platine dans un récipient avec un électrolyte et a déterminé un courant circulant entre elles (Figure I-1-a), Becquerel a constaté que l'intensité du courant a changé lorsqu'il est exposé à la lumière. Il s'agissait de l'effet photovoltaïque externe,
- En 1873, l'ingénieur britannique Willoughby Smith et son assistant Joseph May ont découvert que le semi-conducteur sélénium a changé sa résistance lorsqu'il est exposé à la lumière. Il s'agissait de l'effet photovoltaïque interne, dans lequel les électrons sont arrachés par la lumière et devenus donc des porteurs de charge libres dans le semi-conducteur,
- Trois années plus tard, les anglais William Adams et Richard Day ont découvert qu'une tige de sélénium munie d'électrodes de platine peut produire de l'énergie électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière (Figure I-1-b). Il a été prouvé pour la première fois qu'un corps solide peut directement convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique,



**Figure I-1 : Les débuts du photovoltaïque: (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day ([Mertens 2014](#))**

- En 1883, l'inventeur américain Charles Fritts construit un petit "Module" de cellules de sélénium en les couvrant avec une très mince électrode d'or, d'une superficie d'environ  $30 \text{ cm}^2$  en obtenant un rendement de conversion d'environ 1%,
- En 1904, Albert Einstein (1879-1955) expliqua la théorie de cet effet,
- Au même temps et dans le même domaine, il y avait d'autres avancées technologiques : En 1916 le chimiste polonais Jan Czochralski a découvert le processus de croissance cristalline (qui prend son nom), il est devenu donc possible de produire des monocristaux semi-conducteurs de haute qualité,
- En 1949, William B. Shockley (1910–1989) a établi la théorie de la jonction PN ([Shockley 1949](#)) et a lancé les bases théoriques des cellules solaires utilisées aujourd'hui,
- Sur cette base, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson ont développé, dans les laboratoires Bell, la première cellule solaire de silicium d'une superficie de  $2 \text{ cm}^2$  et un rendement allant jusqu'à 6 % et l'ont présenté au public le 25 Avril 1954 ([Chapin et al. 1954](#)) (Figure I-2),
- Ce rendement a atteint les 10 % dans les années qui ont suivi, mais avec des prix élevés du module solaire (le prix par Watt était environ 1000 fois plus que le prix d'aujourd'hui) donc ils étaient utilisés uniquement pour des applications spéciales,



**Figure I-2 : Les inventeurs de la première cellule solaire "réelle": Chapin, Fuller et Pearson. La figure à droite montre le premier module solaire au monde (mini module de 8 cellules solaires) [\(Mertens 2014\)](#)**

- Le 17 Mars 1958, Le premier emploi aérospatial de l'énergie photovoltaïque était par le satellite artificiel américain Vanguard,
- Dans les années 1960, le développement en photovoltaïque était très avancé en utilisant des nouveaux matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium (GaAs),
- Les recherches dans ce domaine continuent à se développer très rapidement avec de nouvelles technologies atteignant des rendements très élevés (Figure I-3) [\(Green 2017\)](#).

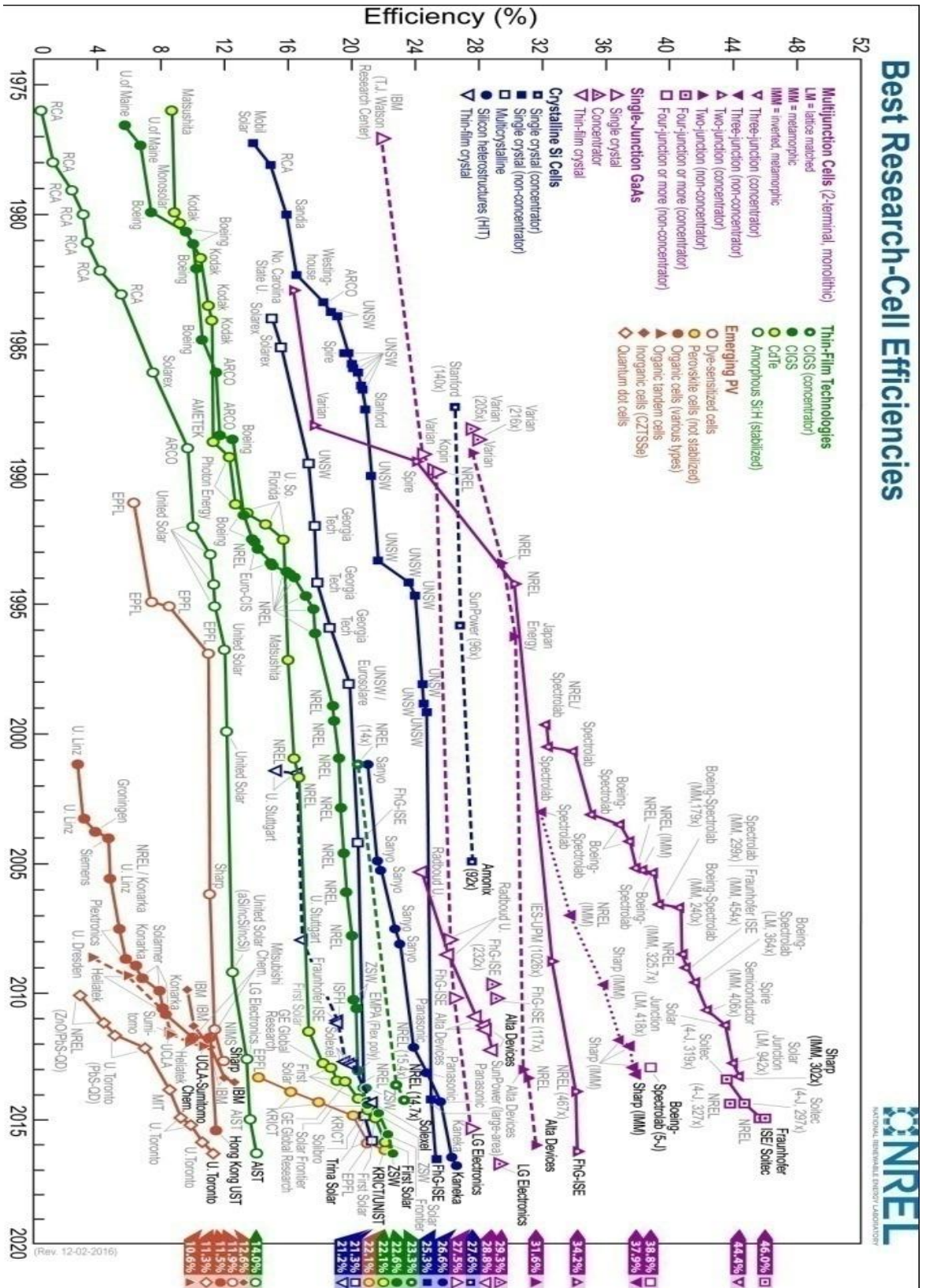


Figure I-3 : Evolution des rendements de conversion de 1976 à aujourd'hui (NREL 2016)

## **I.2 Avantages et inconvénients du PV**

L'énergie photovoltaïque présente des avantages énormes tels que :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité,
- Peu d'entretien,
- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- Utilisation autonome et décentralisée.

Malgré ces avantages intéressants, il y a aussi des inconvénients tels que :

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces,
- Technologie coûteuse,
- Facteur de charge faible,
- Stockage difficile,
- Difficulté à recycler les composants du système,
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques.

## **I.3 Développement du photovoltaïque dans le monde**

Grâce à ses avantages intéressants, l'énergie photovoltaïque se développe considérablement dans le monde depuis une vingtaine d'années. Le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998 ([EPIA 2012](#)).

En 2015, l'industrie photovoltaïque mondiale a connu une augmentation de 50 GW (40 GW en 2014) de puissance PV installées, atteignant 229 GW de capacité cumulée, soit plus de 100 fois la capacité en 2000. Les prévisions pour 2016 et 2017 sont respectivement, de 61 GW et 67 GW de nouvelles installations mondiales ([SolarPower Europe 2016](#)).

Cette diminution de la demande mondiale en 2017 est peut être en raison de la réduction des mesures de soutien aux secteurs prévus par certaines nations. Néanmoins, les analystes et les employés du secteur sont optimistes quant à l'avenir de l'énergie photovoltaïque (Figure I-4) ([Power Clouds 2015](#)).

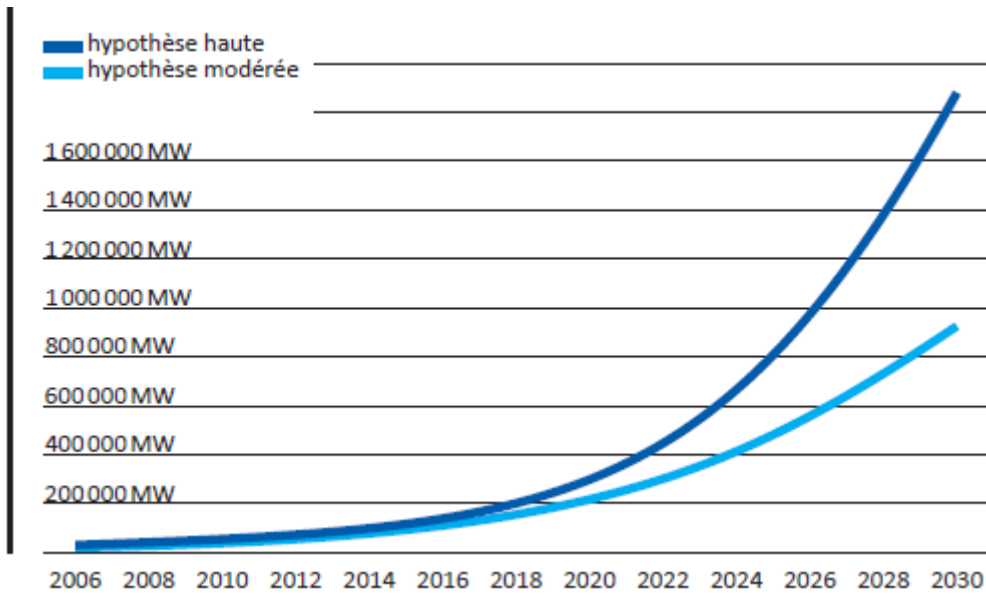


Figure I-4 : Capacité photovoltaïque globale cumulée à l’horizon 2030 (EPIA 2012)

En 2014, l’approvisionnement énergétique primaire total dans le monde (en anglais Total Primary Energy Supply TPES) était de 13.700 Mtep (million de tonnes d’équivalent pétrole, 1 tep=41.868 GJ), dont 13.8 %, soit 1.894 Mtep, a été produit à partir des énergies renouvelables (amélioration de 2.6 % par rapport à 2013) (Figure I-5) (IEA 2016).

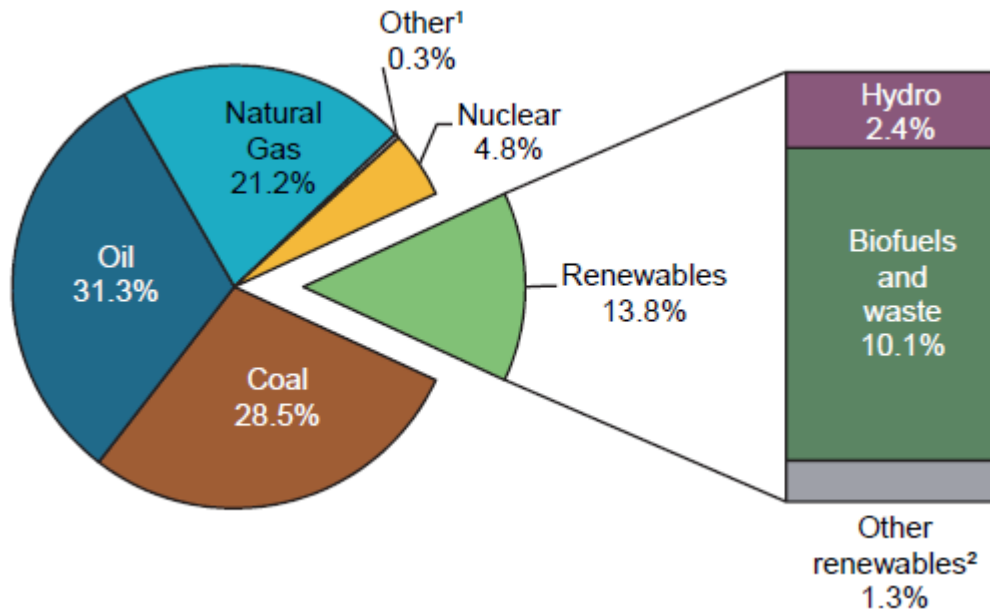


Figure I-5 : Approvisionnement énergétique primaire total dans le monde en 2014 (IEA 2016)

Le taux de 2.5 % pour l'énergie solaire est relativement faible par rapport à la totalité des énergies renouvelables. Cependant les recherches très avancées dans ce domaine tendent à améliorer ce taux (Figure I-6) [\(IEA 2016\)](#).

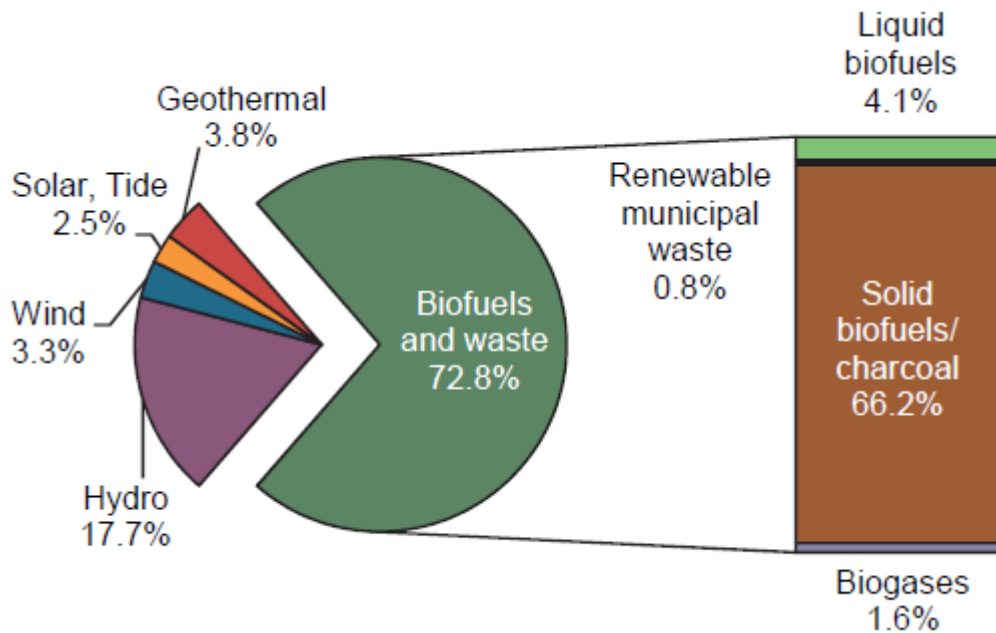


Figure I-6 : Part de la production des différentes énergies renouvelables [\(IEA 2016\)](#)

Depuis 1990, les sources d'énergie renouvelables ont augmenté d'un taux annuel moyen de 2.2 %, ce qui est légèrement supérieur au taux de croissance des TPES mondiales de 1.9 %. La croissance a été particulièrement élevée pour les énergies photovoltaïque et éolienne, qui ont augmenté d'un taux moyen annuel de 46.2 % et 24.3 % respectivement (Figure I-7) [\(IEA 2016\)](#).

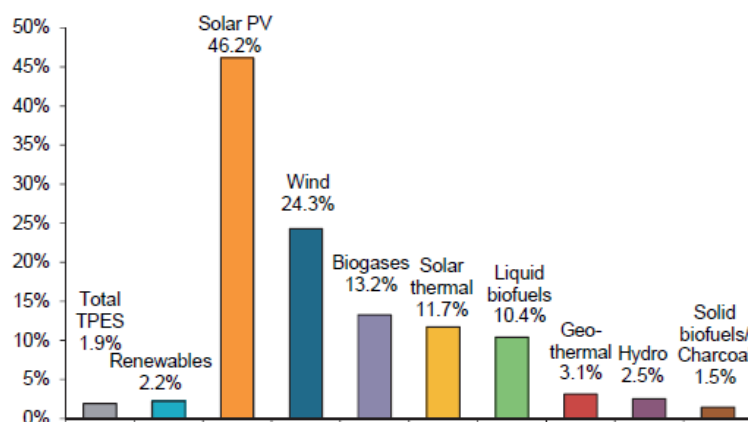


Figure I-7 : Taux de croissance annuel d'approvisionnement énergétique mondial de 1990 à 2014 [\(IEA 2016\)](#)

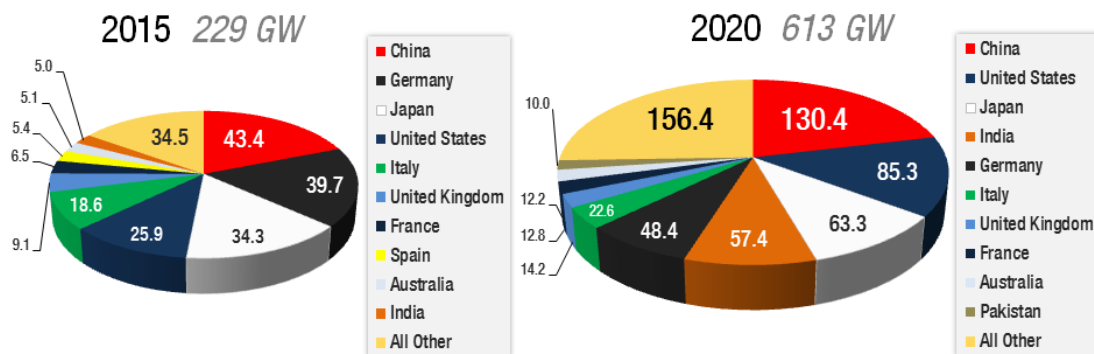
### I.3.1 Installations de systèmes solaires dans le monde

Le développement des grands marchés de l'énergie solaire en Asie (Chine, Inde et Japon) et aux États-Unis ont démontré que l'énergie solaire n'est plus centrée sur l'Europe. Malgré cela, l'Europe reste le leader avec 97 GW de capacité installée à la fin de 2015 (l'Allemagne pour 39.7 GW, soit 41 %), cependant, les pays de l'Asie/Pacifique (à 96 GW) prendront certainement la première place dans le proche avenir (Figure I-8).

L'Inde a installé uniquement 0.6 GW et 2.0 GW en 2014 et 2015. Cependant, la capacité totale de l'Inde croit de 5 GW en 2015 à 57.4 GW d'ici 2020, ce qui signifie qu'il va installer 52.4 GW durant 2016-2020. Ce pays cible les 100 GW d'énergie solaire en 2022 ([SolarPower Europe 2016](#)).

En 2015, la Chine, avec une capacité d'énergie solaire totale installée de 43.4 GW, a dépassé l'Allemagne (39.7 GW), prenant par la même occasion la première position comme le plus grand marché mondial du solaire par les nouvelles installations et la capacité cumulée. Le gouvernement va augmenter sa capacité installée cumulée à 130.4 GW d'ici la fin de 2020, soit une augmentation d'environ 87 GW (plus de 200 %) (Figure I-8).

Quant aux États-Unis, ils vont augmenter leur capacité installée cumulée de 25.9 GW en 2015 à 85.3 GW d'ici la fin de l'an 2020, soit une augmentation d'environ 60 GW (229 %), se positionnant à la deuxième place après la Chine. L'Allemagne va chuter à la cinquième place avec 48.4 GW devant dans l'ordre l'Italie (22.6 GW), le Royaume-Uni (14.2 GW), la France (12.8 GW), l'Australie (12.2 GW) et le Pakistan (10 GW) ([SolarPower Europe 2016](#)) (Figure I-8).



Source: SolarPower Europe (2016). Perspectives mondiales du marché de l'énergie solaire / 2016-2020.

Figure I-8 : Capacité installée par pays en 2015 et 2020 (top 10 des pays) ([SolarPower Europe 2016](#))

Jusqu'en 2020, d'importants nouveaux marchés solaires devraient se développer en Algérie, au Brésil, en Egypte, au Mexique, au Pakistan, aux Philippines, en Arabie Saoudite et aux Emirats Arabes Unis. Aujourd'hui, la plupart de ces pays ont très peu de capacité installée ([SolarPower Europe 2016](#)) (Figure I-8).

## I.4 Développement du photovoltaïque en Algérie

L'Algérie s'engage avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, consiste à installer une capacité totale de 22000 MW, répartie suivant le diagramme de la Figure I-9 ([Ministère de l'Energie 2016](#)).

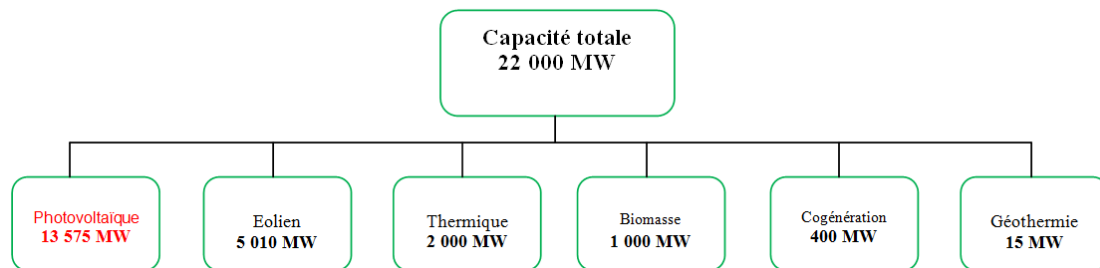


Figure I-9 : Répartition des capacités à installer par filière durant 2015-2030 en Algérie

Le photovoltaïque représente 62 % du programme contre 23 % pour l'éolien et 9 % pour le thermique (Figure I-10) ([Ministère de l'Energie 2016](#)).

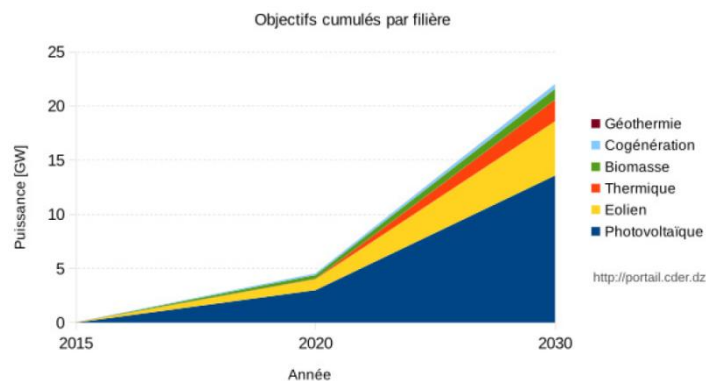


Figure I-10 : Phases du programme algérien des énergies renouvelables ([Portail Algérien des Energies Renouvelables 2015](#))

Cette importance envers l'énergie photovoltaïque est due au potentiel solaire important à travers tout le territoire algérien (Figure I-11), principalement au sud, qui pousse les responsables algériens à penser à une stratégie énergétique qui repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire.

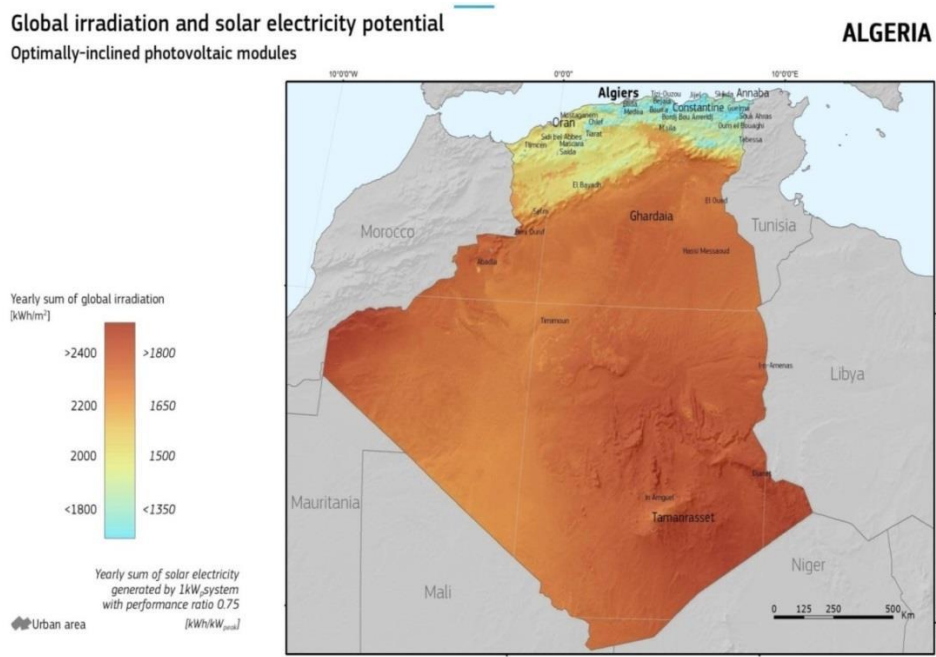


Figure I-11 : Potentiel solaire du territoire algérien ([Ministère de l'Énergie 2016](#))

La radiation solaire moyenne dans les trois régions principales de l'Algérie tirée de cette carte est résumée dans le tableau suivant (Tableau I-1). La valeur élevée de cette radiation (3000 kWh/m<sup>2</sup>/an) dans le Sahara justifie le choix de cette région pour les installations photovoltaïques.

| Région   | Nord | Hauts-Plateaux | Sahara |
|--|------|----------------|--------|
| <b>Radiation solaire moyenne</b><br>(kWh/m <sup>2</sup> /an) | 1800 | 2200           | 3000   |

Tableau I-1 : Radiation solaire moyenne dans les trois régions principales de l'Algérie ([Ministère de l'Énergie 2016](#))

## I.5 Générations du photovoltaïque

### I.5.1 1<sup>ère</sup> Génération

Elle concerne les cellules solaires classiques du silicium massif (c-Si) de substrat à épaisseur supérieure à 100  $\mu\text{m}$ . Pour ses deux types monocristallin et multicristallin, la technologie de cette génération est mature et bien maîtrisée. Elle présente une production mondiale d'environ 84 % du marché PV (37% monocristallin, 2% ruban et 45% multicristallin) ([Environment Canada 2012](#)). Son rendement se situe dans la fourchette 15-26 % (Tableau I-2).

| Cellule solaire          | Surface ( $\text{cm}^2$ ) | Rendement (%)  | Centre de test (date)          |
|--------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|
| Silicium monocristallin  | 180.43                    | $26.3 \pm 0.5$ | FhG-ISE <sup>a</sup> (07/2016) |
| Silicium multicristallin | 242.74                    | $21.3 \pm 0.4$ | FhG-ISE (11/2015)              |

Tableau I-2 : Cellules solaires de 1<sup>ère</sup> génération ([Green 2017](#))

<sup>a</sup>FhG-ISE: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.

### I.5.2 2<sup>ème</sup> Génération

Elle concerne les cellules solaires à couches minces d'épaisseur inférieure à 50  $\mu\text{m}$  utilisant le silicium amorphe ou des matériaux de composés II-VI comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuInSe}_2$ ) et le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). Il est possible de réduire les coûts de production de ces types de cellules solaires par rapport à la première génération. De plus, elles sont flexibles et leur utilisation est plus variée. Cependant, Les étapes de production demandent plus d'énergie car on utilise des procédés sous vide et des traitements à haute température (Tableau I-3).

| Cellule solaire  | Surface ( $\text{cm}^2$ ) | Rendement (%)  | Centre de test (date)          |
|------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|
| GaAs             | 0.9927                    | $28.8 \pm 0.9$ | NREL (05/2012) <sup>b</sup>    |
| CIGS             | 0.9927                    | $21.0 \pm 0.6$ | FhG-ISE (04/2014) <sup>a</sup> |
| CdTe             | 1.0623                    | $21.0 \pm 0.4$ | Newport (08/2014)              |
| Silicium amorphe | 1.001                     | $10.2 \pm 0.3$ | AIST (07/2014) <sup>c</sup>    |

Tableau I-3 :Exemples de cellules solaires de 2<sup>ème</sup> génération ([Green 2017](#))

<sup>b</sup>NREL: National Renewable Energy Laboratory.

<sup>c</sup>AIST: Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

### I.5.3 3<sup>ème</sup> Génération

Actuellement, il y a beaucoup de recherche en cours dans le photovoltaïque pour des types de cellules qui peuvent dépasser le rendement de 20%, ce qu'on appelle les cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération. Cette génération est basée sur la variété de nouveaux matériaux en dehors de silicium, y compris des nanotubes, les cellules à concentration, des fils de silicium, des encres solaires en utilisant des technologies de presse d'impression classiques, des colorants organiques et des polymères. À l'heure actuelle, la plupart des travaux sur les cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération est réalisée en laboratoire, et en cours d'élaboration par les nouvelles entreprises car le coût de production reste élevé. Ces cellules ne sont pour la majorité qu'à l'état d'expérimentation (Tableau I-4).

| Cellule solaire                              | Surface (cm <sup>2</sup> ) | Rendement (%) | Centre de test (date) |
|--|----------------------------|---------------|-----------------------|
| Colorante (Dye-sensitised)                   | 1.005                      | 11.9 ± 0.4    | AIST (09/2012)        |
| Organique                                    | 0.992                      | 11.2 ± 0.3o   | AIST (10/2015)        |
| InGaP/GaAs/InGaAs (multijonction)            | 1.047                      | 37.9 ± 1.2    | AIST (02/2013)        |
| Perovskite/Si (monolithique)                 | 0.990                      | 23.6 ± 0.6    | NREL (08/2016)        |
| GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs (à concentration) | 0.0520                     | 46.0 ± 2.2    | AIST (10/2014)        |

Tableau I-4 : Exemples de cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération [\(Green 2017\)](#)

## I.6 Le rayonnement solaire

### I.6.1 Le Soleil

Le Soleil est une étoile, c'est une énorme boule de diamètre 1 391 000 km et de masse d'environ  $1.99 \times 10^{30}$  kg de gaz chaud et rayonnant produisant de l'énergie. Elle est l'étoile la plus proche de la terre (environ  $1.496 \times 10^{11}$  m) parmi les milliards d'autres qui appartiennent à la voie lactée, notre Galaxie, et qui sont distantes de plusieurs années-lumière. Malgré son diamètre (plus de 100 fois le diamètre terrestre) et sa masse 330 000 fois plus importante que celle de la Terre qui vaut  $5.97 \times 10^{24}$  kg, le Soleil est une étoile relativement petite par rapport à ses voisins.

Le soleil est né il y a 4.6 milliards d'années d'un nuage interstellaire énorme composé environ de 71 % d'hydrogène, 27% d'hélium et 2% de quelques éléments plus lourds tels que le carbone, l'azote et l'oxygène [\(Verger et al. 2003\)](#). Ce nuage s'est divisé

donnant, parmi d'autres objets célestes, le système solaire composé d'une étoile entourée de planètes, de comètes et de poussières.

C'est au centre du soleil que des réactions thermonucléaires de fusion transforment l'hydrogène en hélium en produisant l'énergie et le rayonnement du soleil car une masse ( $m$ ) de 4 millions de tonnes disparaît par seconde en énergie ( $E$ ) selon la loi célèbre d'Einstein :

$$E = mc^2 \quad (\text{I-1})$$

Où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

La première phase de formation du deutérium transforme donc un proton en neutron, en libérant un positron (antiparticule de l'électron, chargée positivement), un neutrino, et une partie de l'énergie totale de la réaction sous forme de rayons gamma. Les réactions nucléaires au cœur du Soleil peuvent grossièrement se résumer à :



$^1\text{H}$  est le noyau d'hydrogène (proton).

$^4\text{He}$  est le noyau d'hélium (2 neutrons et 2 protons).

$e^+$  est un positron (électron chargé positivement).

$\nu$  est un neutrino.

$\gamma$  est un photon qui transporte l'énergie gigantesque fournie par la réaction.

Ces réactions sont confinées dans un milieu où la densité est élevée (150 fois celle de l'eau) et la température atteint environ  $10^7$  °K ([Ricaud 1997](#)). L'énergie produite traverse lentement le Soleil pour atteindre les couches superficielles et est ensuite émise sous forme de lumière. La surface visible du Soleil (la photosphère, couche épaisse de 300 km seulement) est à une température de 5760 °K, émettant la lumière blanche naturelle.

## I.6.2 Le rayonnement solaire hors atmosphère

### I.6.2.1 Le corps noir

On considère que le soleil est un corps noir (par définition, c'est un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique) à la température de 5760 °K. Il obéit à la fois aux lois de Lambert, de Stefan et de Wien (Figure I-12).

La loi de Stefan exprime le pouvoir émissif total qui s'écrit :

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (I-3)$$

Avec  $\sigma$  est la constante de Stephan donnée par :

$$\sigma = \frac{2\pi k^4}{15h^3 c^2} \quad (I-4)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

$k$  : le vecteur d'onde,  $h$  : la constante de Planck,  $T$  : la température absolue.

La répartition spectrale de l'énergie moyenne par unité de volume se fait suivant la loi de Stefan-Boltzman :

$$E(\lambda, T) = A\lambda^{-5} \cdot (e^{-\frac{B}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (I-5)$$

$$A = 3.74 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2.\mu\text{m}$$

$$B = 1.44 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

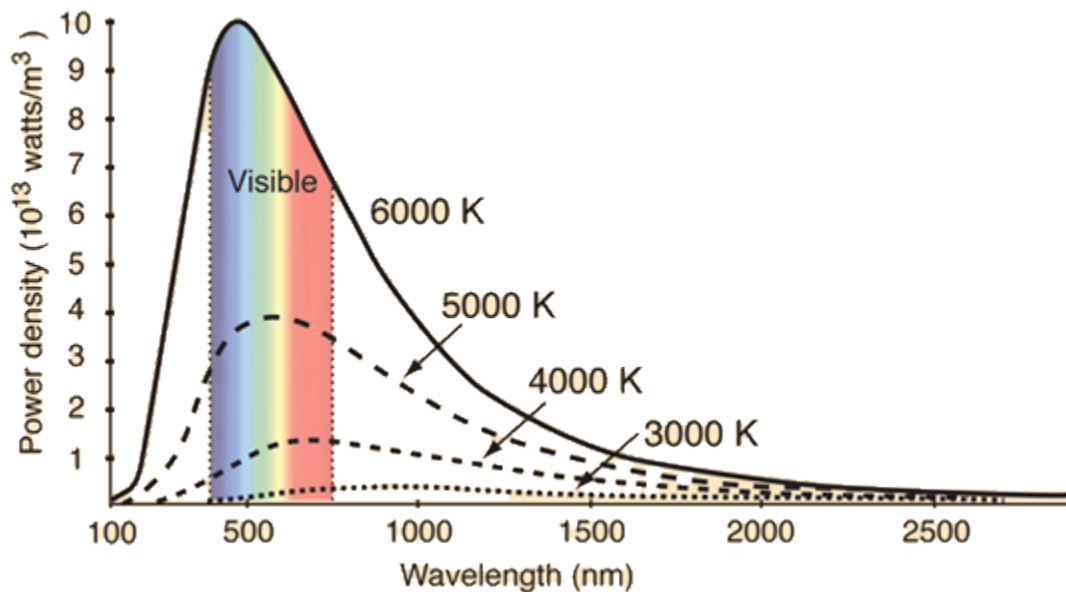


Figure I-12 : Courbes d'émission du corps noir ([Astronomy and Physics 2017](#))

### I.6.2.2 L'éclairement solaire total

L'éclairement solaire total (en anglais : total solar irradiance TSI ) varie d'un jour à l'autre durant une année quelconque. Il est mesuré par des radiomètres à bord des satellites depuis 1978.

En 2003, le satellite SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) sponsorisé par le NASA (National Aeronautics and Space Administration) a été lancé sur une orbite

basse d'environ 645 km pour mesurer l'éclairement solaire total durant une décennie (2003-2013). Cet éclairement n'est pas vraiment constant puisque des fluctuations sensibles sont observées de jour en jour comme le montre la Figure I-13. Après 10 ans de mesures quotidiennes de l'éclairement solaire total, sa moyenne de mars 2003 à mars 2013 était de  $1360.8 \text{ W.m}^{-2}$  (adoptée par le nom de constante solaire hors atmosphère) ([Kirk 2015](#)).

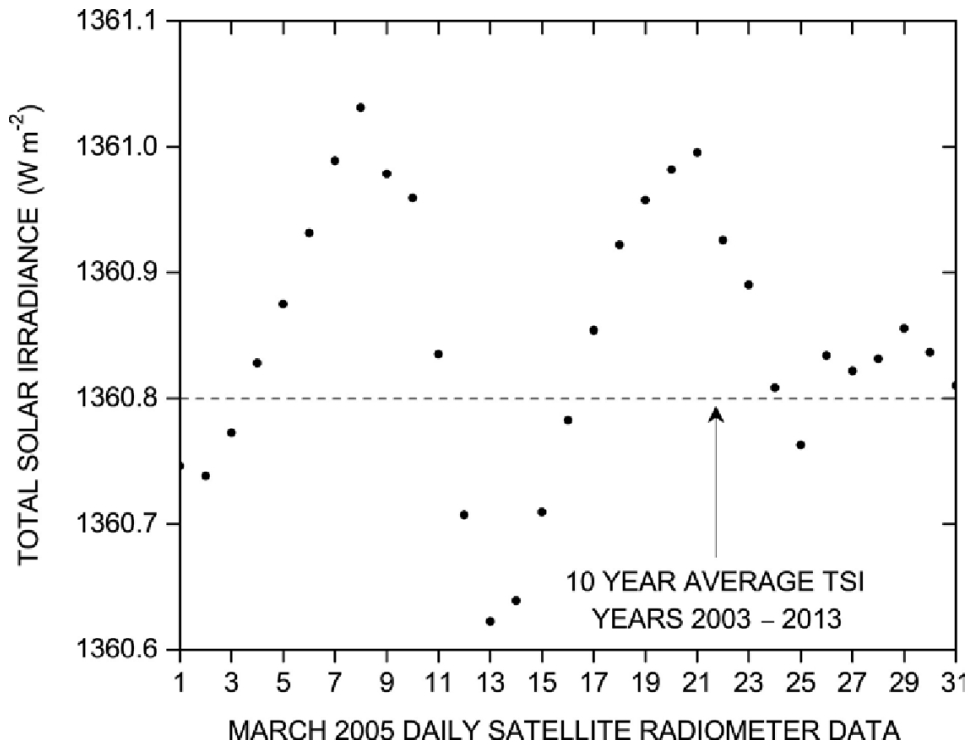


Figure I-13 : L'éclairement solaire total journalier mesuré en mars 2005 par les radiomètres à bord du satellite *SORCE* ([Kirk 2015](#))

### I.6.2.3 Le spectre solaire hors atmosphère

Dans la communauté photovoltaïque solaire, le spectre solaire hors atmosphère (juste au-dessus de l'atmosphère) est connu sous le nom de spectre solaire d'air masse nul (*AM0*), équivalent à l'éclairement solaire total moyenne (mesuré). Il est donné par l'intégral de l'irradiance sur tout le spectre solaire :

$$I_{AM0} = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (I-6)$$

Le spectre solaire AM0, dérivé de [\(Gueymard 2004\)](#), est représenté sur la Figure I-14. La caractéristique de ce spectre est principalement liée à la température effective de la surface du Soleil.

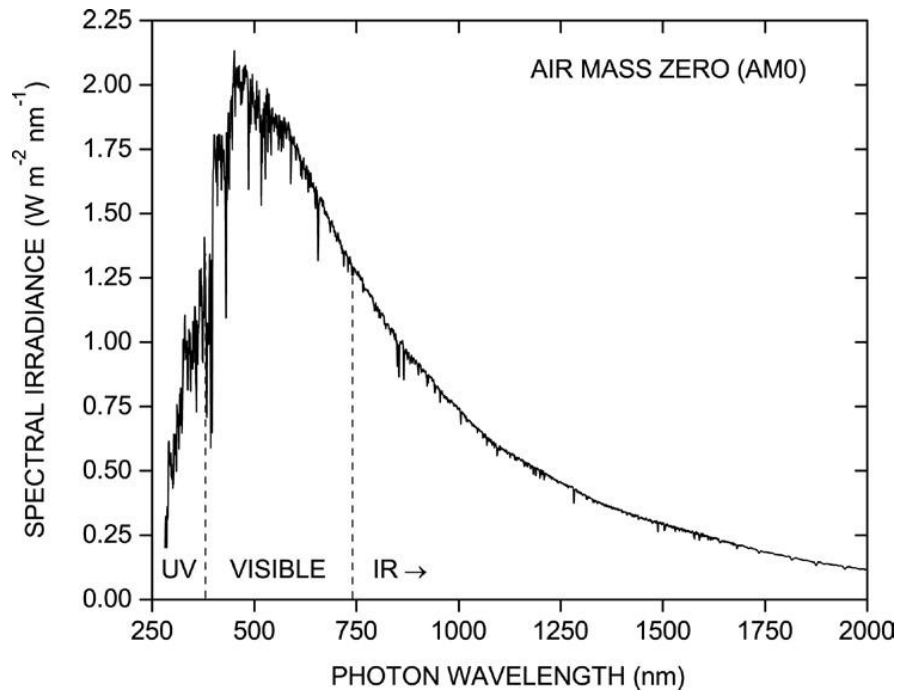


Figure I-14 : Le spectre solaire AM0 dérivé de [\(Gueymard 2004\)](#) & [\(Kirk 2015\)](#)

### I.6.3 Le rayonnement solaire au sol

#### I.6.3.1 Effets de l'atmosphère

Avant d'atteindre la surface de la terre, le spectre solaire hors atmosphère subit plusieurs variations par interaction (absorption, réflexion, diffusion) avec les constituants de l'atmosphère (gaz, liquides et solides) comme l'ozone (O<sub>3</sub>), l'oxygène (O<sub>2</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), les gouttelettes d'eau, les cristaux de glace dans les nuages, les poussières, les cendres et les fumées de pollution industrielle [\(Kirk 2015\)](#).

Les molécules responsables de l'absorption sont principalement l'ozone (O<sub>3</sub>), la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) et d'une manière moins sensible l'oxygène (O<sub>2</sub>) et le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). L'ozone absorbe l'UV moyen (0.2 μm-0.7 μm). La vapeur d'eau a sept bandes d'absorption dont trois importantes dans l'IR moyen. L'oxygène est à l'origine de deux bandes d'absorption étroites à 0.69 μm et 0.76 μm. Le gaz carbonique absorbe dans trois bandes étroites dans l'IR au-delà de 1.5 μm [\(Ricaud 1997\)](#).

### I.6.3.2 Nombre d'air-masse

Le nombre d'air-masse est la distance parcourue par un rayon lumineux depuis son entrée dans l'atmosphère (on suppose que l'atmosphère soit plan, stratifié, réduit à l'unité et sous une pression moyenne de 1013 mb) jusqu'à son arrivée au sol (Figure I-15). On peut le traduire par la relation suivante :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (I-7)$$

Avec  $\theta$ , l'angle entre la direction du rayonnement par rapport au zénith.

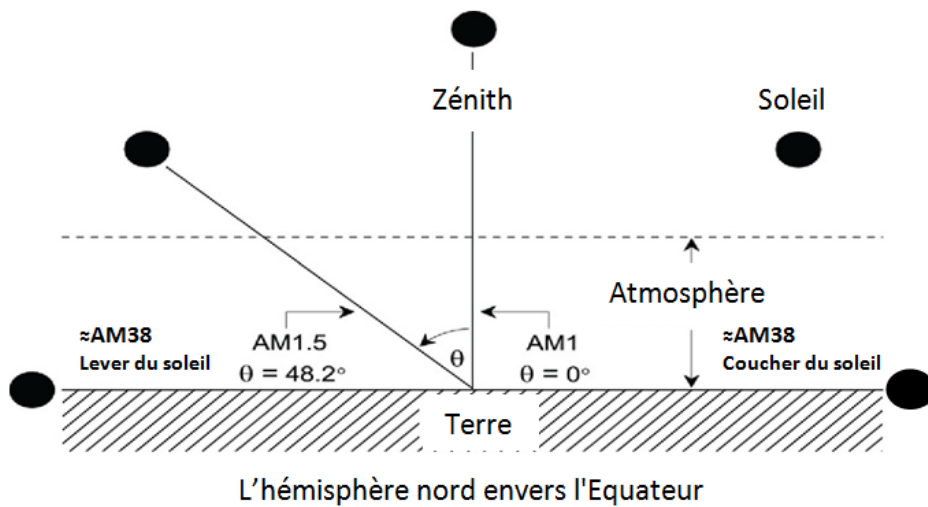


Figure I-15 : Nombre d'air-masse

Hors atmosphère, il est nul et on l'appelle AM0 (Air masse zéro). Lorsque le soleil se trouve au zénith ( $\theta=0$ ), c'est AM1 (Air masse 1).

Dans le domaine photovoltaïque, pour comparer les performances de différentes cellules solaires, on utilise l'air masse 1.5 (AM1.5) correspondant à ( $\theta=48.20^\circ$ ).

Pour une pression atmosphérique  $p$  (mb) différente des conditions normales et pour une attitude  $z$  (km) différente de l'épaisseur de l'atmosphère (épaisseur réduite de 7.8 km), le nombre d'air masse est corrigé par la relation suivante :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \times \frac{p}{1013} \exp - \frac{z}{7.8} \quad (I-8)$$

Une autre relation plus récente ([Gueymard 2003](#)), définit le nombre d'air masse comme :

$$AM \approx \left\{ \left[ \cos \theta + 0,48353 \theta^{0,095846} / (96,741 - \theta)^{1,754} \right]^{-1} \right\} \times \frac{P}{1013} \quad (I-9)$$

### I.6.3.3 Le rayonnement direct et le rayonnement global

Le rayonnement solaire global (noté G) qui arrive au sol a deux composantes : le rayonnement direct (noté D) et le rayonnement diffus. Ce dernier n'a pas d'orientation privilégiée, il provient de toute la voûte céleste et il est surtout riche en couleur bleue.

La Figure I-16 présente le rayonnement direct AM1.5D de 900 W/m<sup>2</sup> et le rayonnement global AM1.5 G de 1000 W/m<sup>2</sup> adopté comme spectre de référence.

Ces rayonnements sont développés par ASTM (American Society for Testing and Materials) ([Gueymard & Myers 2010](#)) avec le programme SMARTS (Simple Model of the Atmospheric radiative Transfer of Sunshine) ([Gueymard 2001](#)).

Le spectre de référence ASTM G173 modelé et développé avec SMARTS (v2.9.2) suppose les hypothèses suivantes:

- Ciel clair sans nuages,
- AM0=1367 W/m<sup>2</sup>,
- Inclinaison de surface tournée vers le soleil = 37° (par exemple, d'un collecteur solaire monté au sol),
- Température 288.1 °K,
- Pression atmosphérique 1013.25 mbar,
- Altitude au sol =0 km,
- Humidité relative 46.04 %,
- Hauteur d'eau condensable 1.416 cm,
- Hauteur réduite d'ozone=0.3438 atm-cm,
- Modèle d'aérosol rural avec une profondeur optique d'aérosol (en anglais : Aerosol Optical Depth AOD)=0.084 à λ= 500 nm,
- Rapport de mélange volumétrique de CO<sub>2</sub>=370 ppm,
- Albédo spectral basé sur un «sol sableux léger» avec une réflexion non lambertienne et un demi-angle d'ouverture de pyréliomètre = 2.9° (pour calculer le rayonnement circumsolaire).

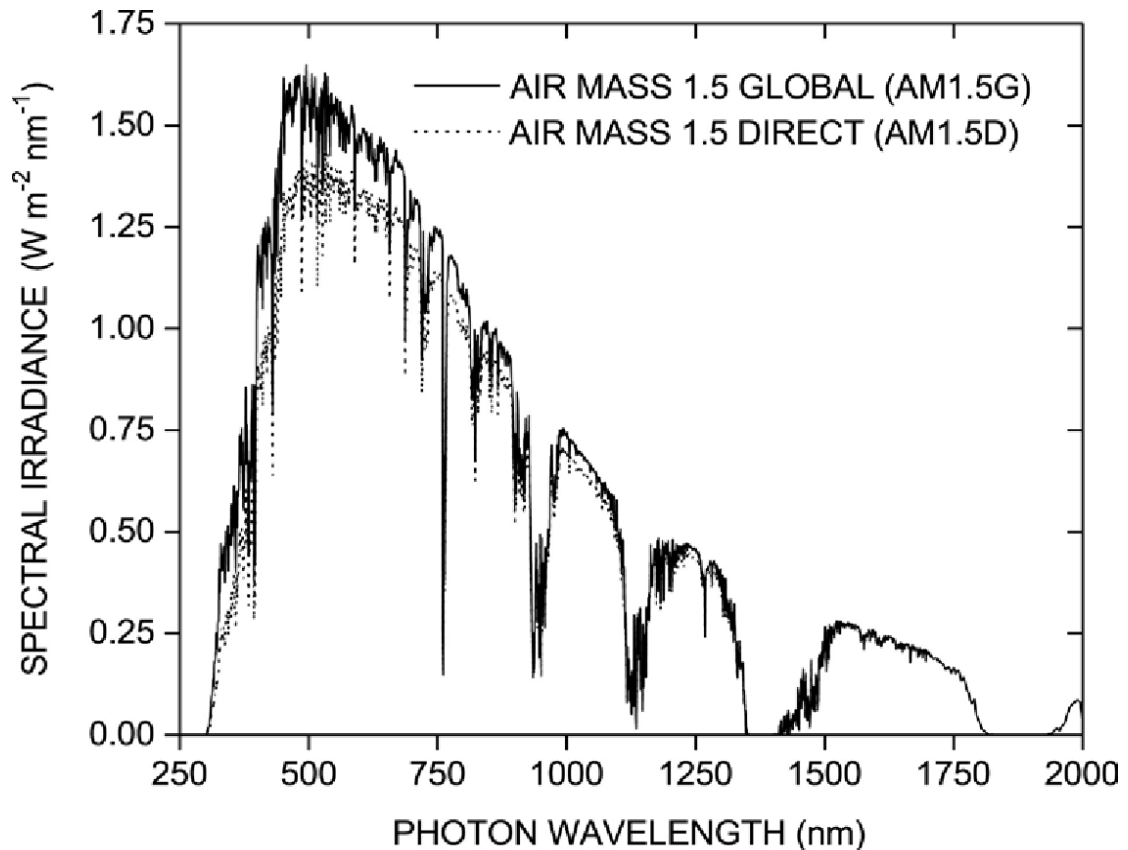


Figure I-16 : Spectres solaires de (ASTM G173) :global AM1.5G et direct AM1.5G ([Gueymard & Myers 2010](#))

## I.7 Conclusion

Grâce à ses avantages intéressants, l'énergie photovoltaïque se développe considérablement dans le monde, en moyenne de 35 % par an depuis 1998.

La capacité mondiale d'énergie solaire cumulée était de 229 GW en 2015 dont la chine se positionne à la première place avec 43.4 GW. En 2020, on prévoit une capacité mondiale de 613 GW. La chine maintient sa première place avec une capacité de 130.4 GW.

Jusqu'en 2020, d'importants nouveaux marchés solaires devraient se développer en plusieurs d'autres pays comme l'Algérie avec un programme qui consiste à installer une capacité totale de 22000 MW d'énergie renouvelables durant la période 2015-2030. Le photovoltaïque représente 62 % du programme contre 23 % pour l'éolien et 9 % pour le thermique.

Le marché du PV est principalement alimenté par les photopiles en silicium cristallin (c-Si). À partir de 2009, cette filière représentait 84% du marché PV (37 % monocristallin, 2 % ruban et 45 % multicristallin), et les films minces occupaient les 16 % restants du marché. La plupart des nouvelles technologies photovoltaïques de la 3<sup>ème</sup> génération telles que les cellules photovoltaïques organiques et les nanotubes, sont en cours de recherche et d'expérimentations dans les laboratoires.

Dans ce chapitre, on a aussi rappelé le rayonnement solaire hors atmosphère AM0 et le rayonnement global terrestre, AM1.5 G adopté par ASTM G173 comme spectre de référence avec ses deux composantes diffuse et directe.

# **Chapitre II : Théorie de la cellule solaire**

## Chapitre II Théorie de la cellule solaire

La simulation d'une cellule solaire est basée sur la modélisation physique de sa structure. Dans ce chapitre, on rappelle les principales notions des semi-conducteurs. Ensuite, on décrit qualitativement et quantitativement la théorie de la jonction PN à l'équilibre, sous obscurité et sous éclairage. Cette modélisation permet de définir les quatre paramètres de la cellule qui sont le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ . On termine le chapitre par une étude sur les différentes pertes limitant la conversion photovoltaïque.

### II.1 Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire

La conversion photovoltaïque est basée sur trois principes:

- L'absorption du maximum de l'énergie lumineuse (photons),
- La conversion, de cette énergie absorbée, en charges électriques libres,
- La collecte sans perte de ces charges dans un circuit électrique extérieur.

Par conséquent, une cellule solaire doit être composée d'un matériau absorbant ayant une bande interdite (gap) convenable dans la bande du spectre solaire (1-1.5 eV) afin de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, donc de créer des charges électriques. Ces dernières doivent être séparées par un champ électrique permanent et indestructible, puis collectées au moyen d'une structure de collecte de faible résistance. Ces deux conditions (comme on va le constater plus loin dans ce chapitre) sont réunies dans les jonctions à semi-conducteurs dont la plus simple est l'homojonction P-N. En effet, pour comprendre le fonctionnement de la cellule solaire, nous étudierons la physique du semi-conducteur et la structure de base d'une cellule solaire qu'est la jonction P-N.

### II.2 Les semi-conducteurs

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets (théorie de Niels Bohr en 1914). Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs (Figure II-1)

Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons (thermalisation des électrons).

Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap (8-10 eV) est plus grand que les énergies de ce spectre.

Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2 eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction.

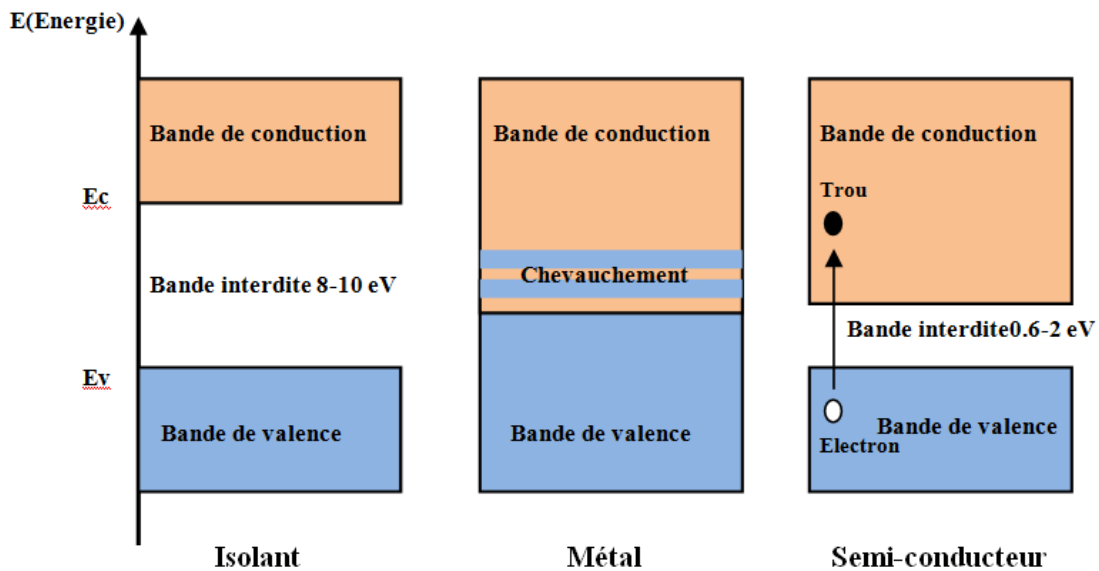


Figure II-1: Les trois grandes familles des matériaux

### II.2.1 Transitions directe et indirecte

Pour les semi-conducteurs à gap direct (exemple : GaAs), le passage du minimum de la bande de conduction au maximum de la bande de valence se fait sans changement de vecteur d'onde  $\vec{k}$ . Par contre, dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect (exemple : Si, Ge), ce passage se fait par le changement de vecteur d'onde, assisté par des phonons, particules associées aux modes de vibrations quantifiées du réseau (Figure II-2).

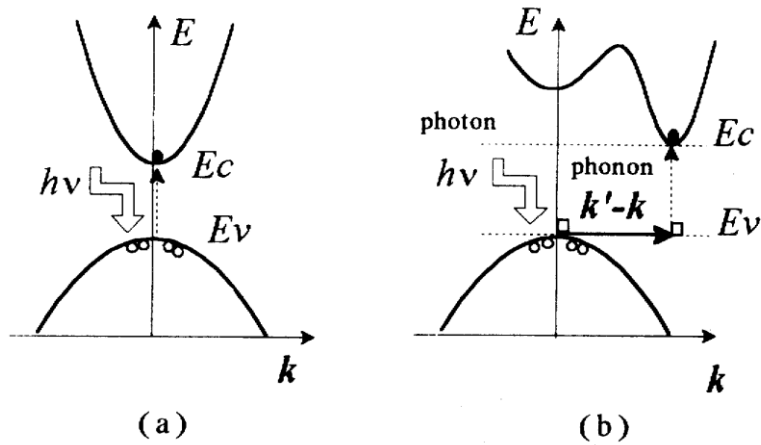


Figure II-2 : (a) Structure de bande à gap direct, (b) Structure de bande à gap indirect

## II.2.2 Structure cristalline

La plupart des semi-conducteurs cristallisent dans la structure « Diamant » comme le Si et Ge ou « Zinc blende » comme le GaAs. Les deux structures possèdent des liaisons covalentes tétraédriques où chaque atome est entouré de quatre atomes proches voisins situés sur les sommets d'un tétraèdre régulier. Les deux structures peuvent être considérées comme deux structures cubiques à face centrées décalées l'une par rapport à l'autre d'un quart ( $a/4$ ) suivant les trois directions. Pour la structure « Diamant », les deux structures cubiques sont constituées des mêmes atomes (exemple Si), tandis que pour la structure « Zinc blende », les deux structures cubiques sont constituées d'atomes différents (exemple Ga et As) (Figure II-3).

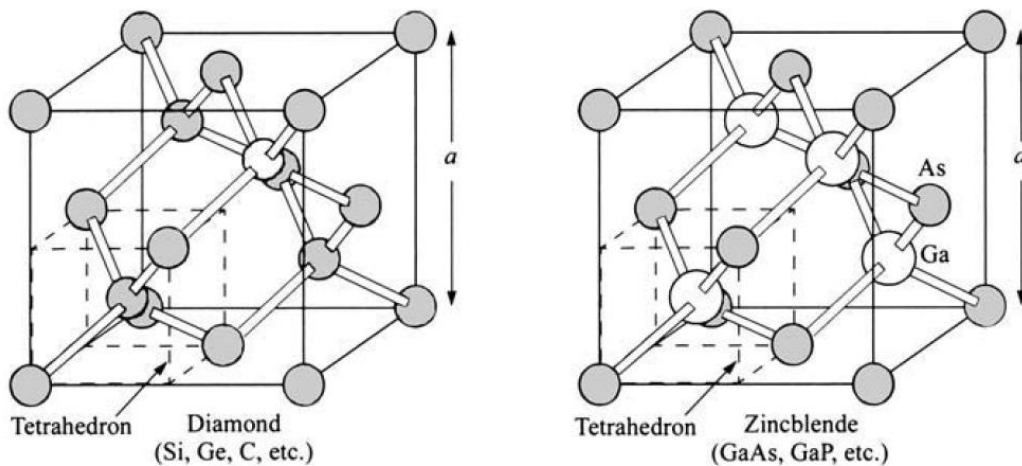


Figure II-3: Structure cristalline des semi-conducteurs ([Sze & Ng 2007](#))

### II.2.3 Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique

Dans un semi-conducteur, l'énergie de l'agitation thermique permet le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction laissant une lacune appelée «trou», un électron d'un atome voisin peut combler cette lacune, laissant à son tour un trou. Cette notion de trou permet d'introduire un deuxième mécanisme de conduction de charges positives (+e) (Figure II-1).

Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction est donné par le produit de la densité d'états  $N_c(E)$  par la fonction de distribution de Fermi Dirac  $f_n(E)$  intégré sur toute la bande de conduction :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f_n(E) d(E) \quad (\text{II-1})$$

Où

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (\text{II-2})$$

Et

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (\text{II-3})$$

Cette intégrale donne :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \quad (\text{II-4})$$

Où

$$N_c = \frac{1}{4} \left( \frac{2m_c^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (\text{II-5})$$

D'une façon analogue, Le nombre de trous libres dans la bande de valence est donné par le produit de la densité d'états  $N_v(E)$  par la fonction  $f_p(E)$  égale à  $(1 - f_n(E))$  intégré

sur toute la bande de valence où  $f_p(E)$  exprime la probabilité de trouver une place vacante de niveau d'énergie  $E$  :

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} N_v(E) f_p(E) d(E) \quad (\text{II-6})$$

Où

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_v^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (\text{II-7})$$

Le calcul donne alors :

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \quad (\text{II-8})$$

Où

$$N_v = \frac{1}{4} \left( \frac{2m_v^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (\text{II-9})$$

$E_F$  est le niveau de Fermi qui est l'énergie de référence pour laquelle la probabilité d'occupation  $f(E_F)$  est égale à 0.5 ;  $m_c^*$  et  $m_v^*$  sont respectivement les masses effectives de l'électrons et du trou ;  $E_c$  est le niveau du bas de la bande de conduction ;  $E_v$  est le niveau du haut de la bande de valence ;  $T$  est la température absolue du matériau (en °K) ;  $k_B$  est la constante de Boltzmann et  $\hbar$ , la constante de Planck ( $\hbar = h/2\pi$ ).

### II.2.3.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque s'il est à l'état pur dépourvu de toute impureté pouvant modifier les densités des porteurs. Dans ce cas là, les densités d'électrons et de trous sont égales et on peut écrire :

$$n = p = n_i \quad (\text{II-10})$$

Et donc:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (\text{II-11})$$

En vertu des équations (II-4, II-8, II-11), on trouve le produit :

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (\text{II-12})$$

Par conséquent :

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (\text{II-13})$$

$n_i$  est la densité intrinsèque des porteurs, c'est une caractéristique propre au semi-conducteur à une température donnée. La position du niveau de Fermi peut être repérée en écrivant:  $n=p$ , soit

$$N_c \exp\frac{E_F - E_c}{k_B T} = N_v \exp\frac{E_v - E_F}{k_B T} \quad (\text{II-14})$$

Soit

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (\text{II-15})$$

En remplaçant  $N_v$  et  $N_c$  par leurs expressions, on trouve:

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_v^*}{m_c^*} \quad (\text{II-16})$$

Puisque  $m_v^* \approx m_c^*$ , on peut écrire :

$$E_{fi} \approx \frac{E_c + E_v}{2} \quad (\text{II-17})$$

Cette relation montre que le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque se trouve approximativement au milieu de la bande interdite (Figure II-4).

### II.2.3.2 Semi-conducteur extrinsèque

Lorsqu'un semi-conducteur est dopé par des atomes spécifiques tel que le Bore (atome accepteur) ou le phosphore (atome donneur), ses propriétés électriques sont modifiées considérablement. On dit qu'un semi-conducteur extrinsèque est de type n si la densité la densité des donneurs ( $N_d$ ) est supérieure à la densité des accepteurs

( $N_a$ ), dans le cas inverse, le semi-conducteur est de type p. En se basant sur l'équation de neutralité et dans le cas où tous les atomes dopants sont ionisés, on a :

$$n + N_a = p + N_d \quad (\text{II-18})$$

En négligeant la densité des trous dans le cas d'un semi-conducteur de type n, la densité des électrons (ici porteurs majoritaires) est :

$$n = N_d - N_a \quad (\text{II-19})$$

En utilisant l'expression (II-11) on obtient la densité des trous (porteurs minoritaires):

$$p = \frac{ni^2}{N_d - N_a} \quad (\text{II-20})$$

En combinant les expressions (II-4, II-19), on obtient la position du niveau de Fermi:

$$E_F = E_c - k_B T \ln \frac{N_c}{N_d - N_a} \quad (\text{II-21})$$

On remarque que le niveau de Fermi est au-dessus du milieu de la bande interdite et tend vers le bas de la bande de conduction lorsque le dopage augmente (Figure II-4).

Pour un semi-conducteur de type p et avec une procédure analogue, on obtient

$$p = N_a - N_d \quad (\text{II-22})$$

$$n = \frac{ni^2}{N_a - N_d} \quad (\text{II-23})$$

$$E_F = E_v + k_B T \ln \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad (\text{II-24})$$

On remarque que le niveau de Fermi est au-dessous du milieu de la bande interdite et tend vers le haut de la bande de valence lorsque le dopage augmente (Figure II-4).

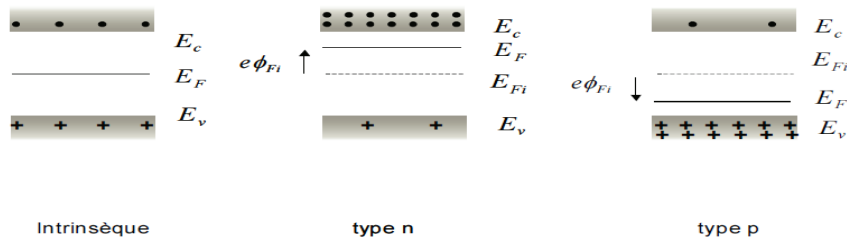


Figure II-4: Les trois types de semi-conducteurs

## II.2.4 Semi-conducteur hors équilibre

### II.2.4.1 Courants dans le semi-conducteur

Sous l'effet d'un champ électrique  $\vec{E}$ , il y a un déplacement des porteurs de charges, donc un courant de conduction  $\vec{J}_c$  donné par la loi d'ohm :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-25})$$

Où  $\sigma$  est la conductivité du semi-conducteur. Pour les électrons :

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} \quad (\text{II-26})$$

Avec  $\mu_n$ , la mobilité des électrons ;  $q$ , la valeur absolue de la charge d'électron.

Et de façon similaire pour les trous :

$$\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} \quad (\text{II-27})$$

Avec  $\mu_p$ , la mobilité des trous.

Ainsi le courant total de conduction :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (\text{II-28})$$

En remplaçant les deux courants par leurs expressions respectives, on obtient le courant de conduction total :

$$\vec{J}_c = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} \quad (\text{II-29})$$

Par ailleurs et sous l'effet d'un gradient de concentration, selon la loi de Fick, il y a existence d'un courant de diffusion  $\vec{J}_D$ .

Pour les électrons :

$$\vec{J}_n = qD_n \vec{\nabla} n \quad (\text{II-30})$$

$D_n$  est la constante de diffusion des électrons.

Pour les trous :

$$\vec{J}_p = -qD_p \vec{\nabla} p \quad (\text{II-31})$$

$D_p$  est la constante de diffusion des trous.

Ainsi le courant total de diffusion s'écrit :

$$\vec{J}_D = q(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p) \quad (\text{II-32})$$

D'après les expressions ci-dessus (II-26-27-30-31) les courants totaux des électrons et des trous s'écrivent donc :

$$\vec{J}_n = q(n\mu_n\vec{E} + D_n\vec{\nabla}n) \quad (\text{II-33})$$

$$\vec{J}_p = q(p\mu_p\vec{E} - D_p\vec{\nabla}p) \quad (\text{II-34})$$

### II.2.4.2 Génération-Recombinaison

La génération est la création de porteurs dans le semi-conducteur, elle est caractérisée par un paramètre ( $G$ ) qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et par unité de temps ( $\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$ ). Elle peut être due à l'agitation thermique ou à l'excitation du semi-conducteur par une source extérieure (optique, électrique, etc...).

La recombinaison est le processus inverse. Elle est caractérisée par un paramètre ( $R$ ) ( $\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$ ) propre au matériau. Le temps ( $\tau$ ) qui sépare la recombinaison d'une paire électron-trou de sa génération est appelé la durée de vie de ces porteurs de charge.

Les trois principaux mécanismes qui limitent la durée de vie des porteurs de charge en volume dans un matériau semi-conducteur sont :

- Recombinaison radiative,
- Recombinaison Auger,
- Recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall).

#### II.2.4.2.1 Recombinaison radiative

Ce genre de recombinaison a principalement lieu dans les semi-conducteurs à gap direct comme l'arséniure de gallium (GaAs) (Figure II-5-a). Le taux de recombinaison est donné par la relation suivante :

$$R_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (\text{II-35})$$

$B$  est une constante de proportionnalité.

Pour les deux types de semi-conducteur (type p et type n respectivement) et en régime de faible injection où la densité des porteurs majoritaires reste inchangée et seule la densité des porteurs minoritaires est affectée, les taux de recombinaison se réduisent aux expressions suivantes :

- Pour un semi-conducteur de type p :

$$R_{rad,p} = \frac{\Delta n}{\tau_{rad,p}} \quad (\text{II-36}) \quad \tau_{rad,p} = \frac{1}{Bp_0} \quad (\text{II-37})$$

- Pour un semi-conducteur de type n :

$$R_{rad,p} = \frac{\Delta p}{\tau_{rad,p}} \quad (\text{II-38})$$

$$\tau_{rad,p} = \frac{1}{Bn_0} \quad (\text{II-39})$$

$\tau_{rad,n}, \tau_{rad,p}$  sont les durées de vie des porteurs minoritaires.

$n_0$  et  $p_0$  sont respectivement, les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre.

$n, p$  sont respectivement, les concentrations d'électrons et de trous hors équilibre.

#### II.2.4.2.2 Recombinaison Auger

La recombinaison Auger est une recombinaison faisant intervenir trois particules. Lorsqu'un électron (ou un trou) quitte la bande de conduction (ou de valence) pour se recombiner avec un trou (ou un électron) de la bande de valence (ou de conduction), l'énergie est transférée à un tiers porteur (électron ou trou) qui se thermalise ensuite par l'intermédiaire d'un phonon (Figure II-5-b). Ce type de recombinaison se produit surtout dans les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est alors donné par :

$$R_{Auger} = (A_n n + A_p p)(np - n_i^2) \quad (\text{II-40})$$

$A_n$  et  $A_p$  sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

Les durées de vie des porteurs minoritaires en régime de faible injection (low injection : li) et en régime de forte injection (high injection : hi) sont données par les relations suivantes :

- Pour un semi-conducteur de type p :

$$\tau_{Auger,n,li} = \frac{1}{A_p p_0^2} \quad (\text{II-41})$$

$$\tau_{Auger,n,hi} = \frac{1}{(A_n + A_p)\Delta n^2} \quad (\text{II-42})$$

- Pour un semi-conducteur de type n :

$$\tau_{Auger,p,li} = \frac{1}{A_n n_0^2} \quad (\text{II-43})$$

$$\tau_{Auger,p,hi} = \frac{1}{(A_n + A_p)\Delta p^2} \quad (\text{II-44})$$

Ces expressions montrent que la recombinaison Auger est proportionnelle à l'inverse de la densité de porteurs au carré ( $\tau \sim 1/n^2$ ), la dépendance avec le niveau d'injection

de  $\tau_{Auger}$  sera plus forte que  $\tau_{rad}$ , comme dans le cas par exemple de l'émetteur fortement dopé.

### II.2.4.2.3 Recombination Shockley-Read-Hall (SRH)

Ces recombinaisons font intervenir des niveaux pièges dans la bande interdite (Figure II-5-c). La statistique SRH, introduite par Hall ([Hall 1952](#)) et généralisée par Shockley et Read ([Shockley & Read 1952](#)), étudie la théorie de ce type de recombinaison. Pour un matériau moins dopé, les défauts et les pièges situés à des niveaux profonds (proches du milieu du gap) limitent la durée de vie. Le taux de recombinaison est donné par :

$$R_{SRH} = \frac{C_n C_p N_R (np - n_i^2)}{C_n (n + n_i e^{-(E_i - E_R)/kT}) + C_p (p + n_i e^{(E_i - E_R)/kT})} \quad (II-45)$$

$N_R$  est la concentration des centres recombinants d'énergie  $E_R$  ;  $E_i$  est le niveau d'énergie intrinsèque ;  $C_n$  et  $C_p$  sont les probabilités de capture des électrons et des trous. La durée de vie SRH des porteurs est donnée par la relation :

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{n_0} (p_0 + p_1 + \Delta n) + \tau_{p_0} (n_0 + n_1 + \Delta n)}{n_0 + p_0 + \Delta n} \quad (II-46)$$

Où,  $n_0$  et  $p_0$  sont respectivement, les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre,  $n_1$  et  $p_1$  sont des facteurs statistiques définis par les équations suivantes :

$$n_1 = N_c \exp \frac{E_R - E_c}{k_B T} \quad (II-47) \quad p_1 = N_v \exp \frac{E_v - E_R}{k_B T} \quad (II-48)$$

$\tau_{p_0}$  est la durée de vie des trous lorsque les centres pièges sont complètement occupés,  $\tau_{n_0}$  est la durée de vie des électrons lorsque les centres pièges sont complètement vides, elles sont données par les relations suivantes :

$$\tau_{p_0} = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_R} \quad (II-49) \quad \tau_{n_0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_R} \quad (II-50)$$

Où  $\sigma_n$  et  $\sigma_p$  sont les sections efficaces de capture des électrons et des trous du centre recombinant concerné,  $v_{th}$  la vitesse thermique des porteurs donnée par :

$$v_{th} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m^*}} \quad (\text{II-51})$$

En régime de faible injection, la durée de vie SRH se simplifie aux relations suivantes :

- Pour le silicium de type p :

$$\tau_{SRH_{n,li}} = \tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_R} \quad (\text{II-52})$$

- Pour le silicium de type n :

$$\tau_{SRH_{p,li}} = \tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_R} \quad (\text{II-53})$$

Le rapport entre les durées de vie est donné par la relation :

$$k = \frac{\tau_{SRH_{p,li}}}{\tau_{SRH_{n,li}}} = \frac{\sigma_n}{\sigma_p} \quad (\text{II-54})$$

En régime de forte injection, la durée de vie SRH pour les deux types (type n et type p), est réduite à la relation suivante :

$$\tau_{SRH_{hi}} = \tau_{n0} + \tau_{p0} = \frac{1}{v_{th} N_R} \left( \frac{1}{\sigma_n} + \frac{1}{\sigma_p} \right) \quad (\text{II-55})$$

#### II.2.4.2.4 Durée de vie volumique

Le taux de recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume  $R_{vol}$  est donné par la somme des contributions de chaque taux de recombinaison vu précédemment :

$$R_{vol} = R_{rad} + R_{Auger} + R_{SRH} \quad (\text{II-56})$$

En conséquence, la durée de vie volumique est donnée par la relation suivante :

$$\frac{1}{\tau_{vol}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (\text{II-57})$$

#### II.2.4.2.5 Recombinaison en surface

La recombinaison des porteurs en excès se produit non seulement dans le volume du cristal, mais aussi à sa surface (Figure II-5-d). Cette dernière est perturbée à cause des

traitements mécaniques et chimiques qu'elle subit. La recombinaison au niveau de la surface est plus importante que celle du volume donnant naissance à un courant de diffusion néfaste. Elle est définie par les relations suivantes :

- Pour un semi-conducteur de type n :

$$D_p \frac{\delta \Delta p}{\delta x}(x = 0) = R_{n,sur} = S_p \Delta p \quad (\text{II-58})$$

- Pour un semi-conducteur de type p :

$$D_n \frac{\delta \Delta n}{\delta x}(x = 0) = R_{p,sur} = S_n \Delta n \quad (\text{II-59})$$

$R_{sur}$  est le taux de recombinaison en surface.  $S_n$  et  $S_p$  sont respectivement les vitesses de recombinaison en surface des électrons et des trous.

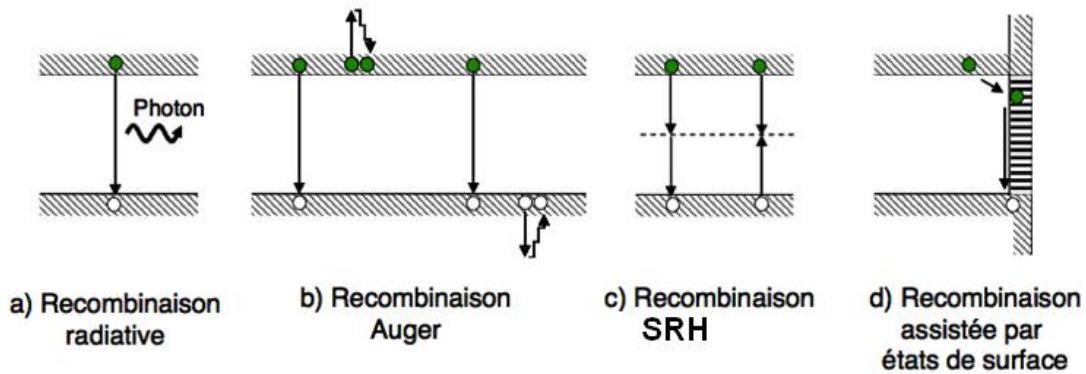


Figure II-5: Représentation des différents mécanismes de recombinaison

#### II.2.4.2.6 Durée de vie effective

Les différents mécanismes de recombinaison analysés précédemment peuvent se produire simultanément dans un semi-conducteur. Néanmoins, dans de nombreuses situations, certains de ces processus de recombinaison contribueront de façon négligeable. Le taux de recombinaison efficace est le taux global de toutes ces contributions. Il est donné par :

$$R_{eff} = R_{vol} + 2R_{sur} \quad (\text{II-60})$$

Dans le cas général simplifié, la durée de vie effective est donnée par la relation suivante :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{vol}} + \frac{2s}{w} \quad (\text{II-61})$$

$w$  est l'épaisseur du substrat.

### II.2.4.3 Equations de transport

L'étude de tous les phénomènes se produisant dans les semi-conducteurs ainsi que le calcul des propriétés de tous les dispositifs à semi-conducteur (diode-cellule solaire-transistor, etc....) sont basés sur les cinq équations qui suivent :

- Les équations de courants (II-33) et (II-34) (voir section II.2.4.1):

$$\vec{J}_n = q(n\mu_n\vec{E} + D_n\vec{\nabla}n)$$

$$\vec{J}_p = q(p\mu_p\vec{E} - D_p\vec{\nabla}p)$$

- Le déplacement des porteurs libres peut entraîner la création d'une charge d'espace locale, qui est liée au potentiel interne dans le semi-conducteur par l'équation de Poisson :

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} (p - n + N_d - N_a) \quad (\text{II-62})$$

Où  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du semi-conducteur,  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\rho$  est la densité locale de charge d'espace.

- Les équations de continuité régissant la condition d'équilibre dynamique des porteurs dans le semi-conducteur, sont données par :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{II-63})$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{II-64})$$

Avec  $G_n$  et  $G_p$  les taux respectifs de génération des électrons et des trous,  $R_n$  et  $R_p$  les taux respectifs de recombinaison des électrons et des trous.

La solution générale de ce système de cinq équations se fait numériquement, mais dans des cas plus simples, elle peut être résolue analytiquement.

### II.2.4.4 Notion de quasi-niveaux de Fermi

En régime d'équilibre thermodynamique, le produit ( $n.p = n_i^2$ ) est constant et les densités de porteurs sont données par les relations (II-4) et (II-8) vues précédemment:

$$n = N_c \exp \frac{E_F - E_c}{k_B T}$$

$$p = N_v \exp \frac{E_v - E_F}{k_B T}$$

Hors équilibre (injection ou extraction des porteurs), le produit peut différer notablement de  $n_i^2$  ( $n.p \neq n_i^2$ ) et le niveau de Fermi n'est pas le même, donc on parle de quasi-niveau de Fermi  $E_{Fn}$  pour les électrons et de quasi-niveau de Fermi  $E_{Fp}$  pour les trous. Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$n = N_c \exp \frac{E_{Fn} - E_c}{k_B T} \quad (\text{II-65})$$

$$p = N_v \exp \frac{E_v - E_{Fp}}{k_B T} \quad (\text{II-66})$$

Ce qui ramènent à :

$$E_{Fn} = E_F + k_B T \ln \left( 1 + \frac{\delta n}{n_0} \right) \quad (\text{II-67})$$

$$E_{Fp} = E_F - k_B T \ln \left( 1 + \frac{\delta p}{p_0} \right) \quad (\text{II-68})$$

$n_0$  et  $p_0$  sont les densités d'électrons et trous à l'équilibre thermodynamique.

$\delta n$  et  $\delta p$  sont les variations des densités d'électrons et trous hors équilibre.

Les courants des porteurs sont donnés par les relations suivantes :

$$\vec{J}_n = n \mu_n \vec{\nabla} E_{fn} \quad (\text{II-69})$$

$$\vec{J}_p = p \mu_p \vec{\nabla} E_{fp} \quad (\text{II-70})$$

Ces deux relations montrent que le courant est lié au gradient des quasi-niveaux de Fermi.

## II.3 Structure et fonctionnement d'une cellule solaire

Comme on l'a présentée au début de ce chapitre, une cellule solaire élémentaire est généralement basée sur une simple jonction PN. L'étude qualitative et quantitative de la cellule solaire est fondée sur le simple modèle de Shockley ([Shockley 1949](#)) d'une diode sous obscurité et sous illumination. Ce modèle est suffisant pour étudier les mécanismes de transport de la cellule et extraire ces principaux paramètres physiques.

### II.3.1 L'homojonction PN à l'équilibre

Une homojonction PN est la juxtaposition de deux régions de types différents (type n et type p) d'un même matériau semi-conducteur. Lorsque le contact est réalisé, les électrons de la région N, où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région P où ils sont minoritaires. De même, les trous de la région P vont diffuser de la même façon

vers la région N. Les déplacements de ces électrons et de ces trous vont provoquer l'apparition, de part et d'autre de la jonction, de deux zones non neutres l'une comprenant des impuretés ionisées positivement (zone N) et l'autre comprenant des impuretés ionisées négativement (zone P). La présence de ces charges positives et négatives donne naissance à un champ électrique interne dont le sens est tel qu'il s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. À l'équilibre, tout se passe comme si deux courants identiques et opposés se superposaient, donnant un courant résultant nul: l'un est provoqué par la diffusion de gradient de concentration et l'autre de conduction dû à la présence de ce champ électrique interne. La zone comprenant des charges non compensées est dite zone de charge d'espace (ZCE) ou zone désertée, les autres zones sont dites neutres.

Pour le modèle simple de la jonction abrupte (Figure II-6), la densité de charge d'espace à travers la structure est :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho(x) = 0 & \text{Pour } x > x_n \text{ et } x < x_p \end{array} \right. \quad \text{(II-71)}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho(x) = -qN_a & \text{Pour } x_p < x < 0 \end{array} \right. \quad \text{(II-72)}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho(x) = qN_d & \text{Pour } 0 < x < x_n \end{array} \right. \quad \text{(II-73)}$$

En intégrant l'équation de Poisson (II-62) pour une dimension, on obtient le champ électrique  $E$  et le potentiel électrique  $V$  à travers la structure.

$$E = -\frac{qN_a}{\epsilon}(x - x_p) \quad \text{Pour } x_p < x < 0 \quad \text{(II-74)}$$

$$E = \frac{qN_d}{\epsilon}(x - x_n) \quad \text{Pour } 0 < x < x_n \quad \text{(II-75)}$$

$$V = \frac{qN_a}{2\epsilon}(x - x_p)^2 + V_p \quad \text{Pour } x_p < x < 0 \quad \text{(II-76)}$$

$$V = -\frac{qN_d}{2\epsilon}(x - x_n)^2 + V_n \quad \text{Pour } 0 < x < x_n \quad \text{(II-77)}$$

La continuité du champ électrique  $E$  et du potentiel électrique  $V$  au point ( $x=0$ ) (Figure II-6), permet d'écrire les relations suivantes :

$$x_n = \left( \frac{2\varepsilon k_B T}{q^2 N_d} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II-78})$$

$$x_p = - \left( \frac{2\varepsilon k_B T}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II-79})$$

La largeur de la zone de charge d'espace est donnée par:

$$w = x_n - x_p$$

La tension de diffusion est donnée par:

$$V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2) \quad (\text{II-80})$$

Le produit ( $q V_d$ ) représente l'énergie potentielle qui correspond à la hauteur de la barrière de potentiel que doit franchir un trou pour passer de la région P à la région N et vice-versa.

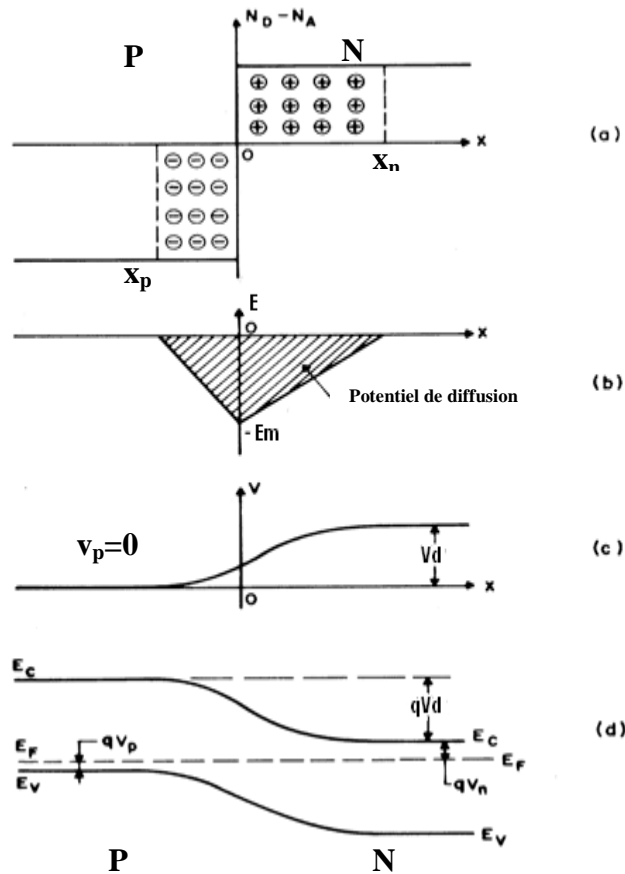


Figure II-6 : Jonction PN (abrupte) à l'équilibre: a) distribution des impuretés ionisées; b) distribution du champ électrique; c) variation du potentiel; d) diagramme des bandes d'énergie

### II.3.2 La jonction PN polarisée

Lorsque la jonction est connectée à une source extérieure de tension  $V$ , la différence de potentiel entre les régions N et P varie et le potentiel électrostatique à travers la jonction devient  $(V_d - V)$  (Figure II-7), par conséquent, il y aura un décalage des niveaux de Fermi. Dans la zone de charge d'espace, les niveaux de Fermi des électrons et des trous vont se dédoubler en deux quasi-niveaux de Fermi  $E_{fn}$  et  $E_{fp}$  s'appliquant respectivement aux électrons et aux trous (Figure II-8).

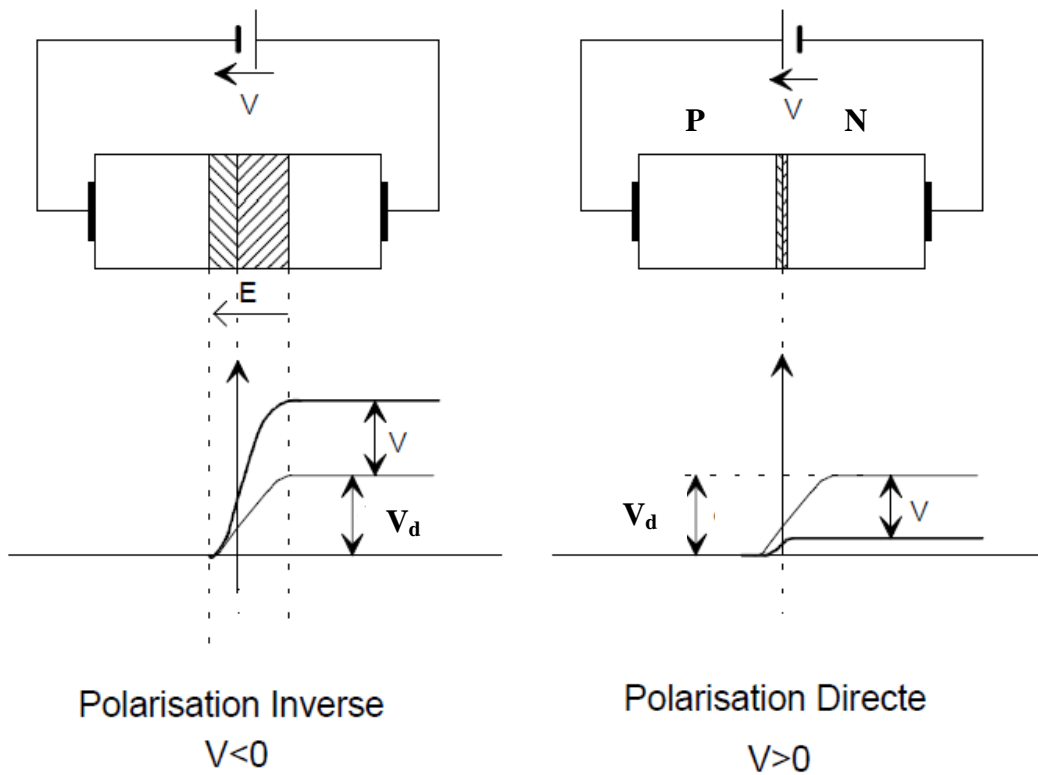


Figure II-7: Jonction PN polarisée directe (positive) et indirecte (négative)

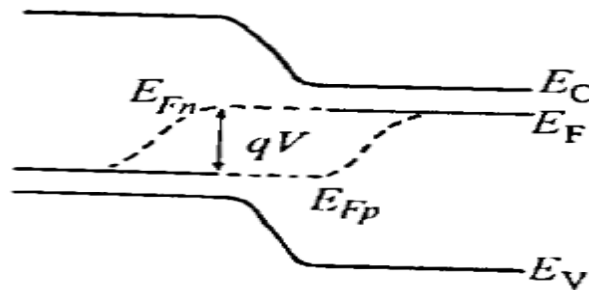


Figure II-8: Jonction PN polarisée (hors équilibre)

Pour notre cas et en régime de faible injection, les équations de courant (II-33), (II-34) et de continuité (II-63), (II-64) se simplifient, on peut ainsi écrire pour une dimension :

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J = J_n + J_p$$

$$\frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = 0$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (\text{II-81})$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (\text{II-82})$$

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

La résolution analytique simplifiée de ces équations nous donne la caractéristique  $J=f(V)$  de la jonction PN définie par l'équation fondamentale de Shockley (Figure II-9) :

$$J = J_{01} (e^{qV/k_B T} - 1) \quad (\text{II-83})$$

$J_{01}$  est appelé le courant de saturation dans les zones neutres, il est donné par la relation :

$$J_{01} = \frac{q n_i^2 D_p}{N_d L_p \text{th}(d_n/L_p)} + \frac{q n_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}(d_p/L_n)} \quad (\text{II-84})$$

Dans le cas où les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires  $L_p$  et  $L_n$  des régions n et p sont très petites par rapport aux longueurs  $d_n$  et  $d_p$  de ces régions, l'équation (II-84) se réduit à :

$$J_{01} = \frac{q n_i^2 D_p}{N_d L_p} + \frac{q n_i^2 D_n}{N_a L_n} \quad (\text{II-85})$$

Pour une jonction à profil de dopage quelconque, d'extrémités  $x_1$  (région P) et  $x_2$  (région N) le courant de saturation est exprimé par la relation générale :

$$J_{01} = \frac{q n_i^2 D_p}{\int_{x_n}^{x_2} N_d(x) dx} + \frac{q n_i^2 D_n}{\int_{x_1}^{x_p} N_a(x) dx} \quad (\text{II-86})$$

$J_{02}$  est la densité de courant de saturation dans la zone de charge d'espace (voir section suivante).

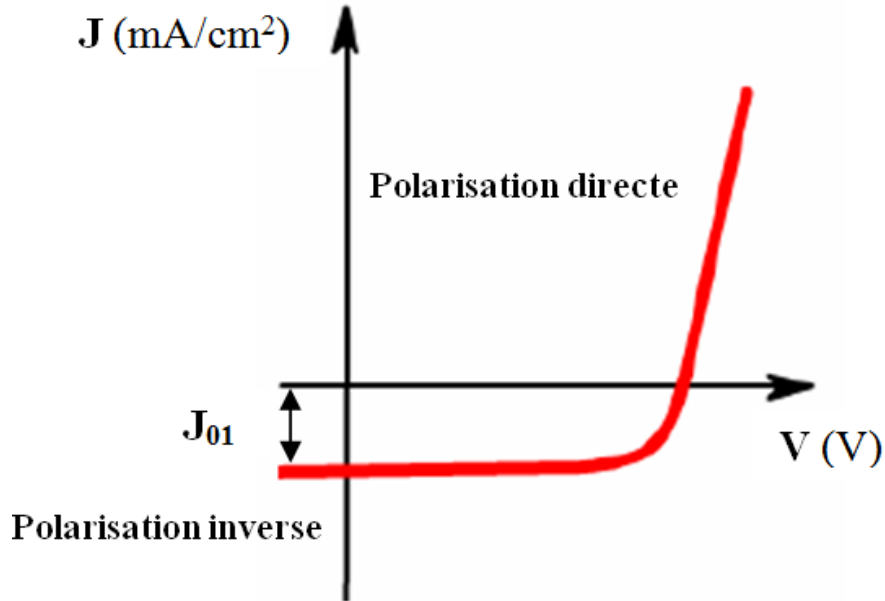


Figure II-9 : Caractéristique J(V)

### II.3.3 Le courant de génération-recombinaison

La jonction est le siège de générations thermiques et de recombinaisons. La densité de porteurs dans la zone de charge d'espace étant faible, le taux de recombinaison est dominé par les recombinaisons de Shockley-Read-Hall (II-45). Par conséquent, le mécanisme de recombinaison-génération dans la zone de charge d'espace provoque un courant supplémentaire qui peut être supérieur au courant de diffusion ([Sah et al. 1957](#)). Il est donné par :

$$J_{rg} = q \int_{x_p}^{x_n} R dx \quad (\text{II-87})$$

$R$  est le taux de recombinaison maximum donné par la relation :

$$R = \frac{1}{2} q \sigma v_{th} N_R n_i (e^{qV/2kT} - 1) \quad (\text{II-88})$$

Le calcul du courant de génération- recombinaison nous ramène à l'équation:

$$J_{rg} = \frac{1}{2} q w \sigma v_{th} N_R n_i (e^{qV/2k_B T} - 1) \quad (\text{II-89})$$

En posant

$$J_{02} = \frac{1}{2}qw\sigma v_{th}N_R n_i \quad (\text{II-90})$$

On obtient

$$J_{rg} = J_{02}(e^{qV/2k_B T} - 1) \quad (\text{II-91})$$

$J_{02}$  est la densité de courant de saturation dans la zone de charge d'espace.

### II.3.4 La jonction PN sous illumination

Lorsque la jonction PN est éclairée, des paires électrons-trous sont créées dans le volume. La variation de la densité de porteurs majoritaires est faible tandis que celle des porteurs minoritaires augmente fortement (régime de faible injection). Dans la ZCE, les paires sont instantanément séparées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés et injectés dans la zone N et les trous dans la zone P donnant naissance à un photo-courant de génération. Les porteurs minoritaires générés dans les zones neutres N et P diffusent dans le matériau. Si ces porteurs atteignent la ZCE, le champ électrique les accélère et les injecte dans la zone où ils sont majoritaires donnant naissance à un photo-courant de diffusion (Figure II-10). Les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur: ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement pleine plaque sur la face arrière.

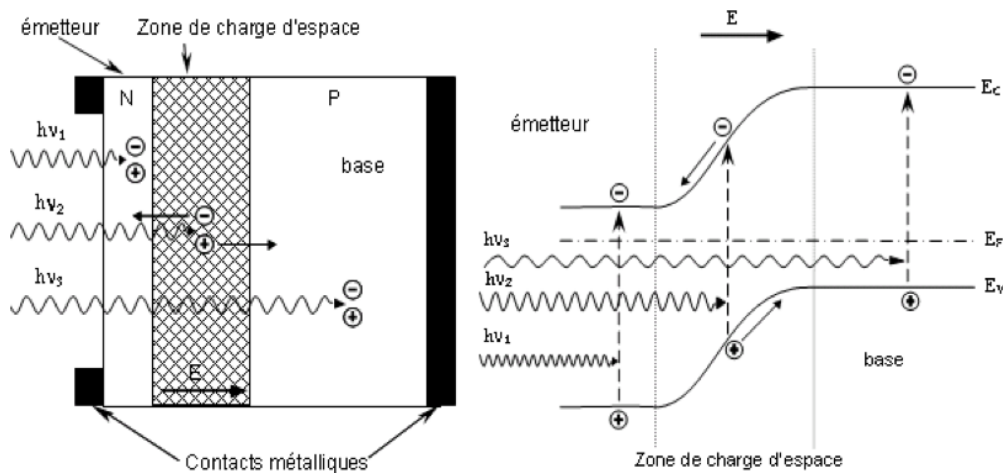


Figure II-10: Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule solaire

#### II.3.4.1 Propriétés optiques des semi-conducteurs

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est éclairé, la lumière arrivant à la surface est réfléchiée ou transmise. Le semi-conducteur est transparent pour les photons d'énergie

inférieure à son gap  $E_g$  tandis que ceux d'énergie supérieure peuvent être absorbés et créer une paire électron-trou.

Lorsque des photons sont absorbés par le matériau, des paires électron-trou sont générées plus ou moins profondément dans la structure. Les photons de haute énergie (de faibles longueurs d'onde) sont absorbés en surface de la structure, tandis que les photons de plus faible énergie (à plus grandes longueurs d'onde) sont moins absorbés en surface et parcourent donc une distance plus grande dans le volume du semi-conducteur (Figure II-11).

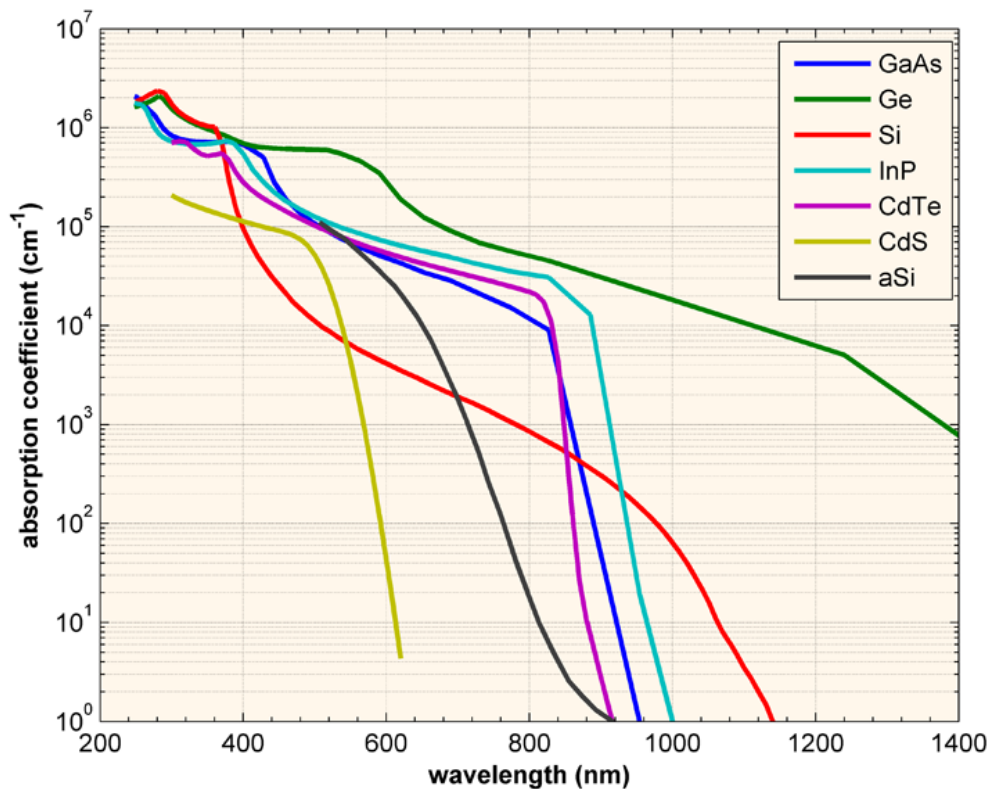


Figure II-11 : Coefficient d'absorption des différents semi-conducteurs à 300 °K en fonction de la longueur d'onde ([PV Education 2017](#))

Si  $\alpha(\lambda)$  est le coefficient d'absorption pour le rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ ,  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion pour la même longueur d'onde, alors le flux de photons  $\Phi(\lambda, x)$  de longueur d'onde  $\lambda$  à la profondeur  $x$  du semi-conducteur est donné selon la loi de Beer-Lambert par :

$$\Phi(\lambda, x) = \Phi_0(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II-92})$$

Où  $\Phi_0(\lambda)$  (photons.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>) est le nombre de photons incidents par unité de temps et par unité de surface.

Le coefficient de réflexion  $R(\lambda)$  est donné par la relation :

$$R(\lambda) = \left( \frac{n_i(\lambda) - 1}{n_i(\lambda) + 1} \right)^2 \quad (\text{II-93})$$

Avec

$$n_i(\lambda) = n(\lambda) + ik_e(\lambda) \quad (\text{II-94})$$

$n_i(\lambda)$  est l'indice de réfraction complexe,  $n(\lambda)$ , l'indice de réfraction réel,  $k_e(\lambda)$ , le coefficient d'extinction donné par :

$$k_e(\lambda) = \frac{\lambda \alpha(\lambda)}{4\pi} \quad (\text{II-95})$$

Pour le cas du silicium où le coefficient d'extinction  $k(\lambda)$  devient négligeable devant l'indice de réfraction réel  $n(\lambda)$  pour les longueurs d'onde supérieur à 400 nm, la relation (II-93) s'écrit :

$$R(\lambda) = \left( \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right)^2 = \left( \frac{\sqrt{\epsilon_r(\lambda)} - 1}{\sqrt{\epsilon_r(\lambda)} + 1} \right)^2 \quad (\text{II-96})$$

Où  $\epsilon_r(\lambda)$  sa constante diélectrique relative.

### II.3.4.2 Le photo-courant

Le taux de génération de paires électron-trou est égal au taux de disparition de photons donné par :

$$G(\lambda, x) = -\frac{d\Phi(\lambda, x)}{dx} \quad (\text{II-97})$$

En dérivant l'équation (II-92), on obtient:

$$G(\lambda, x) = \Phi_0(\lambda)\alpha(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II-98})$$

En remplaçant cette expression dans les équations de continuité (II-63) et (II-64), on peut résoudre le système d'équations de la jonction PN sous éclaircissement pour

déterminer le photo-courant  $J_{ph}$ . La résolution du système d'équations est généralement faite numériquement par différents programmes ou logiciels. La précision de la résolution est liée au choix des programmes utilisés. En effectuant certaines approximations et simplifications, on peut obtenir une forme analytique du photocourant (Figure II-12).

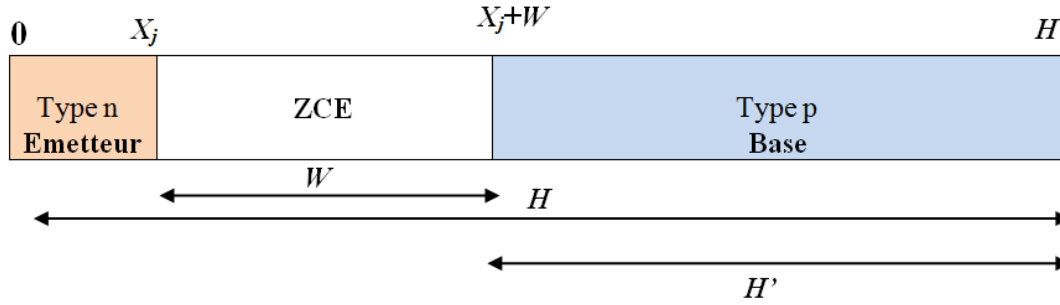


Figure II-12: Limites de la jonction PN sous éclaircissement.

Pour la région N :

$$J_p(\lambda) = [q\Phi_0(1 - R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \left[ \frac{\left( \frac{s_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left( \frac{s_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\left( \frac{s_p L_p}{D_p} \right) \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (\text{II-99})$$

Pour la région P :

$$J_n(\lambda) = [q\Phi_0(1 - R)\alpha L_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \exp(-\alpha(x_j + w))] \left[ \alpha L_n - \frac{\frac{s_n L_n}{D_n} [\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H')] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{s_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (\text{II-100})$$

Pour la région ZCE :

$$J_d(\lambda) = q\Phi_0(1 - R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha w)] \quad (\text{II-101})$$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} x = 0 & & D_p(d\Delta p/dx) &= s_p \Delta p \\ x = x_j & & \Delta p &= 0 \\ x = x_j + w & & \Delta n &= 0 \\ x = H & & -D_n(d\Delta n/dx) &= s_n \Delta n \end{aligned}$$

Le courant total est alors la sommation des contributions de ces trois zones :

$$J_{ph}(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_d(\lambda)$$

On obtient la valeur du courant  $J_{ph}$  en intégrant  $J_{ph}(\lambda)$  sur tout le spectre solaire.

### II.3.4.3 Le rendement quantique

Le rendement quantique interne (en anglais Internal Quantum Efficiency IQE ) ou la réponse spectrale interne d'une cellule photovoltaïque indique la quantité de porteurs photogénérés et collectés à ses bornes en fonction de l'énergie lumineuse incidente (Figure II-13). Il est donné par la relation :

$$R_{si} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (\text{II-102})$$

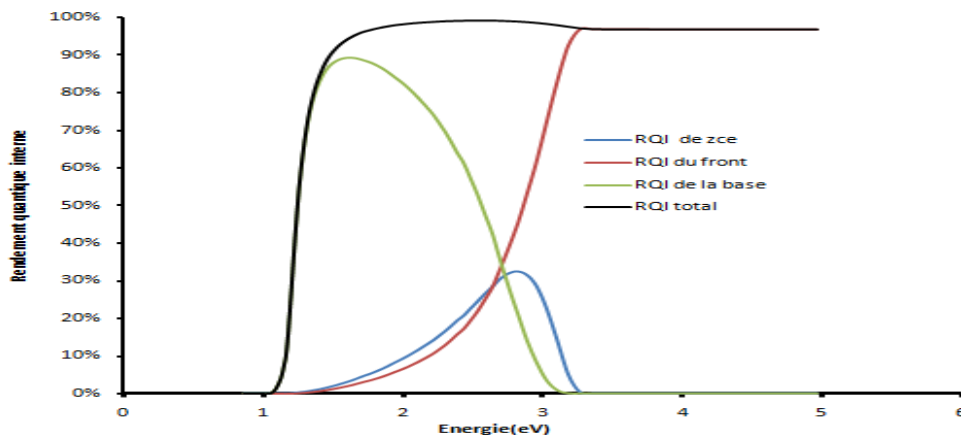


Figure II-13 : Rendement quantique interne

Si on ne tient pas compte du coefficient de réflexion de la cellule, on parle du rendement quantique externe (en anglais External Quantum Efficiency EQE ) donnée par la relation:

$$R_{se} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)} \quad (\text{II-103})$$

#### II.3.4.4 La modélisation de la cellule solaire

Les caractéristiques  $I(V)$  d'une cellule solaire idéale est la superposition de la courbe  $I(V)$  sous obscurité et du courant photogénéré  $I_{ph}$  (Figure II-14). On peut écrire :

$$I = I_{01}(e^{qV/k_B T} - 1) - I_{ph} \quad (\text{II-104})$$

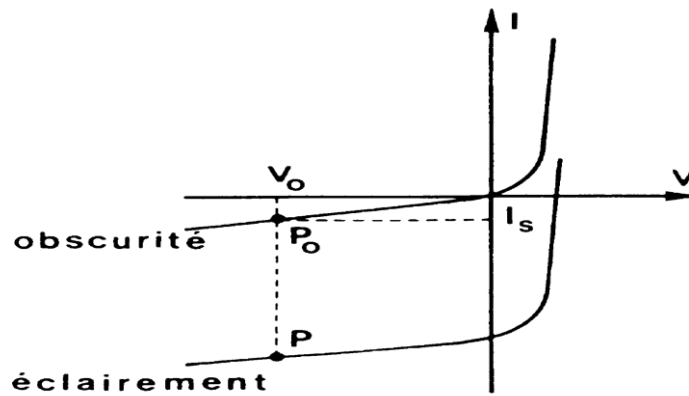


Figure II-14: Caractéristique I(V)

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est constitué d'une source de courant ( $I_{ph}$ ) modélisant l'éclairage, d'une diode D1 en parallèle (de facteur d'idéalité  $n_1=1$ ) spécifiant le courant de diffusion dans l'émetteur et la base de la cellule solaire (zones neutres) (équation II-83), d'une seconde diode D2 également en parallèle (de facteur d'idéalité  $n_2=2$ ) tenant compte de la recombinaison des porteurs dans la Zone de Charge d'espace (équation II-91), d'une résistance série  $R_s$ , qui modélise la résistance de la grille et les pertes résistives dans la base et l'émetteur, et d'une résistance parallèle (shunt en anglais)  $R_p$  qui prend en compte les pertes et les courants de fuites dans l'émetteur et la base (Figure II-15).

La caractéristique  $I(V)$  dans le 4<sup>ème</sup> quadrant s'écrit sous la forme suivante :

$$I = I_{01} \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{k_B T}} - 1 \right) + I_{02} \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{2k_B T}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{II-105})$$

**Composantes du courant d'obscurité**

Pour des raisons pratiques, cette équation est réécrite dans le 1<sup>er</sup> quadrant en inversant tous les courants comme suit:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{k_B T}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{2k_B T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II-106})$$

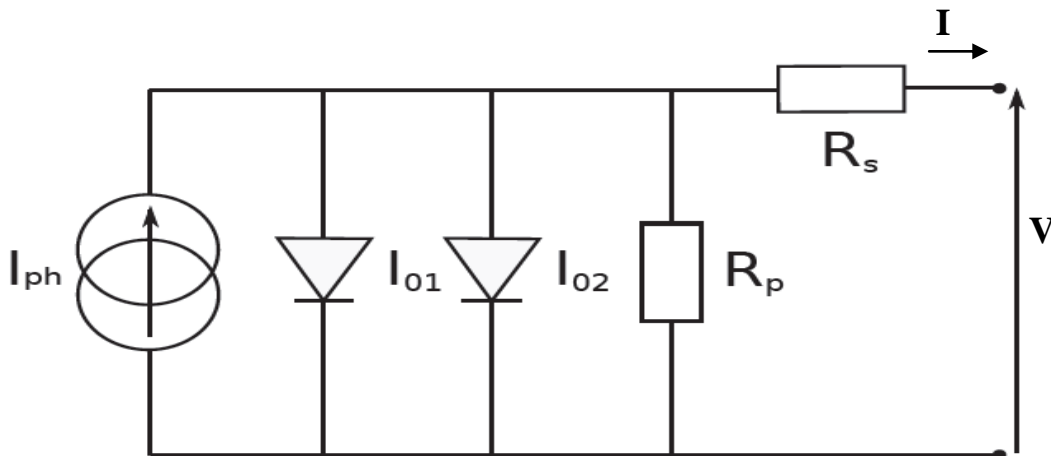


Figure II-15: Schéma électrique équivalent réel d'une cellule solaire

Les courants de recombinaisons  $I_{01}$  et  $I_{02}$  ont une grande influence sur les performances d'une cellule solaire. Ils peuvent être extraits de la caractéristique  $I(V)$  sous obscurité (tracée comme ci-dessous en échelle logarithmique) au voisinage des valeurs de tension de 0.5 volts pour  $I_{01}$  et de 0.2 volts pour  $I_{02}$ . Les valeurs des résistances  $R_s$  et  $R_p$  peuvent être également tirées de cette courbe (Figure II-16).

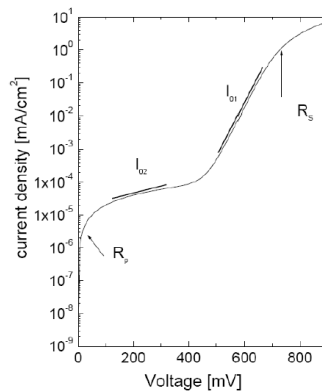


Figure II-16 : Présentation des paramètres :  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_s$  et  $R_p$  sur la caractéristique  $I(V)$  sous obscurité de la photopile (Schutz-kuchlv 2011)

### II.3.4.5 Performances de la cellule solaire

En utilisant les caractéristiques  $I(V)$ , il est possible d'extraire les paramètres fondamentaux d'une cellule solaire. A savoir, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion ( $\eta$ ) (Figure II-18).

#### II.3.4.5.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Quand le courant augmente, les termes exponentiels sont négligeables devant le « 1 » De plus, si la résistance parallèle est très élevée, on peut négliger le troisième terme de l'équation (II-105). Alors, le courant circulant lorsque la cellule est en court-circuit ( $V=0$ ) est donné par la relation suivante :

$$I_{cc} = I_{01} + I_{02} + I_{ph} \approx I_{ph} \quad (\text{II-107})$$

Le courant de court-circuit correspond presque au courant photo-généré  $I_{ph}$ .

Pour la caractérisation des cellules photovoltaïques, le courant de court-circuit est normalisé par rapport à la surface du dispositif. On parle alors de la densité du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) qui s'exprime alors en mA/cm<sup>2</sup>.

#### II.3.4.5.2 La tension de circuit ouvert $V_{co}$

Quand la tension augmente, le terme des recombinaisons dans la zone de charge d'espace devient négligeable devant le terme de diffusion ( $e^{(qV/2k_B T)} \ll e^{(qV/k_B T)}$ ), le troisième terme de l'équation (II-105) est négligé (résistance parallèle très élevée). Par conséquent, la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) qui est la valeur de la tension aux bornes du dispositif lorsque le courant s'annule ( $I=0$ ) est exprimée par la relation suivante :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{01}} + 1 \right) \quad (\text{II-108})$$

Le courant de saturation à l'obscurité  $I_{01}$  est fonction des paramètres  $D$  (constante de diffusion) et  $L$  (longueur de diffusion) ainsi qu'au dopage  $N$  pour les deux régions de la cellule (base et émetteur) (équation II-85). On cherche d'optimiser ces paramètres pour minimiser le courant de saturation dans le but d'améliorer la tension de circuit ouvert.

### II.3.4.5.3 Le facteur de forme FF

Il nous renseigne sur la qualité de la cellule solaire, il permet de qualifier la rectangularité de la courbe  $I(V)$ . On s'éloigne du cas idéal (100%) lorsque la résistance série est trop élevée, ou encore quand la résistance parallèle est faible (Figure II-17). Le facteur de forme est donné par la formule :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (\text{II-109})$$

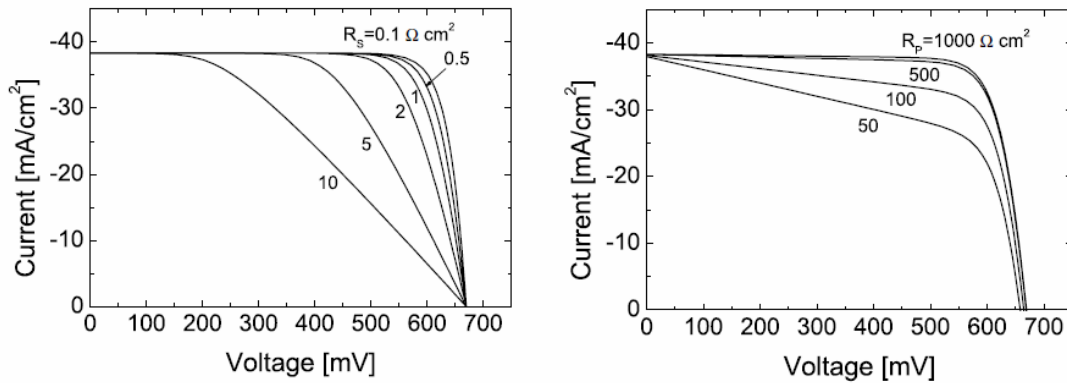


Figure II-17 : Effets résistifs

$P_m$  est la puissance maximale fournie par le composant au point optimal de fonctionnement ( $I_m, V_m$ ).

Pour le modèle simple d'une seule diode et sans tenir compte des résistances série et shunt, le facteur de forme est donné par la relation semi-empirique suivante ([Green 1982](#)) :

$$FF = \frac{V_{co} - \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{qV_{co}}{k_B T} + 0.72\right)}{V_{co} + \frac{k_B T}{q}} \quad (\text{II-110})$$

Cette relation montre que le facteur de forme est étroitement lié à la tension de circuit ouvert, et qui augmente lentement avec son accroissement.

### II.3.4.5.4 Le rendement de conversion

Le rendement de conversion  $\eta$  d'une cellule photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance débitée au point de puissance maximale (PPM)  $P_m$  et la puissance lumineuse incidente  $P_i$  de  $1000 \text{ W/m}^2$  (spectre de référence (ASTM G173) (voir section I.6.3.3). Il est lié aux trois paramètres précédents et est donné par la relation:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_i} \quad (\text{II-111})$$

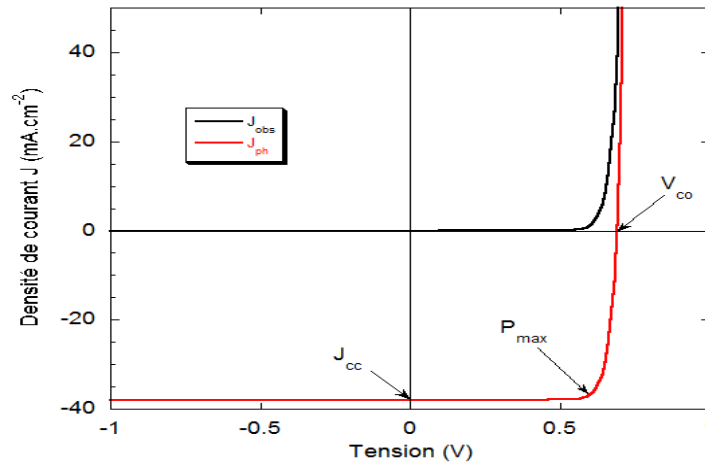


Figure II-18: -Paramètres de la cellule solaire

### II.3.4.6 Pertes limitant la conversion photovoltaïque

En pratique, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule (Figure II-19). Il est donc limité par ces pertes à une valeur théorique maximale. D'après les travaux ([Shockley & Queisser 1961](#)), le rendement peut atteindre 30%. De nouveaux concepts, dits de 3<sup>ème</sup> génération permettraient d'améliorer ce rendement à 44% en exploitant les photons de hautes et basses énergie ([Green 2002](#)). Ces pertes peuvent être classées en deux catégories: pertes optiques et pertes électriques. La réduction de ces pertes sera détaillée dans le chapitre III.

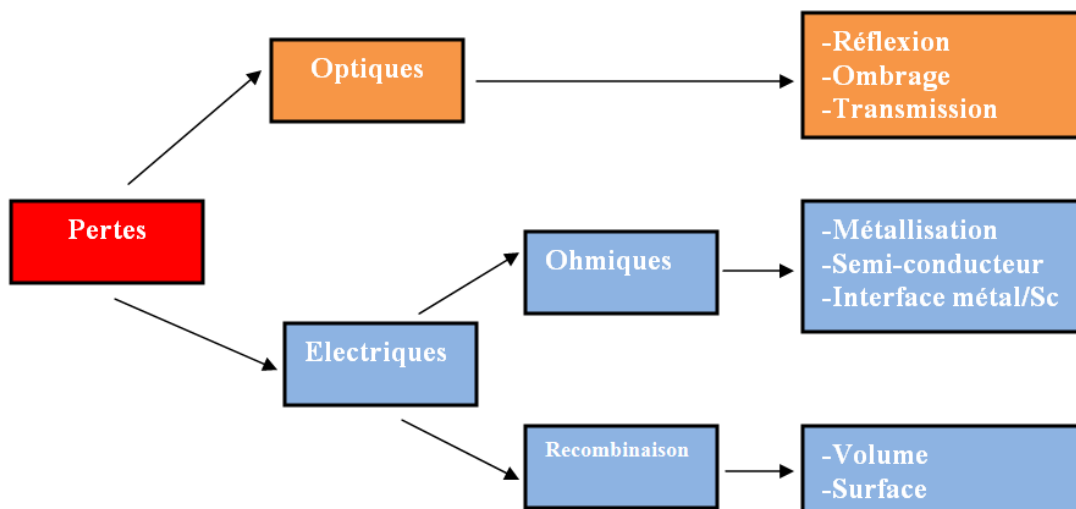


Figure II-19 : Les différentes pertes dans la cellule solaire

### II.3.4.6.1 Pertes optiques

- Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite ne peuvent pas être absorbés. Ils ne contribuent alors pas à la création de paires électron-trou. Ceci entraîne une perte d'environ 27% sur le rendement. (Zone A de la (Figure II-20),
- Les photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite perdent l'énergie en excès par thermalisation, qui ne participent donc pas à la création de paires électron-trou. Cette perte représente environ 28% de pertes (Zone B de la (Figure II-20),
- La réflexion : une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface non métallisée de la cellule solaire,
- Le taux d'ombrage : la face avant de la cellule solaire est recouverte par une grille en métal, qui empêche les photons de pénétrer dans le matériau. Les dimensions des métallisations sont alors un compromis entre les pertes optiques dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes résistives liées à la géométrie de la métallisation.

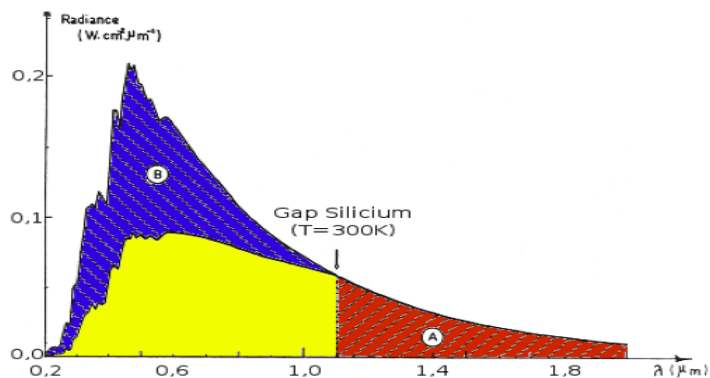


Figure II-20: Pertes optiques (Ricaud 1997).

### II.3.4.6.2 Pertes électriques

- Pertes résistives: Elles sont dues à la résistance série qui minimise le courant débité dans le circuit et aux résistances parallèles, telles que les courants de fuites sur les bords de la cellule photovoltaïque ou lorsque le métal de la face avant court-circuite l'émetteur,

- Facteur de tension : la tension de circuit ouvert ne peut pas dépasser la tension du gap, il ne correspond qu'à une fraction de cette tension notamment à cause des recombinaisons Auger, qui la limitent ([Szlufcik et al. 1997](#)),
- Facteur de forme : Le caractère exponentiel de l'expression du courant rend impossible l'obtention d'une courbe I(V) rectangulaire (100%). Le FF peut atteindre 89% ([Szlufcik et al. 1997](#)),
- Pertes par recombinaison : les porteurs de charge créés doivent diffuser jusqu'aux contacts pour participer à la conduction. Cependant, si elles se recombinent avant d'atteindre les contacts, elles ne participeront plus à la génération du courant. Différents mécanismes existent entraînant la recombinaison de la paire électron-trou, en volume ou en surface ([Kerr 2002](#)) (voir la section II.2.4.2).

## II.4 Conclusion

L'étude de la jonction PN permet de modéliser la cellule solaire en se basant sur le système d'équations différentielles de transport (Poisson, courant et continuité).

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est la superposition des quatre composantes : le photo-courant modélisant l'éclairement, le courant de diffusion dans l'émetteur et la base de la cellule solaire (diode en parallèle de facteur d'idéalité  $n_1=1$ ), le courant de recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace (diode également en parallèle de facteur d'idéalité  $n_2=2$ ) et un quatrième courant modélisant les résistances série et shunt.

Ce modèle permet d'extraire les quatre paramètres principaux de la cellule qui sont le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion.

Néanmoins, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Les différentes pertes optiques et électriques viennent influencer le rendement d'une cellule. Il est donc limité par ces pertes à une valeur théorique maximale. La réduction de ces pertes sera expliquée dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III : Technologie de la cellule solaire de type n et outils de caractérisations**

## Chapitre III Technologie de la cellule solaire de type n et outils de caractérisations

Comme on l'a constaté précédemment, les performances de la cellule solaire sont limitées par différentes pertes physiques. Par conséquent, l'étude de la technologie de la cellule solaire est nécessaire pour minimiser ces pertes et améliorer ses performances.

On entame ce chapitre par les différents procédés de purification et de cristallisation du silicium afin d'obtenir des substrats monocristallin ou multicristallin de type p ou de type n. Ensuite, on passe au procédé standard de la fabrication de la cellule solaire de type p détaillant ces différentes étapes. Une étude détaillée sur la cellule solaire de type n qui est l'objet de notre étude, est présentée expliquant l'avantage de cette structure par rapport à celle de type p. Enfin, on expose quelques outils de caractérisation utilisés pour mesurer certains paramètres et caractéristiques des photopiles.

### III.1 Silicium cristallin

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. Dans le tableau périodique des éléments, il est situé dans la colonne IV ; entre le carbone (C) et le germanium (Ge) et la troisième ligne ; entre l'aluminium (Al) et le phosphore (P). C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante (Figure III-1). Sa densité intrinsèque des porteurs est de  $8.56 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  à la même température.

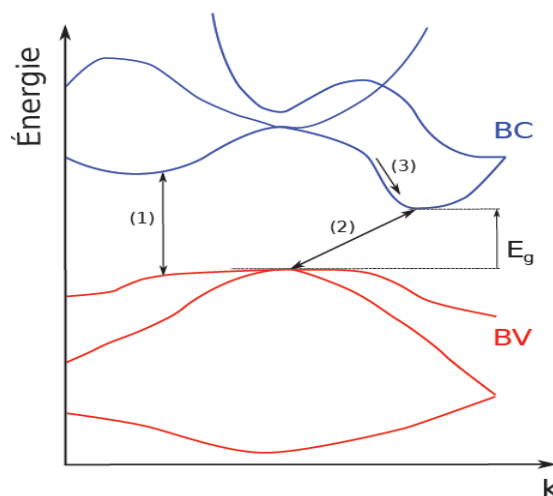


Figure III-1 : Structure de bandes du silicium cristallin (Favre 2011)

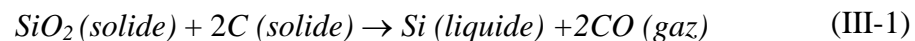
Le silicium cristallise dans la structure « Diamant » (voir la section II.2.2). Il ne se trouve pas sous sa forme pure, mais, sous forme de silice (SiO<sub>2</sub>) dans le sable de quartz comme on va le voir plus loin. Les différentes propriétés thermiques et mécaniques sont rapportées dans le Tableau III-1 ([Ceccaroli & Lohne 2011](#)).

| Propriété   | Valeur               |
|---|----------------------|
| Masse atomique                                      | 28.085               |
| Densité atomique (atomes / cm <sup>3</sup> )        | 5.0×10 <sup>22</sup> |
| Densité (g / cm <sup>3</sup> à 25 °C)               | 2.329                |
| Point de fusion (°C)                                | 1414                 |
| Point d'ébullition (°C)                             | 3270                 |
| Chaleur de fusion (kJ/g)                            | 1.8                  |
| Chaleur de vaporisation (kJ/g) (au point de fusion) | 16                   |
| Volume de contraction à la fusion (%)               | 9.5                  |

Tableau III-1 : Propriétés thermiques et mécaniques du silicium ([Ceccaroli & Lohne 2011](#))

### III.1.1 Silicium métallurgique

On obtient le silicium de grade métallurgique (en anglais Metallurgical Grade : MG-Si) par la réduction de la silice avec le carbone (C) dans un four à arc électrique (Figure III-2). Le creuset du four est rempli de la silice et du carbone puis est porté à une température élevée d'environ 1800 °C. La réaction globale de cette réduction est donnée par :



Le silicium en fusion est rempli dans des poches puis séparé du laitier avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5 %. Les impuretés présentes proviennent soit des intermédiaires de réaction comme le SiC (solide) et SiO<sub>2</sub> (solide), soit des impuretés contenues dans la matière première (métalliques, carbone, bore et phosphore).

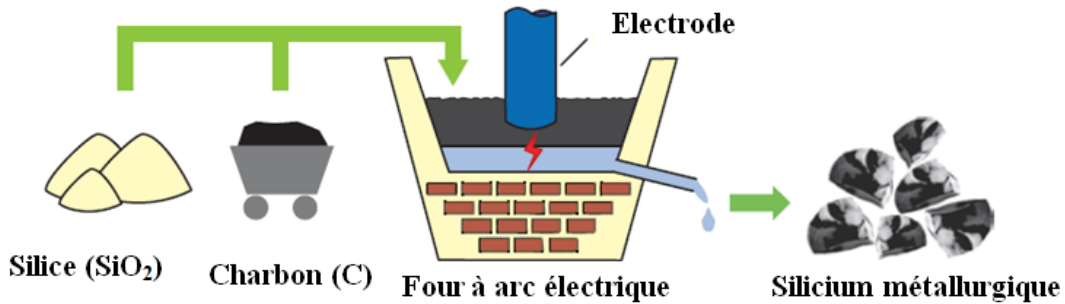


Figure III-2 : Production du silicium métallurgique

### III.1.2 Purification du silicium métallurgique

Néanmoins, cette pureté de 98,5 % n'est pas suffisante pour produire des composants électroniques. Pour les applications microélectroniques telles que les puces informatiques, la purification doit être élevée, de l'ordre de 99,9999999 % (9 N, en anglais 9 nine); c'est le silicium électronique (en anglais Electronic Grade : EG- Si). Par contre, une purification de l'ordre de 99,9999 % (6 N) est suffisante pour les applications photovoltaïques ; c'est le silicium solaire (en anglais Solar Grade : SG-Si).

#### III.1.2.1 Silicium électronique

La purification du silicium (MG-Si) en silicium (EG-Si) s'effectue par voie gazeuse en utilisant des gaz chlorés ([Ceccaroli & Lohne 2011](#)). Différents procédés existent comme le procédé « Union Carbide » ou le procédé « Ethyl Corporation », le plus connu étant le procédé « Siemens ». Ce dernier produit du silicium polycristallin très pur mais il est cependant très énergivore.

Le procédé commence par l'hydro-chloration du MG-Si catalysée par le cuivre dans un réacteur à lit fluidisé, pour obtenir le trichlorosilane ( $\text{SiHCl}_3$ ) suivant la réaction :



Cette réaction réduit les concentrations du bore (B) et du phosphore(P) à quelques ppb-a (partie par milliard atomique).

Le trichlorosilane vaporisé et injecté avec l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) dans le réacteur « Siemens », se décompose sur la surface de filaments chauffés à 1100 °C (Figure III-3) suivant la réaction :



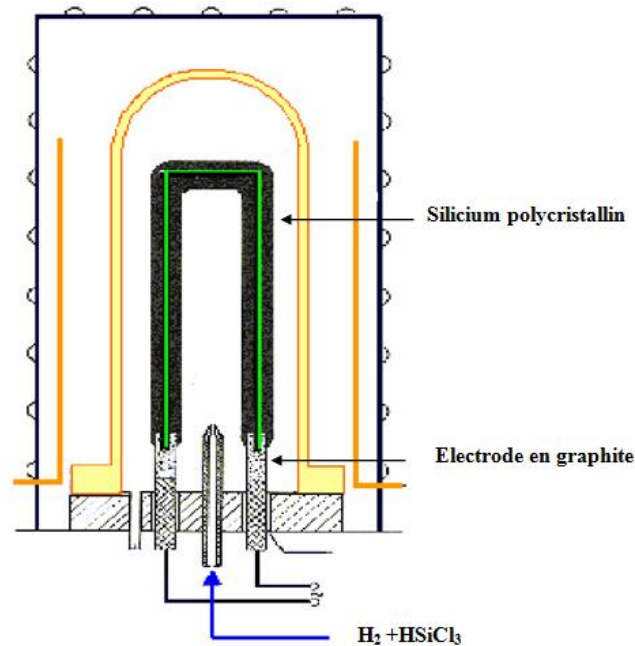


Figure III-3 : Réacteur « Siemens » ([Schutz-kuchly 2011](#))

Le silicium électronique obtenu est polycristallin d'une très haute pureté, il est ensuite cristallisé en lingots.

### III.1.2.2 Silicium solaire

Comme on l'a mentionné au début de ce chapitre, les applications photovoltaïques ne nécessitent pas un degré de purification élevé, d'autres procédés moins énergivores que celui de « Siemens » sont utilisés pour produire du silicium de grade solaire. Une de ces techniques est celui de « réacteur fluidisé », la production étant plus rapide et la consommation d'énergie est moins de 70% par rapport à celle de la procédé « Siemens » ([Alsema et al. 2006](#)). Néanmoins, le traitement est difficile et nécessite de grandes compétences. Dans ce procédé, le (MG-Si) est directement purifié en silicium métallurgique amélioré (en anglais Upgraded Metallurgical Grade: UMG-Si). Il existe plusieurs versions de ce procédé comme celui de la société « 6N-Silicon » qui consiste à fondre le (MG- Si) dans l'aluminium (Al) liquide à 800 °C au lieu de 1414 °C, ensuite, on laisse la masse fondue se refroidir pour former des cristaux de silicium. Les impuretés telles que le bore (B) ou le phosphore (P) sont prises par l'aluminium. Cependant, après refroidissement, le silicium est contaminé par ce dernier qui doit être extrait par d'autres étapes. La production de silicium UMG ne

nécessite qu'environ la moitié d'énergie du procédé « Siemens ». Cependant, la pureté souhaitée n'atteint pas encore celle obtenue par ce dernier ([Mertens 2014](#)).

### III.1.3 Cristallisation du silicium

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé Fusion de Zone « Float Zone » (FZ) qui produisent du silicium monocristallin.

#### III.1.3.1 Le procédé « Czochralski » (Cz)

Cette méthode qui a été inventée par Jan Czochralski (1916), consiste à fondre le silicium polycristallin dans un creuset en quartz à 1450 °C, des dopants (bore et phosphore) peuvent alors être ajoutés pour doper le silicium de type p ou de type n.

Un germe de silicium monocristallin avec une orientation cristallographique précise (100 par exemple) est placé en contact avec la surface du bain en fusion. Le silicium solidifié et tiré lentement vers le haut, prend l'orientation cristallographique du germe. (Figure III-4). Ensuite la vitesse de tirage est augmentée jusqu'à atteindre la vitesse spécifique à laquelle le cristal croît avec le diamètre désiré. Le lingot obtenu peut atteindre 30 cm de diamètre et 2 m de longueur. Pour le photovoltaïque, les diamètres finaux des cellules actuelles, obtenues à partir des lingots, se situent généralement entre 12.5 et 15.6 cm.

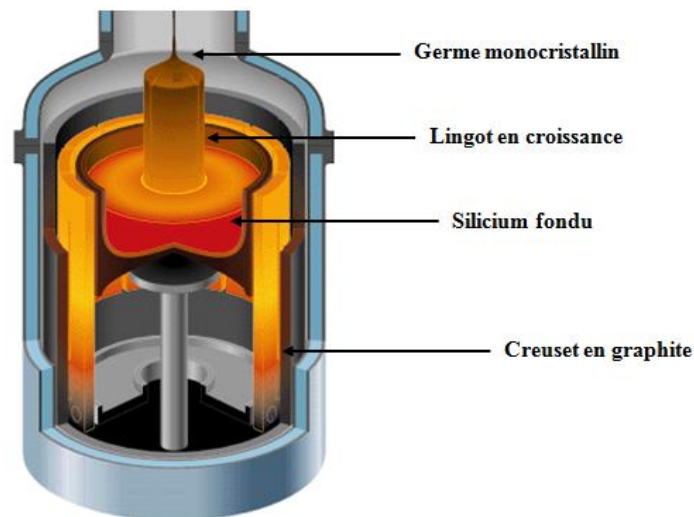


Figure III-4 : Procédé « Czochralski » ([Schutz-kuchly 2011](#))

### III.1.3.2 Le procédé de Fusion de Zone (FZ)

Cette technique consiste à passer plusieurs fois un barreau de silicium polycristallin dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium (Figure III-5). Un germe monocristallin est placé à l'extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot. Le silicium monocristallin se forme du bas vers le haut, de sorte que toutes les impuretés existantes sont entraînées par ségrégation vers le haut avec la zone fondue. Le silicium monocristallin obtenu est plus purifié que celle du procédé (Cz). Le procédé (FZ) est significativement plus cher que celui de (Cz), il n'est utilisé pour le photovoltaïque que dans des cas exceptionnels. Par exemple la cellule PERL (en anglais Passivated Emitter Rear Locally diffused) a été établie avec du silicium monocristallin utilisant le procédé (FZ) atteignant un rendement-laboratoire de 25% sur une surface de 4 cm<sup>2</sup> ([Saga 2010](#)).

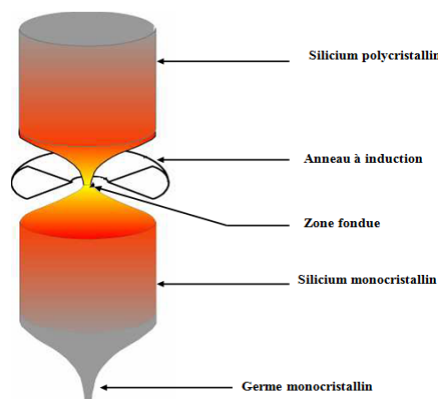


Figure III-5 : Procédé de Fusion de Zone ([Http://pveducation.org](http://pveducation.org) 2017c)

### III.1.3.3 Silicium multicristallin

Les lingots de silicium multicristallin (mc-Si) sont produits par solidification unidirectionnelle d'un bain de silicium en fusion. Des morceaux de silicium polycristallin sont versés dans un creuset en graphite puis fondus par un chauffage à induction. Ensuite, le creuset est laissé refroidir depuis son fond par une bague chauffante, lentement tirée vers le haut. En divers endroits sur le fond du creuset se forment de petits monocristaux qui poussent latéralement jusqu'à ce qu'ils se touchent. Ce processus de refroidissement vertical permet aux cristaux de pousser vers le haut dans une colonne (croissance colonnaire). Enfin, le bloc de silicium multicristallin est divisé en lingots sous forme de cubes de 5 ou 6 pouces (12.70 ou 15.24 cm) le long des bords (Figure III-6). En raison de sa qualité dégradée, le rendement de conversion

des cellules solaires fabriquées avec le silicium multicristallin est typiquement 2-3% inférieur à celui des cellules solaires monocristallines.

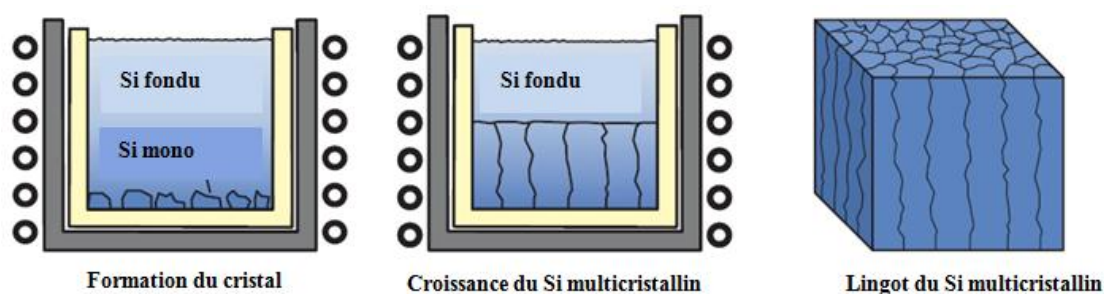


Figure III-6 : Production du silicium multicristallin

### III.1.4 Types de silicium cristallin

La distinction entre les différents types du silicium cristallin se fait selon la taille de leurs grains, particulièrement entre le silicium multicristallin avec celui polycristallin. Le Tableau III-2 présente avec précision ces types.

| Description            | Symbole          | Taille des grains     | Techniques de croissance         |
|------------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------|
| <b>Monocristallin</b>  | sc-Si            | > 10 cm               | Cz, FZ                           |
| <b>Multicristallin</b> | mc-Si            | 1 mm-10 cm            | Moulage, sphéral, feuille, ruban |
| <b>Polycristallin</b>  | pc-Si            | 1 $\mu\text{m}$ -1 mm | Dépôt chimique en phase vapeur   |
| <b>Microcristallin</b> | $\mu\text{c-Si}$ | < 1 $\mu\text{m}$     | Dépôt par plasma                 |

Tableau III-2 : Terminologie pour les différents types de silicium cristallin (c-Si) ([Basore 1994](#))

### III.1.5 Production des plaquettes (wafers)

Les lingots cristallisés, que ce soit pour le mono ou le multicristallin, sont ensuite découpés dans le sens de la hauteur pour former des minces plaquettes d'environ 150-300  $\mu\text{m}$  (Figure III-7). L'opération est faite par des scies à disques diamantés arrosés d'abrasif et d'eau pour éviter l'échauffement. Le procédé de découpe laisse des défauts considérables en surface. Par conséquent, les faces de la plaquette sont traitées par un polissage mécanique et chimique. Le sciage des plaquettes engendre une perte de matière d'environ 50 %.

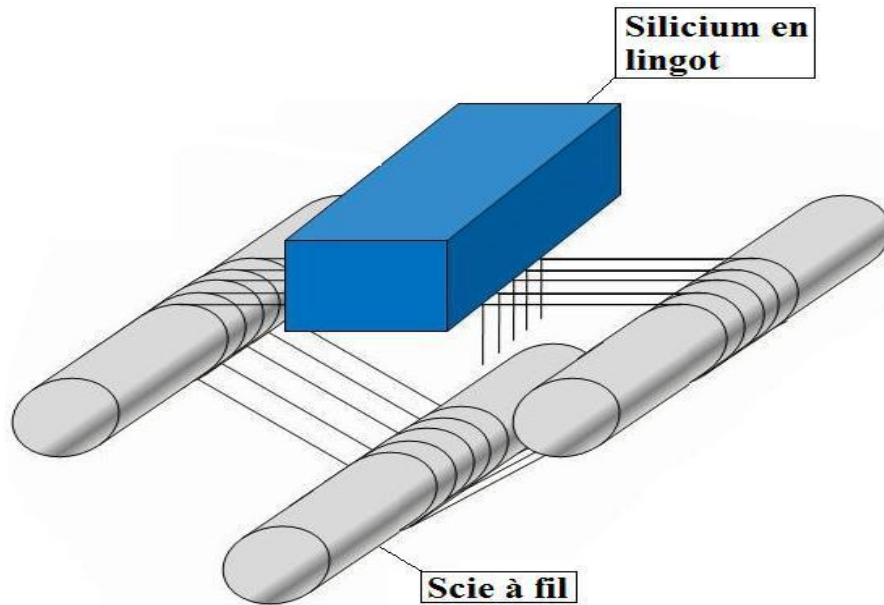


Figure III-7 : Découpage du lingot

## III.2 Elaboration de la cellule solaire en silicium monocristallin de type n

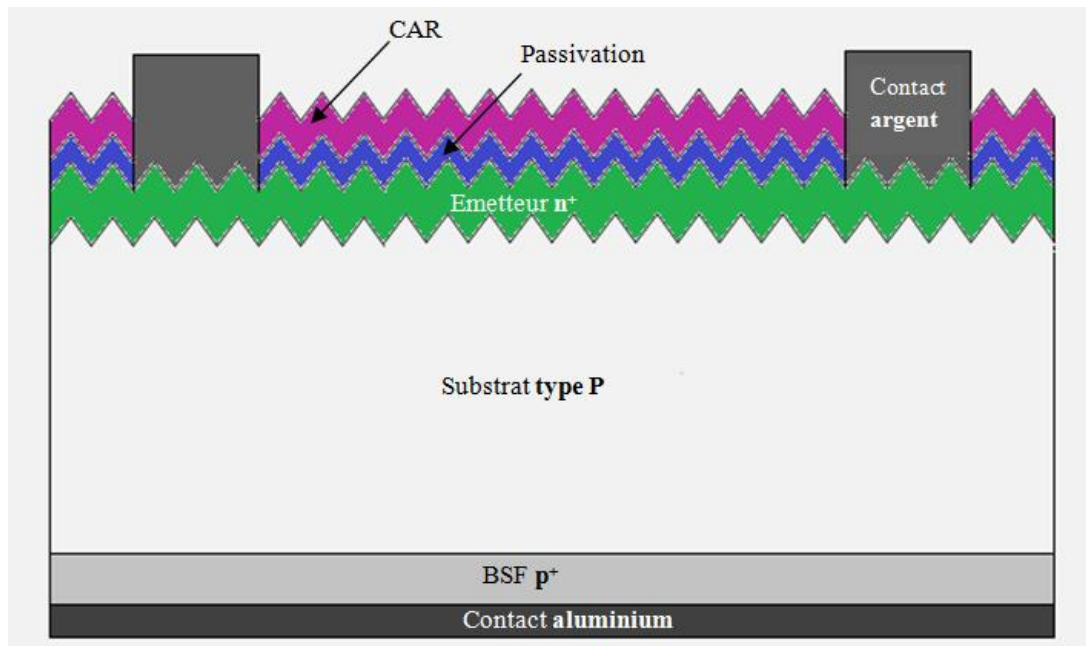
L'architecture et le procédé général de la fabrication d'une cellule photovoltaïque pour les deux types (p et n) sont analogues. Comme, on l'a énoncée dans l'introduction, la technologie de la fabrication des cellules « type p » est beaucoup plus maîtrisée contrairement à celle de « type n » qui est en cours de développement. Nous allons dans ce qui suit, décrire les techniques de ces deux procédés.

### III.2.1 Procédé standard de réalisation d'une cellule solaire en silicium monocristallin de type p

La figure (Figure III-8) présente la structure générale d'une cellule solaire à substrat de type p et qui est composée des éléments suivants :

- La base qui est un substrat de type p (en général, dopé au bore)
- L'émetteur  $n^+$  (en général, sur-dopé au phosphore) formant la jonction  $n^+p$  avec la base.
- La couche de passivation (en général d'oxyde de silicium  $SiO_2$ )
- La couche antireflet (CAR) en face avant (en nitrure de silicium  $SiN_x$ ), qui joue également un rôle supplémentaire de passivation.
- Le champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field), sur-dopé  $p^+$  (en général à l'aluminium).

- Les contacts en face avant (argent Ag) et en face arrière (aluminium Al) permettant la collecte des porteurs de charge et la mise en module.



**Figure III-8 : Structure générale d'une cellule solaire de type p**

Les substrats utilisés ont une résistivité variant en général de 0.5 à 2.0  $\Omega$ .cm, ce qui équivaut à une concentration en dopants de bore d'environ  $7.2 \times 10^{15}$  à  $3.2 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ .

Une étude plus détaillée sur le choix du substrat sera présentée dans la section III.2.2.1

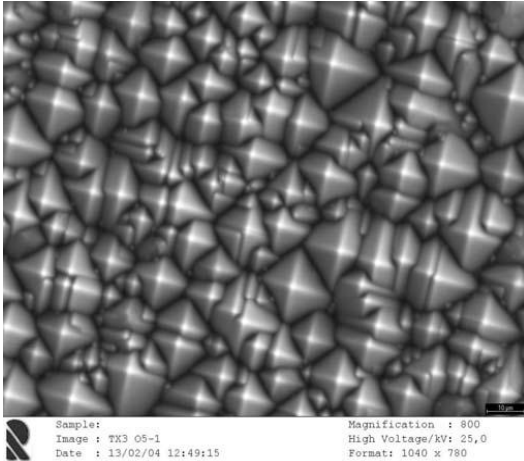
### III.2.1.1 Texturation (ou texturisation)

La rugosité de la surface du substrat favorise les chances pour la lumière de se réfléchir sur le matériau. La texturation alcaline ou acide permet d'éliminer cette zone perturbée d'un point de vue cristallographique. Cette attaque anisotrope des plans cristallographiques denses (111), (110) et (100) engendre des pyramides directes de 5 à 10  $\mu\text{m}$  de hauteur qui permettent des réflexions multiples et de piégeage de la lumière. Les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. Par conséquent, un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, le coefficient de réflexion est réduit de  $R$  à  $R^2$  (Figure III-10).

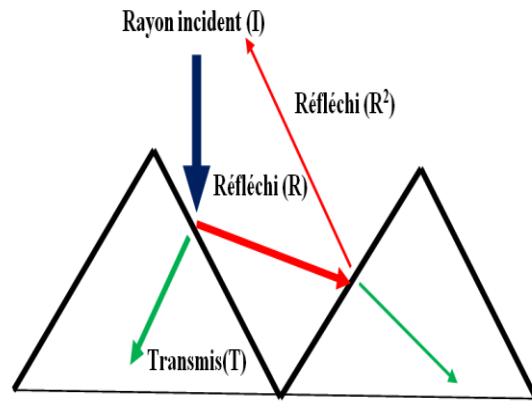
La texturation alcaline (exemple KOH) est bien adaptée au silicium monocristallin (Figure III-9), par contre, pour le silicium multicristallin, il sera préférable d'utiliser

une texturation acide (exemple HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) plus homogène où tous les grains de silicium seront texturés de manière identique.

La texturation est suivie d'un nettoyage à l'acide fluorhydrique (HF) afin de neutraliser l'effet de la réaction chimique, éliminer d'éventuelles traces d'impuretés et de désoxyder la surface du substrat.



**III-9: Texturisation alcaline**  
 (Tobías et al. 2011)



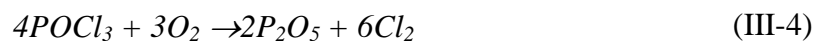
**Figure III-10 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée**

### III.2.1.2 Réalisation de la jonction

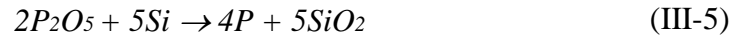
Plusieurs technologies sont utilisées pour réaliser la jonction PN à partir d'un substrat de type p (ou de type n), les plus connues sont la diffusion thermique et l'implantation ionique.

#### III.2.1.2.1 Réalisation de l'émetteur par diffusion thermique

Pour les cellules solaires, la réalisation de la jonction PN est effectuée généralement par diffusion thermique de phosphore (n<sup>+</sup>). Cette technologie est largement utilisée dans l'industrie car elle est plus maîtrisée et moins coûteuse, particulièrement pour les semi-conducteurs thermiquement stables comme le silicium. Le processus se fait en deux étapes ; le pré-dépôt qui consiste à la formation du PSG (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (Phosphorous Surface Glass) en surface du silicium à partir d'une source dopante (POCl<sub>3</sub>) entraînée par un gaz neutre tel que l'azote (N<sub>2</sub>) (Figure III-11). La réaction chimique est réalisée à faible pression et à des températures comprises entre 800 et 900 °C:



La deuxième étape est la redistribution (en anglais : drive in) permet la diffusion du phosphore de l'oxyde vers le substrat de silicium. Cette étape est réalisée sous flux de N<sub>2</sub>. La réaction chimique de cette étape est :



La diffusion de phosphore permet également de purifier le volume par effet « getter ». La couche dopée au phosphore piège les impuretés indésirables comme le fer, le cuivre et le nickel. L'effet getter a pour effet de retirer ces impuretés dans des zones peu actives où elles ne pourront pas avoir d'influence sur le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

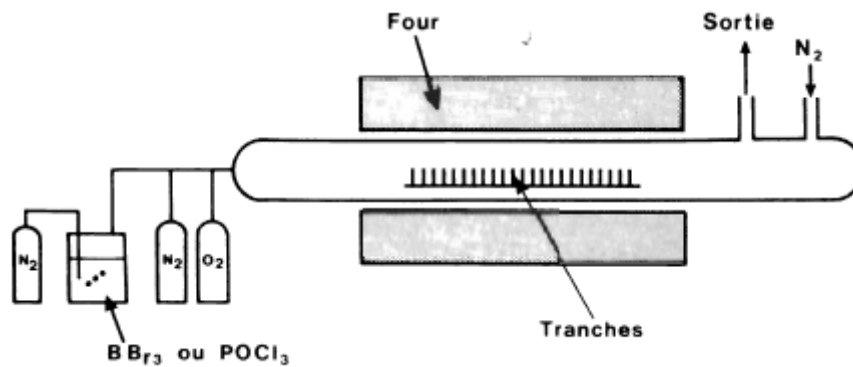


Figure III-11 : Schéma de principe de la diffusion thermique (Castagné & Vapaille 1987)

La diffusion thermique des impuretés est régie par la première loi de Fick donnée par la relation :

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{III-6})$$

Le flux d'impuretés  $F$  (cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) est proportionnel au gradient de concentration  $C$  (cm<sup>-3</sup>), la diffusion a lieu des zones à forte concentration vers les zones à faibles concentrations. Le coefficient de diffusion  $D$  (cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) s'exprime en fonction de la température  $T$  (°K) par la relation suivante :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (\text{III-7})$$

$\Delta E$  est l'énergie d'activation du phénomène de diffusion.

Le Tableau III-3 donne les valeurs typiques de ces coefficients pour les éléments dopants les plus utilisés dans le silicium.

| Dopant dans Si                            | Phosphore (P) | Bore (B) | Arsenic (As) | Antimoine (Sb) |
|---|---------------|----------|--------------|----------------|
| $D_0$ (cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0.76          | 3.85     | 23           | 0.21           |
| $\Delta E$ (eV)                           | 3.46          | 3.66     | 4.1          | 3.65           |

Tableau III-3 : Valeurs typiques du coefficient de diffusion et d'énergie d'activation pour les dopants de silicium les plus fréquents (Bonnaud et al. 2003)

La deuxième loi de Fick permet de connaître l'évolution temporelle de la concentration d'espèces diffusantes en un point donné. L'équation de continuité de la diffusion s'exprime alors :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{III-8})$$

Puisque la source dopante est considérée comme constante pendant la diffusion et en tenant compte des conditions initiales et aux limites de la technique, la solution de cette équation différentielle donne le profil de dopage (Figure III-12) qui s'exprime par la relation suivante :

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (\text{III-9})$$

La fonction (*erfc*) est appelée fonction erreur complémentaire définie par :

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt \quad (\text{III-10})$$

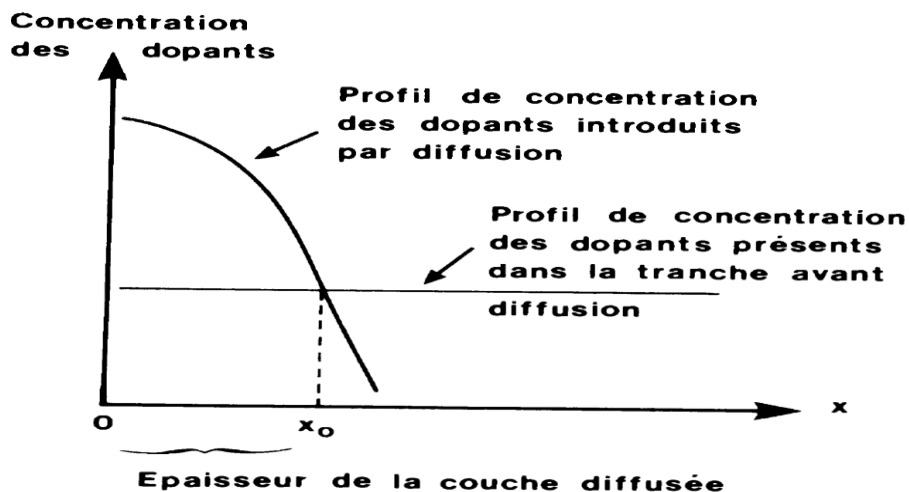


Figure III-12 : Profil du dopage par diffusion thermique

### III.2.1.2.2 Réalisation de l'émetteur par implantation ionique

Le procédé de l'implantation ionique est utilisé pour les semi-conducteurs thermiquement instables comme le GaAs. Mais, ces dernières années, cette technique

est utilisée aussi pour le silicium, particulièrement pour les cellules à substrat de type n ([ITRPV 2016](#)).

L'implantation ionique a de nombreux avantages par rapport à la diffusion parmi eux :

- Le bon contrôle de la dose du dopage, par conséquent, le profil de dopage est bien ajusté,
- Les défauts sont minimisés après recuit de la zone amorphisée,
- Une grande vitesse de production,
- Le procédé s'effectue à basses températures.

Dans cette technique, la surface du substrat est bombardée avec des ions de l'impureté de dopage, accélérés sous une énergie de l'ordre de 100 keV avec des doses surfaciques implantées de l'ordre de  $10^{13}$ -  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup>.

Le procédé est réalisé par un dispositif appelé « implanteur » (Figure III-13). Après implantation, un recuit est nécessaire pour guérir les défauts et assurer la redistribution correcte des dopants.

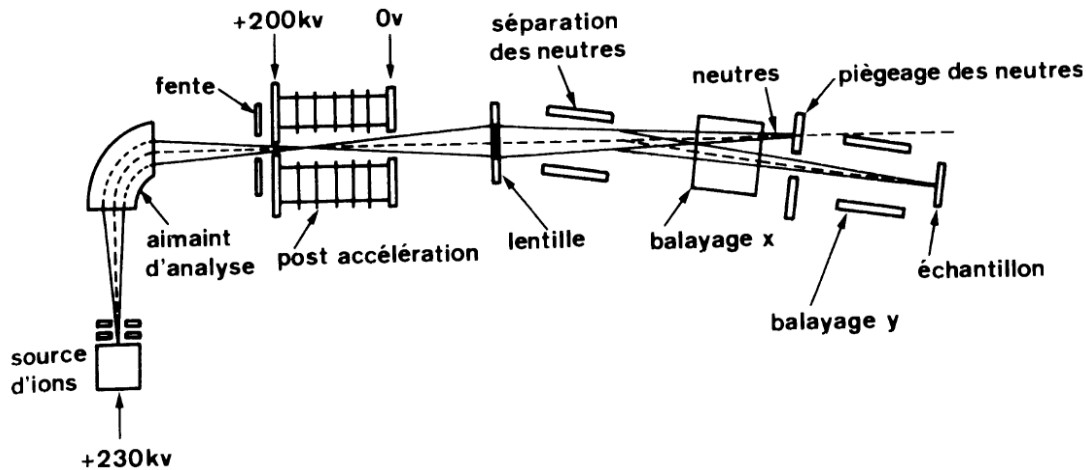


Figure III-13 : Schéma de principe d'un implanteur ionique ([Castagné & Vapaille 1987](#))

Le profil de concentration par unité de volume des impuretés implantées est gaussien (Figure III-14) :

$$C(x) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right) \quad (\text{III-11})$$

$\phi$  est la dose implantée,  $R_p$  est la profondeur du maximum de concentration et  $\Delta R_p$  l'écart type.

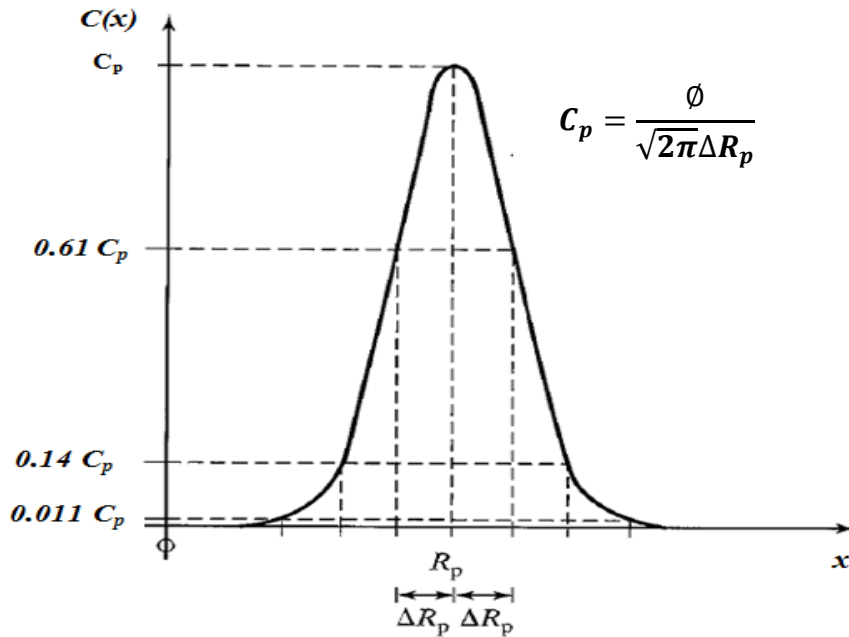


Figure III-14 : Profil de dopage par implantation ionique

### III.2.1.3 Dépôt de la couche antireflet (CAR)

Afin de diminuer davantage la réflectivité, l'utilisation d'une couche antireflet s'impose. Le choix d'une couche antireflet d'indice de réfraction  $n_c$  et d'épaisseur  $d_c$  est régi par les lois de l'optique géométrique (Figure III-15). Les valeurs optimales de ces deux paramètres sont données par les relations suivantes :

$$n_c = \sqrt{n_0 n_{si}} \quad (III-12) \quad d_c = \frac{(2m + 1)\lambda}{4n_c} \quad (III-13)$$

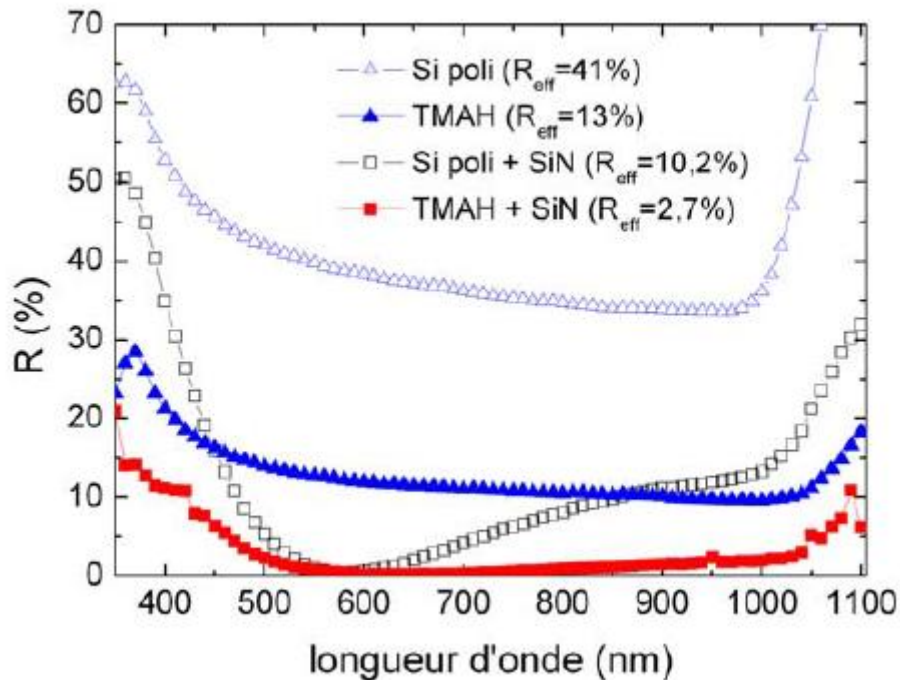
$n_0$  et  $n_{si}$  sont respectivement les indices de réfraction du milieu extérieur (verre ou air) et le silicium.  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement et  $m$ , un nombre entier.

Pour les applications photovoltaïques, ces deux paramètres sont choisis à la longueur d'onde de 600 nm (maximum d'émission du soleil et pénétration acceptable des photons pour le silicium). Par conséquent :

$$n_c \approx 2 \quad \text{et} \quad d_c \approx 75 \text{ nm}$$

Dans l'industrie du photovoltaïque, les matériaux présentant des caractéristiques appropriées pour réaliser une couche antireflet sont le dioxyde de titane ( $TiO_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $SiN_x:H$ ). Ce dernier est largement utilisé dans le domaine au vu de ses propriétés supplémentaires de passivation en surface et en

volume, ainsi que de son faible coefficient d'absorption. Son indice de réfraction varie entre 1.8 et 2.3 ([Duerinckx & Szlufcik 2002](#)).

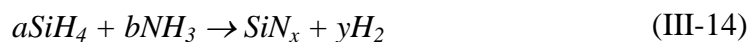


**Figure III-15 : Exemple de Réflectivité mesurée avant et après texturisation et dépôt de CAR**  
(Lelièvre 2007)

La couche du nitrure de silicium est couramment élaborée par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma ([Hezel & Schörner 1981](#)) (PECVD°en anglais : Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition) (Figure III-16). Un plasma est un milieu gazeux ionisé, caractérisé par des densités d'espèces neutres, d'ions et d'électrons. Le processus d'un tel dépôt est élaboré en deux étapes :

- Production dans le plasma et son voisinage d'espèces réactives nécessaires au dépôt.
- Mécanismes de surface entraînant le dépôt proprement dit.

Les gaz réactants sont du silane ( $SiH_4$ ) et de l'ammoniac ( $NH_3$ ). La réaction de dépôt est la suivante :



Après dissociation du  $SiH_4$  et du  $NH_3$ , une couche de  $SiN_x$  est formée à la surface de la jonction.

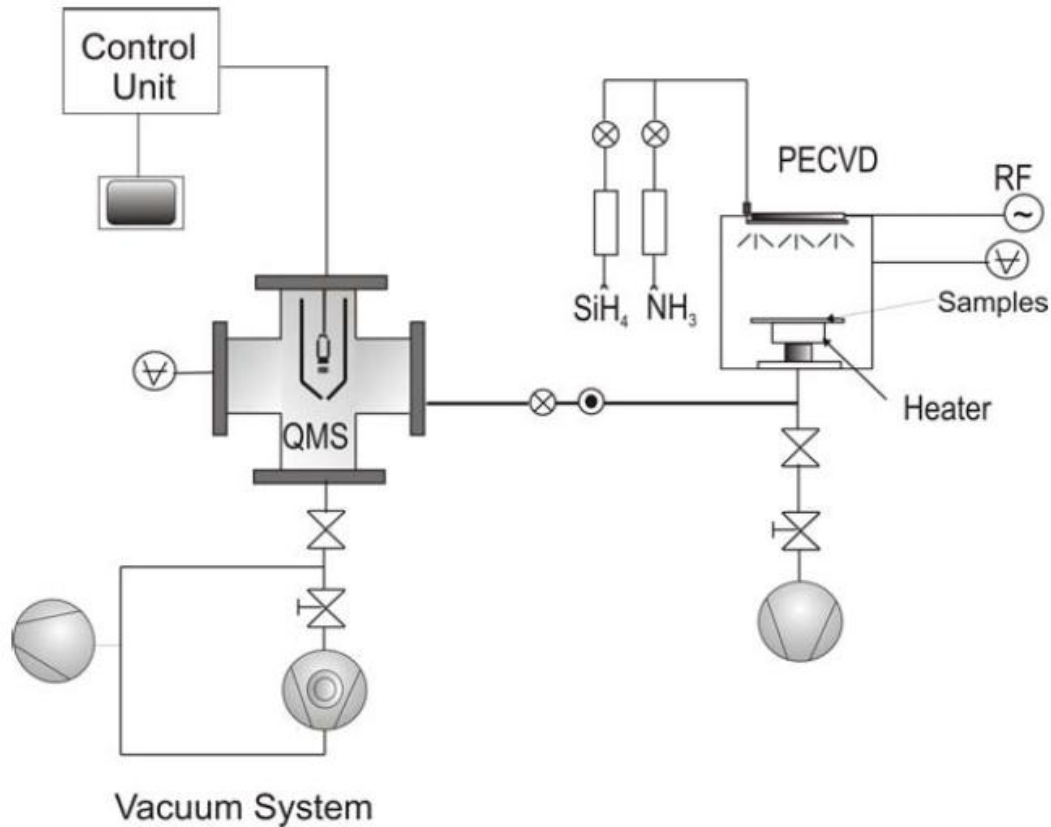


Figure III-16 : Le processus PECVD (Romero et al. 2010)

#### III.2.1.4 Passivation

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes électriques dues à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Les principales couches de passivation utilisées couramment en photovoltaïque sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) par oxydation thermique, le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ) par CVD (ou PCVD) et l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le ( $\text{SiO}_2$ ) et ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ) sont utilisés pour passiver les émetteurs  $\text{n}^+$ , le ( $\text{SiO}_2$ ) et ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sont adaptés aux émetteurs  $\text{p}^+$  (section III.2.2.3).

Pour le nitrure de silicium hydrogéné, les atomes d'hydrogène présents dans la couche de  $\text{SiN}_x$  et provenant de la réaction (III-14) diffusent sur quelques microns dans la jonction pendant l'étape de recuit des métallisations (Sheoran et al. 2008). Ces atomes d'hydrogène vont passiver, d'une part les liaisons pendantes à l'interface  $\text{SiN}_x/\text{Si}$ , et d'autre part, les défauts et les impuretés présents dans le volume du semi-conducteur.

### III.2.1.5 Le champ de surface arrière (BSF)

Il s'agit d'une passivation par un gradient de dopage (Figure III-17). Le BSF consiste en une couche fortement dopée de la même nature que le dopage de la base sur la face arrière de la cellule conduisant à une jonction  $p^+/p$  (Low-High Junction) pour un substrat de type p. La barrière de potentiel ainsi créée par cette jonction conduit à un confinement des porteurs minoritaires (électrons) dans la base afin de les maintenir éloignés du contact arrière et éviter leur recombinaison (vitesse de recombinaison élevée de la face arrière). Comme il sera décrit dans la section suivante, la couche BSF est élaborée durant le recuit du contact arrière.

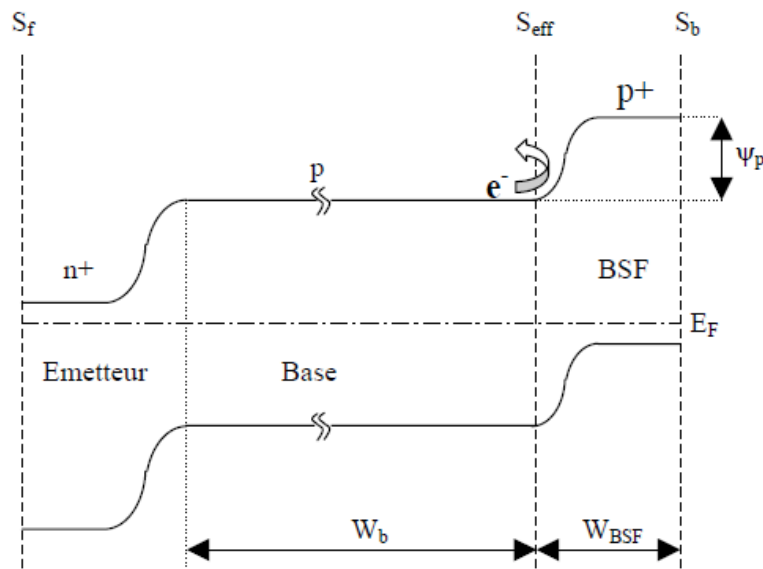


Figure III-17 : Diagramme de bandes d'une cellule solaire illustrant la passivation par la couche BSF

### III.2.1.6 Métallisation

Actuellement, la méthode la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque est la sérigraphie ([ITRPV 2016](#)). En effet, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son bas coût, la sérigraphie de pâte à base d'argent (Ag) pour la face avant et d'aluminium (Al) pour la face arrière est utilisée pour plus de 85% de la production mondiale. Avec le développement de nouvelles structures de cellules à haut rendement, les techniques de métallisation sont ainsi développées dans le but de limiter les coûts de production en améliorant le rendement de conversion.

Le principe de la sérigraphie est de déposer une pâte métallique au travers d'un masque afin de réaliser le motif de grille (Ag) constitué de lignes fines appelées doigts

(fingers en anglais), reliés par des busbarres plus larges (Busbars en anglais). La face arrière est métallisée pleine plaque avec une pâte à base d'aluminium ([Schubert et al. 2006](#)).

Le procédé est réalisé en trois étapes (Figure III-18) :

- Les ouvertures de l'écran sont remplies de la pâte,
- La raclette amène l'écran en contact intime avec le substrat et presse la pâte à travers les ouvertures,
- Pendant que l'écran est soulevé, la pâte est libérée de l'écran et collé au substrat.

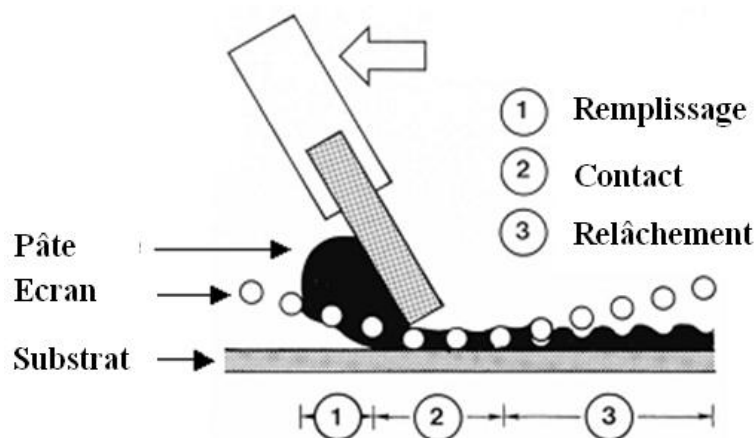


Figure III-18 : Formation d'un contact sérigraphié

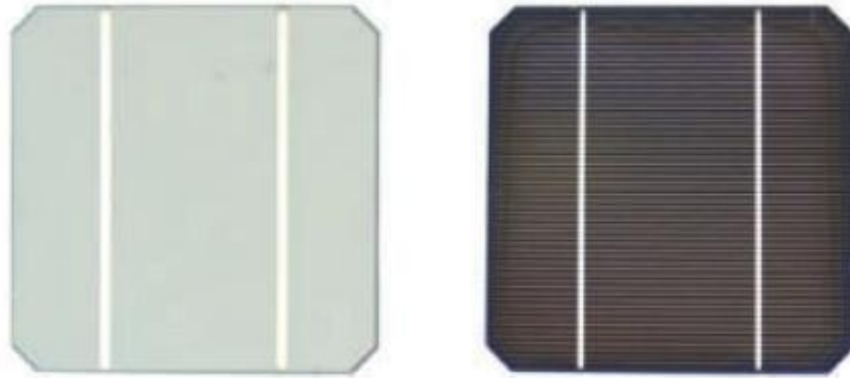
La pâte de sérigraphie est constituée de particules de métaux actifs (de 1 à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre), de fritte de verre ( $\text{B}_2\text{O}_3$  et  $\text{PbO}$ ), de solvants et de liants organiques ([Thuillier 2001](#)). Lors du recuit, la fritte de verre, qui fond à 700 °C, a pour but de percer la couche de  $\text{SiN}_x$  en face avant, d'améliorer l'accroche de la pâte avec l'émetteur et de favoriser le frittage des particules métalliques afin de réduire la résistance de contact. Le rôle des solvants est de fluidifier le mélange afin de faciliter la sérigraphie. La cohésion entre les différents éléments est assurée par les liants organiques.

Il existe d'autres technologies qui sont en cours de développement, la plus prometteuse est la métallisation par placage (en anglais : plating) et par électroplacage (en anglais : electroplating) pouvant atteindre un marché de 20 % d'ici 2026 ([ITRPV 2016](#)).

Le placage est une technique de métallisation permettant le dépôt d'ions métalliques à partir d'une solution chimique sur une surface. Pour activer le placage,

L'électroplacage nécessite l'ajout des contacts physiques (anode et cathode). Il consiste à immerger l'anode dans la solution et appliquer un potentiel externe générant un courant électrique entre l'anode et la cathode. À la cathode, le métal est réduit et à l'anode, le métal est oxydé. Pour l'application d'une cellule solaire, un film mince de métal doit être déposé sur la surface à métalliser avant le placage ([Lennon et al. 2013](#)).

La métallisation de la face avant est une grille d'argent sous forme de peigne, la face arrière est pleine plaque d'aluminium (Figure III-19).



**Figure III-19 : Exemple de la géométrie de la métallisation faces avant (à droite) et arrière (à gauche)**

Le recuit de la face arrière entraîne la formation de la couche  $p^+$  dopée par l'aluminium créant un champ électrique arrière (BSF) assurant une bonne passivation à l'arrière. Ce champ consiste à créer une barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF ( $p^+/p$ ) qui tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base sur la face arrière de la cellule. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

### **III.2.2 Fabrication des cellules photovoltaïques sur substrat de silicium de type n**

L'architecture de cette structure est analogue à celle de la cellule standard sur silicium de type p. L'émetteur est formé par un surdopage  $p^+$  au bore en face avant et le BSF est formé par surdopage  $n^+$  au phosphore en face arrière (Figure III-20). Le procédé de fabrication est cependant plus énergivore que le procédé standard, puisque deux

diffusions gazeuses à haute température :  $\text{BCl}_3$  et  $\text{POCl}_3$  sont nécessaires pour former l'émetteur et le BSF. Des procédés simplifiés existent, comme la co-diffusion ([V. D. Mihailtchi et al. 2008](#)) où l'émetteur et le BSF sont créés simultanément en une seule étape de diffusion gazeuse. La passivation de l'émetteur au bore nécessite un oxyde thermique à haute température comme l'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ([Hoex et al. 2007](#)). Dans ce qui suit, on va détailler de manière un peu approfondie chaque étape de réalisation de ce type de cellules.

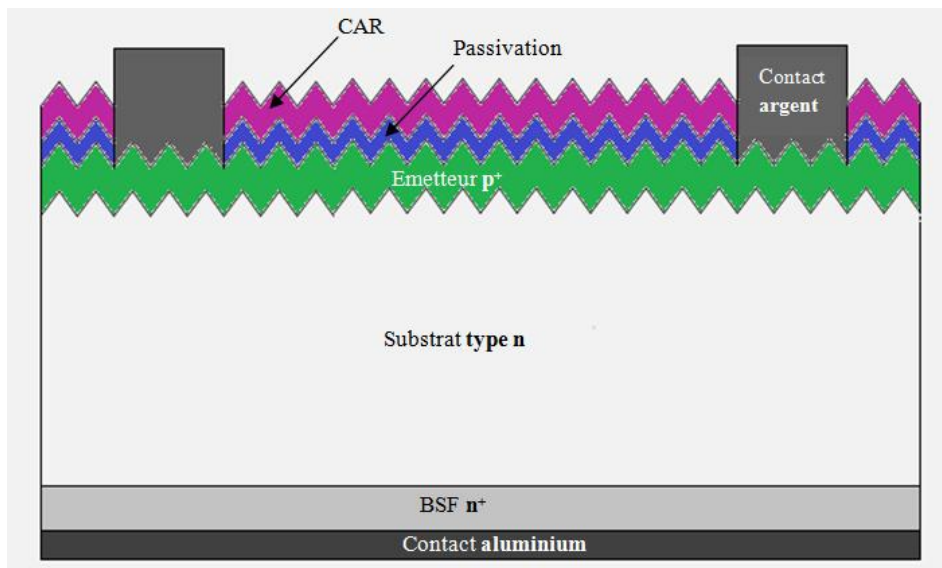


Figure III-20 : Structure générale d'une cellule solaire de type n

### III.2.2.1 Réalisation et étude du substrat

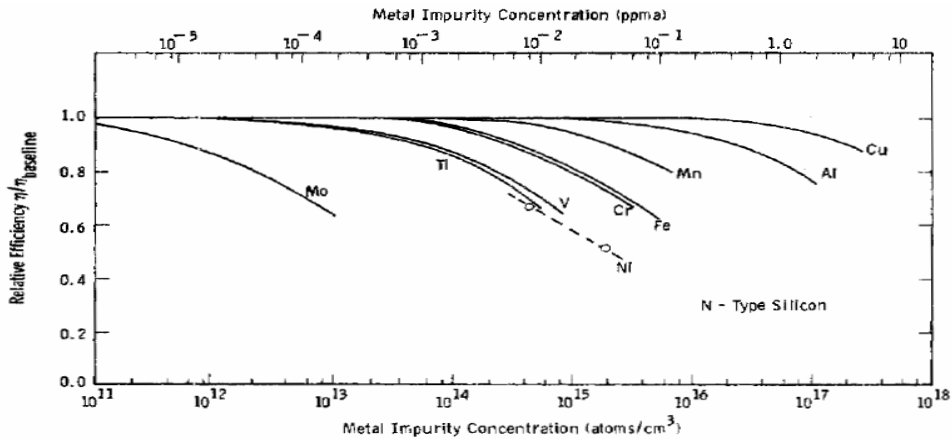
Le substrat du silicium cristallin dopé n, a des avantages de taille par rapport à celui dopé p et qui sont énumérés ci-après :

- Une faible sensibilité à la plupart des impuretés métalliques,
- Une faible variation de la durée de vie avec le niveau d'injection,
- Une faible dégradation des performances de la cellule solaire sous éclairnement (Light Induced Degradation : LID) due à l'activation de complexes Bore-Oxygène (BO).

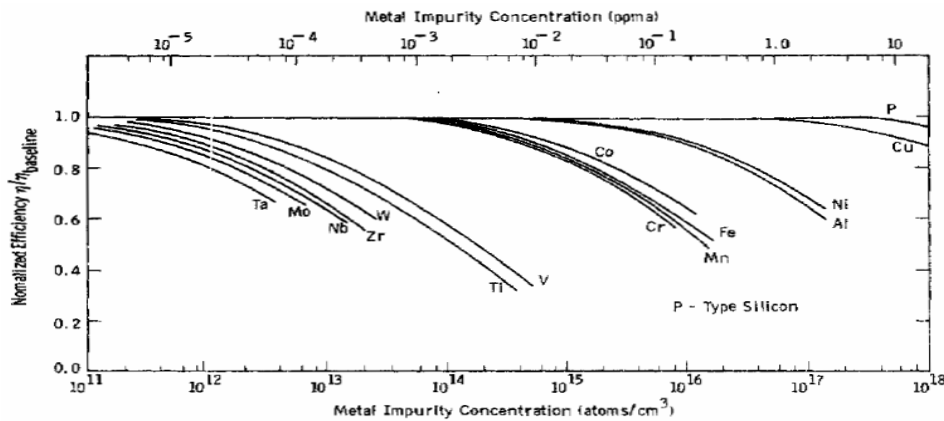
#### III.2.2.1.1 Sensibilité aux impuretés métalliques

Le silicium de qualité solaire présente de plus grandes concentrations en impuretés que le silicium purifié par voie électronique. Les impuretés métalliques introduisent

en général des niveaux d'énergie profonds dans la bande interdite du silicium. Elles avantagent ainsi le mécanisme de recombinaison SRH assisté par des pièges (voir section II.2.4.2.3). Plusieurs études ont été faites à ce sujet. En 1980, [\(Davis et al. 1980\)](#) avaient étudié l'influence de différentes impuretés métalliques sur le rendement de conversion de cellules solaires monocristallines à base de silicium de type n et de type p (Figure III-21) et (Figure III-22).



**Figure III-21 : Influence des impuretés métalliques sur le rendement de conversion normalisé pour le silicium de type n de 1.5 Ω.cm. [\(Davis et al. 1980\)](#)**



**Figure III-22 : Influence des impuretés métalliques sur le rendement de conversion normalisé pour le silicium de type p de 4.0 Ω.cm. [\(Davis et al. 1980\)](#)**

Les deux figures montrent l'effet indésirable des impuretés métalliques comme le fer (Fe), le chrome (Cr), le titane (Ti), le vanadium (V), le molybdène (Mo) et d'autres sur le rendement de conversion pour les deux types de substrat (type n et type p). Mais, cet effet est moins important pour les cellules à substrat de type n.

[\(Macdonald & Geerligs 2004\)](#) ont fait une étude dans cette optique en calculant le ratio de section efficace de capture des électrons par rapport aux trous pour différentes impuretés métalliques ( $k = \sigma_n / \sigma_p$ ) (Figure III-23).

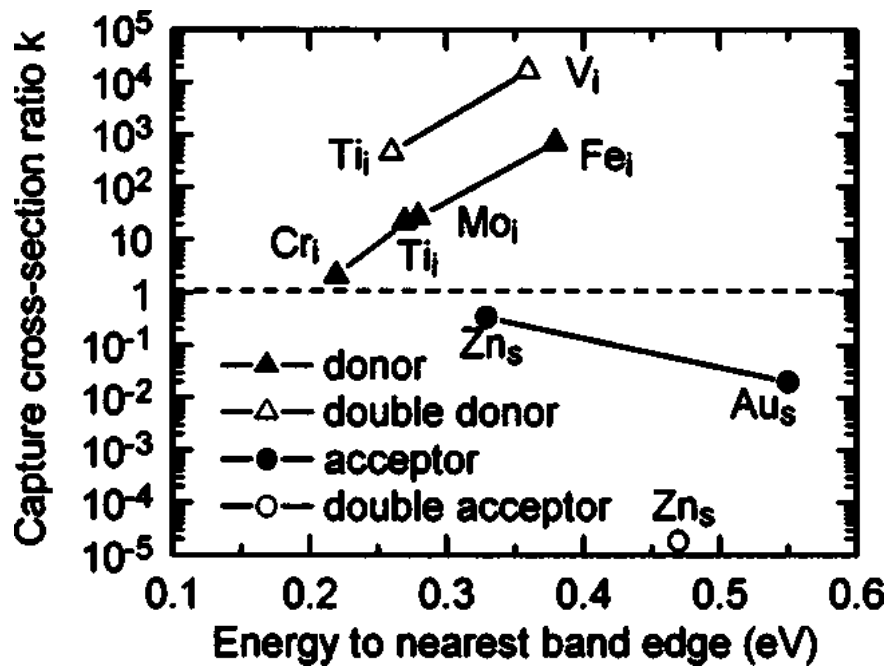


Figure III-23 : Ration de section efficace de capture des électrons par rapport aux trous pour différentes impuretés métalliques ([Macdonald & Geerligs 2004](#))

Les éléments métalliques (Fe, Cr, Ti, V, Mo) des groupes de la classification périodique, inférieurs ou égaux à 8 viennent en général se placer en position interstitielle et introduisent des niveaux d'énergie donneurs dans la bande interdite du silicium, ils ont un grand ratio  $k$ , c'est-à-dire une section efficace de capture des électrons grande par rapport à celle des trous. Par conséquent, en régime de faible injection et selon la relation (II-54) vu en section (II.2.4.2.3), la durée de vie SRH des porteurs minoritaires sera bien supérieure dans le silicium de type n que dans le silicium de type p, conduisant à des rendements de conversion élevés comme l'a démontrée l'étude de ([Davis et al. 1980](#)). En conclusion, le silicium cristallin de type n est beaucoup moins sensible aux impuretés métalliques.

### III.2.2.1.2 Dégradation sous éclairage (Light Induced Degradation : LID)

Le phénomène de LID est dû à l'association sous illumination de complexes recombinants associant un dimère d'oxygène interstitiel ( $O_{i2}$ ) et un atome de bore (en position substitutionnelle ( $B_s$ ) ([Schmidt & Bothe 2004](#)) ou interstitielle ( $B_i$ ) ([Voronkov & Falster 2010](#)) formant le complexe ( $BO_{i2}$ ), réduisant ainsi la durée de vie des porteurs de charge dans le matériau. Ce phénomène de LID a été analysé par

de nombreux chercheurs, dont la plupart de ces recherches sont basées sur du silicium de type p ([Schmidt et al. 1997](#)) ([Glunz et al. 2001](#)) ([Palmer et al. 2007](#)).

Les premières études de ce phénomène ont été effectuées par ([Fischer & Pschunder 1973](#)). Ils ont étudié la variation des performances de cellules solaires à substrat en silicium dopé au bore (type p) avec le procédé Cz. La (Figure III-24) montre l'évolution de la puissance de sortie  $P_m$ , du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  de la cellule solaire sous illumination. Les paramètres initiaux ont été mesurés directement après la fabrication de la cellule et sont caractérisés par un état intermédiaire marqué X. Après seulement une courte période d'exposition à la lumière, ces trois paramètres se dégradent jusqu'à un niveau stable B. Il est intéressant de noter que les performances de la cellule peuvent être complètement récupérées par un traitement de recuit à basse température à 200 °C (état A). Les mesures par la technique de PCD (Photoconductance decay method) (voir section III.4.2), ont montré que l'effet observé est dû à une diminution de la durée de vie des porteurs variant entre deux valeurs correspondant à deux états différents, A et B, du matériau. L'état A est associé à une durée de vie élevée et nécessite un recuit à basse température pour être activé, tandis que l'état B est associé à une faible durée de vie provoqué par l'illumination. Les auteurs ont constaté que les deux niveaux ont tendance à se saturer et peuvent être modifiés de façon réversible en appliquant le traitement approprié.

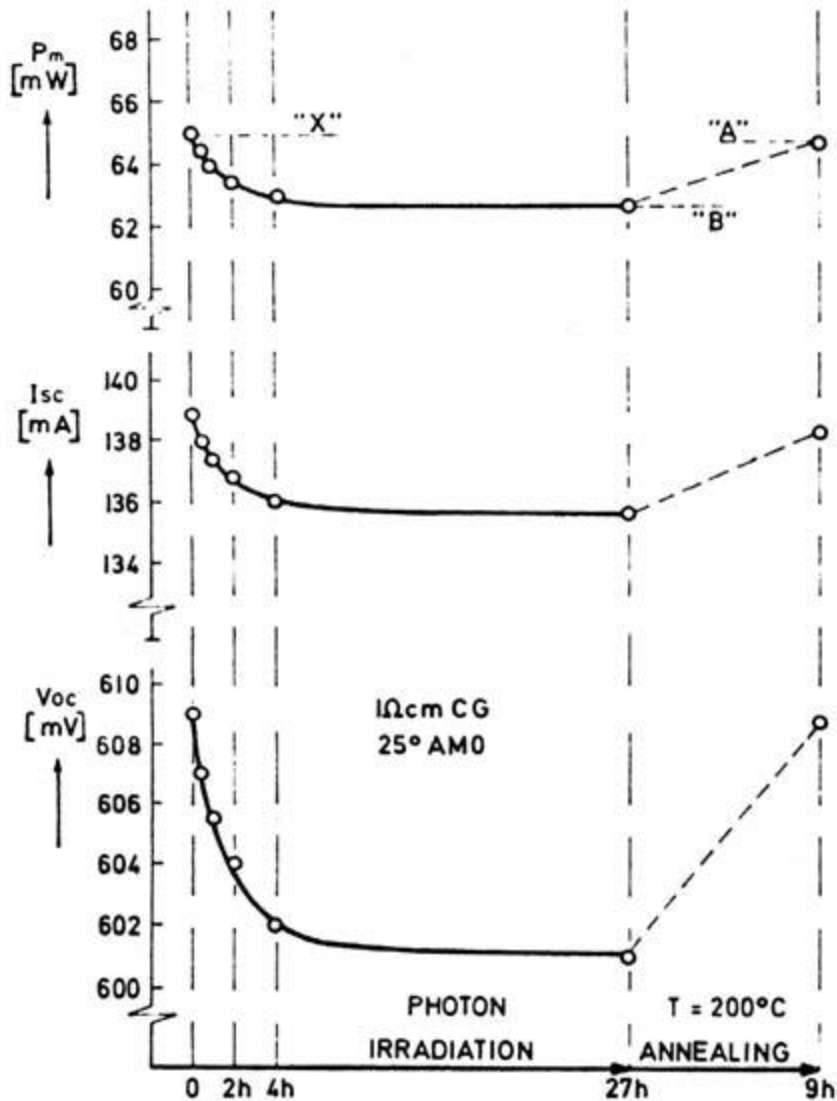


Figure III-24 :Dégradation sous éclairage (Light Induced Degradation : LID) dans les substrats monocristallins en silicium de type p (Fischer & Pschunder 1973)

D'autre part, (Lim et al. 2011) ont étudié ce phénomène sur des substrats en silicium monocristallin de type n (procédé Cz) et ont montré la stabilité de la durée de vie durant l'illumination.

Dans la (Figure III-25), il est bien constaté que la durée de vie des porteurs d'un échantillon de substrats de type n (Cz-Si de 1,9 Ω cm) dopé uniquement avec du phosphore reste parfaitement stable sous éclairage et à température ambiante. Tandis que, la durée de vie des porteurs d'un échantillon de substrats de type n dopé simultanément au bore et au phosphore diminue significativement. Cette figure

montre aussi l'ordre de grandeur de la durée de vie des porteurs de substrats de type n qui dépasse la milliseconde.

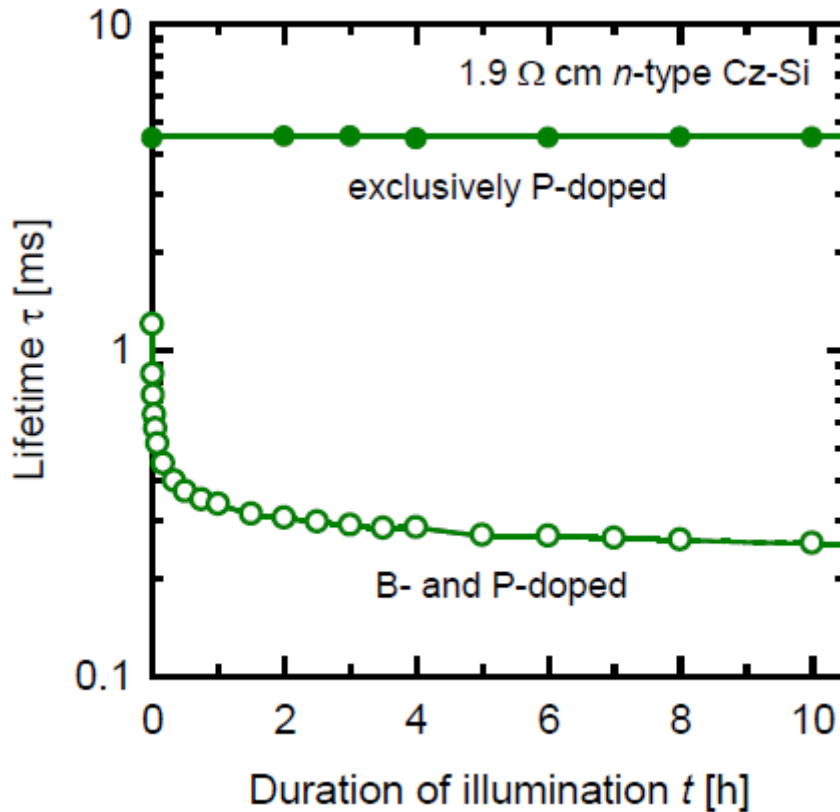


Figure III-25 Phénomène de LID dans les substrats monocristallins en silicium de type n  
(Lim et al. 2011)

En conclusion, les substrats de type n ont une grande durée de vie des porteurs de l'ordre de millisecondes, en plus, sous illumination, cette durée est stable dans le temps. Ces caractéristiques importantes de la durée de vie influent positivement sur le rendement de la conversion des cellules solaires à substrat de type n.

### III.2.2.2 Réalisation de l'émetteur dopé au bore

La formation de l'émetteur en bore est réalisée par diffusion du bore à haute température à l'aide de composés gazeux  $BBr_3$  ou  $BCl_3$ . Le procédé est analogue à celui de la diffusion du phosphore, mais, l'opération est réalisée à des températures supérieures à 900 °C, contrairement à la diffusion phosphore qui est réalisée aux alentours de 850°C (Figure III-11). Cette augmentation de la température de la diffusion bore par rapport à la diffusion phosphore est nécessaire pour obtenir des dopages d'émetteurs similaires, puisque le coefficient de diffusion ( $D_0$ ) du bore est de 0.76  $cm^2/s$  contre 3.85  $cm^2/s$  pour le phosphore (section III.2.1.2.1).

### III.2.2.3 Passivation de l'émetteur

La passivation de surface, traditionnellement effectuée avec du  $\text{SiN}_x$  pour le procédé standard n'est pas adapté à une surface dopée  $p^+$ . Par conséquent, l'ajout d'une couche supplémentaire de passivation est nécessaire. En effet, (Petres et al. 2005). ont montré que la passivation d'un émetteur dopé  $p^+$  par du  $\text{SiN}_x$  engendre une passivation médiocre. Cela s'explique par le fait que le  $\text{SiN}_x$  présente une densité importante de charges fixes positives ( $Q=2.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) engendrant une couche d'inversion négative sous le  $\text{SiN}_x$  et favorisant ainsi la recombinaison des trous (Dauwe et al. 2002). Les travaux de (Petres et al. 2005). montrent une diminution du  $V_{co}$  induit de 596 mV à 575 mV en utilisant le  $\text{SiN}_x$  pour passiver une surface dopée  $p^+$  en comparaison à une surface non dopée. Il a fait preuve que l'utilisation de  $\text{SiO}_2$  (ou de  $\text{SiC}$ ) est mieux adapté pour passiver une surface dopée  $p^+$ .

D'autres méthodes ont été utilisées comme celle de (Valentin D. Mihailetchi et al. 2008) avec la couche de NAOS (Nitric Acid Oxydation of Silicon) permettant d'augmenter le rendement de 2% absolu. Ces dernières années, les études faites sur l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ont démontré son excellente qualité de passivation. En effet, la couche de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  déposée par PALD (Plasma-assisted Atomic Layer Deposition), présente une densité élevée de charges fixes négatives ( $Q \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ). Avec cette technique de passivation, (Hoex et al. 2007) ont obtenu des courants de saturation d'émetteur très faibles de l'ordre de 10 fA/cm<sup>2</sup> et de 30 fA/cm<sup>2</sup> sur des émetteurs dopés  $p^+$  de résistances carrées supérieures respectivement à 100  $\Omega/\square$  et 54  $\Omega/\square$  (Figure III-26).

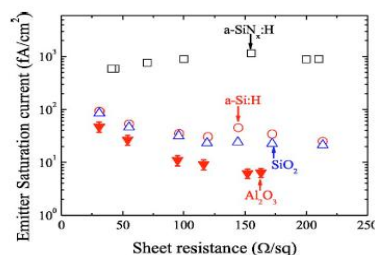


Figure III-26 : Courant de saturation en fonction de la résistance carrée de l'émetteur dopé au bore (Hoex et al. 2007)

## III.3 Cellule solaire à émetteur sélectif

De nouvelles architectures permettant d'améliorer les performances des cellules solaires au silicium cristallin sont aujourd'hui activement recherchées. Parmi celles-

ci, la cellule à «émetteur sélectif » apparaît depuis longtemps comme une solution appropriée, apportant une amélioration notable du rendement de conversion.

Néanmoins, la réalisation d'une telle structure nécessite des étapes technologiques supplémentaires, ce qui augmente son coût de production.

### III.3.1 Principe et avantages

L'émetteur homogène des cellules solaires possède une résistance de couche moyenne de  $70 \Omega/\square$  à  $80 \Omega/\square$  car l'augmentation de la résistance de couche de l'émetteur ( $\geq 100 \Omega/\square$ ) (faible dopage) entraîne une forte résistance série. Au contraire, une faible résistance de couche ( $\leq 50 \Omega/\square$ ) (dopage élevé) augmente le taux de recombinaison (surtout de type Auger : section II.2.4.2.2). La structure d'émetteur sélectif est basée sur ce compromis : Augmenter la résistance de couche sous les contacts ( $n^{++}$ ) pour minimiser la résistance série et la réduire entre les contacts ( $n^+$ ) pour diminuer le taux de recombinaison (Figure III-27).

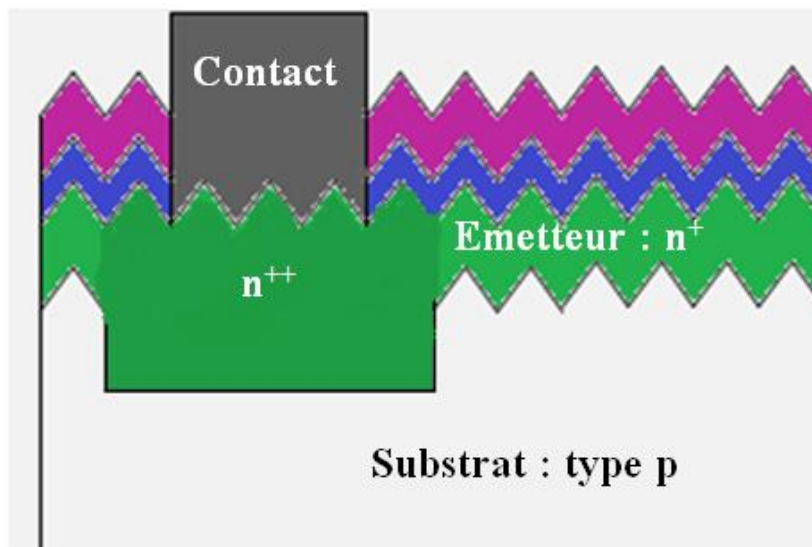


Figure III-27 : Structure de l'émetteur sélectif

### III.3.2 Technologie de la réalisation de l'émetteur sélectif

La première société qui a réussi à implémenter cette technologie est BP Solar par la voie de contacts enterrés ([Wenham 1993](#)). Cette méthode avait le désavantage de nécessiter d'importantes modifications du procédé standard (formation de tranchées, deux diffusions thermiques, etc.). D'autres voies sont aujourd'hui conçues pour implémenter l'émetteur sélectif dans une production industrielle à grande échelle,

facilement intégrable dans le procédé standard actuel avec moins d'étapes supplémentaires. On peut citer :

#### **III.3.2.1 Les encres dopées**

Cette technologie est développée par la société Innovalight Inc. Des micros particules de silicium fortement dopées contenues dans une encre, sont déposées sur le substrat de silicium par sérigraphie avant l'étape de diffusion thermique de l'émetteur. L'encre sert de source de phosphore supplémentaire pour une plus forte diffusion sous les contacts ([Antoniadis et al. 2010](#)).

#### **III.3.2.2 L'implantation ionique**

Poussées par la société Varian spécialiste de ce type de procédé, La réalisation d'émetteurs sélectifs par implantation ionique (voir section III.2.1.2.2) repose sur l'utilisation d'un masque physique qui réduit la dose implantée dans les zones entre les contacts ([Low et al. 2011](#)). Une étape haute température est nécessaire pour guérir les défauts induits dans le réseau cristallin par le bombardement ionique et pour activer les dopants.

#### **III.3.2.3 Le dopage laser**

La réalisation du dopage sélectif est établie au moyen d'un laser servant à créer un échauffement local très intense de façon à permettre la diffusion d'atomes dopants à partir d'une source préalablement déposée sur le substrat. L'apport d'énergie par le laser pendant un temps très bref (en général, quelques dizaines de nanosecondes) permet d'atteindre la fonte du matériau, pendant laquelle la diffusion des impuretés dopantes est effectuée ([Colville & Clara 2009](#)) ([Poulain 2012](#)).

### **III.4 Outils de caractérisations**

Ce sont des méthodes expérimentales de mesure pour extraire certains paramètres de la cellule solaire telles que la résistivité, la durée de vie des porteurs de charge, la réflectivité...etc. Autres outils permettent de relever certaines caractéristiques de la cellule solaire comme les courbes IV et EQE. Parmi ces outils, on peut citer :

### III.4.1 Mesure de la résistivité par la méthode des quatre pointes

C'est une méthode non destructive. Le courant et la tension sont mesurés par quatre pointes, généralement alignées, à égales distances  $e$  les unes des autres comme le montre le schéma ci-dessous (Figure III-28).

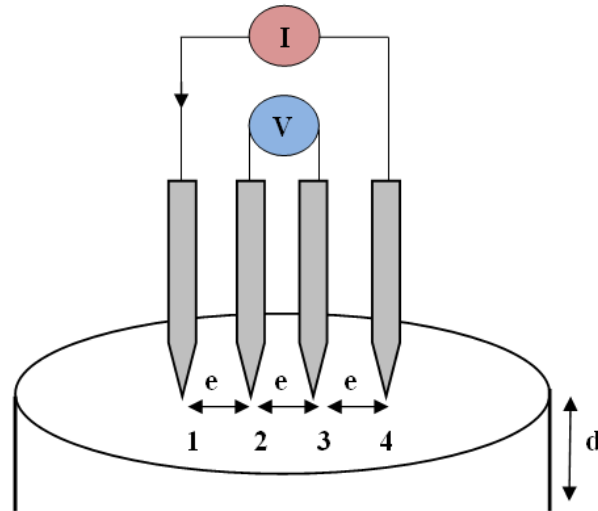


Figure III-28 : Schéma de la mesure de la résistivité par la méthode des quatre pointes

Pour une couche de surface considérée comme infinie, d'épaisseur  $d$  fine par rapport à la distance  $e$ , la résistivité de l'échantillon est donnée par la relation suivante (Schroder 1998) :

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d = 4.532 \frac{V}{I} d \quad (\text{III-15})$$

Dans le cas d'une couche fortement dopée, comme c'est le cas d'un émetteur d'une cellule solaire, il est plus difficile d'évaluer l'épaisseur et par conséquent de remonter à la résistivité et au dopage. Le paramètre permettant d'évaluer le dopage est la résistance de couche ou carrée (en anglais sheet resistance) définie comme suit :

$$R_{sh} = \frac{\rho}{d} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (\text{III-16})$$

### III.4.2 Mesure de la durée de vie par la méthode PCD

La technique PCD (Photoconductance decay method) est basée sur la génération  $G$  de porteurs de charges excédentaires à l'aide d'une brève impulsion lumineuse à

décroissance rapide. Cette illumination entraîne un excès de conductivité donné par la relation :

$$\Delta\sigma = \Delta n q (\mu_n + \mu_p) W \quad (\text{III-17})$$

$\Delta n$  est la densité de porteurs de charge en excès,  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont les mobilités d'électrons et de trous,  $W$  l'épaisseur de l'échantillon à mesurer et  $q$  la charge élémentaire de l'électron. En connaissant les mobilités des porteurs  $\mu_n$  et  $\mu_p$ , il est possible de déterminer  $\Delta n$  et d'accéder à la mesure de la durée de vie effective  $\tau_{eff}$  en résolvant l'équation de continuité, donnant la relation suivante :

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta n(t)}{G(t) - \frac{d\Delta n(t)}{dt}} \quad (\text{III-18})$$

Le taux de génération  $G(t)$  est estimé en mesurant le nombre de photons absorbés.

Ce système dispose de trois modes de mesure :

- Le mode transitoire qui consiste à envoyer une impulsion rapide sur l'échantillon et enregistrer la variation de la conductivité après la fin de l'impulsion, l'équation (III-18) devient :

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta n(t)}{\frac{d\Delta n(t)}{dt}} \quad (\text{III-19})$$

Ce mode permet de mesurer des durées de vie supérieure à 100  $\mu\text{s}$ .

- Le mode quasi- stationnaire (en anglais Quasi- Steady- State QSS) développé par [\(Sinton & Cuevas 1996\)](#) où la variation  $\Delta n$  est constant et par conséquent, la durée de vie est donnée par la relation :

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta n}{G} \quad (\text{III-20})$$

Ce mode permet de mesurer des durées de vie inférieure à 50  $\mu\text{s}$ .

- Le mode généralisé développé par [\(Nagel et al. 1999\)](#) qui utilise directement l'équation (III-18). Ce mode est plus sensible aux incertitudes des mesures que les deux méthodes précédentes, il permet d'estimer les durées de vie dans la gamme 50-100  $\mu\text{s}$ .

Le dispositif de mesure est représenté sur la Figure III-29, il est composé d'une lampe flash, d'une bobine excitée sous RF (radio fréquence), d'une cellule étalon et d'une interface informatique. La lumière émise par le flash est uniformisée, filtrée par un filtre infrarouge et deux diffuseurs puis enregistrée par la cellule de référence. Elle permet seulement aux longueurs d'onde transmises supérieures à 700 nm d'une

génération uniforme dans la profondeur de l'échantillon. Deux tensions, l'une proportionnelle à la conductivité, est mesurée sur le pont RF, l'autre proportionnelle à la génération, sont transmises à l'interface informatique pour déterminer la durée de vie effective à l'aide des équations précédentes.

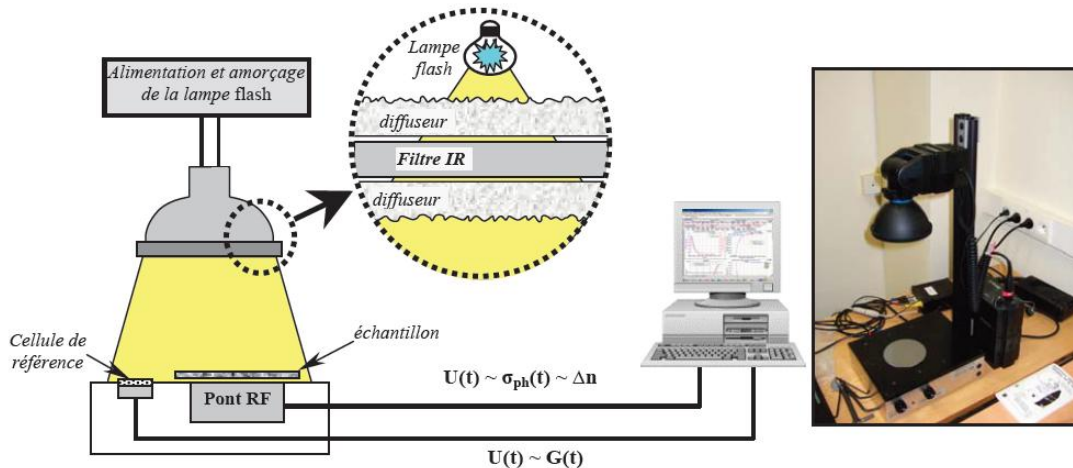


Figure III-29 : Schéma de fonctionnement et photo du dispositif mesurant la durée de vie de porteurs par la méthode PCD ([Lelièvre 2007](#))

### III.4.3 Mesure de la réflectivité

La mesure de la réflectivité sert à évaluer la qualité de la texturation et de la couche antireflet (Figure III-31). Elle consiste à éclairer un échantillon avec une lumière monochromatique et à mesurer l'intensité réfléchi sur tout le spectre solaire utilisé pour la conversion photovoltaïque (350 à 1100 nm).

La (Figure III-30 ) présente le dispositif expérimental de la mesure de réflectivité. L'échantillon est placé sur une ouverture de la sphère intégrante située à l'opposé du faisceau incident monochromatique (incidence de  $9^\circ$ ). La source lumineuse est une lampe halogène. La lumière relativement faible, filtrée par le monochromateur (qui permet de sélectionner la longueur d'onde de 350 à 1100 nm), est modulée sous forme d'un signal carré par un hacheur à 167 Hz, de manière à utiliser une détection synchrone afin de rejeter le bruit de fond et d'obtenir un signal plus net. A chaque longueur d'onde, l'intensité réfléchi est mesurée par un photodétecteur (diode PIN en silicium). La mesure est établie en deux étapes, un premier balayage du spectre est effectué sur l'échantillon enregistrant les valeurs de tension délivrées, puis un deuxième est effectué sur un étalon, dont la réflectivité est connue. Par corrélation entre les deux spectres mesurés, la réflectivité de l'échantillon est déduite.

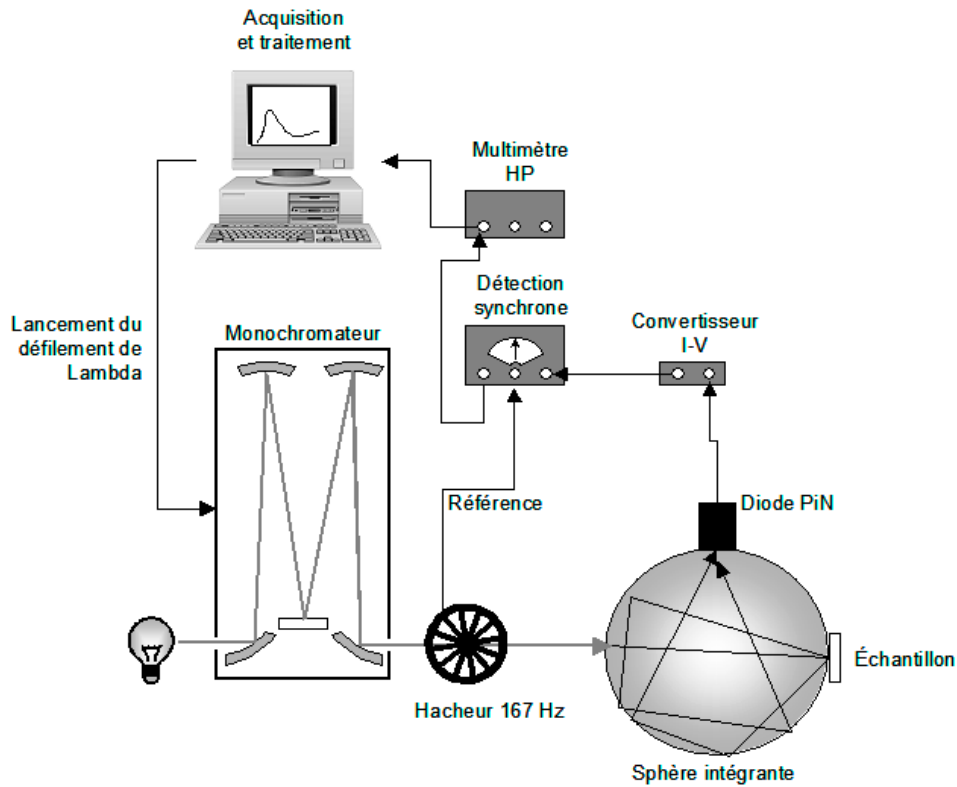


Figure III-30 : Schéma de fonctionnement du dispositif mesurant la réflectivité (Papet 2007)

### III.4.4 Mesure de la réponse spectrale

Le principe de mesure est le même que celui de la réflectivité. La cellule est placée en condition de court-circuit. La densité de courant  $J_{CC}(\lambda)$  mesuré pour chaque longueur d'onde, est transformée en tension par un convertisseur courant-tension. La réponse spectrale (ou sensibilité spectrale) est déterminée par la relation suivante :

$$R_s(\lambda) = \frac{J_{CC}(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (\text{III-21})$$

Cette mesure permet ainsi de connaître le rendement quantique externe (Figure III-31) (EQE) donné par la relation suivante :

$$R_{QE}(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} R_s(\lambda) \quad (\text{III-22})$$

La mesure de la réflectivité permet de déterminer le rendement quantique interne (Figure III-31) (EQI) donné par la relation suivante :

$$R_{QI}(\lambda) = \frac{R_{QE}(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (\text{III-23})$$

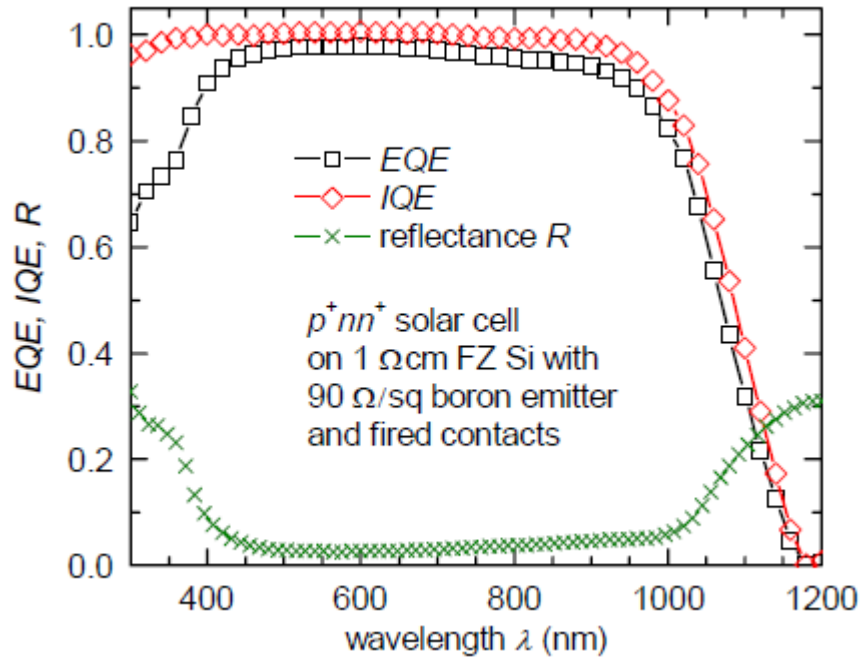


Figure III-31 : Réflectivité et rendement quantique externe mesurés , rendement quantique interne calculé (Richter et al. 2010)

### III.4.5 Mesure de la caractéristique J(V)

Cette mesure est effectuée pour déterminer les performances de la cellule solaire dans les conditions de température et d'éclairement AM1.5. Ces paramètres étudiés dans la section II.3.4.5 sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). Pour réaliser ce type de mesures, il faut un banc électrique sous un simulateur solaire composé d'une lampe au xénon à laquelle des filtres sont rajoutés pour pouvoir restituer un spectre similaire au spectre solaire. La Figure III-32 représente le schéma simplifié du banc expérimental de mesure de caractéristique J(V) sous éclairement. Le courant et la tension sont mesurés séparément pour surmonter les problèmes de contact entre résistances.

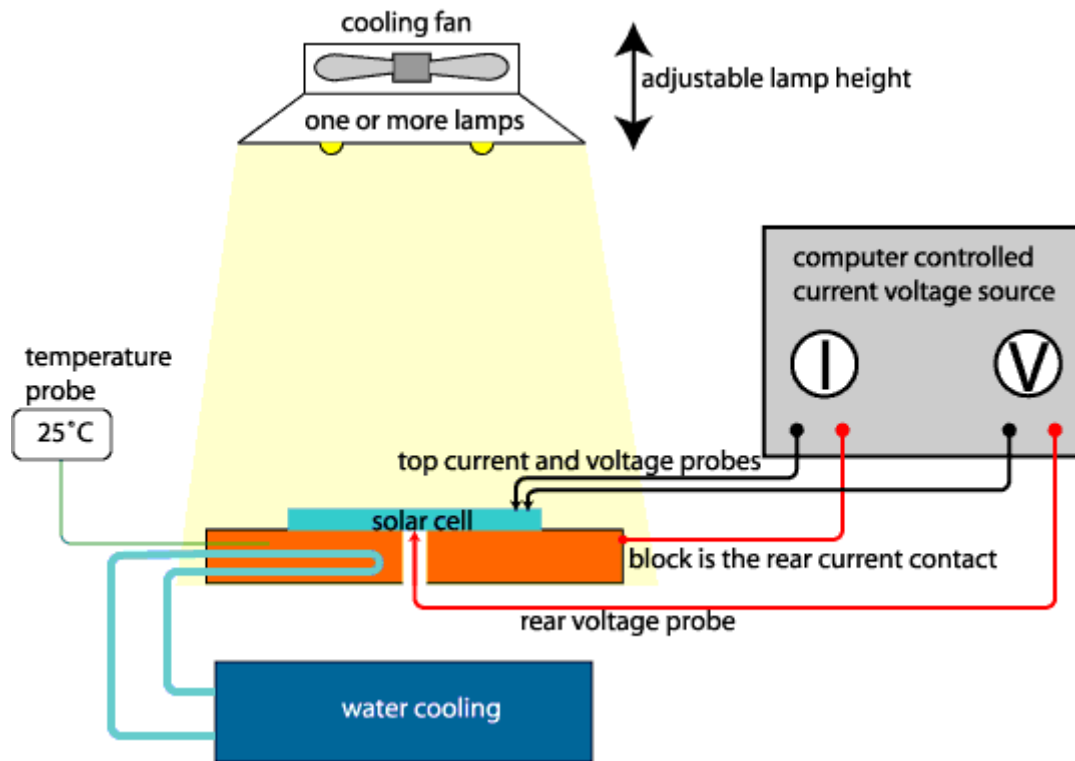


Figure III-32 : Schéma simplifié du banc expérimental de mesure de caractéristique  $J(V)$  sous éclairement ([Http://pveducation.org](http://pveducation.org) 2017b)

### III.5 Conclusion

Le silicium métallurgique possède une purification de 98.5 % qui n'est pas suffisante pour fabriquer des photopiles. Le silicium de grade solaire (en anglais Solar Grade : SG- Si) a une purification de l'ordre de 99.9999 % (6 N) qui est acceptable pour réaliser des cellules solaires. Plusieurs techniques sont utilisées pour monocristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé de Fusion de Zone « Float Zone » (FZ).

L'architecture de la cellule solaire en silicium de type n est analogue à celle en silicium de type p avec beaucoup d'étapes communes de production. Cependant le procédé de fabrication est plus énergivore que celui du standard, puisque deux diffusions gazeuses à haute température :  $\text{BCl}_3$  et  $\text{POCl}_3$  sont nécessaires pour former l'émetteur et le BSF. La passivation de surface, traditionnellement effectuée avec du  $\text{SiN}_x$  pour le procédé standard n'est pas adapté à une surface dopée  $p^+$ . Par conséquent, l'ajout d'une couche supplémentaire de passivation est nécessaire (exemple  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Néanmoins, les substrats de type n sont faiblement sensibles à la plupart des impuretés métalliques comme le fer (Fe), le chrome (Cr), le titane (Ti), le vanadium (V) et le molybdène (Mo). De plus, leurs performances ne dégradent pas sous

éclairage (Light Induced Degradation : LID) due à l'activation de complexes Bore-Oxygène (BO). Par conséquent, ces cellules ont une durée de vie des porteurs élevée et stable dans le temps, de l'ordre de la milliseconde.

La structure d'émetteur sélectif qui est basée sur l'augmentation de la résistance de couche sous les contacts pour minimiser la résistance série et la réduire entre les contacts pour diminuer le taux de recombinaison, permet une amélioration sensible du rendement de la cellule solaire à émetteur homogène.

# **Chapitre IV :**

## **Présentation du programme PC2D**

## Chapitre IV Présentation du programme PC2D

La simulation est la représentation imitative du fonctionnement d'un système ou d'un processus sans expérimentation. En raison du coût élevé de l'expérience, cet outil est devenu primordial pour le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent. La simulation est basée sur des modèles physiques ou empiriques (reposant sur des données expérimentales) lorsque le phénomène est inconnu. Le développement des modèles physiques suit généralement les étapes suivantes :

- Analyse qualitative du modèle,
- Etablir quantitativement le modèle,
- Résolution des équations du modèle quantitatif.

La résolution des équations consiste à définir les conditions initiales et aux limites du problème et la création du domaine de simulation (maillage). En raison de la non-linéarité des modèles, la résolution du problème est souvent numérique (itérative), car la résolution analytique est assez complexe sauf pour des cas plus simples.

De nombreux programmes informatiques ont été développés au cours de ces dernières années afin de simuler le fonctionnement des cellules solaires. Parmi eux, les logiciels commerciaux Setaurus (<http://www.synopsys.com/> 2009), COMSOL (<http://www.comsol.com/comsol-multiphysics> 2014), ATLAS Silvaco (<Http://www.silvaco.com/> 2012), le logiciel unidimensionnel gratuit PCID ([Clugston & Basore 1997](#)) développé par P.A. Basore et ses collègues de l'Université de New South Wales, en Australie, et qui est très utilisé en photovoltaïque grâce à sa simplicité et sa rapidité. Son succès a poussé ses auteurs à le développer en un nouveau simulateur bidimensionnel disponible gratuitement, nommé PC2D ([Basore & Cabanas-Holmen 2011](#)).

### IV.1 Principe général de la simulation

Comme on l'a mentionné au chapitre II.2.4.3, la simulation d'une cellule solaire est basée sur cinq équations qui peuvent être réécrites comme suit :

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} (p - n + N_d - N_a)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\vec{\nabla} \vec{J}_n}{q} + G_n - R_n$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\vec{\nabla} \vec{J}_p}{q} + G_p - R_p$$

$$\vec{J}_n = -q(n\mu_n \vec{\nabla} \psi - D_n \vec{\nabla} n)$$

$$\vec{J}_p = -q(p\mu_p \vec{\nabla} \psi + D_p \vec{\nabla} p)$$

$\psi$  est le potentiel électrostatique (remplaçant le champ ( $\vec{E} = -\overline{\text{grad}} \psi$ ) à travers la structure suivant les trois directions.

La solution exacte de ce système d'équations différentielles est une fonction continue, quasi-impossible de la déterminer. L'outil informatique adapté aux quantités discrètes et finies facilite énormément l'obtention d'une solution numérique très approchée.

La solution numérique de ces équations est couramment mise en œuvre utilisant l'une des trois méthodes : les différences finies, les volumes finis (en anglais finite boxes) et les éléments finis ([Selberherr 1984](#)).

La méthode des différences finies est la plus simple à mettre en place. Pour des structures simples, elle est très stable et conduit à un système d'équations non-linéaires avec une structure jacobienne simple qui peut être efficacement résolue par la technique de Newton ([Selberherr 1984](#)). Cependant, cette méthode est moins précise et moins flexible car elle est basée sur un maillage rectangulaire (Figure IV-1), contrairement à la méthode des éléments finis qui est plus précise utilisant un maillage qui peut être non rectangulaire (triangle ou quadrangle) (Figure IV-2) adapté à la complexité et l'inhomogénéité de la structure à simuler. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est difficile à réaliser surtout en deux ou trois dimensions car elle nécessite un calcul numérique lourd exigeant un programme informatique puissant (microprocesseur rapide et grande mémoire).

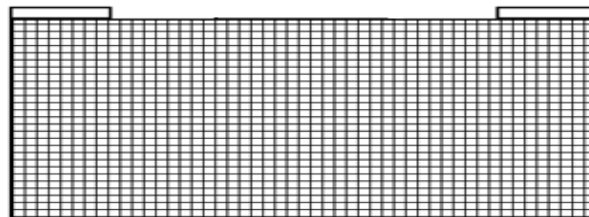


Figure IV-1 : Maillage rectangulaire

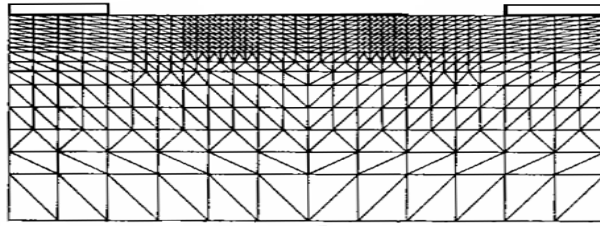


Figure IV-2 : Maillage non rectangulaire

## IV.2 Le simulateur PC1D

Comme il a été mentionné plus haut, PC1D a été développé par P.A Basore et ses collaborateurs à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie. Grâce à son interface simple et sa vitesse d'exécution, il a une grande popularité dans le domaine des recherches photovoltaïques. Malgré son unidimensionnalité, il est largement toujours utilisé dans la simulation des cellules solaires à structures simples ou comme un intermédiaire de calcul pour les simulateurs multidimensionnels. La dernière version vérifiée 5.9 de PC1D a été lancée à partir de février 2008, elle est disponible en téléchargement gratuit ([PC1D 2008](#)).

La simulation de la structure photovoltaïque est réalisée en introduisant en premier lieu ses différents paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), ensuite, on choisit l'excitation caractéristique et enfin, l'exécution du programme. Le logiciel se compose de quatre distinctes parties. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation (Figure IV-3).

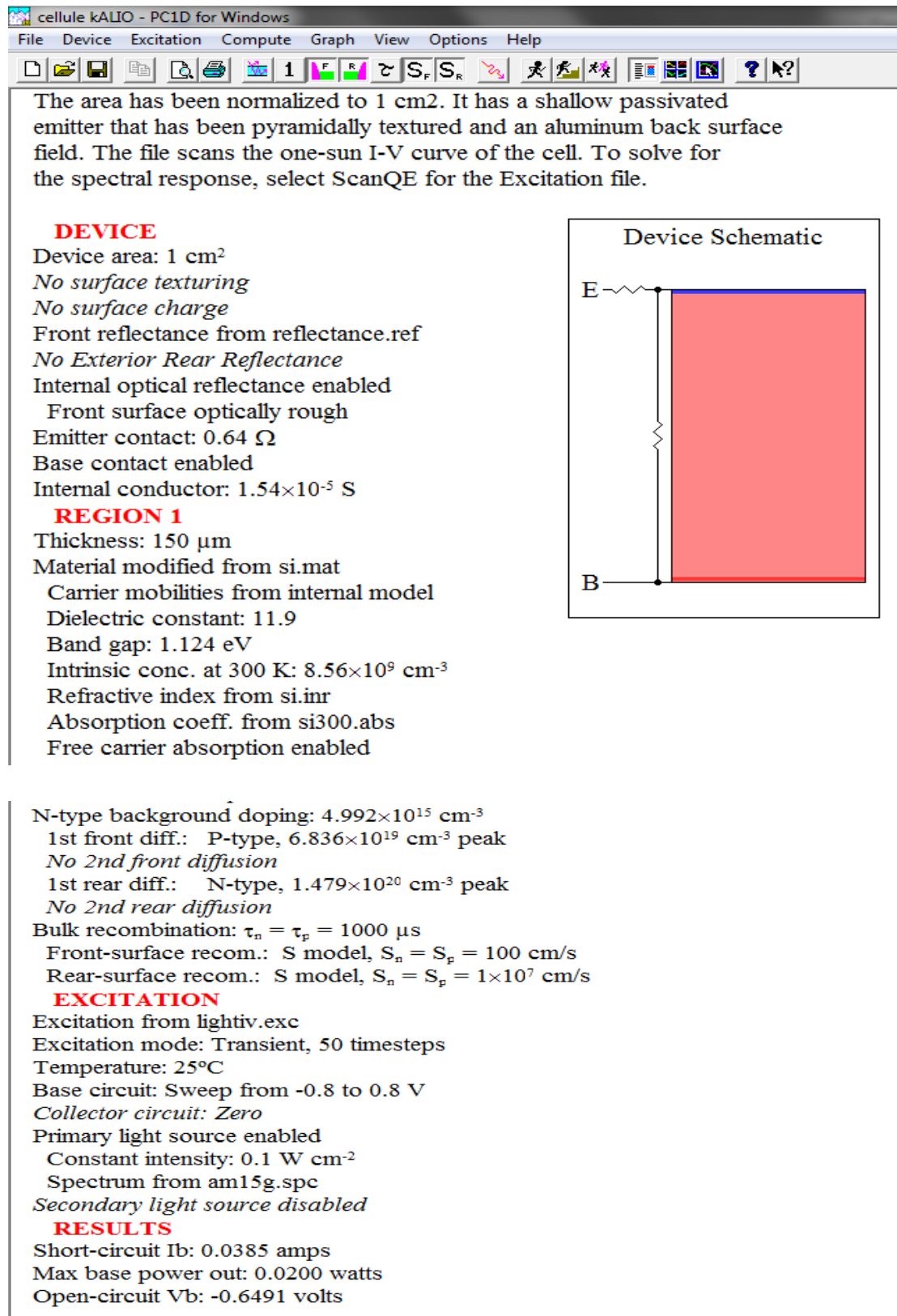


Figure IV-3 : Fenêtre principale de PC1D

### IV.2.1 Paramètres du dispositif

Les paramètres du dispositif (Device) à introduire sont classés par ordre d'apparition comme suit :

- La surface du dispositif,
- La texturisation (avant et/ou arrière),
- La densité de charge surfacique (avant et/ou arrière),
- La réflectance externe (avant et/ou arrière),
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les résistances shunt internes.

### IV.2.2 Paramètres des régions

PC1D permet de créer plusieurs régions selon leurs géométries et leurs propriétés. Dans chaque région, les paramètres introduits sont les suivants:

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat). Ils sont soit, fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium, ou changés. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ), la constante diélectrique, l'énergie du gap ( $\text{eV}$ ), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ), le coefficient d'absorption optique ( $\text{cm}^{-1}$ ) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage (pour la base),
- Le profil de dopage des faces (avant et/ou arrière),
- Les durées de vie des porteurs dans le volume,
- Les vitesses de recombinaison (avant et/ou arrière).

### IV.2.3 Paramètres d'excitation

Selon les résultats recherchés, on choisit comme suit le type de fichiers d'excitation à introduire :

- Le fichier « **One-Sun.exc** » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil : généralement celui d'AM1.5 Global) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),

- Le fichier « **Scan-qe.exe** » (intensité de chaque longueur du spectre) pour simuler de la réponse spectrale.

Ensuite, on choisit un mode d'excitation parmi trois qui sont le mode d'équilibre, stationnaire et transitoire.

Les derniers paramètres à introduire sont les suivants :

- La température,
- Le circuit (résistance, tension),
- L'éclairement (intensité, fichier d'air masse).

#### **IV.2.4 Résultats**

La quatrième partie est consacrée à la visualisation des résultats. Lorsqu'on utilise le fichier « **One- Sun.exe** » comme excitation, les résultats obtenus sont :

- La valeur du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ),
- La valeur de la puissance maximale ( $P_m$ ),
- La valeur de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ).

Ces résultats permettent de calculer le rendement de conversion ( $\eta$ ) ainsi que le facteur de forme (FF). Ce mode permet aussi de visualiser les courbes courant-tension (I-V) et puissance -tension (P-V).

Le fichier « **Scan-qe.exe** » permet d'obtenir :

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

Ce mode permet aussi de visualiser les trois courbes de reflectance, du rendement quantique externe (EQE) et du rendement quantique interne (IQE).

#### **IV.3 Le simulateur PC2D**

La simulation unidimensionnelle est insuffisante car elle néglige l'influence bi- et tridimensionnelle des paramètres physiques et géométriques de la structure.

La simulation bidimensionnelle est plus précise car elle permet d'étudier plus profondément la structure de la cellule solaire et par conséquent, d'obtenir des résultats plus affinés.

Ainsi, le succès de PC1D pour la simulation des cellules solaires en une dimension ont poussé ses auteurs à réfléchir à le faire développer à un logiciel à deux dimensions dans l'objectif d'étudier profondément la structure de la photopile. La perspective d'étendre PC1D à deux dimensions fût présentée en 1996 ([Basore & Clugston 1996](#))

mais elle a été reportée par ses concepteurs jusqu'à ce qu'ils aient opté pour une interface simple et précise. En effet, P.A. Basore et K. Cabanas-Holmen ont présenté PC2D le 19 Août 2011 ([Basore & Cabanas-Holmen 2011](#)) comme un nouveau simulateur bidimensionnel conçu à l'aide du tableur Excel de Microsoft.

Les équations de courant et de continuité des électrons et des trous sont résolues en utilisant la méthode numérique des éléments finis. Le calcul itératif est effectué dans chaque cellule (contenant la formule numérique) de la feuille. Ces formules sont sous forme de références circulaires (En Excel : une référence circulaire est une formule qui fait référence à sa propre cellule, directement ou indirectement) d'où le nom scientifique de PC2D (A Circular-Reference Spreadsheet Solar Cell Device Simulator).

Les résultats et les graphes sont obtenus grâce à des macros(En Excel, macro : action ou ensemble d'actions qu'on peut utiliser pour automatiser des tâches. Les macros sont enregistrées dans le langage de programmation Visual Basic pour applications). Par ailleurs, PC2D ne remplace pas totalement PC1D mais le complète car il l'utilise encore pour extraire certains paramètres de surfaces avant et arrière dans l'intention de les intégrer dans le programme comme des conditions aux limites ([Basore & Cabanas-Holmen 2011](#)) du problème posé.

### IV.3.1 Méthode numérique

La région à simuler par PC2D est la plus petite partie élémentaire, représentative de la cellule entière d'aire de  $1\text{cm}^2$ , d'une largeur  $X$  (Width) comptée à partir du centre du contact au point milieu entre les centres de deux contacts successifs quelconques, et d'une hauteur  $Y$  (Height) égale à l'épaisseur de la cellule (Figure IV-4).

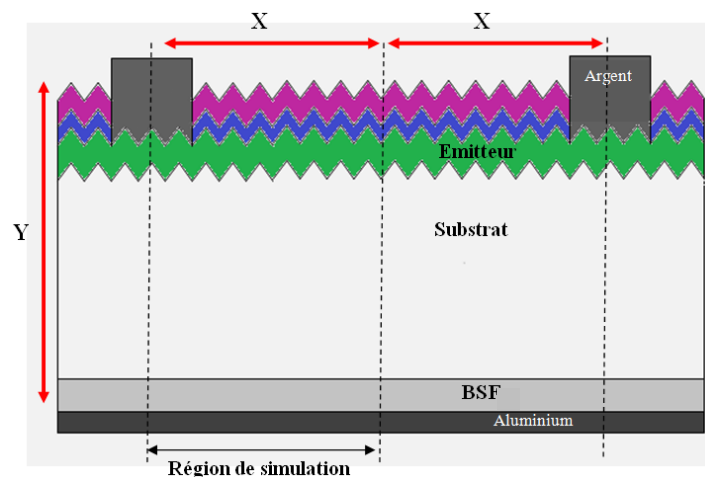


Figure IV-4 : Structure et région de simulation

Cette région est divisée en une grille de 20×20 éléments rectangulaires identiques bordés donc par une maille de 21×21 nœuds. Chaque élément aura comme côtés :  $\Delta X= X/20$  et  $\Delta Y=Y/20$ . Cette grille est représentée de façon numérique (matrice) sur la feuille d'Excel avec les équations pour chaque cellule (Figure IV-5).

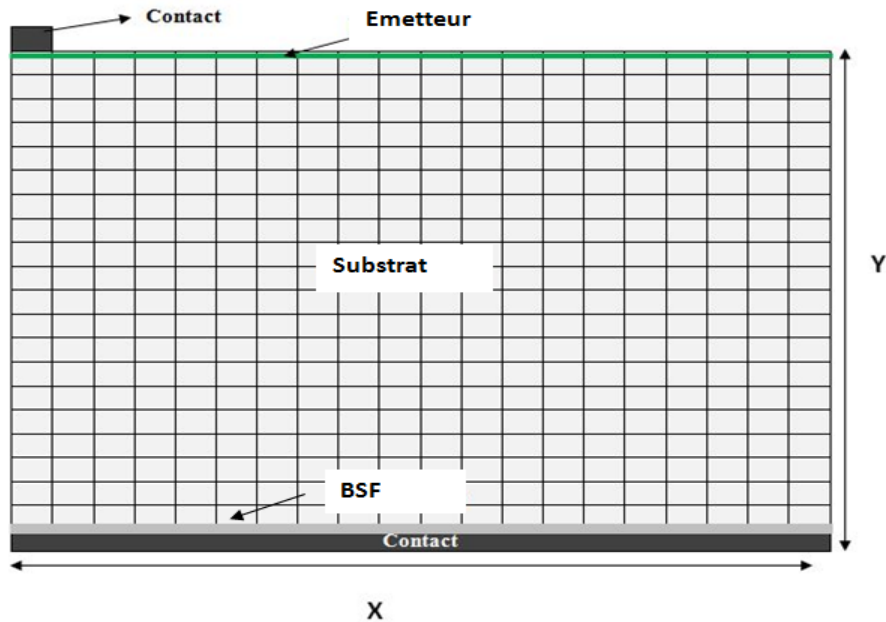


Figure IV-5 : Grille de simulation

Comme les équations des porteurs sont non linéaires, on procède alors par un calcul numérique itératif avec la méthode des éléments finis (Voir annexe).

Chaque nœud intérieur est le point d'intersection de quatre éléments finis rectangulaires qui se rencontrent en ce nœud (Figure IV-6), sauf pour un nœud situé en surface haut (top) et bas (bottom)) qui est effectivement le point d'intersection de deux éléments finis rectangulaires.

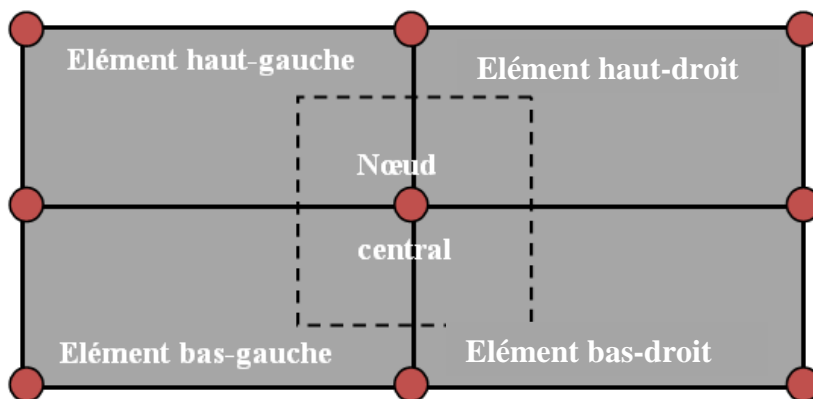


Figure IV-6 : Présentation nodale

On calcule les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous  $\Phi_n, \Phi_p$  (voir section II.2.4.4) de chaque nœud (normalisé à  $k_B T/q$ ) en utilisant les équations :

$$\Phi_n(x, y) = -V_t \ln(C_{on} + C_{xn}x + C_{yn}y + C_{xyn}xy) \quad (IV-1)$$

$$\Phi_p(x, y) = V_t \ln(C_{op} + C_{xp}x + C_{yp}y + C_{xyp}xy) \quad (IV-2)$$

Avec  $V_t$  est la tension thermique donnée par :

$$V_t = \frac{k_B T}{q} \quad (IV-3)$$

Les quatre coefficients « C » pour chaque équation sont déterminés à partir des valeurs de  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ , respectivement, aux quatre coins de l'élément.

Le potentiel électrostatique  $\psi$  de chaque nœud (normalisé à  $k_B T/q$ ) est calculé à partir des potentiels de quasi-niveau de Fermi fonction  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ .

### IV.3.2 Feuilles de calcul

#### IV.3.2.1 Feuilles de $\Phi_n$ et $\Phi_p$ .

Ce sont les feuilles du calcul principal qui résolvent les équations de continuité (des électrons et des trous). Elles contiennent un tableau de valeurs du potentiel quasi-niveaux de Fermi (calculées par itération) de chaque nœud normalisées à la tension thermique  $V_t$ . Ces valeurs sont également représentées sous formes de courbes en 2D (Figure IV-7) et (Figure IV-8).

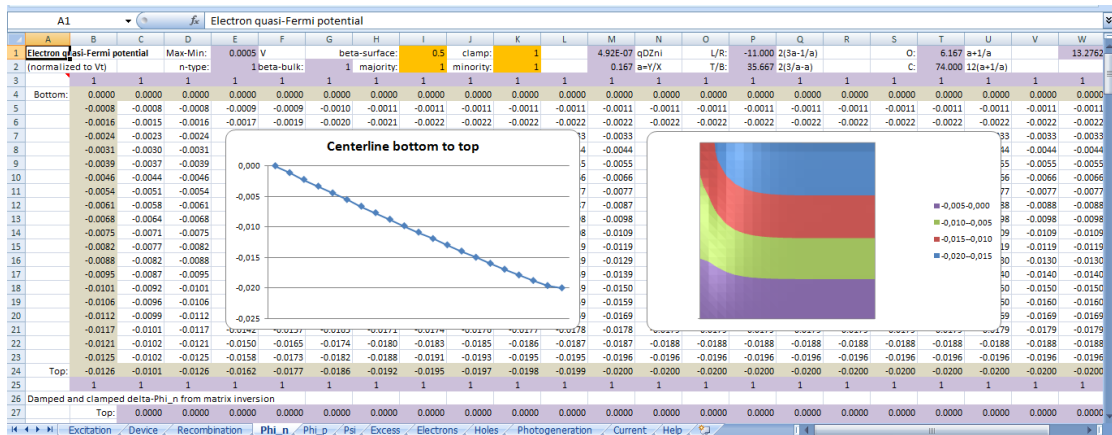


Figure IV-7 : Partie d'une feuille de  $\Phi_n$

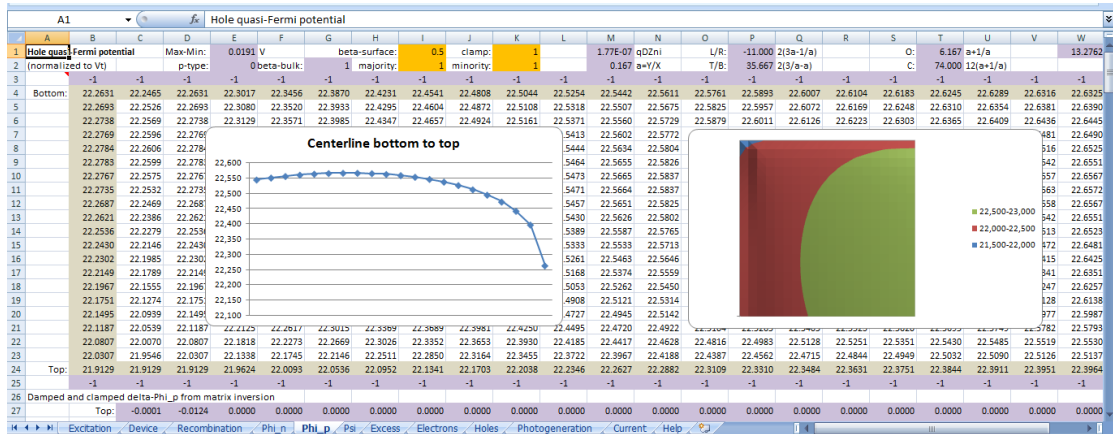


Figure IV-8 : Partie d'une feuille de  $\Phi_p$

Avant le déclenchement du programme, les cellules d'exécution (RUN BUTTONS) **B4** et **B5** prennent la valeur (-1) sur la feuille d'Excitation ci-dessous, c'est-à-dire,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  prennent leurs valeurs initiales.

Lorsque le programme est exécuté **B4** et **B5** prennent la valeur (1) sur la même feuille, le calcul itératif commence et les valeurs de  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  convergent et se maintiennent vers la solution finale. (**B4** = **B5** = 0 de la même feuille) (Figure IV-9).

La feuille contient également tous les calculs matriciels intermédiaires pour la résolution des équations de continuité et du courant.

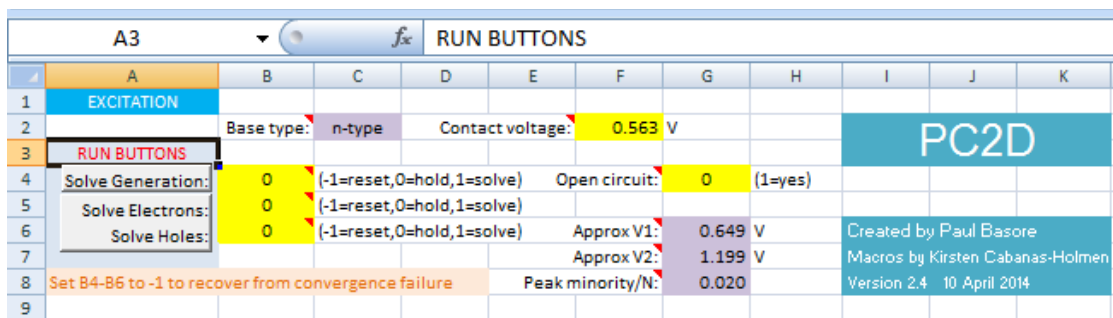


Figure IV-9 : Partie d'une feuille d'Excitation

### IV.3.2.2 Feuille du potentiel électrostatique $\psi$

Dans la version (2.4) de PC2D, l'équation de Poisson n'est pas utilisée pour calculer le potentiel électrostatique  $\psi$ . En chaque nœud, il est calculé directement à partir des valeurs de  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  de ce même nœud.

La valeur d'équilibre du potentiel électrostatique (sans excitation) est donnée dans la cellule **K1** normalisée à la tension thermique  $V_t$  (Figure IV-10).

Avant l'exécution du programme (**B4=B5=-1** de la feuille d'Excitation),  $\Psi$  prend sa valeur par défaut dans la cellule **K2** (pour les valeurs initiales de  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ ). En exécutant le programme (**B4=B5=1**), les valeurs de  $\psi$  convergent vers la solution finale. La feuille visualise aussi l'évolution de  $\psi$  en courbe 2D. A partir de la version (3.0), l'équation de Poisson est résolue analytiquement en utilisant les séries de Fourier.

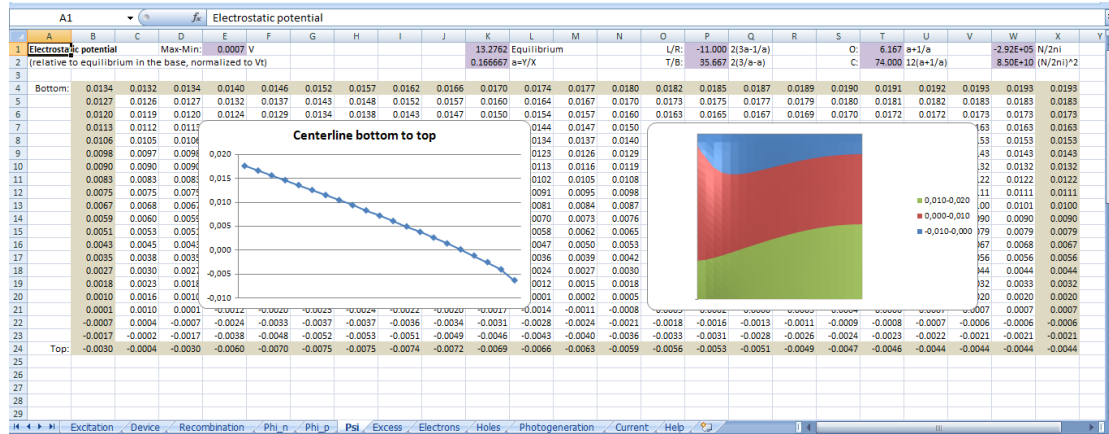


Figure IV-10 : Feuille du potentiel électrostatique  $\psi$

### IV.3.2.3 Feuille « Excès »

Cette feuille montre les valeurs de l'excès du produit ( $p \times n$ ), normalisé à  $N^2$  (dopage de la base, élevé au carré ( Voir feuille « Device » plus loin) (Figure IV-11). Ces valeurs sont utilisées dans les calculs de la feuille « Recombinaison ».

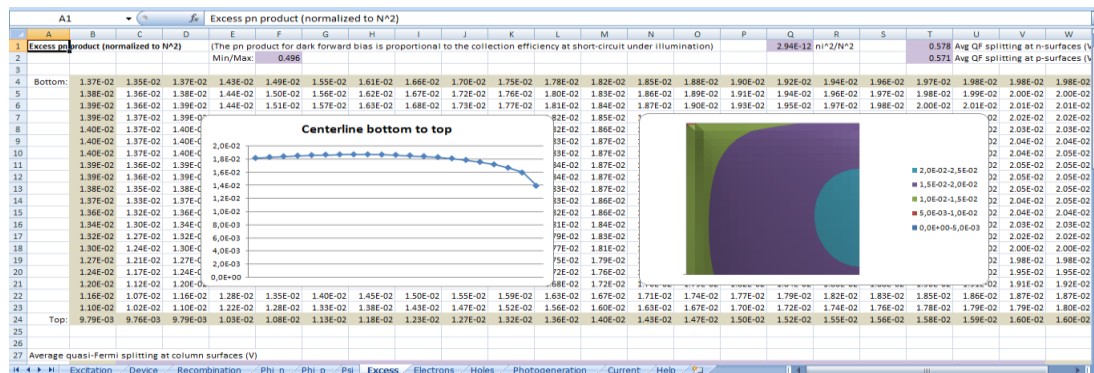


Figure IV-11 : Feuille l'excès  $p \times n$  (normalisé à  $N^2$ )

### IV.3.2.4 Feuilles « électrons » et « trous »

Ces deux feuilles calculent les densités des électrons et des trous en chaque nœud à partir de  $\Phi_n$ ,  $\Phi_p$  et  $\Psi$  au même nœud. Les valeurs de ces densités montrées sur (Figure IV-12) et (Figure IV-13) sont normalisées à la densité de dopage de la base (N). Elles sont utilisées dans les calculs par la feuille « Recombinaison ». Les concentrations moyennes d'électrons et de trous sont calculées dans la cellule F2 de chaque feuille.

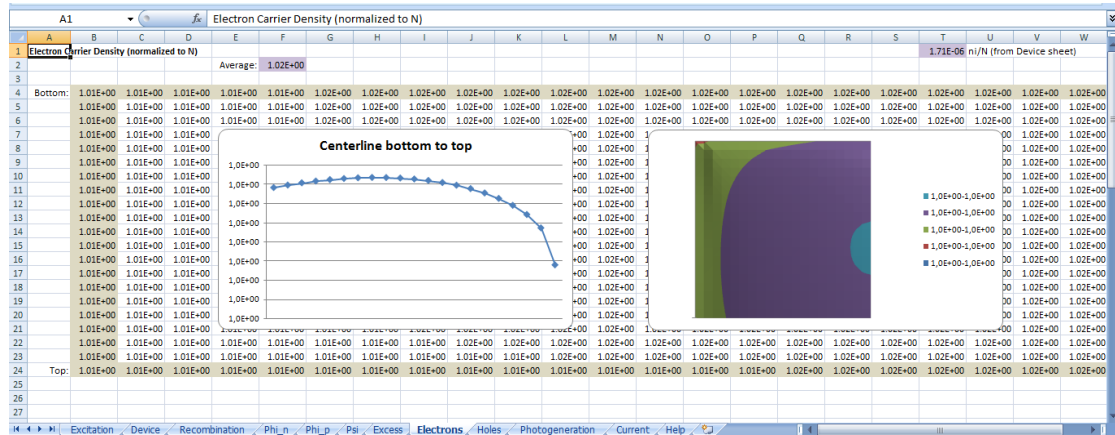


Figure IV-12 : Feuille de la densité d'électrons (normalisée à N)

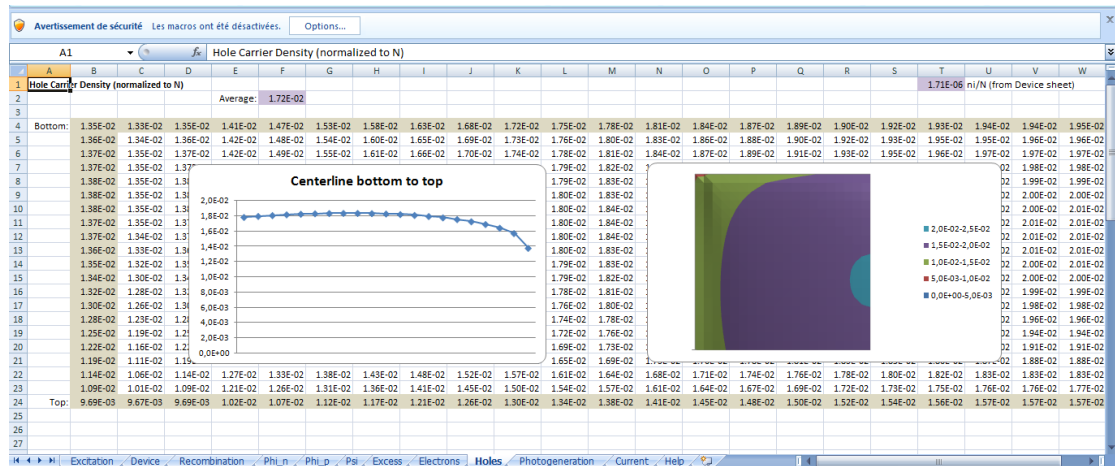


Figure IV-13 : Feuille de la densité de trous (normalisée à N)

### III-4-5-Feuille « Courant »

Cette feuille visualise les courbes du flux de courant latéral sur les surfaces avant et arrière en fonction de la position X, mesurés en Ampères.

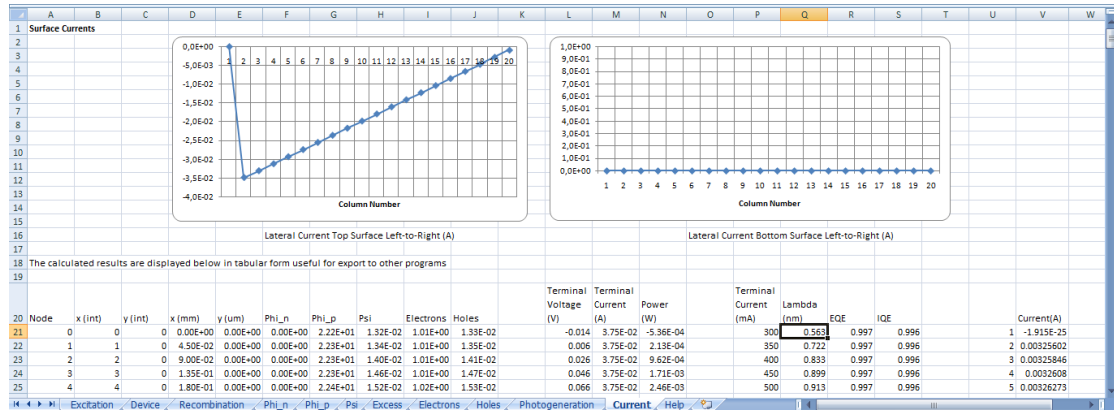


Figure IV-14 : Flux du courant latéral sur la surface avant et arrières (Ampères).

Cette feuille comporte aussi les résultats de calcul de différentes feuilles pour pouvoir les utiliser pour d'autres programmes.

### IV.3.3 Simulation

Le classeur de simulation Excel est composé de quatre feuilles : La feuille « Device » pour introduire les paramètres géométriques, électriques et optiques de la structure à simuler. La Feuille « Recombinaison » pour introduire les courants de recombinaison  $J_{01}$  et  $J_{02}$  (équations (II-84) et (II-90)) des deux surfaces avant et arrière. Dans la feuille « Photogeneration », on sélectionne le spectre AM1.5 G (pour simuler la caractéristique IV), ou le spectre Mono (pour simuler le rendement quantique). Les résultats sont visualisés dans la feuille « Excitation ».

#### IV.3.3.1 Feuille « Device »

##### 1. Structure

La structure physique de la photopile est définie par la hauteur (Y) et la largeur (X) de la région à simuler, son maillage ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ), sa surface élémentaire et sa symétrie : si la structure est symétrique entre les contacts, la cellule Q3 de la feuille prend la valeur de « -1 », si elle est asymétrique entre les contacts, Q3 prend la valeur de « 1 ». Cela va réduire de la moitié la simulation de la structure ce qui minimise beaucoup de calculs. La structure est supposée uniforme à travers sa profondeur (Z) (Figure IV-15).

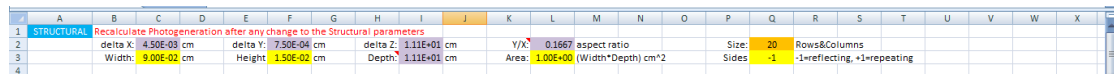


Figure IV-15 : Structure de la cellule

## 2. Paramètres électriques

La concentration du dopage de la base « **N** » est introduite dans la cellule **C6**; une valeur positive indique un dopage de type « **p** » et une valeur négative indique un dopage de type « **n** ». Les durées de vie « **tau** » et les constantes de diffusion des électrons et des trous « **D<sub>n</sub>**, **D<sub>p</sub>** » sont choisies en fonction du dopage correspondant selon les relations qui les relient (utilisant par exemple PC1D). La résistivité de la base « **Rho** » ainsi que le ratio de la longueur de diffusion par rapport à la hauteur de la photopile « **L/H** » sont directement calculés à partir des données décrites précédemment.

Ces paramètres sont donnés à la température ambiante de **25 °C**. Pour une autre température, l'utilisateur doit ajuster les paramètres dépendants de la température tels que la concentration intrinsèque **n<sub>i</sub>** et la tension thermique **V<sub>t</sub>**.

La résistance carrée de couche est introduite à chaque cellule le long du front ainsi que sur la surface arrière. Une valeur positive indique un dopage de type p, une valeur négative indique un dopage de type n, une valeur nulle pour une surface non dopée. Connaissant le profil du dopage, cette résistance peut être calculée avec PC1D ou bien tirée de l'expérience (Figure IV-16).

## 3. Circuit

On définit les contacts en mettant un « **1** » là où il y a un contact métallique et « **0** » là où il n'y existe pas. Les résistances extérieures (grille, busbarres, résistances de contact semi-conducteur/métal) série et shunt sont introduites dans les cellules **H15** et **L15**. Des résistances shunt supplémentaires peuvent être ajoutées à travers la structure. (Figure IV-16). Notant que contrairement à PC1D, Les résistances de l'émetteur, la base et le BSF ne sont pas ajoutées car elles sont prises en compte intérieurement par PC2D.

|    |                              |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
|----|------------------------------|----------------|---------|---------------------------|-------------------|--------|-------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|----------|---------------------------------|-------------------|----------|--------------------|-----|----------|-----|-----|
| 5  | ELECTRICAL                   |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 6  | N                            | -4.99E+15      | cm-3    | Rho                       | 0.99              | ohm-cm | Dp                            | 11.6              | cm <sup>2</sup> /s | Vt                      | 0.02569  | V                               | Auger coefficient | 8.30E-31 | cm <sup>6</sup> /s | Lp  | 0.107889 | cm  |     |
| 7  |                              |                |         |                           |                   |        | Dn                            | 32.3              | cm <sup>2</sup> /s | q                       | 1.60E-19 | coulombs                        |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 8  | tau                          | 1.00E-09       | seconds | L/H                       | 7.19              |        | n                             | 8.56E+09          | cm-3               | q                       | 2.94E-12 | ni <sup>2</sup> /N <sup>2</sup> |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 9  |                              |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 10 | Sheet Rho (ohms/sq)          | 0 = undoped    |         |                           | negative = n-type |        |                               | positive = p-type |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 11 | Top:                         | 90             | 90      | 90                        | 90                | 90     | 90                            | 90                | 90                 | 90                      | 90       | 90                              | 90                | 90       | 90                 | 90  | 90       | 90  | 90  |
| 12 | Bottom:                      | -30            | -30     | -30                       | -30               | -30    | -30                           | -30               | -30                | -30                     | -30      | -30                             | -30               | -30      | -30                | -30 | -30      | -30 | -30 |
| 13 |                              |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 14 | CIRCUIT                      |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 15 |                              |                |         | Additional R <sub>s</sub> | 3.82E-01          | ohms   | Additional G <sub>sh</sub>    | 1.54E-05          | siemens            |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 16 | Contacts:                    | 0 = no contact |         |                           | 1 = contact       |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 17 | Top:                         | 1              | 1       | 0                         | 0                 | 0      | 0                             | 0                 | 0                  | 0                       | 0        | 0                               | 0                 | 0        | 0                  | 0   | 0        | 0   | 0   |
| 18 | Bottom:                      | 1              | 1       | 1                         | 1                 | 1      | 1                             | 1                 | 1                  | 1                       | 1        | 1                               | 1                 | 1        | 1                  | 1   | 1        | 1   | 1   |
| 19 |                              |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |
| 20 | Shunt conductance (siemens): | 0.00E+00       |         | Shunt node branches:      | 0                 |        | Shunt conductance per branch: | 0.00E+00          | siemens            | Central node potential: | 0.000    | *Vt =                           | 0.000             | V        |                    |     |          |     |     |
| 21 | Top:                         | 0              | 0       | 0                         | 0                 | 0      | 0                             | 0                 | 0                  | 0                       | 0        | 0                               | 0                 | 0        | 0                  | 0   | 0        | 0   | 0   |
| 22 | Bottom:                      | 0              | 0       | 0                         | 0                 | 0      | 0                             | 0                 | 0                  | 0                       | 0        | 0                               | 0                 | 0        | 0                  | 0   | 0        | 0   | 0   |
| 23 |                              |                |         |                           |                   |        |                               |                   |                    |                         |          |                                 |                   |          |                    |     |          |     |     |

Figure IV-16 : Paramètres électriques de la structure

## 4. Paramètres optiques

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

La partie supérieure des paramètres optiques concerne les valeurs globales de ces paramètres sur les deux surfaces avant et arrière (top-bottom). La partie suivante concerne ces valeurs optiques en fonction de la position **X** des surfaces. La partie inférieure concerne les valeurs optiques en fonction de la longueur d'onde. Ces valeurs sont calculées en utilisant PC1D suivant un modèle qui sera décrit ultérieurement (Figure IV-17).

| OPTICAL Recalculate Photogeneration after any change to the Optical parameters |                           |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |                                    |        |        |        |        |        |        |                              |        |        |          |                      |  |     |  |
|--|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|----------|----------------------|--|-----|--|
| 25   | Top-surface transmission: | 97%    |        |        |        |        |        |        |         |        |        | Top internal specular reflectance: |        |        |        |        | 5%     |        | Bottom specular reflectance: |        | 80%    |          | Bottom-surface haze: |  | 50% |  |
| 26   | Top-surface haze:         | 80%    |        |        |        |        |        |        |         |        |        | Top internal diffuse reflectance:  |        |        |        |        | 92%    |        | Bottom diffuse reflectance:  |        | 90%    |          |                      |  |     |  |
| 27   | Spatial Multiplier        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |                                    |        |        |        |        |        |        |                              |        |        |          |                      |  |     |  |
| 28   | Column:                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8       | 9      | 10     | 11                                 | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18                           | 19     | 20     |          |                      |  |     |  |
| 29   | Trans(top)                | 0%     | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 30   | Haze(top)                 | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 31   | Rspec(top)                | 80%    | 80%    | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 32   | Rdiff(top)                | 70%    | 70%    | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 33   | Haze(bot)                 | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 34   | Rspec(bot)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 35   | Rdiff(bot)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   |          |                      |  |     |  |
| 36   |                           |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |                                    |        |        |        |        |        |        |                              |        |        |          |                      |  |     |  |
| 37   | Wavelength Multiplier     |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |                                    |        |        |        |        |        |        |                              |        |        |          |                      |  |     |  |
| 38   | Wavelength:               | 0      | 300    | 350    | 400    | 450    | 500    | 550    | 600     | 650    | 700    | 750                                | 800    | 850    | 900    | 950    | 1000   | 1050   | 1100                         | 1150   | 1200   | 1.00E+10 |                      |  |     |  |
| 39   | Trans(top)                | 61.29% | 61.29% | 78.64% | 90.73% | 97.91% | 99.40% | 99.56% | 100.00% | 99.97% | 99.84% | 99.61%                             | 99.29% | 98.91% | 98.50% | 98.08% | 97.67% | 97.27% | 96.89%                       | 96.52% | 96.19% | 96.19%   |                      |  |     |  |
| 40   | Haze(top)                 | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 41   | Rspec(top)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 42   | Rdiff(top)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 43   | Haze(bot)                 | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 44   | Rspec(bot)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 45   | Rdiff(bot)                | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%    | 100%   | 100%   | 100%                               | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   | 100%                         | 100%   | 100%   | 100%     |                      |  |     |  |
| 46   |                           |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |                                    |        |        |        |        |        |        |                              |        |        |          |                      |  |     |  |

Figure IV-17 : Paramètres optiques

### IV.3.3.2 Feuille « Recombinaison »

La partie supérieure de la feuille concerne le courant de recombinaison superficielle  $J_{01}$  et le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace  $J_{02}$  pour les deux faces (avant et arrière) (Figure IV-18). Ces valeurs sont calculées en utilisant PC1D dont la méthode sera décrite plus loin.

La partie inférieure concerne la recombinaison aux alentours de chaque nœud de la structure à simuler.

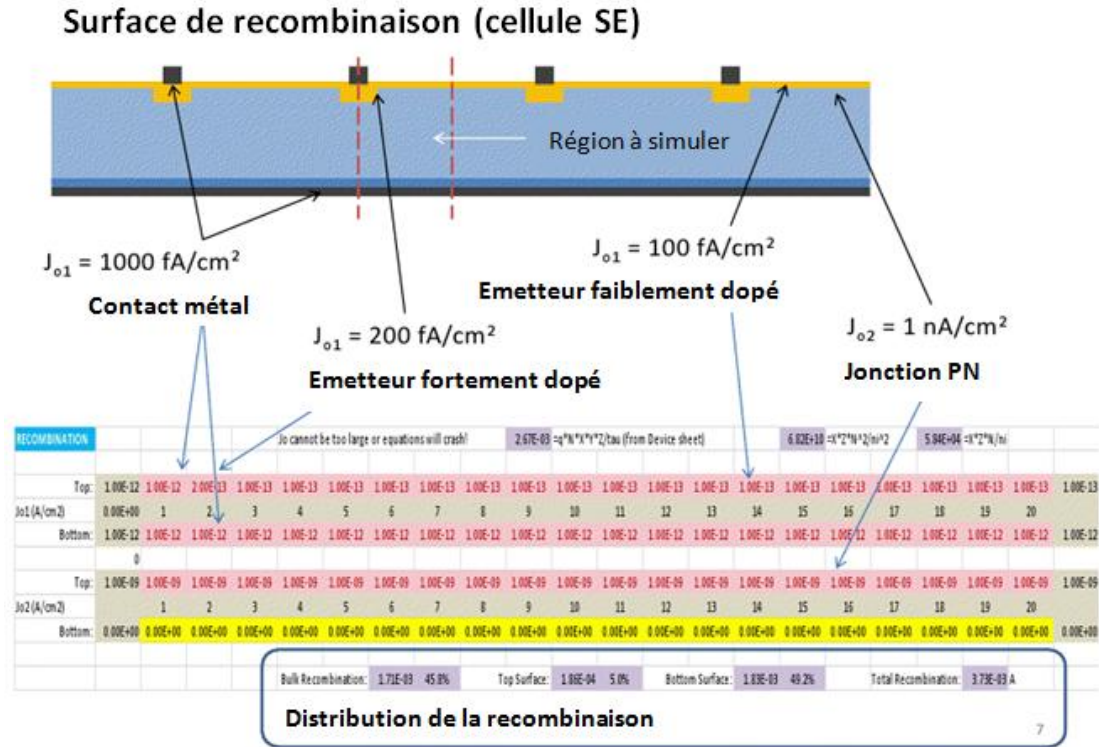


Figure IV-18 : Recombinaison dans les différentes zones de la structure

### IV.3.3.3 Feuille « Photogénération »

C'est la feuille d'exécution des calculs optiques menant aux valeurs de la photogénération dans chacun des 400 (20x20) éléments rectangulaires. La photogénération dans chacun de ces éléments est répartie également aux quatre éléments nodaux situés à chacun des coins de cet élément (Figure IV-19). Dans cette feuille, on dispose aussi le fichier du spectre solaire global de référence **AM1.5G** utilisé dans les différents calculs.

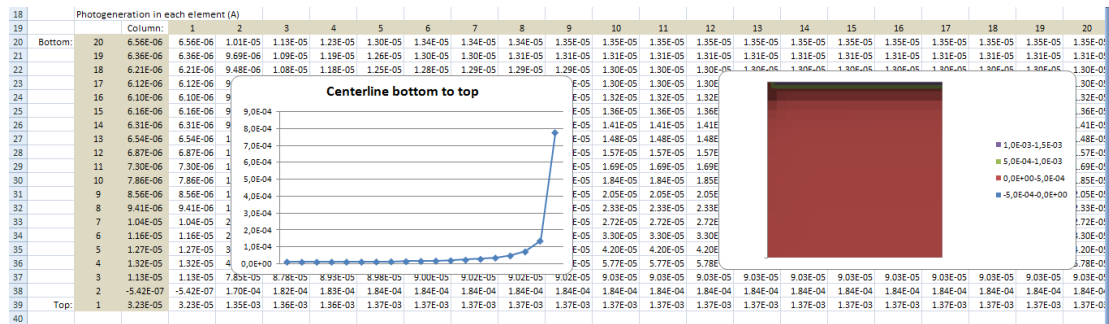


Figure IV-19 : Photogénération à travers la structure simulée

#### IV.3.3.4 Feuille d'exécution (excitation)

Il y a trois modes de fonctionnement du programme : direct « Live », exécutif « Run » et « Drive ».

Le programme peut fonctionner sous le mode « Live » en prenant égales à « 1 » les cellules **B4** et **B5** de cette feuille (Figure IV-20). On peut également changer d'autres paramètres puis ré-exécuter le programme. Le nombre d'itérations est de **5000** dans sa première version qui ne cesse d'augmenter dans les versions suivantes. Mais ce mode est très lent, surtout si de nombreux paramètres sont changés. Par conséquent, il est préférable d'utiliser le mode « Run » où les cellules **B4** et **B5** sont initialement mises à « -1 » ou « 0 » (tenant compte de la dernière solution). Une autre façon d'utiliser le mode « Run » consiste à réinitialiser le programme utilisant la cellule **L17** (reset) pour construire une nouvelle cellule propre à la structure à simuler, puis lancer le programme (**B4 =B5=1**). Le troisième mode de fonctionnement (Drive) consiste à exécuter les macros disposées pour l'automatisation des tâches communes concernant le balayage de la courbe de courant-tension (**I-V**), celui de la courbe de la réponse spectrale (**EQE, EQI**) et celui du **LBIC** (Laser Beam Induced Current).

Au dessus de la courbe (**I-V**), sont portées les caractéristiques de la cellule :  $I_{sc}(A)$ ,  $V_{oc}(V)$ , la puissance maximale de sortie (**max power out**) en watts (**W**) qui est égale au rendement divisé par 1000 (car la surface de la cellule étant égale à **1 cm<sup>2</sup>** et la puissance incidente étalonnée est à **0.1 w/cm<sup>2</sup>**) (Figure IV-20).

Il faut noter qu'une macro peut être interrompue par un appui sur la touche « **Esc** » du clavier. En outre, lorsqu'une macro rencontrerait une erreur, l'exécution du programme s'arrêterait et un message d'erreur apparaîtrait afin d'offrir le choix d'arrêter le programme (qui est le bon choix) ou de déboguer la macro (action d'éliminer les défauts de réalisation ou de conception se manifestant par des anomalies de fonctionnement). Après, l'arrêt du programme, il suffit de cliquer sur la commande de remise à zéro dans la cellule **L17** avant de continuer les étapes suivantes.

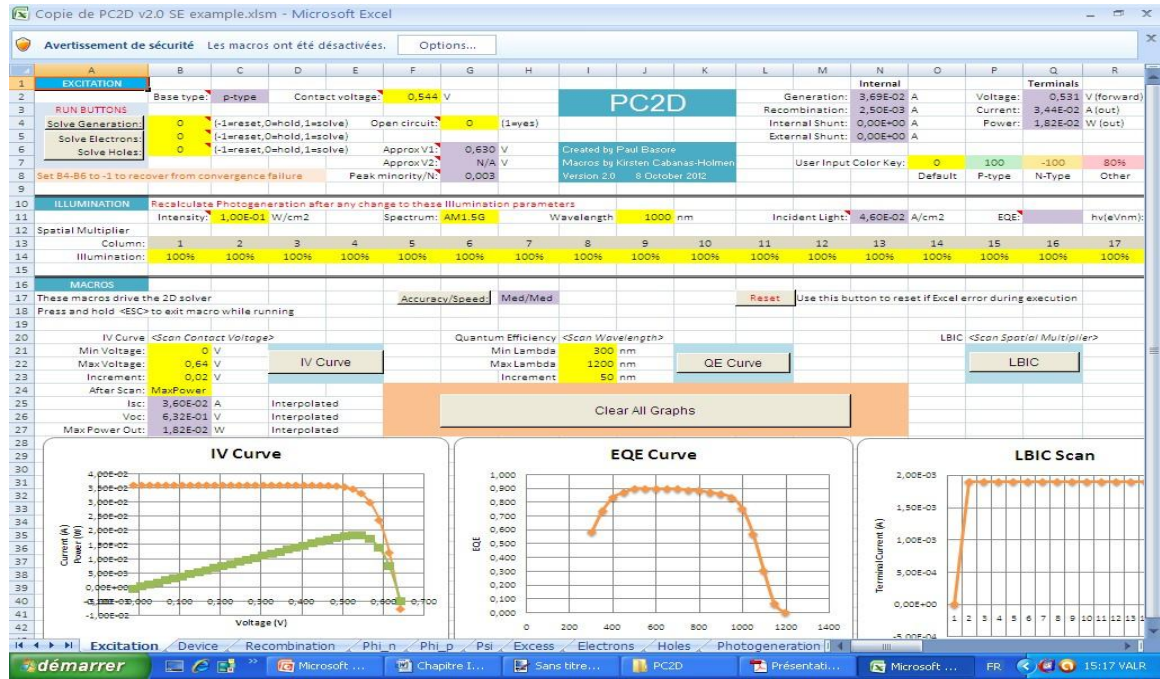


Figure IV-20 : Feuille d'exécution (excitation)

## IV.4 Conclusion

La simulation avec PC2D est basée sur un maillage rectangulaire où la région à simuler est divisée en une grille de (20x20) éléments rectangulaires identiques bordés donc par une maille de (21x21) nœuds. Cette grille est représentée de façon numérique (matrice) sur la feuille d'Excel avec les équations pour chaque cellule. Comme ces équations des porteurs sont non-linéaires, on utilise alors un calcul numérique itératif avec la méthode des éléments finis.

En effet, la cellule solaire est définie à partir des deux feuilles « **Device** » et « **Recombinaison** » du fichier Excel de PC2D. Le fichier du spectre solaire **AM1.5G** choisi comme référence est intégré dans la feuille « **Photogeneration** ». Quant aux résultats de la simulation, ils sont présentés sur la feuille « **Excitation** ».

Certains paramètres, à introduire dans PC2D, nécessitent des calculs intermédiaires utilisant PC1D ou bien tirés de l'expérience, il s'agit de la résistance de couche, la transmittance en fonction de la longueur d'onde et les différents courants de recombinaison.

**Chapitre V: Modélisation et  
optimisation des cellules solaires de  
type n**

## Chapitre V Modélisation et optimisation des cellules solaires de type n

Ce chapitre présente d'abord l'état de l'art du développement de la fabrication des cellules solaires de type n. Ensuite, on présente un résumé décrivant les étapes de calcul du programme PC2D. Puis, on aborde l'application du programme en étudiant la cellule solaire de type n respectivement à émetteurs homogène et sélectif afin d'optimiser ses paramètres dans le but d'améliorer ses performances. Dans une seconde étape, on compare les performances de ces cellules avec celles de type p d'Irysolar. Enfin, on étudie les effets bidimensionnels de la cellule de référence afin d'analyser l'évolution de ces effets en deux dimensions.

### V.1 Etat de l'art

La fabrication des cellules solaires sur substrat de type n est en cours de développement et d'exploitation par de nombreux laboratoires ([ITRPV 2016](#)). Certains modèles sont déjà industrialisés, d'autres sont en cours. On peut entre autres et à titre d'exemples citer certaines cellules réalisées sur substrat de type n :

- ([Benick et al. 2008](#)) sont parvenus à un rendement de conversion maximal de 23.2 % sur des cellules de 4 cm<sup>2</sup> de surface. La face avant de la cellule est passivée par une couche d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la texturation du front est réalisée en pyramides inversées et les contacts sont réalisés par électroplacage (en anglais : electroplating) avec un alliage de Al/Ti/Pd/Ag (Figure V-1).

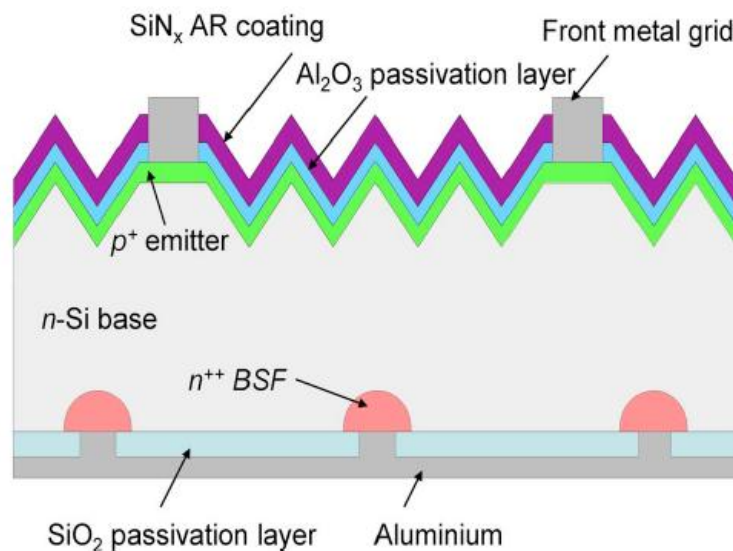


Figure V-1 : Cellule solaire de ([Benick et al. 2008](#))

- ECN (Energy research Centre of the Netherlands) en collaboration avec les industries Yingli et Tempres ont obtenu un rendement de conversion de 19.5% sur silicium Cz de surface 239 cm<sup>2</sup> ([Burgers et al. 2011](#)), la passivation de l'émetteur s'effectue par NAOS (Nitric Acid Oxydation of Silicon) et la métallisation en sérigraphie (Figure V-2).

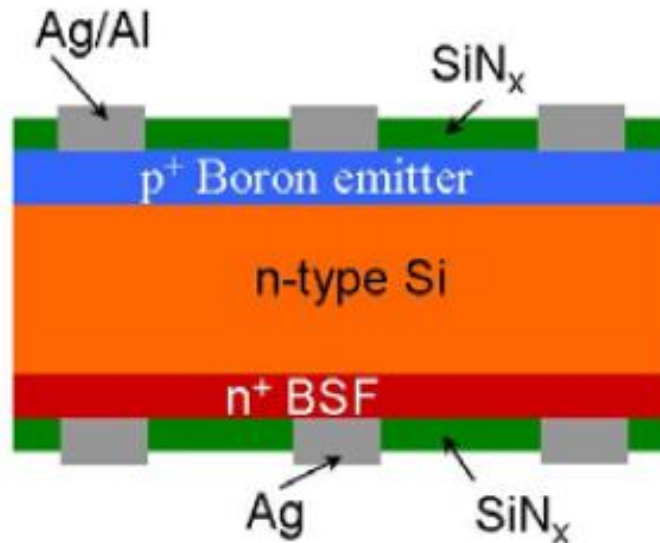


Figure V-2 : cellule solaire de ([Burgers et al. 2011](#))

- ISC Konstanz (International Solar Energy Research Center Konstanz-Germany) en collaboration avec Bosch Solar ont obtenu un rendement de conversion de 19.7 % sur silicium Cz de surface 241 cm<sup>2</sup> ([Böscke et al. 2011](#)). Le dépôt des métallisations est réalisé par placage (en anglais plating).
- INES (Institut National de l'Energie Solaire) a obtenu quant à lui un rendement de conversion de 19.3 % sur silicium Cz de 148.6 cm<sup>2</sup> ([Veschetti et al. 2011](#)). La diffusion de l'émetteur bore est réalisée à l'aide du composé gazeux BCl<sub>3</sub> et la passivation de l'émetteur utilise une double couche de SiO<sub>2</sub>/SiN (Figure V-3.)

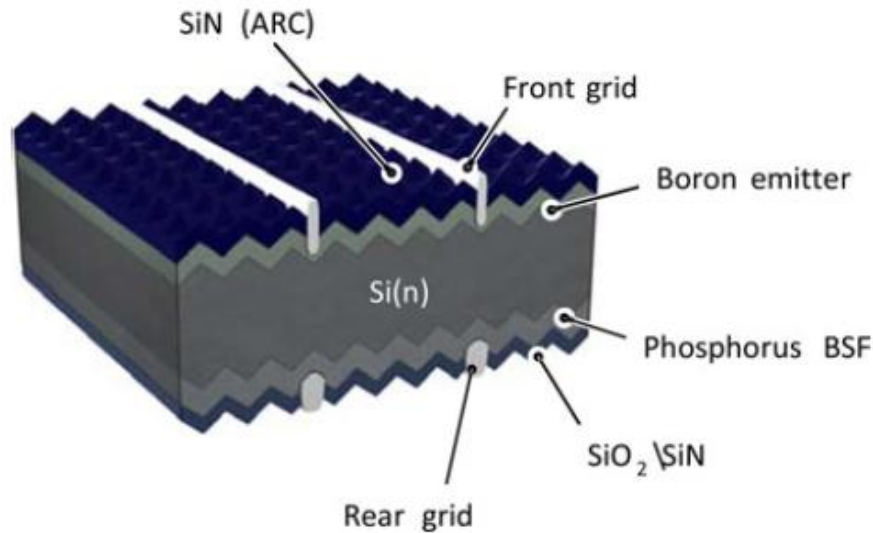


Figure V-3 : Cellule solaire de [\(Veschetti et al. 2011\)](#)

- Fraunhofer ISE (Institute for Solar Energy Systems) obtient un rendement de conversion de 19.6 % sur silicium FZ de 139.3 cm<sup>2</sup> de surface, sur une architecture de cellule non bifaciale [\(Kalio et al. 2011\)](#). La passivation de l'émetteur bore est réalisée par une couche double Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN<sub>x</sub>. La métallisation de la face avant est réalisée par impression de jet d'aérosol (aerosol jet printing) (Figure V-4).

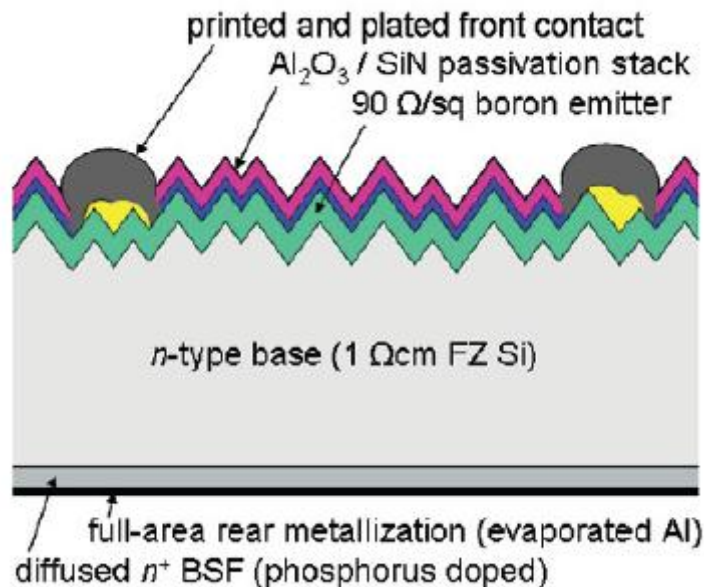


Figure V-4 : Cellule solaire de [\(Kalio et al. 2011\)](#)

C'est cette dernière cellule que nous avons choisi dans ce travail pour l'étudier en la comparant à ces performances pratiques ensuite optimiser ces différents paramètres. Cette cellule sera décrite ultérieurement en détails.

## V.2 Etapes de calculs

La méthode de simulation par PC2D et PC1D est exposée de manière détaillée dans le chapitre précédent. Seuls les calculs intermédiaires qui n'ont pas été clarifiés, sont complétés ici avec plus de précisions.

En effet, la cellule solaire est définie à partir des deux feuilles « **Device** » et « **Recombinaison** » du fichier Excel de PC2D. Le fichier du spectre solaire **AM1.5G** choisi comme référence est intégré dans la feuille « **Photogeneration** ». Quant aux résultats de la simulation, ils sont présentés sur la feuille « **Excitation** ».

Certains paramètres, à introduire dans PC2D, nécessitent des calculs intermédiaires utilisant PC1D (ou à l'aide d'un autre programme) ou bien tirés de l'expérience.

### V.2.1 Calculs intermédiaires

Certains paramètres ne sont pas déterminés par PC2D. Mais, l'utilisateur a le choix de les extraire de l'expérience pour plus de précisions ou de les déterminer par un programme unidimensionnel. [\(Cabanas-holmen & Basore 2012\)](#) ont présenté des méthodes simples utilisant PC1D pour estimer ces paramètres qui sont :

#### V.2.1.1 La Résistance de couche « Sheet Resistance »

Dans le cas où la zone fortement dopée est formée seulement à la surface, il est plus difficile d'évaluer l'épaisseur et par conséquent de remonter à la résistivité et au dopage. La résistance de couche (ou carrée) sera donc le paramètre permettant d'évaluer le dopage. Elle est définie comme suit (section III.4.1) :

$$R_{sh} = \frac{\rho}{d}$$

$R_{sh}$  est exprimée en  $\Omega$  (on utilise souvent l'unité  $\Omega/\square$  -ohms carrés),  $\rho$  la résistivité en  $\Omega.cm$  et  $d$  l'épaisseur de la zone dopée en **cm**. Elle est introduite dans la feuille « **Device** » pour les deux faces (avant et/ou arrière).

Cette résistance peut être mesurée avec la méthode des quatre pointes (section III.4.1). Si elle n'est pas fournie expérimentalement, on peut l'obtenir théoriquement par PC1D si on connaît son type du dopage, son profil, la valeur et la position de son pic (maximum de concentration) et enfin son facteur de profondeur (Figure V-5).

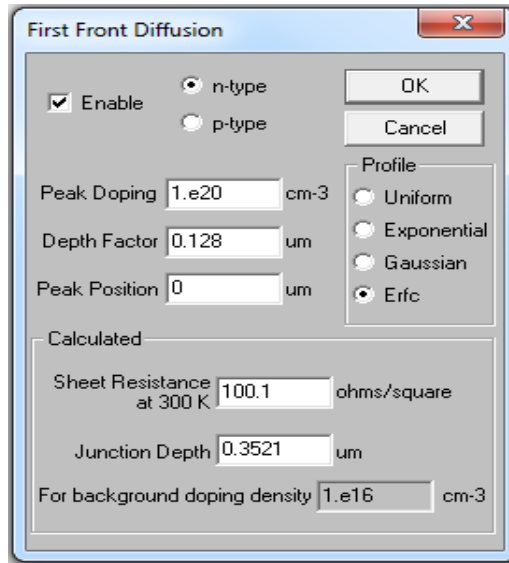


Figure V-5 : Calcul de la résistance de couche

### V.2.1.2 Transmittance en fonction de la longueur d'onde

Pour estimer le rayon transmis par la cellule éclairée, on estime, dans PC1D, sa transmittance en fonction de la longueur d'onde du rayonnement solaire. Elle est introduite par la suite dans la partie optique (**Wavelength Multiplier**) de la feuille « **Device** » (section IV.3.3.1, partie 4). Pour calculer ces valeurs, on procède selon les étapes suivantes :

- Définir, dans PC1D, la géométrie de la cellule et ses paramètres avec la couche antireflet comme donnée principale,
- Simuler la réponse spectrale interne (IQE) pour extraire la réflectance  $R(\lambda)$  en fonction de la longueur d'onde,
- Transposer cette réflectance (copier son fichier à partir de sa courbe dans un fichier texte avec l'extension REF),
- Elever au carré la réflectance  $R(\lambda)$  (pour tenir compte de la texturisation, voir section III.2.1.1),
- Construire un nouveau fichier texte  $R^2(\lambda)$ ,
- Re-simuler la réponse spectrale interne en introduisant le nouveau fichier  $R^2(\lambda)$ .

La transmittance est égale à la réponse spectrale externe (EQE) pour les longueurs d'onde inférieures à 600 nm, pour les longueurs d'onde supérieures à 600 nm, la transmittance est égale à 100% moins la réflectance.

Notant que le fichier de réflectance peut être introduit directement s'il est fourni par l'expérience.

### V.2.1.3 Courant de recombinaison $J_{01}$

C'est le courant de recombinaison dans les zones neutres. Comme il est montré dans la Figure IV-18, le courant de recombinaison est saisi dans la feuille « **Recombinaison** » aux différentes régions des deux surfaces avant et arrière. S'il n'est pas acquis expérimentalement,  $J_{01}$ , à la surface envisagée, est évalué en procédant selon les étapes suivantes (Figure V-6) :

- Faire entrer dans PC1D les paramètres de la surface concernée : aire, texture, profil du dopage, charge et vitesse de recombinaison,
- S'assurer que le circuit électrique de la cellule ne possède pas des résistances extérieures série ( $R_s=0$ ) et shunt ( $R_p=\infty$ ),
- Inverser le dopage de la surface juxtaposée par rapport à celui de la surface étudiée et ce pour créer une jonction,
- Prendre une durée de vie en volume (bulk) élevée (de l'ordre d'une seconde) et une vitesse de recombinaison nulle pour la surface opposée,
- Appliquer une polarisation directe  $V$  dans l'obscurité d'environ **0.5** volts (au voisinage du point de fonctionnement, voir Figure II-16 dans la section II.3.4.4), puis enregistrer le courant d'obscurité  $J$  (en utilisant PC1D).
- Calculer le courant de recombinaison avec la formule  $J_{01} = J e^{\frac{-V}{V_t}}$ .

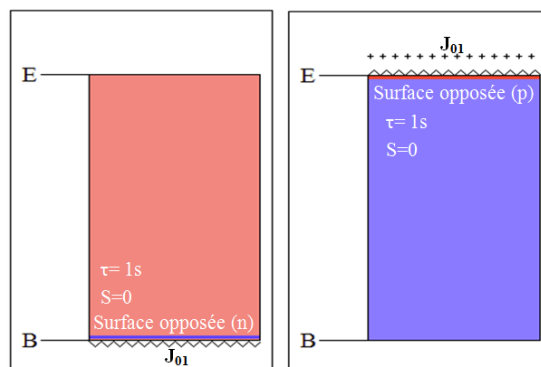


Figure V-6 : Calculs des courants de recombinaison  $J_{01}$  (à droite : surface avant, à gauche : surface arrière)

#### V.2.1.4 Courant de recombinaison $J_{02}$

C'est le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace. Pour le déterminer, les mêmes étapes sont suivies que précédemment. Mais, on applique une polarisation directe  $V$  dans l'obscurité d'environ **0.2** volts (Voir Figure II-16 dans la section II.3.4.4).

Le courant  $J_{02}$  est calculé partir de la formule  $J_{02} = J e^{\frac{-V}{2V_t}}$ .

### V.3 Simulation

#### V.3.1 Paramètres de la cellule à étudier

Il s'agit d'une cellule solaire  $p^+nn^+$  au silicium monocristallin à deux busbarres, tiré avec le procédé FZ avec un dopage d'environ  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  correspondant à  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ , d'une surface réelle carrée de  $139.3 \text{ cm}^2$  ( $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ). L'émetteur homogène est dopé par diffusion thermique au bore avec une résistance de couche de  $90 \Omega/\square$  (HE90 : en anglais HE pour Homogeneous Emitter et 90 pour la résistance de couche de  $90 \Omega/\square$  de l'émetteur) correspondant à une concentration superficielle de dopage de  $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et une profondeur d'environ  $0.25 \mu\text{m}$ , calculée avec PC1D ([Clugston & Basore 1997](#)). La surface avant est texturée avec le composé alcalin (KOH) dans le but d'avoir une structure pyramidée d'une angle de  $54.74^\circ$  et d'une profondeur de  $3 \mu\text{m}$ , passivée avec l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) puis recouverte d'une couche antireflet de nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ) ([Kalio et al. 2011](#)) et ([Richter et al. 2010](#)).

La métallisation est réalisée par électroplacage d'argent (en anglais : electroplating) utilisant l'impression par jet d'encre (inkjet printing) ou par jet d'aérosol (aerosol jet printing). Elle a été optimisée par ([Kalio et al. 2011](#)) (Fraunhofer ISE) donnant une résistance de contact de  $3.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , une résistance série de  $0.64 \Omega \cdot \text{cm}^2$  et une résistance shunt de  $65 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

La face arrière est dopée par diffusion au phosphore ( $n^+$ ) à profil gaussien de résistance de couche  $30 \Omega/\square$  correspondant à une concentration superficielle de dopage de  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et d'une profondeur de  $2 \mu\text{m}$ . Quant au contact arrière, il est réalisé avec de l'aluminium évaporé sur toute la surface de la cellule (Figure V-7).

Les paramètres optiques pour toutes les cellules solaires simulées sont tirés d'exemples de ([Basore & Cabanas-Holmen 2014](#)).

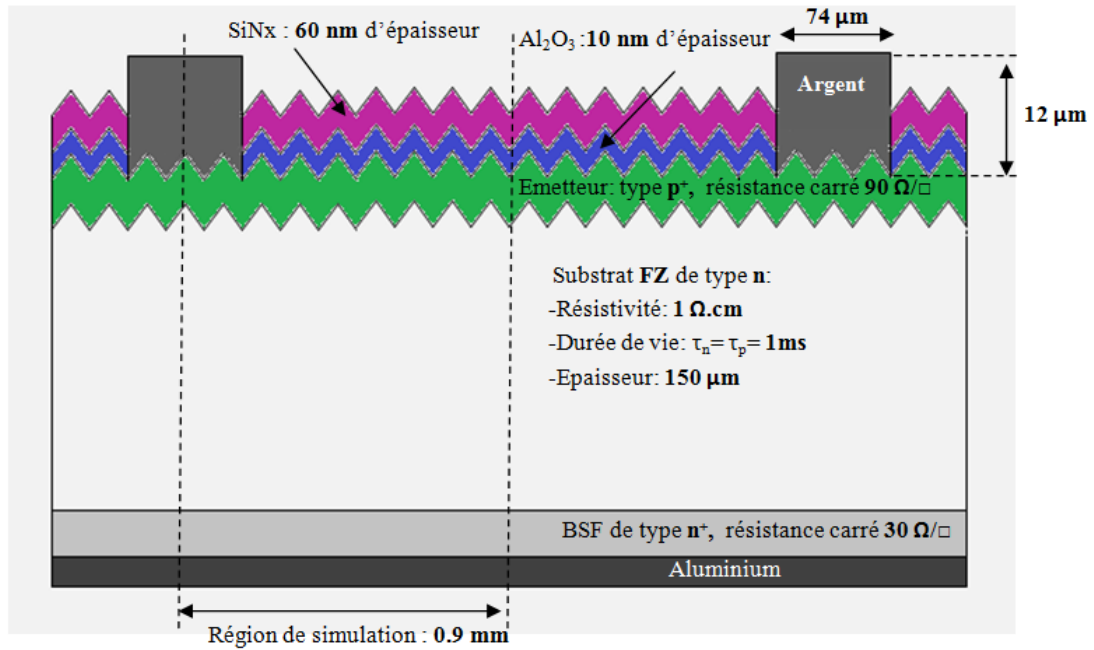


Figure V-7 : Structure et paramètres de la cellule solaire simulée à émetteur homogène HE90

### V.3.2 Résultats et comparaison

Afin de valider notre programme, on l'applique sur la cellule de (Kalio et al. 2011). La simulation avec ces paramètres (Figure V-8) (Mekemeche et al. 2017) donne les résultats suivants, présentés dans le Tableau V-1. Les résultats trouvés (densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ ) sont approchés aux résultats mesurés de la cellule solaire étudiés par (Kalio et al. 2011).

| Cellule             | $J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{co}$ (mV) | FF (%) | $\eta$ (%) |
|---------------------|--------------------------------|---------------|--------|------------|
| Expérimentée (HE90) | 38.00                          | 651.6         | 79.00  | 19.60      |
| Simulée (HE90)      | 37.46                          | 649.5         | 80.92  | 19.68      |

Tableau V-1 : Résultats des deux cellules (expérimentée /simulée)

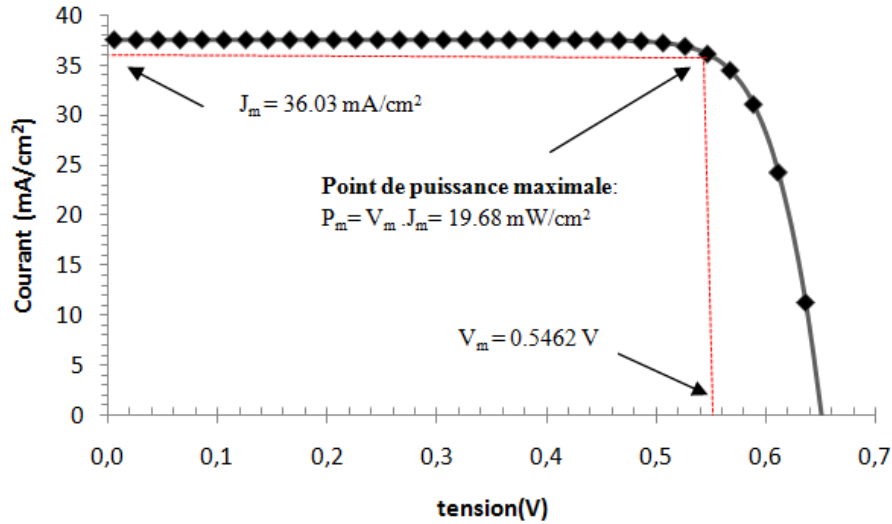


Figure V-8 : Caractéristiques de la cellule solaire simulée (HE90)

On note que la valeur de la densité de courant de court-circuit est légèrement inférieure à celle expérimentale (différence d'environ  $0.5 \text{ mA/cm}^2$ ). La même chose est constatée pour la valeur de la tension de circuit ouvert (environ  $0.2 \text{ mV}$ ). Concernant le facteur de forme, il est faiblement supérieur à celui expérimental (moins de 2%) (Tableau V-1).

Ce bon accord avec l'expérience nous permet donc d'utiliser ce programme pour l'étude de cette cellule, puis l'optimiser tout en modifiant ses différents paramètres.

## V.4 Optimisation

Du moment que nous avons trouvé approximativement les mêmes résultats (entre les cellules réelles et celle simulées), on passe à l'optimisation des paramètres des différentes régions (base, émetteur et couche BSF).

Les paramètres les plus importants de la base sont la durée de vie, la résistivité et l'épaisseur. Ces paramètres ont un rôle très important dans la collecte des porteurs de charge et influent de manière significative sur le photocourant de la cellule solaire et donc indirectement sur son rendement de conversion.

D'autre part, la résistance de couche de l'émetteur a également un grand effet sur les courants de recombinaisons, et par conséquent sur la tension de circuit ouvert (Goetzberger et al. 1998)

Par ailleurs, la couche du BSF a aussi un effet important sur les performances de la cellule solaire. Le BSF crée une barrière de potentiel tendant à confiner les porteurs minoritaires (trous) dans la région la moins dopée et aide à les conduire vers la face avant, en améliorant ainsi le rendement de conversion.

## V.4.1 Effet des paramètres de la base

### V.4.1.1 Effet de la durée de vie

En faisant varier la durée de vie des porteurs minoritaires de 100  $\mu\text{s}$  à 2.5 ms, les courbes obtenues possèdent la même allure. Tous les paramètres de la cellule augmentent rapidement jusqu'à environ 1 ms correspondant à 649.5 mV de  $V_{co}$ , 37.46 mA/cm<sup>2</sup> de  $J_{cc}$ , 80.92 % de FF et 19.68 % de  $\eta$ .

Au-delà de cette valeur critique de la durée de vie, la croissance des courbes devient lente (Figure V-9). Ce résultat était prévu car l'accroissement de la durée de vie entraîne une meilleure collecte des porteurs de charge.

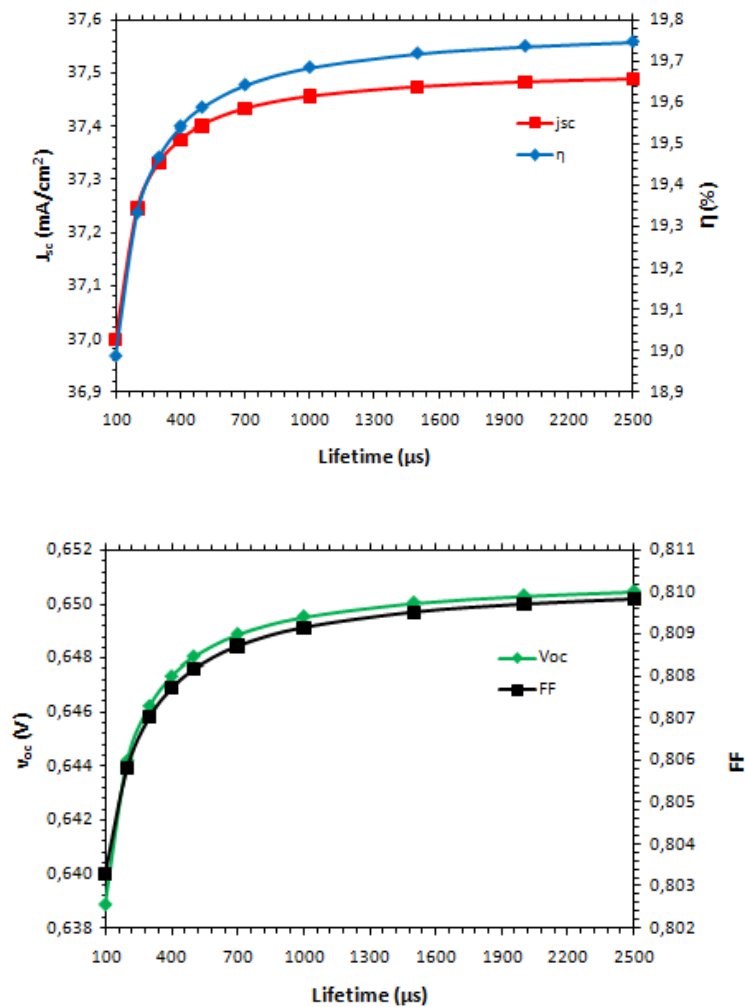


Figure V-9 : Effet de la durée de vie sur les paramètres de la cellule solaire : en haut  $J_{cc}$  et  $\eta$ , en bas  $V_{co}$  et FF

### V.4.1.2 Effet de la résistivité

Lorsque la résistivité de la base varie de 1 à 10  $\Omega\cdot\text{cm}$  (Figure V-10), on constate que le courant de court-circuit augmente jusqu'à la valeur de 37.89  $\text{mA}/\text{cm}^2$  correspondant à une résistivité de base de 6  $\Omega\cdot\text{cm}$ . Au-delà de cette valeur, l'amélioration n'est pas trop significative. Comme il fallait s'attendre, cette progression est due à la diminution du courant de recombinaison en raison de la réduction du dopage de la base (Sze & Ng 2007).

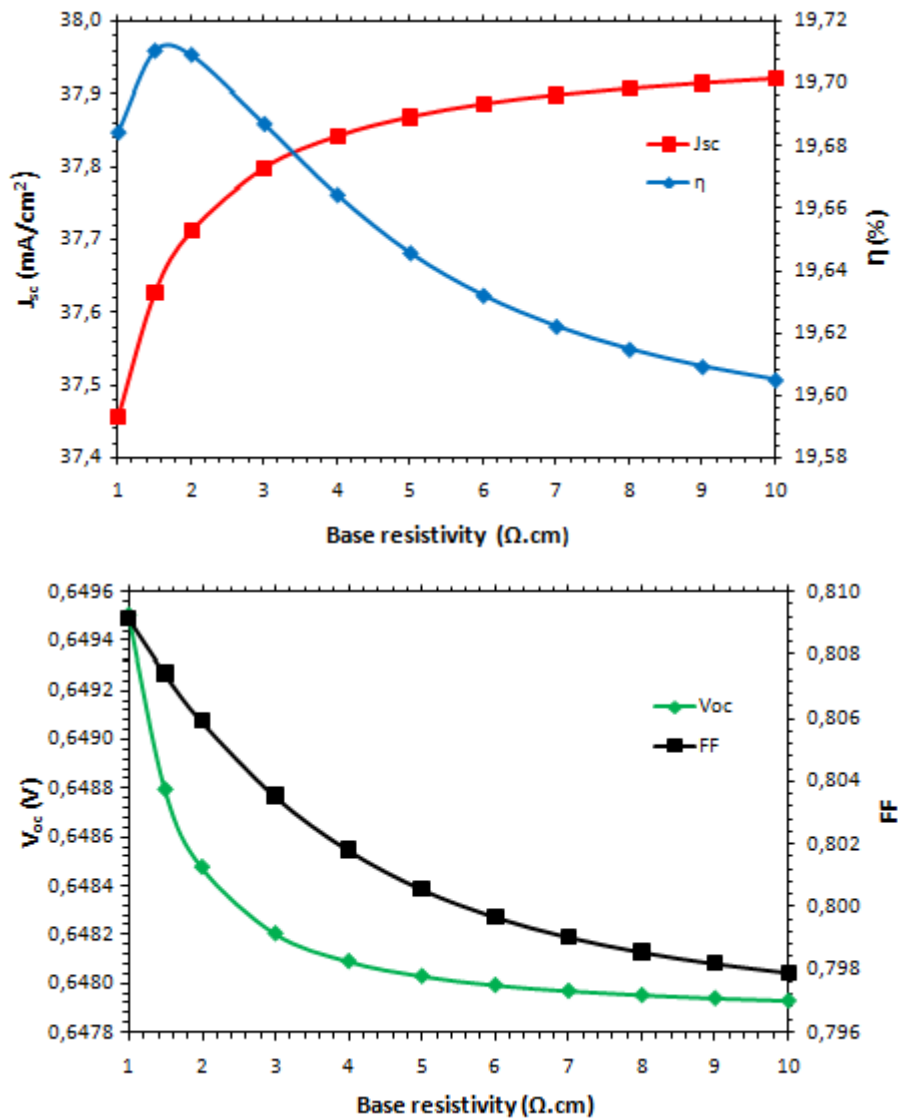


Figure V-10 : Effet de la résistivité de base sur les paramètres de la cellule solaire : en haut  $J_{cc}$  et  $\eta$ , en bas  $V_{co}$  et FF

Au contraire, la tension de circuit ouvert diminue légèrement avec la résistivité de la base (variation de 1.5 mV dans l'intervalle 1-5  $\Omega\cdot\text{cm}$ ), puis devient presque invariable

(Figure V-10). Théoriquement, ce résultat est attendu car la réduction du dopage de la base augmente le courant de saturation qui réduit la tension de circuit ouvert, cette diminution est faible car cette tension est également fonction du courant de court-circuit. Elle est exactement proportionnelle au logarithme népérien du quotient du courant de court-circuit au courant de saturation comme il est montré dans le deuxième chapitre par l'équation (II-108) qui peut être approchée à la relation suivante (Goetzberger et al. 1998) :

$$V_{oc} \approx (k_B T / q) \ln \left( \frac{j_{cc}}{j_0} \right) \quad (V-1)$$

De même, le facteur de forme diminue avec la résistivité due à l'augmentation de la résistance de base.

Par conséquent, le résultat est une optimisation du rendement de conversion de 19.71 %, montré sur le graphe dans l'intervalle 1.5-2  $\Omega \cdot \text{cm}$  (Figure V-10).

#### V.4.1.3 Effet de l'épaisseur

Il est clair que l'augmentation de l'épaisseur du substrat est un avantage pour absorber plus de photons, mais si la longueur de diffusion  $L$  est inférieure à l'épaisseur de la base, le photocourant est fortement diminué (Goetzberger et al. 1998). Ainsi, le courant de court-circuit et le rendement de conversion sont optimisés à 37.86 mA/cm<sup>2</sup> et 19.89 % respectivement au voisinage 400  $\mu\text{m}$  d'épaisseur (Figure V-11), ce qui explique le choix actuel de cet ordre de grandeur des épaisseurs des cellules conventionnelles.

On constate que le facteur de forme diminue de 80.98 % pour l'épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  à 80.64 % pour 600  $\mu\text{m}$ . C'est en raison de l'augmentation de la résistance de la base que cette diminution est due, puisque le facteur de forme est affecté par la résistance série. Notant par ailleurs qu'un substrat trop épais accroît le coût.

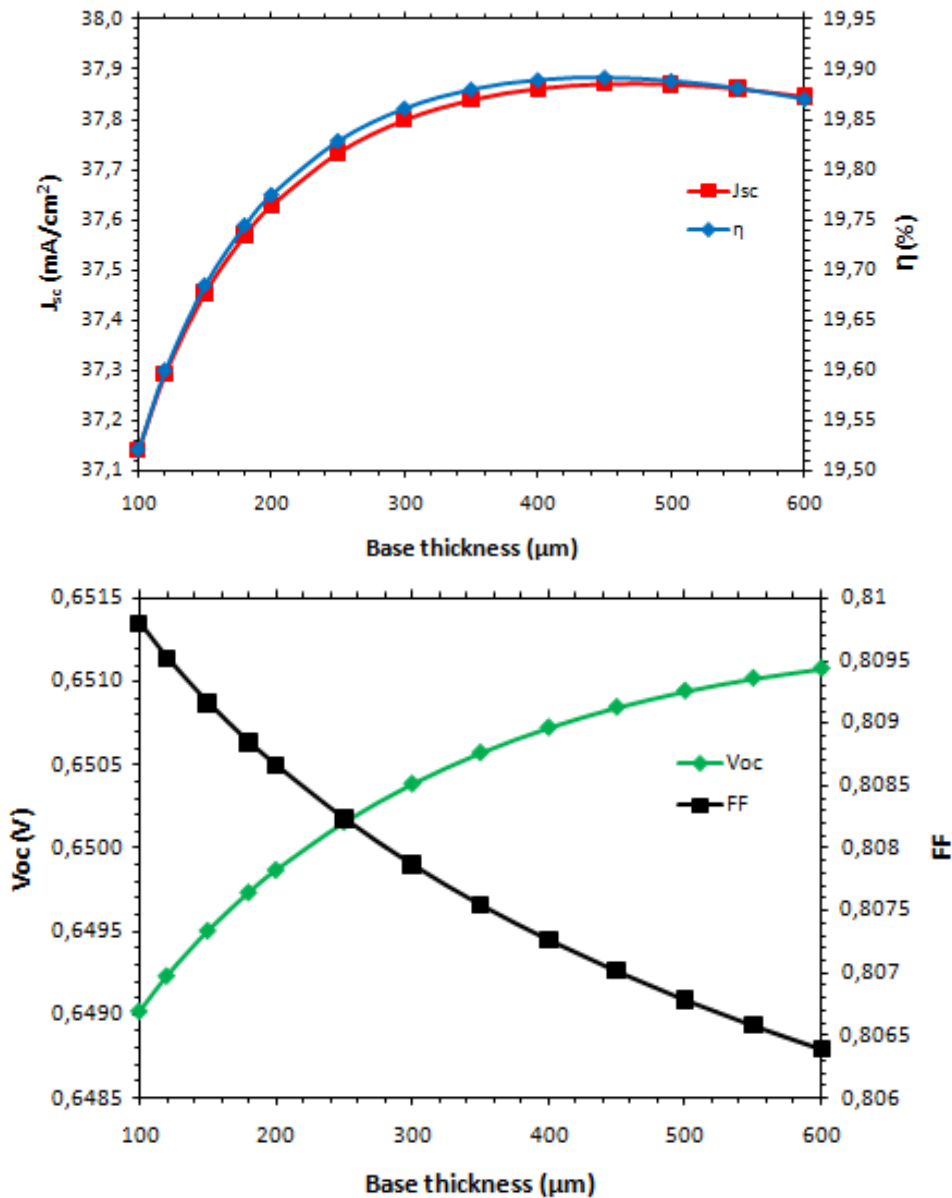


Figure V-11 : Effet de l'épaisseur de base sur les paramètres de la cellule solaire : en haut  $J_{sc}$  et  $\eta$ , en bas  $V_{oc}$  et FF

#### V.4.2 Effet de la résistance de couche de l'émetteur

On remarque que le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmentent avec la résistance de couche de l'émetteur (Figure V-13), puisque la réduction du dopage de l'émetteur diminue le courant de recombinaison dans l'émetteur de  $143.53 \text{ fA}/\text{cm}^2$  pour  $50 \Omega/\square$  à  $44.3 \text{ fA}/\text{cm}^2$  pour  $100 \Omega/\square$  (calculés avec PC1D).

Au contraire, le facteur de forme diminue à cause de l'augmentation de la résistance de l'émetteur. Par conséquent, on aura une optimisation du rendement de conversion à  $75 \Omega/\square$  (moyenne du petit intervalle de  $70\text{-}80 \Omega/\square$ ) donnant une valeur de 19.70 %,

car une résistance de couche élevée cause un faible courant de recombinaison. Au-delà de cette gamme de valeurs, le rendement de conversion diminue puisque la résistance série devient prédominante.

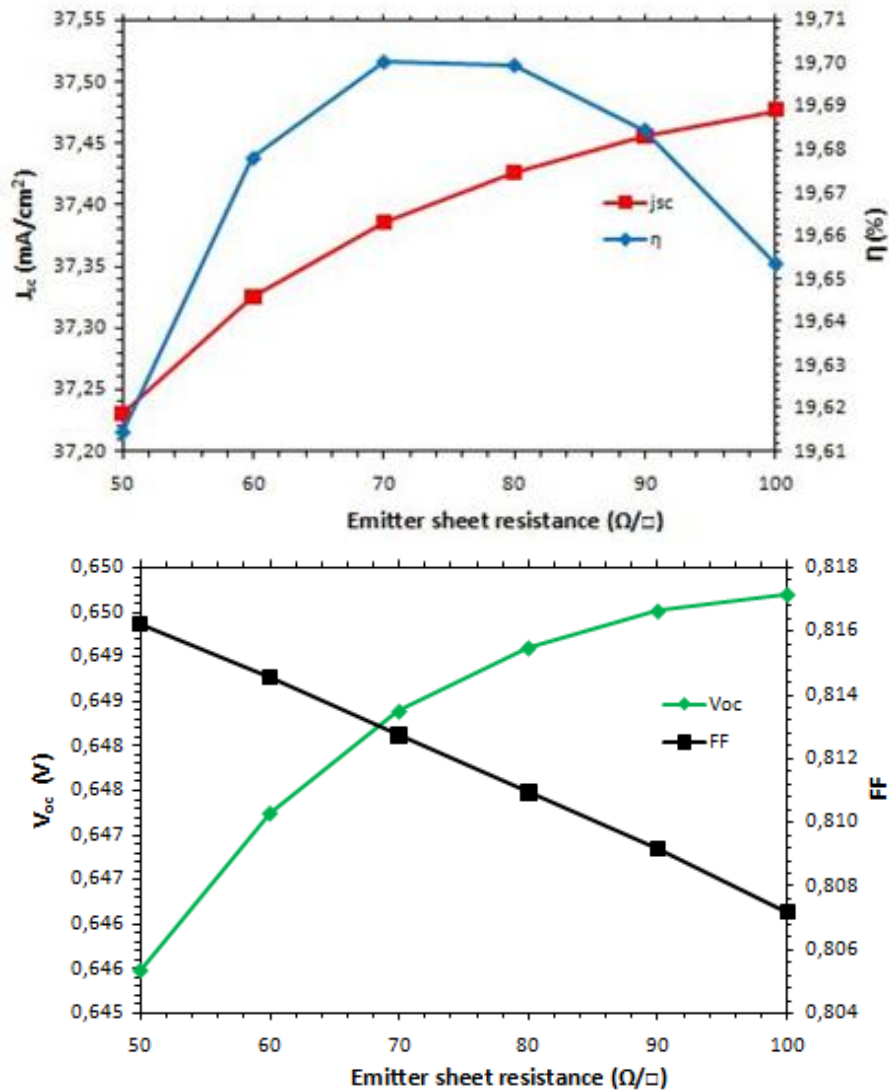


Figure V-12 : Effet de la résistance de couche de l'émetteur sur les paramètres de la cellule solaire : en haut  $J_{sc}$  et  $\eta$ , en bas  $V_{oc}$  et FF

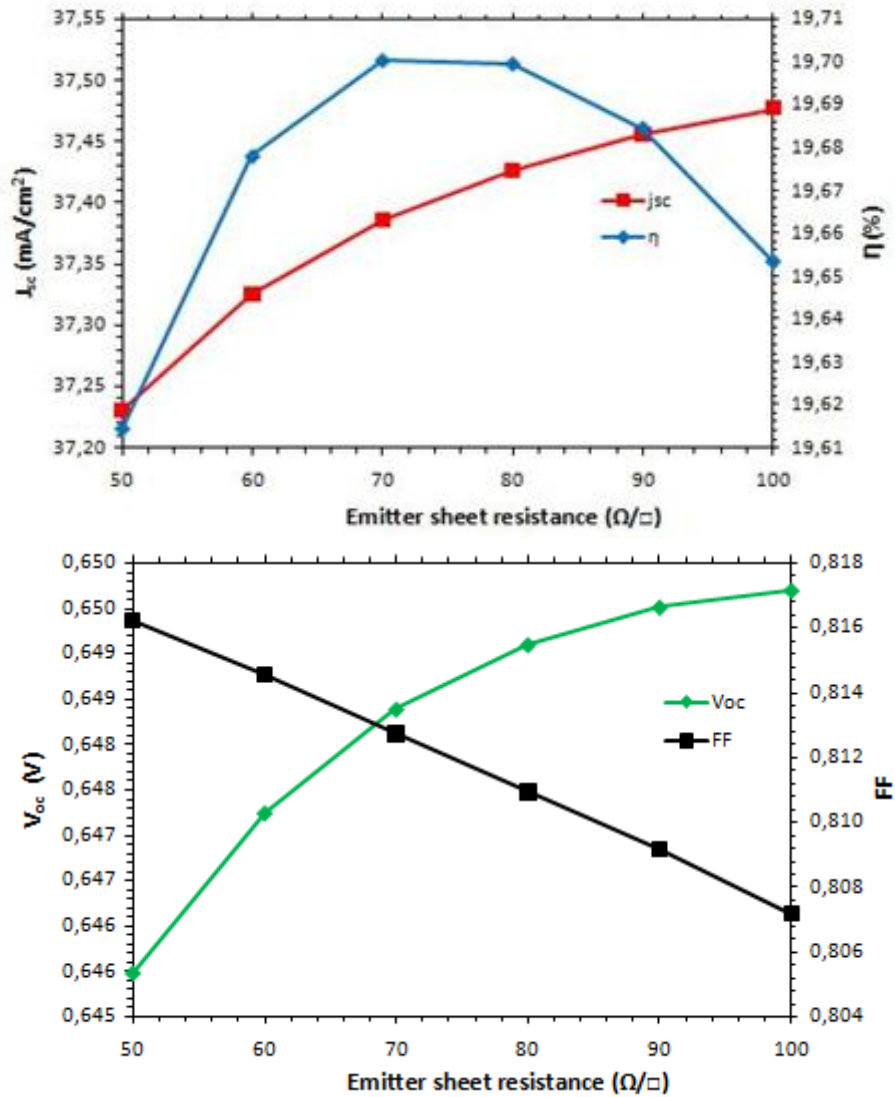


Figure V-13 : Effet de la résistance de couche de l'émetteur sur les paramètres de la cellule solaire :-en haut :  $J_{sc}$  et  $\eta$  -en bas  $V_{oc}$  et FF

Ce qui explique notre choix de rajouter un émetteur sélectif à la structure homogène, qui montre son utilité importante (Poulain et al. 2012). En effet, la structure à émetteur sélectif (Figure V-14) permet (Rahman 2012) :

- Sous les contacts : de réduire la résistance de couche dans le but de faire diminuer la résistance série.
- Entre les contacts : d'augmenter la résistance de couche et donc de diminuer le courant de recombinaison

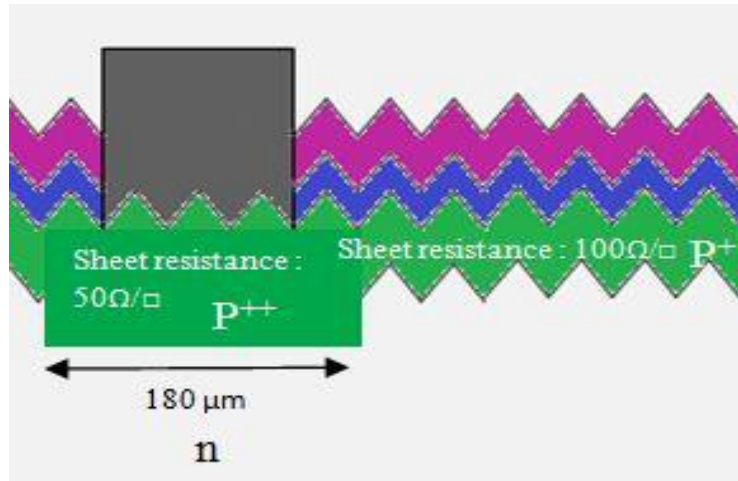


Figure V-14 : Partie agrandie de la structure de l'émetteur sélectif

(En anglais : Selective Emitter (SE))

### V.4.3 Effet du champ de surface arrière (BSF)

Les courbes (Figure V-15) montrent que les quatre paramètres de la cellule diminuent avec l'augmentation de la résistance de couche du BSF. En d'autres termes, l'augmentation du dopage BSF provoque une amélioration de l'intensité du champ de surface arrière dans la jonction  $n^+/n$  créant une barrière de potentiel qui tend à confiner les porteurs minoritaires (trous) dans la région légèrement dopée et aide à les pousser vers le front.

Par conséquent, le courant de court-circuit augmente. La tension de circuit ouvert progresse en raison de sa relation avec le courant de court-circuit (équation (V-1)) Ainsi, le rendement de conversion et le facteur de forme montent sensiblement. Par exemple, le rendement passe de 19.06 % pour la cellule solaire sans BSF à 19.68 % avec BSF pour une résistance de couche de  $30 \Omega/\square$  (cellule réelle), amélioré ensuite par notre étude à 19.82 % pour un BSF de  $20 \Omega/\square$ .

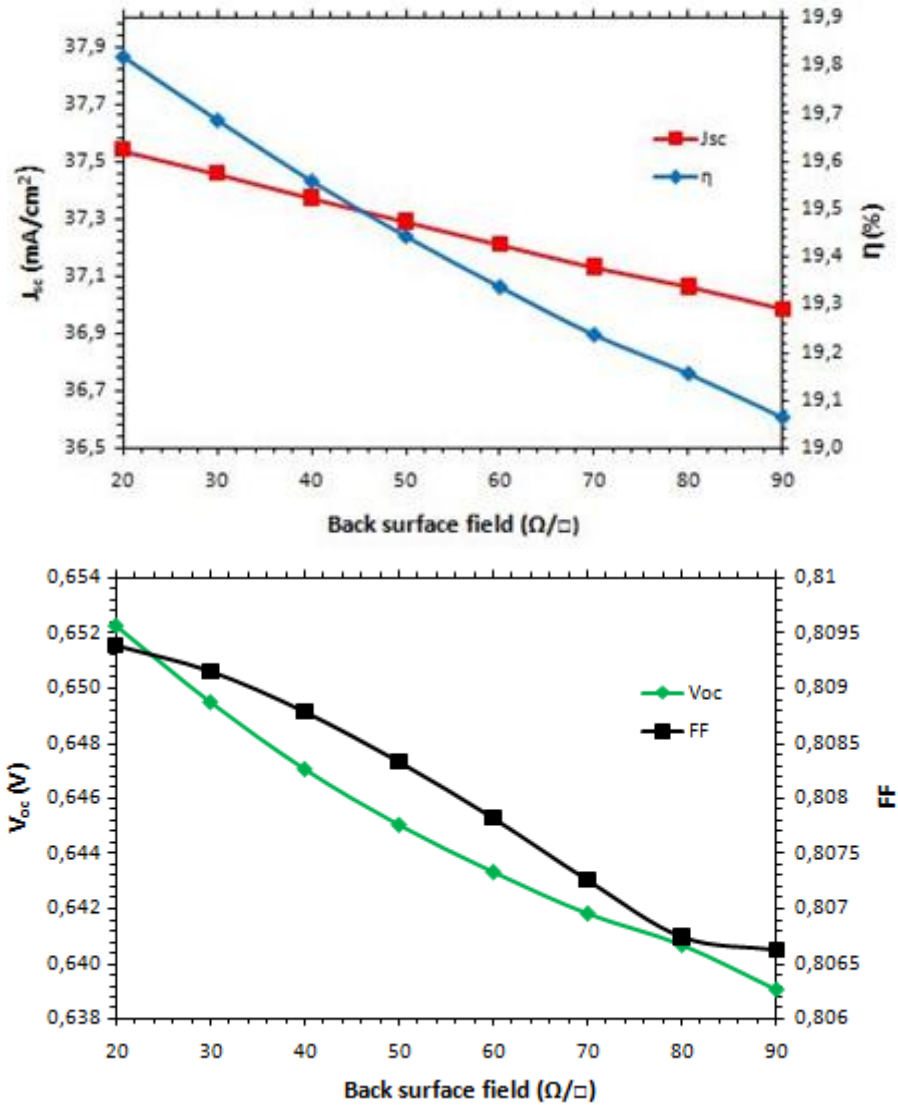


Figure V-15 : Effet du champ de surface arrière sur les paramètres de la cellule solaire : en haut  $J_{sc}$  et  $\eta$ , en bas  $V_{oc}$  et FF

## V.5 Performances de la cellule solaire optimisée

D'après l'étude faite, les valeurs optimisées sont :

- L'épaisseur (250  $\mu\text{m}$ ),
- La résistivité 1.75  $\Omega\cdot\text{cm}$  (moyenne de la fourchette : 1.5-2  $\Omega\cdot\text{cm}$ ),
- La durée de vie du substrat (1.5 ms),
- du BSF (20  $\Omega/\square$ ).

Avec ces paramètres, l'optimisation donne les résultats suivants présentés dans le Tableau V-2.

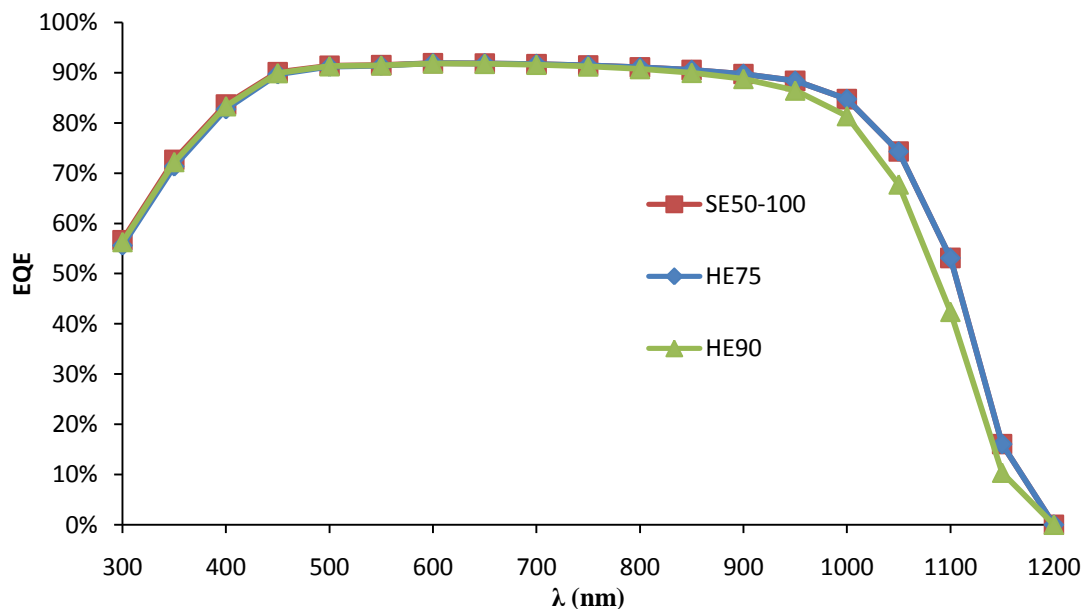
| Cellule                              | Jcc (mA/cm <sup>2</sup> ) | Vco (mV) | FF (%) | η (%) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|--------|-------|
| <b>Optimisée 75 Ω/□ (HE75)</b>       | 38.07                     | 651.50   | 80.86  | 20.05 |
| <b>Exemple 50-100 Ω/□ (SE50-100)</b> | 38.14                     | 654.56   | 80.90  | 20.20 |

**Tableau V-2 : Résultats des cellules solaires optimisées :**

L'optimisation de la cellule référence de Kalio (HE90) conduit à deux structures:

- la première cellule à émetteur homogène de 75 Ω/□ (HE75) avec un gain absolu de 0.37 % en rendement.
- la seconde cellule (SE50-100) à émetteur sélectif de 50 Ω/□ sous les contacts et 100 Ω/□ entre les contacts (Figure V-13 ) avec un gain absolu de 0.52 % en rendement de conversion.

Cette amélioration est clairement confirmée par la courbe du rendement quantique externe (EQE) dans la gamme des longueurs d'onde infrarouge en raison de la bonne collecte des porteurs de charge dans la base des cellules solaires optimisées (optimisation des paramètres de la base et BSF) (Figure V-16).



**Figure V-16 : Comparaison des rendements quantiques externes de SE50-100, HE75 et HE90**

On peut également constater l'amélioration de 0.15 % en rendement de la cellule (SE50-100) par rapport à celle de (HE75) en raison de l'intégration de l'émetteur sélectif (Figure V-17).

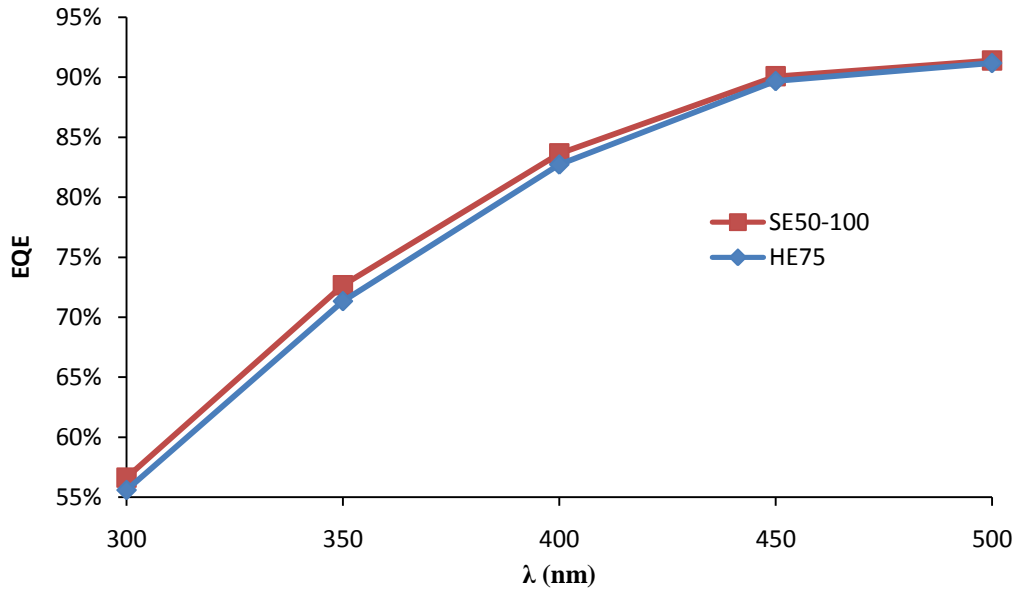


Figure V-17 : Comparaison du rendement quantique externe de SE50-100 et HE75

On remarque que cette structure permet une amélioration du rendement quantique dans la gamme des longueurs d'onde ultraviolettes à cause de la diminution du courant de recombinaison de  $73 \text{ fA/cm}^2$  à  $44.3 \text{ fA/cm}^2$  (section V.4.2), résultant d'un taux de recombinaison plus faible, principalement du type Auger, en raison de la résistance de couche plus élevée de l'émetteur (entre les contacts) (section II.2.4.2.2). Au contraire, aux longueurs d'onde plus grandes, les deux cellules donnent des résultats identiques, confirmant que la structure à SE n'influence pas beaucoup sur le volume ou sur la surface arrière de ces cellules, mais l'absorption est plus superficielle. Ce résultat peut être amélioré en effectuant une étude détaillée sur cette structure.

## V.6 Comparaison avec les performances de la cellule à substrat de type p

Comme on l'a constaté durant cette étude en troisième chapitre (section III.2), les cellules solaires de type n apparaissent, selon certains de ses paramètres, avantageuses que celles de type p. Pour concrétiser l'étude théorique faite, on va comparer les cellules à substrat de type n étudiées avec celles à substrat de type p réalisées par

Irysolar (Montpellier, France) (<http://www.societe.com/societe/irysolar-487865594.html>).

### V.6.1 Paramètres des cellules d'Irysolar

Les cellules étudiées ici sont élaborées chez Irysolar. Ce sont des cellules semi-carrées  $n^+pp^+$  en silicium monocristallin de surface réelle de  $234.60 \text{ cm}^2$  ( $15.6 \text{ cm} \times 15.6 \text{ cm}$ ) et d'épaisseur de  $220 \text{ }\mu\text{m}$ , texturisées en solution alcaline (KOH) formant des pyramides directes à épaisseur de  $3 \text{ }\mu\text{m}$ . L'émetteur, dopé au phosphore, est réalisé sur un substrat de type p de résistivité  $2 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ . La durée de vie de  $100 \text{ }\mu\text{s}$  des porteurs dans le substrat est prise de la littérature générale (Figure V-18).

La résistance carrée de l'émetteur de la cellule à émetteur homogène est de l'ordre  $75 \text{ }\Omega/\square$  (notée dans tout ce qui suit : HE75) tandis que celle de la cellule à émetteur sélectif (réalisé par un dopage laser) est de  $40 \text{ }\Omega/\square$  et  $100 \text{ }\Omega/\square$ , respectivement sous et entre les contacts (SE40-100), d'une largeur de  $200 \text{ }\mu\text{m}$  de la zone surdopée. Pour la face arrière, la résistance de couche formant le BSF est de  $20 \text{ }\Omega/\square$  (Figure V-19).

La couche antireflet (CAR) est composée de nitrure de silicium  $\text{SiN}_x$  d'épaisseur  $80 \text{ nm}$  et d'indice de réfraction 2.03, autour de la longueur d'onde  $600 \text{ nm}$  du spectre solaire.

La métallisation de la face avant est une grille sérigraphiée en argent (Ag) de hauteur  $15 \text{ }\mu\text{m}$ , de résistivité  $3.9 \times 10^{-6} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , formée de 3 busbarres larges de  $2 \text{ mm}$ , espacés de  $52 \text{ mm}$  et de 65 doigts de largeur  $90 \text{ }\mu\text{m}$  chacun, sont distants de  $2.2 \text{ mm}$  et perpendiculaires aux busbarres (en forme de peigne). Quant à la métallisation de la face arrière, elle est en sérigraphie d'aluminium (Al), de résistivité  $5.6 \times 10^{-6} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , est de hauteur  $20 \text{ }\mu\text{m}$ , alternée d'Ag directement en face sous les busbarres (Figure V-20).

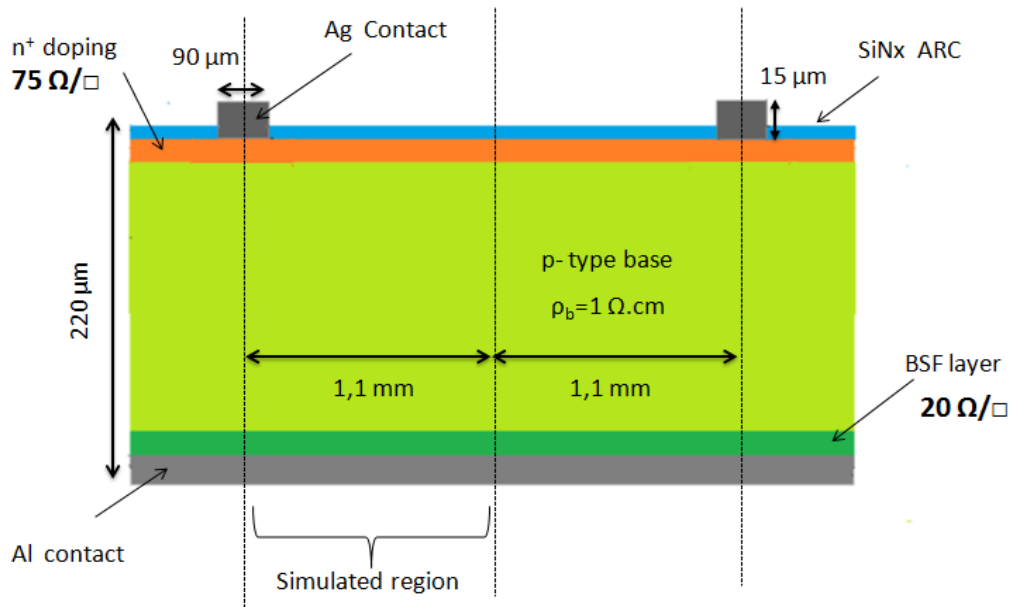


Figure V-18 : Structure et paramètres de la cellule solaire simulée à émetteur homogène HE75

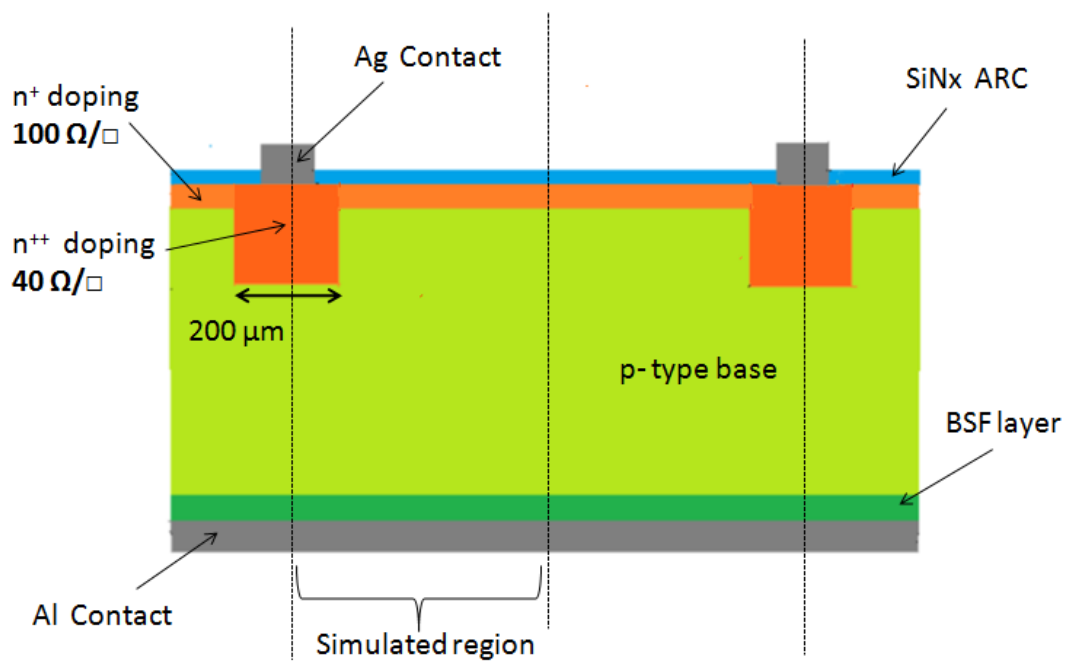


Figure V-19 : Structure et paramètres de la cellule solaire simulée à émetteur sélectif SE40-100

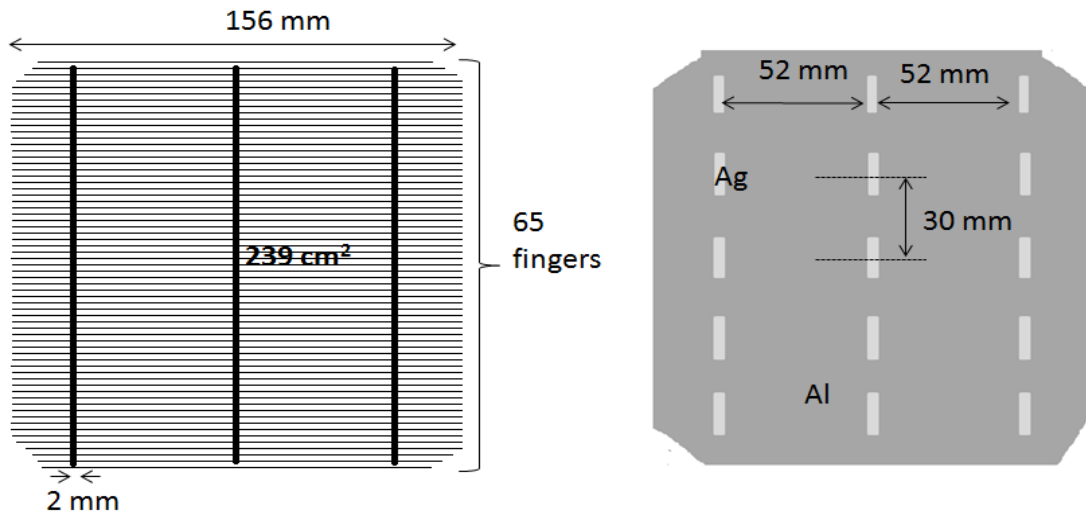


Figure V-20 : Géométrie de la métallisation faces avant (à droite) et arrière (à gauche)

## V.6.2 Résultats

On constate que l'amélioration des performances de la cellule SE40-95 par rapport à celle HE-75 est significative. En effet, le gain en rendement porté sur le Tableau V-3 est de l'ordre de 0.2 %.

| Cellule  | Jcc (mA/cm <sup>2</sup> ) | Vco (mV) | FF (%) | η (%) |
|----------|---------------------------|----------|--------|-------|
| HE75     | 35.22                     | 630.57   | 79.02  | 17.55 |
| SE40-100 | 35.14                     | 633.22   | 78.96  | 17.78 |

Tableau V-3 : Résultats des cellules solaires simulées d'Irysolar

Ce qui explique en conséquence un meilleur rendement quantique pour la cellule SE40-100 par rapport à celle HE75 comme on le constate sur la Figure V-21.

Ces améliorations sont interprétées par le même raisonnement décrit dans la section V.5 concernant les cellules solaires de type n.

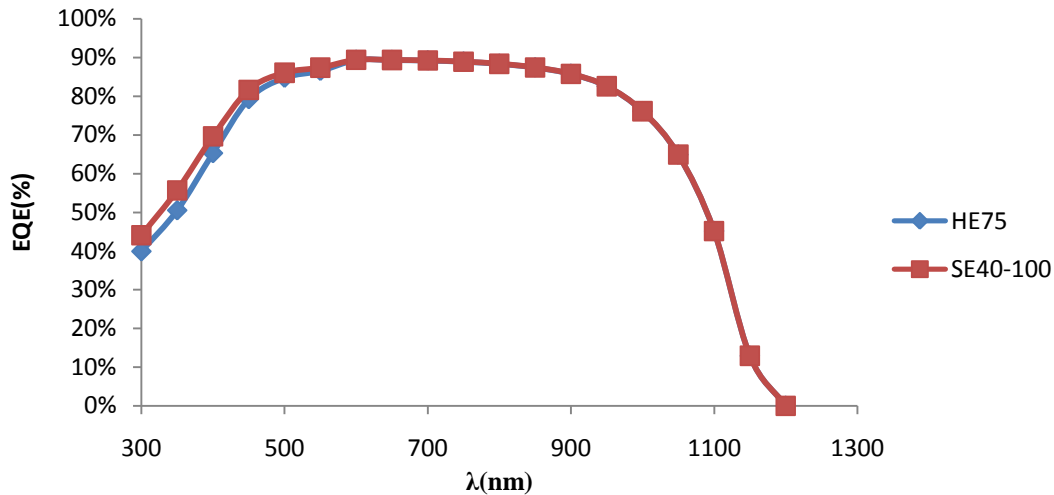


Figure V-21 : Comparaison du rendement quantique externe de SE40-100 et HE75 (type p)

### V.6.3 Comparaison avec les cellules solaires de type n

Pour des épaisseurs voisines de substrat (200-250  $\mu\text{m}$ ), le Tableau V-4 résume les différents résultats pour les deux types de cellules.

| Cellule             | Jcc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | Vco (mV) | FF (%) | $\eta$ (%) |
|---------------------|---------------------------------|----------|--------|------------|
| (HE75)(type n)      | 38.07                           | 651.50   | 80.86  | 20.05      |
| (HE75) (type p)     | 35.22                           | 630.57   | 79.02  | 17.55      |
| (SE50-100) (type n) | 38.14                           | 654.56   | 80.90  | 20.20      |
| (SE40-100) (type p) | 35.14                           | 633.22   | 78.96  | 17.78      |

Tableau V-4 : Comparaison des performances des cellules solaires (type n par rapport à type p)

Le tableau ci-dessus montre que les performances des cellules à substrat de type n sont supérieures à celles de type p pour les deux structures HE et SE avec des différences absolues d'environ 3 mA pour  $J_{cc}$ , 20 mV pour  $V_{co}$ , 2 % pour FF et 2.5 % pour le rendement de conversion  $\eta$ .

Ces différences, relativement élevées sont dues essentiellement à la durée de vie élevée du substrat de type n qui est de l'ordre de la milliseconde par rapport à celui de type p qui est de l'ordre du dixième de la milliseconde (voir section III.2.2.1).

Une autre raison justifiant ces excellentes performances est la bonne passivation caractérisée par un faible courant de recombinaison  $J_{01}$  de l'émetteur  $p^+$  (cellule type n) réalisée par  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport à l'émetteur  $n^+$  (cellule type p) réalisée par  $\text{SiN}_x$

(voir section III.2.2.3). De plus, la passivation de la face arrière établie par une couche BSF dopée au phosphore ( $n^+/n$  pour la cellule de type n) est plus bon ( $J_{01}$  plus faible sur la face arrière) que celle dopée à l'Aluminium ( $p^+/p$  pour la cellule de type p) (Tableau V-5).

| Cellule             | $J_{01}$ de l'émetteur (fA/cm <sup>2</sup> ) | $J_{01}$ du BSF (fA/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| (HE75)(type n)      | 73   | 205                                   |
| (HE75) (type p)     | 96.4   | 494                                   |
| (SE50-100) (type n) | 44.3   | 205                                   |
| (SE40-100) (type p) | 50.7   | 494                                   |

**Tableau V-5 : Courants de recombinaison de l'émetteur et du BSF pour les deux types des cellules solaires**

Une troisième raison qui justifie encore ces résultats est la résistance série réduite de l'ordre de  $0.6 \Omega/\text{cm}^2$  obtenue par électroplacage pour les cellules de type n étudiées par rapport à celle obtenue par sérigraphie pour les cellules de type p d'Irysolar qui est de l'ordre de  $0.9 \Omega/\text{cm}^2$ .

## V.7 Effets bidimensionnels sur les cellules de type n

Les effets bidimensionnels des cellules solaires dus à l'inhomogénéité géométrique et physique de leur structure (doigts de la grille, dopage, ombrage... etc.) ne sont pas pris en compte par le modèle unidimensionnel classique. Le programme PC2D permet de visualiser différents effets en deux dimensions, tels que les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des porteurs et leurs densités.

### V.7.1 Potentiels de quasi-niveaux de Fermi

Les figures (Figure V-22) et (Figure V-23) montrent les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous (porteurs minoritaires) et des électrons (porteurs majoritaires) normalisés à la tension thermique ( $V_t=k_B T/q$ ) (voir la section II.2.4.4), de la cellule HE90 type n à la puissance du point maximum du fonctionnement. Le gradient de ces potentiels indique la direction du courant des électrons et des trous (du contact avant vers le contact arrière). Contrairement au modèle à une dimension, on remarque assez bien que les trous ne diffusent pas verticalement dans le volume mais plutôt dans les

deux sens. Pour les électrons qui sont majoritaires, leur diffusion horizontale n'est pas assez importante (Figure V-23).

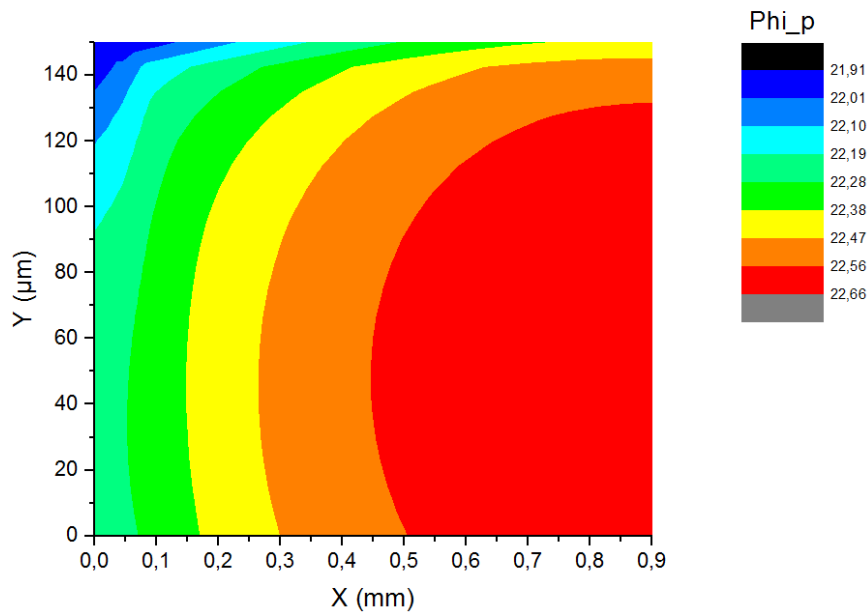


Figure V-22 : Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous  $\Phi_p$  (normalisés à  $V_t$ ) de HE90

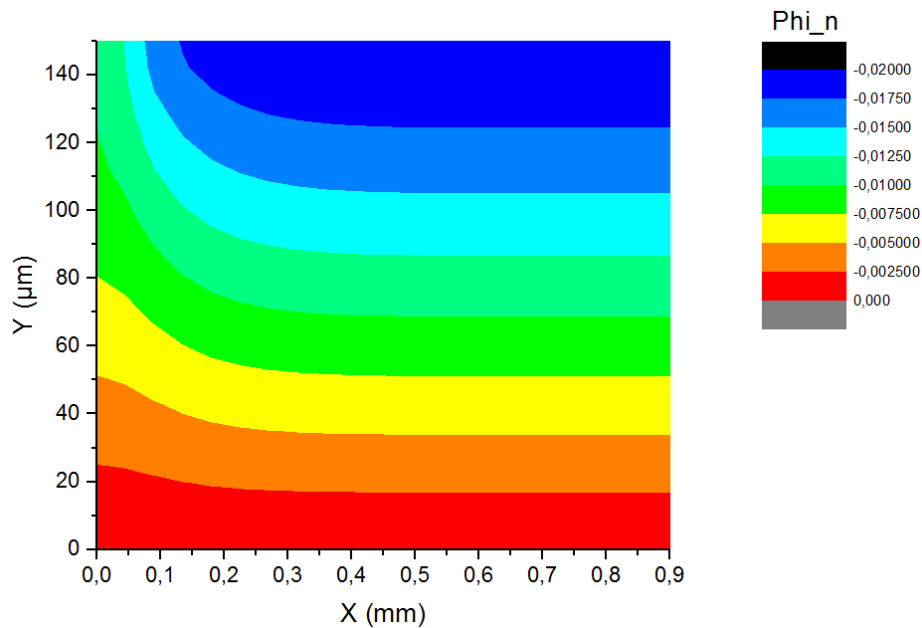


Figure V-23 : Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des électrons  $\Phi_n$  (normalisés à  $V_t$ ) de HE90

On note également l'effet causé par l'émetteur et l'ombrage pour HE90 du contact situé dans le coin supérieur gauche entraînant une chute de tension latérale dans l'émetteur de 14.36 mV entre le contact (coin à gauche) et le point milieu des contacts (coin à droite) (Figure V-22). Cette chute diminuera à 14.04 mV avec l'introduction

de l'émetteur sélectif (SE50-100), ce qui réduit l'effet latéral et améliore les performances de la cellule (Figure V-24).

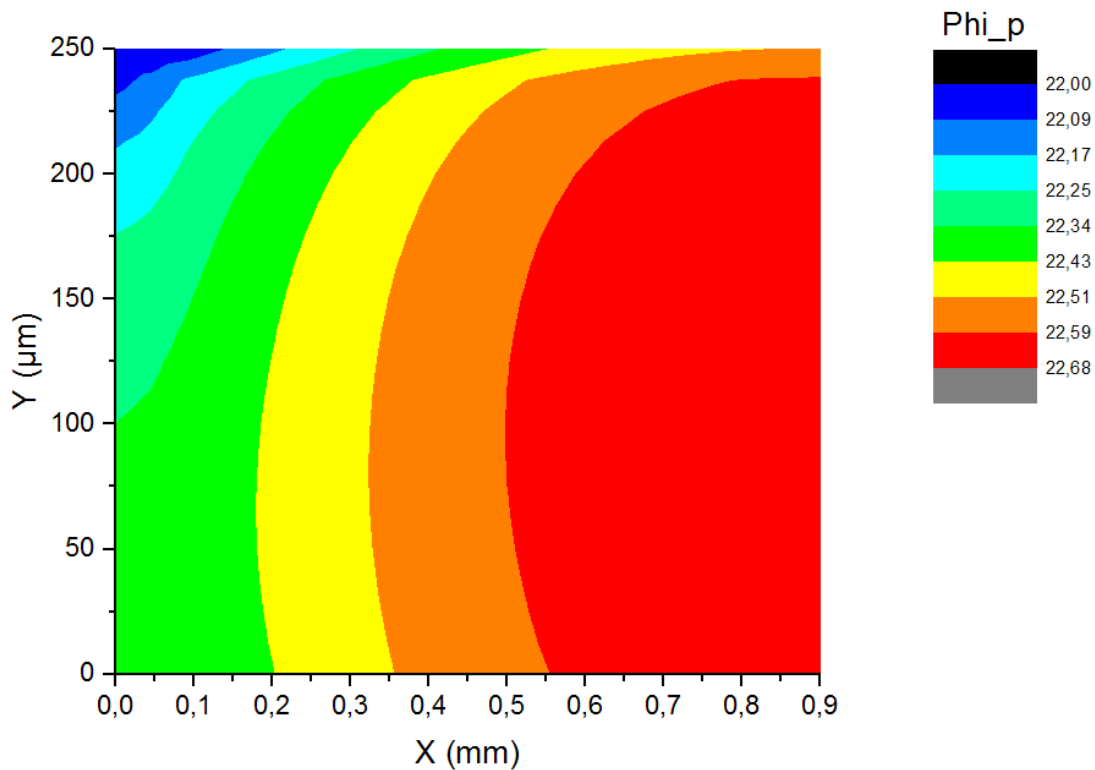


Figure V-24 : Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous  $\Phi_p$  (normalisés à  $V_t$ ) de SE50-100

### V.7.2 Densité des porteurs

Selon l'analyse précédente sur les potentiels de quasi-niveaux de Fermi, la densité des porteurs (particulièrement les trous minoritaires) aux contacts sera plus faible dans la zone analysée, ensuite elle augmente à travers les deux sens de la zone, pour atteindre son maximum à la zone inférieure du point milieu entre les contacts et plus prononcée vers le bas (Figure V-25) et (Figure V-26).

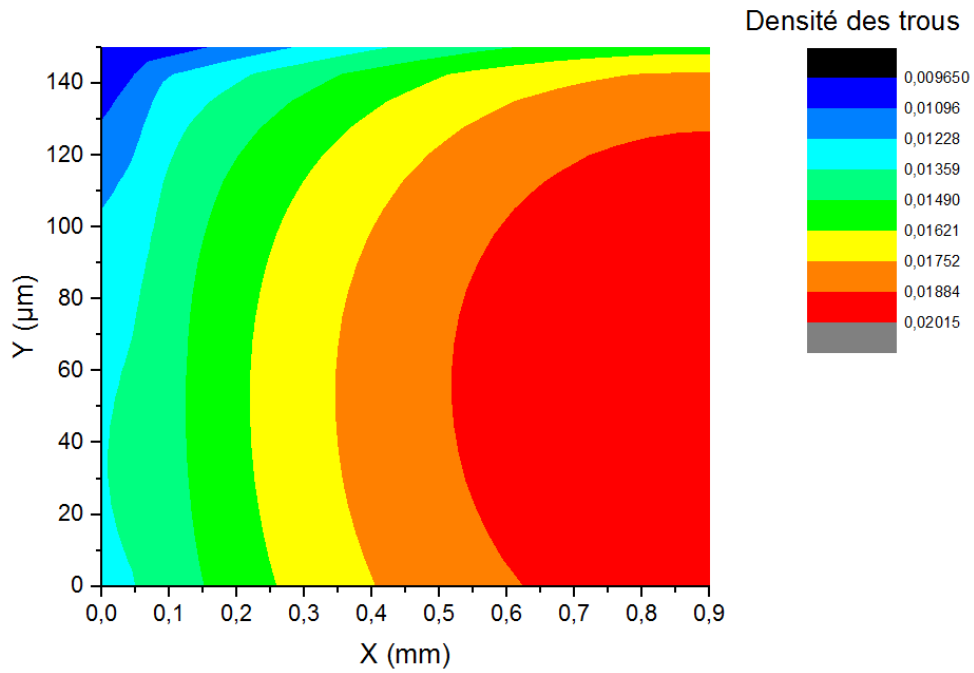


Figure V-25 : Distribution de la densité des trous normalisée au dopage de la base à la puissance au point maximum de HE90

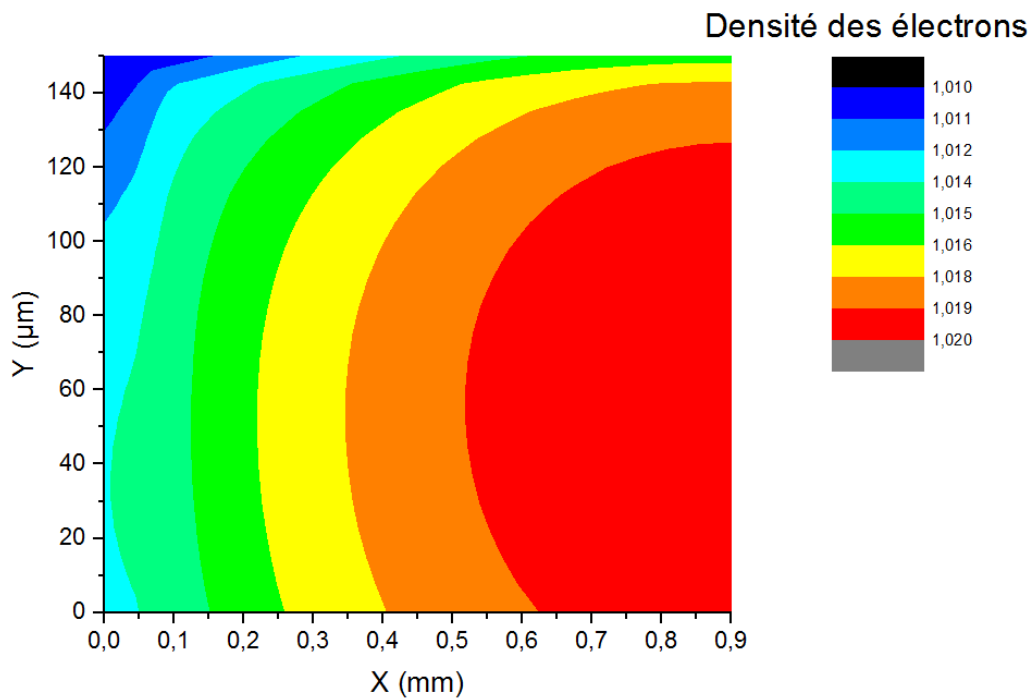


Figure V-26 : Distribution de la densité des électrons normalisée au dopage de la base à la puissance du point maximum de HE90

## V.8 Conclusion

A l'aide du simulateur PC2D, nous avons optimisé les paramètres les plus importants de la cellule solaire de référence à émetteur homogène de type n expérimentée par [\(Kalio et al. 2011\)](#) à savoir :

- La base,
- L'émetteur,
- Le BSF.

Pour la base, on a constaté que tous les paramètres de la cellule ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) augmentent rapidement jusqu'à la valeur de 1 ms de la durée de vie correspondante aux valeurs (37.47 mA, 649.5 mV, 80.92 %, 19.68 %) respectivement, cet accroissement devient lent au-delà de cette valeur. De même, le courant de court-circuit et le rendement de conversion augmentent avec l'épaisseur de la base jusqu'à 400  $\mu\text{m}$  correspondante à 37.86 mA et 19.89 % respectivement, puis ils diminuent en raison de l'augmentation de la résistance série. Le facteur de forme diminue de 80.98 % pour l'épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  à 80.64 % pour 600  $\mu\text{m}$  en raison de l'augmentation de la résistance de la base. La valeur de la résistivité optimisée est de 1.75  $\Omega\cdot\text{cm}$  pour un rendement maximum de 19.71 %.

L'analyse de l'émetteur de la cellule solaire montre que le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmentent avec la résistance de couche de l'émetteur. Par contre, le facteur de forme diminue. Le rendement accroit jusqu'à une résistance de couche de 75  $\Omega/\square$  correspondante à la valeur de 19.70 % de rendement, car la résistance de couche élevée provoque un faible courant de recombinaison. Au-delà de cette valeur, le rendement s'abaisse car la résistance série devient prédominante. D'où le choix de la structure de l'émetteur sélectif qui a une résistance de couche réduite sous les contacts diminuant la résistance série et une résistance de couche élevée entre les contacts diminuant les courants de recombinaison.

L'introduction du BSF a considérablement amélioré les quatre paramètres de la cellule. Le rendement est amélioré de 0.14 % avec la cellule à 20  $\Omega/\square$  de BSF par rapport à celle à 30  $\Omega/\square$  de BSF (cellule solaire expérimentale).

Notre optimisation donne un rendement de 20.05 % avec un émetteur homogène de 75  $\Omega/\square$ , une épaisseur de 250  $\mu\text{m}$ , une durée de vie de 1.5  $\mu\text{s}$  et un BSF de 20  $\Omega/\square$ . Ce rendement est amélioré avec ces mêmes paramètres optimisés à 20.20 % avec un

émetteur sélectif de 50-100  $\Omega/\square$  pris comme exemple. Une étude détaillée de cette structure peut donner des rendements plus élevés.

La comparaison des performances de nos cellules étudiées de type n par rapport aux cellules de type p d'Irysolar montre clairement l'avantage des cellules de type n pour les deux structures HE et SE avec des améliorations d'environ 3 mA pour  $J_{cc}$ , 20 mV pour  $V_{co}$ , 2 % pour FF et 2.5 % pour le rendement de conversion  $\eta$ . Cela est dû aux avantages suivants :

- Une durée de vie élevée des substrats de type n ( $\geq 1$ ms) par rapport à ceux de type p (quelques dixièmes de milliseconde),
- Une passivation de l'émetteur  $p^+$  réalisée avec la couche d' $Al_2O_3$  est meilleure ( $J_{01}$  de 73 fA/cm<sup>2</sup>) que celle réalisée avec la couche classique de  $SiN_x$  déposée sur l'émetteur  $n^+$  ( $J_{01}$  de 96.4 fA/cm<sup>2</sup>).
- Une bonne passivation arrière à l'aide du BSF dopé au phosphore ( $J_{01}$  de 205 fA/cm<sup>2</sup>) par rapport à un BSF dopé à l'aluminium ( $J_{01}$  de 494 fA/cm<sup>2</sup>).
- Une faible résistance série obtenue par électroplacage (de l'ordre de 0.6  $\Omega/cm^2$ ) par rapport à celle obtenue par sérigraphie (de l'ordre de 0.9  $\Omega/cm^2$ ).

Finalement, on a visualisé quelques effets bidimensionnels de la cellule de référence HE90 de type n, tels que les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des porteurs et leurs densités. L'étude de ces effets nous a permis de visualiser le sens des porteurs ainsi que leurs distributions à deux dimensions. On a constaté que les trous minoritaires se meuvent dans les deux sens de la structure partant du contact avant vers le milieu de la structure en raison de leurs déplacements latéraux. On a remarqué aussi la diminution de la chute de tension latérale dans l'émetteur (entre le contact et le milieu des contacts) de 14.36 mV pour HE90 à 14.04 mV avec l'introduction de l'émetteur sélectif pour (SE50-100), ce qui réduit l'effet latéral et améliore les performances de la cellule.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'amélioration des performances de la cellule solaire, principalement son rendement de conversion, avec réduction de son coût de production est l'objectif majeur des recherches photovoltaïques.

Le marché du photovoltaïque est principalement alimenté par les photopiles en silicium cristallin (c-Si) avec environ 84 %, dont 37 % sont pour le silicium monocristallin. Le marché terrestre est encore alimenté aujourd'hui majoritairement par des cellules en silicium cristallin de substrat de type p. L'élaboration des cellules solaires sur substrat de type n est en cours de développement et d'exploitation par de nombreux laboratoires à travers le monde. Certains modèles sont déjà industrialisés, d'autres sont en cours.

En raison du coût élevé de l'expérience, l'outil de simulation est devenu primordial pour prédire le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent.

L'objectif de notre travail entre dans ce cadre précis. Il concerne l'étude et la simulation des cellules solaires à émetteurs homogène et sélectif de substrat de type n dans l'objectif d'optimiser leurs paramètres.

La simulation est réalisée par le programme PC2D car sa modélisation permet de tenir compte de la bi-dimensionnalité des paramètres de la cellule avec plus de précision et par conséquent d'obtenir de résultats plus affinés.

Malgré que le procédé de fabrication de la cellule solaire de type n est plus énergivore que celui du type p, car deux diffusions gazeuses à haute température,  $\text{BCl}_3$  et  $\text{POCl}_3$ , sont nécessaires pour former l'émetteur et le BSF (Back Surface Field : couche qui crée un champ de surface arrière jouant le rôle de la passivation en face arrière). En outre, la passivation de la surface en face avant, traditionnellement effectuée avec du  $\text{SiN}_x$  n'est pas adaptée à une surface dopée  $p^+$  donc l'ajout d'une couche supplémentaire de passivation comme  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est nécessaire.

Par contre, les substrats de type n sont faiblement sensibles à la plupart des impuretés métalliques comme le fer (Fe), le chrome (Cr), le titane (Ti), le vanadium (V) et le molybdène (Mo). De plus, leurs performances ne se détériorent pas sous l'effet de l'éclairement (en anglais : Light Induced Degradation : LID). Cette dégradation est due, dans le silicium de type p, à l'activation des complexes Bore-Oxygène (BO). Par

conséquent, les cellules de type n ont des durées de vie des porteurs élevées et stables dans le temps, de l'ordre de la milliseconde. Ces propriétés de poids offrent aux cellules solaires à substrat de type n d'excellents atouts par rapport à celles de substrat p.

Afin de valider nos résultats de la programmation PC2D, on a d'abord simulé la cellule solaire de référence HE90 (HE pour Homogeneous Emitter : cellule solaire à émetteur homogène de  $90 \Omega/\square$ ) étudiée expérimentalement au sein de l'institut allemand ISE (Institute for Solar Energy Systems) de Fraunhofer.

HE90 est une cellule solaire  $p^+nn^+$  au silicium monocristallin à deux busbarres, tiré avec le procédé FZ (Fusion de Zone) avec un dopage d'environ  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  correspondant à  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ , d'une surface réelle carrée de  $139.3 \text{ cm}^2$  ( $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ). L'émetteur homogène est dopé par diffusion thermique au bore avec une résistance de couche de  $90 \Omega/\square$  correspondant à une concentration superficielle de dopage de  $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et une profondeur d'environ  $0.25 \mu\text{m}$ , calculée avec PC1D. La surface avant est texturée avec le composé alcalin (KOH) dans le but d'avoir une structure pyramidée d'un angle de  $54.74^\circ$  et d'une profondeur de  $3 \mu\text{m}$ , passivée avec l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) puis recouverte d'une couche antireflet de nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ).

La métallisation est réalisée par électroplacage d'argent (en anglais : electroplating) utilisant l'impression par jet d'encre (inkjet printing) ou par jet d'aérosol (aerosol jet printing), donnant une résistance de contact de  $3.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , une résistance série de  $0.64 \Omega \cdot \text{cm}^2$  et une résistance shunt de  $65 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

La face arrière est dopée par diffusion au phosphore ( $n^+$ ) à profil gaussien de résistance de couche  $30 \Omega/\square$  correspondant à une concentration superficielle de dopage de  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et d'une profondeur de  $2 \mu\text{m}$ . Quant au contact arrière, il est réalisé avec de l'aluminium évaporé sur toute la surface de la cellule.

Les paramètres optiques pour toutes les cellules solaires simulées sont tirés d'exemples de PC2D.

Les résultats obtenus (densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  (différence d'environ  $0.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ), tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (différence d'environ  $0.2 \text{ mV}$ ), facteur de forme FF (faiblement supérieur à celui expérimental de moins 2%) et le rendement de conversion  $\eta$  (19.68 %, proche du 19.60 % expérimental) sont en bonne concordance

avec les résultats expérimentaux. Ce bon accord avec l'expérience nous a permis donc d'utiliser par la suite ce programme pour l'étude détaillée de cette cellule dans l'objectif de l'optimiser par la variation de ses paramètres essentiels qui sont :

- Les paramètres du substrat (base) : la durée de vie, l'épaisseur et la résistivité,
- la résistance de couche de l'émetteur,
- la résistance de couche du BSF.

Pour la base, on a constaté que les quatre paramètres de la cellule,  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ , augmentent rapidement jusqu'à la valeur de 1 ms de la durée de vie correspondante aux valeurs : 37.47 mA, 649.5 mV, 80.92 %, 19.68 % respectivement. Au-delà de cette valeur de la durée de vie, cet accroissement devient lent jusqu'à aller vers une saturation.

Le courant de court-circuit et le rendement de conversion atteignent leurs maximums de 37.86 mA et de 19.89 % respectivement, à la valeur de 400  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, puis ils diminuent en raison de la prédominance de la résistance série. Au contraire, Le facteur de forme diminue de 80.98 % pour l'épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  à 80.64 % pour 600  $\mu\text{m}$  à cause de l'augmentation de la résistance série. La valeur optimale de la résistivité est de 1.75  $\Omega\cdot\text{cm}$  pour un rendement maximum de 19.71 %.

La simulation de l'émetteur montre que le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmentent avec sa résistance de couche. Par contre, le facteur de forme diminue. Le rendement accroît jusqu'à 75  $\Omega/\square$  correspondant à la valeur de 19.70 % de rendement car la résistance de couche élevée provoque un faible courant de recombinaison, puis, il s'abaisse car la résistance série devient prédominante. Cette étude montre l'utilité du choix de la structure d'émetteur sélectif qui possède une résistance de couche réduite (exemple : 50  $\Omega/\square$ ) sous les contacts diminuant par conséquent la résistance série et une résistance de couche élevée (exemple : 100  $\Omega/\square$ ) entre les contacts diminuant les courants de recombinaison.

Cette simulation montre aussi l'importance de la couche BSF car les quatre paramètres de la cellule sont sensiblement améliorés avec l'introduction du BSF, le rendement est augmenté de 0.14 % avec la cellule à résistance de couche de 20  $\Omega/\square$  de BSF par rapport à celle expérimentale de 30  $\Omega/\square$ .

L'optimisation donne un rendement de 20.05 % avec un émetteur homogène de  $75 \Omega/\square$ , une épaisseur de  $250 \mu\text{m}$ , une durée de vie de  $1.5 \mu\text{s}$  et un BSF de  $20 \Omega/\square$  (cellule nommée HE75).

L'introduction de l'émetteur sélectif, avec la structure de  $50\text{-}100 \Omega/\square$  ( $50 \Omega/\square$  sous les contacts et  $100 \Omega/\square$  entre les contacts), pris comme exemple, avec les mêmes paramètres optimisés que ce de HE75, améliore ce rendement à 20.20 % (cellule notée SE50-100).

En comparant les performances des cellules étudiées de type n par rapport aux cellules de type p d'Irysolar, on constate clairement, l'avantage des cellules à substrat de type n pour les deux structures HE et SE avec des améliorations d'environ 3 mA pour  $J_{cc}$ , 20 mV pour  $V_{co}$ , 2 % pour FF et 2.5 % pour le rendement de conversion  $\eta$ . Cela est dû à la durée de vie élevée des substrats de type n (de l'ordre de la milliseconde) par rapport à ceux de type p (quelques dixièmes de milliseconde). Cela est dû aussi à la bonne passivation de l'émetteur  $p^+$  réalisée avec la couche d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $J_{01}$  de  $73 \text{ fA/cm}^2$ ) par rapport à la couche classique de  $\text{SiN}_x$  ( $J_{01}$  de  $96.4 \text{ fA/cm}^2$ ). Une troisième cause de ces résultats vient de la passivation arrière réalisée à l'aide du BSF dopé au phosphore pour les cellules de type n, est meilleure ( $J_{01}$  de  $205 \text{ fA/cm}^2$ ) que celle réalisée avec un BSF dopé à l'Aluminium ( $J_{01}$  de  $494 \text{ fA/cm}^2$ ) pour les cellules de type p. Finalement, la résistance série obtenue par électroplacage pour le type n est plus faible (environ  $0.6 \Omega/\text{cm}^2$ ) que celle obtenue par sérigraphie pour le type p (environ  $0.9 \Omega/\text{cm}^2$ ) influençant positivement sur les paramètres des cellules type n.

Enfin, le programme PC2D nous a permis de visualiser quelques effets bidimensionnels de la cellule de référence HE90, tels que les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des porteurs et leurs densités. L'analyse de ces effets indique le sens des porteurs ainsi que leurs distributions bidimensionnelles. Les courbes en 2D montrent que les trous (minoritaires) se déplacent dans les deux sens de la structure partant du contact vers le milieu de la structure en raison d'un déplacement supplémentaire latéral. On a constaté aussi l'abaissement de la chute de tension latérale dans l'émetteur (entre le contact et le milieu des contacts) de 14.36 mV pour la cellule HE90 à 14.04 mV en introduisant l'émetteur sélectif pour la cellule (SE50-100), ce qui diminue l'effet latéral et améliore les performances de la cellule.

Comme perspectives, ce travail peut être d'un bon support pour l'étude et la simulation avec d'autres données telles que les paramètres géométriques de la métallisation qui ont été optimisés expérimentalement par plusieurs techniques dans notre cas. Les paramètres optiques nécessitent aussi plus d'études avec le programme PC2D qui simule ces paramètres avec plus de précision.

Cette étude est aussi une bonne introduction pour la simulation plus détaillée de structures à émetteur sélectif à substrat de type n qui font actuellement l'objet de nombreuses recherches.

PC2D visualise l'évolution bidimensionnelle pour beaucoup de paramètres de la cellule solaire, qui peut être exploitée pour nombreuses études et obtenir des résultats plus précis.

Ce travail ouvre également le chemin aux études de simulation avec le programme PC2D ( qui reste encore moins exploité ) pour d'autres structures plus complexes telles que les cellules à contact arrière à substrat de type n.

## Annexe :

# Méthode des éléments finis pour la résolution des équations de transport d'une cellule solaire

## 1-Introduction

La méthode des éléments finis est largement utilisée pour résoudre un système d'équations différentielles non-linéaires d'un problème physique car, elle est plus précise et utilise un maillage adapté à la complexité et l'inhomogénéité de la structure géométrique à simuler, qui peut être non rectangulaire (triangle ou quadrangle). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est difficile à réaliser surtout en deux ou trois dimensions car elle nécessite un calcul numérique lourd, exigeant un programme informatique puissant. On présente ici par cette méthode, la résolution en une dimension des équations de transport d'une cellule solaire. La méthode peut être généralisée en deux ou trois dimensions.

## 2-Equations fondamentales

La simulation d'une cellule solaire est basée sur les cinq équations qui peuvent être réécrites comme suit (Voir section IV.1) :

$$\begin{aligned}\nabla^2\psi &= -\frac{q}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(p - n + N_d - N_a) \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{\vec{\nabla}\vec{J}_n}{q} + G_n - R_n \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{\vec{\nabla}\vec{J}_p}{q} + G_p - R_p \\ \vec{J}_n &= -q(n\mu_n\vec{\nabla}\psi - D_n\vec{\nabla}n) \\ \vec{J}_p &= -q(p\mu_p\vec{\nabla}\psi + D_p\vec{\nabla}p)\end{aligned}$$

Les équations de courant peuvent être écrites comme suit ((II-69) et (II-70)) :

$$\vec{J}_n = n\mu_n\vec{\nabla}E_{fn} \quad (1)$$

$$\vec{J}_p = p\mu_p\vec{\nabla}E_{fp} \quad (2)$$

$E_{Fn}$  (potentiel  $\Phi_n$ ) est le quasi-niveau de Fermi des électrons et  $E_{Fp}$  (potentiel  $\Phi_p$ ) est le quasi-niveau de Fermi des trous.

Les densités des électrons et des trous sont données par les relations (II-65) et (II-66) :

$$n = N_c \exp \frac{E_{Fn} - E_c}{k_B T}$$

$$p = N_v \exp \frac{E_v - E_{Fp}}{k_B T}$$

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme :

$$n = n_i \exp \frac{q(\psi + v_n - \Phi_n)}{k_B T} \quad (3)$$

$$p = n_i \exp \frac{q(-\psi + v_p + \Phi_p)}{k_B T} \quad (4)$$

Les potentiels  $v_n$  et  $v_p$  représentent les décalages (vers le centre de la bande interdite) des bords de la bande de conduction et de valence, en prenant compte des effets électrostatiques ([Basore 1991](#)).

En combinant les équations (1), (2), (3) et (4), on peut éliminer les variables  $n$  et  $p$  pour obtenir les équations suivantes :

$$\vec{J}_n = -q n_i \mu_n (\vec{\nabla} \Phi_n) \exp \frac{q(\psi + v_n - \Phi_n)}{k_B T} \quad (5)$$

$$\vec{J}_p = q n_i \mu_p (\vec{\nabla} \Phi_p) \exp \frac{q(-\psi + v_p + \Phi_p)}{k_B T} \quad (6)$$

On peut éliminer également les inconnues  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  en utilisant les équations de continuité. On obtient alors, deux équations avec trois inconnues  $\psi$ ,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ .

En ajoutant l'équation de Poisson, on obtient un système de trois équations avec trois inconnues  $\psi$ ,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  exprimé par les relations :

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \left( n_i \exp \frac{q(-\psi + v_p + \Phi_p)}{k_B T} - n_i \exp \frac{q(\psi + v_n - \Phi_n)}{k_B T} + N_d - N_a \right) \quad (7)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\vec{\nabla} \vec{J}_n}{q} \left( -q n_i \mu_n (\vec{\nabla} \Phi_n) \exp \frac{q(\psi + v_n - \Phi_n)}{k_B T} \right) + G_n - R_n \quad (8)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\vec{\nabla} \vec{J}_p}{q} \left( q n_i \mu_p (\vec{\nabla} \Phi_p) \exp \frac{q(-\psi + v_p + \Phi_p)}{k_B T} \right) + G_p - R_p \quad (9)$$

Les différents taux de recombinaison  $R_n$ ,  $R_p$  sont donnés en fonction de  $n$  et  $p$ , ce qui nous permet de les représenter en fonction de  $\psi$ ,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ .

Les trois conditions aux limites de chaque surface ([Basore 1991](#)) sont basées sur :

- la densité de courant injecté à la surface,
- la recombinaison de la surface,
- le potentiel électrostatique de la surface.

La résolution de ce système permet d'obtenir  $\psi$ ,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  et par conséquent de calculer tous les autres paramètres de la cellule solaire.

### 3-Discretisation

La première étape de la solution numérique de ce système d'équations de la cellule solaire est la discrétisation du dispositif, dans le temps et dans l'espace. La structure est divisée spatialement en un ensemble fini de (M) éléments le long de l'axe "x", qui suit approximativement la direction du flux de courant dans le dispositif. Le point d'intersection entre deux éléments est appelé nœud. Les nœuds sont numérotés de zéro à M (de gauche à droite). L'indice  $k$  est utilisé pour désigner la valeur du  $k^{\text{ième}}$  nœud (Figure-1). On désigne par  $A_k$ , la section transversale du flux de courant, attribuée au nœud  $k$  ([Basore 1990](#)).

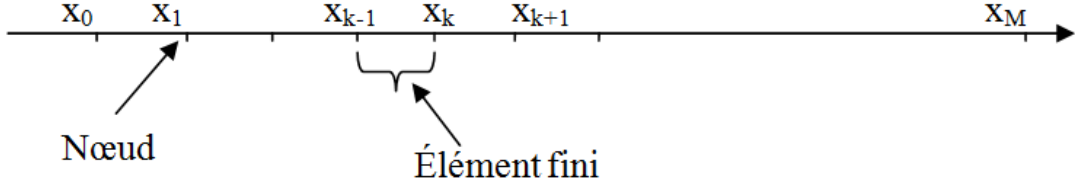


Figure-1 : Discrétisation de la structure

La discrétisation de l'équation de Poisson donne :

$$\begin{aligned} \varepsilon^- \frac{A_{k-1} + A_k}{2} \frac{\Delta\psi_{k-1}}{\Delta x_{k-1}} - \varepsilon^+ \frac{A_k + A_{k+1}}{2} \frac{\Delta\psi_k}{\Delta x_k} \\ = \frac{\rho_{k-1} \Delta x_{k-1} A_{k-1} + 2\rho_k (\Delta x_{k-1} + \Delta x_k) A_k + \rho_{k+1} \Delta x_k A_{k+1}}{6} \end{aligned} \quad (10)$$

Où  $\varepsilon^+$  et  $\varepsilon^-$  sont respectivement les permittivités des éléments sur les côtés droites et gauches du nœud.

La deuxième étape est la discrétisation des équations de courants (1) et (2).

Pour les électrons :

$$I_n(x) \mathbf{a}_x = -q \mu_n(x, E) n(x) A(x) \nabla \Phi_n(x) \quad (11)$$

On définit le potentiel électrique modifié comme suit :

$$\zeta_n(x) = \psi(x) + v_n(x) + \frac{k_B T}{q} \ln \frac{\mu_n(x, E) A(x)}{\mu_r A_r} \quad (12)$$

Où  $\mu_r$  et  $A_r$  sont respectivement les valeurs de référence pour la mobilité et la section transversale du flux de courant.

En remplaçant les équations (3) et (12), l'équation (11) peut s'écrire :

$$\begin{aligned} I_n(x) \mathbf{a}_x \\ = -q \mu_r n_i A_r \left( \exp \frac{q(\zeta_n(x) - \Phi_n(x))}{k_B T} \right) \nabla \Phi_n(x) \end{aligned} \quad (13)$$

Cette équation peut se réécrire sous la forme :

$$I_n(x) \left( \exp \left( \frac{-q \zeta_n(x)}{k_B T} \right) \right) \mathbf{a}_x = q D_r n_i A_r \nabla \exp \left( \frac{-q \Phi_n(x)}{k_B T} \right) \quad (14)$$

Où  $D_r = \frac{\mu_r}{k_B T}$  est la constante de diffusion référence des électrons.

En intégrant l'équation (14) entre les nœuds  $x_k$  et  $x_{k+1}$  on obtient :

$$\int I_n(x) \left( \exp\left(\frac{-q\zeta_n(x)}{k_B T}\right) \right) a_x \cdot dl \quad (15)$$

$$= \int qD_r n_i A_r \nabla \exp\left(\frac{-q\Phi_n(x)}{k_B T}\right) \cdot dl$$

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} I_n(x) \exp\left(\frac{-q\zeta_n(x)}{k_B T}\right) dx \quad (16)$$

$$= qD_r n_i A_r \left[ \exp\left(\frac{-q\Phi_n(x_k)}{k_B T}\right) - \exp\left(\frac{-q\Phi_n(x_{k+1})}{k_B T}\right) \right]$$

En posant :

$$\beta = \frac{q}{k_B T}$$

$$Z(u) = \frac{u}{u - 1}$$

$$Y(u) = \frac{1 - Z(u)}{u}$$

On peut écrire pour le courant des électrons :

$$I_n(x_k) = -\Delta I_n Y(\beta \Delta \zeta_n) \quad (17)$$

$$+ \frac{qD_r n_i A_r}{\Delta x} \left[ Z(\beta \Delta \zeta_n) \exp(\beta \zeta_n(x_{k+1}) - \Phi_n(x_{k+1})) - Z(-\beta \Delta \zeta_n) \exp(\beta \zeta_n(x_k) - \Phi_n(x_k)) \right]$$

On obtient une équation analogue pour les trous :

$$\begin{aligned}
I_p(x_k) = & -\Delta I_p Y(-\beta \Delta \zeta_p) \\
& - \frac{q D_r n_i A_r}{\Delta x} \left[ Z(-\beta \Delta \zeta_p) \exp(-\beta \zeta_p(x_{k+1}) \right. \\
& \left. - \Phi_p(x_{k+1})) \right. \\
& \left. - Z(\beta \Delta \zeta_p) \exp(-\beta (\zeta_p(x_k) - \Phi_p(x_k))) \right]
\end{aligned} \tag{18}$$

#### 4-Résolution du système

Les courants des électrons et des trous au nœud  $k$  peuvent être calculés indépendamment pour les deux éléments qui se rattachent à ce nœud. Chaque courant des porteurs doit être continu aux nœuds, sauf aux limites de la structure, caractérisées par la recombinaison d'interface  $R_s$  et le courant des majoritaires  $I_{maj}$  qui peut être injecté à partir d'une source externe. En utilisant les expressions développées dans la section précédente, on peut écrire pour un nœud interne  $k$  ([Basore 1991](#)) :

- Pour les trous :

$$\begin{aligned}
& - \frac{D_r}{\Delta x_{k-1}} \left[ Z(-\beta \Delta \zeta_p)_{k-1} \exp(-\beta(\zeta_p - \Phi_p)_k) \right. \\
& \quad \left. - Z(\beta \Delta \zeta_p)_{k-1} \exp(-\beta(\zeta_p - \Phi_p)_{k-1}) \right] \\
& \quad + \frac{(\Delta I_p)_{k-1}}{n_i A_r} Y(\beta \Delta \zeta_p)_{k-1} \\
& = - \frac{D_r}{\Delta x_k} \left[ Z(-\beta \Delta \zeta_p)_k \exp(-\beta(\zeta_p - \Phi_p)_{k+1}) \right. \\
& \quad \left. - Z(\beta \Delta \zeta_p)_k \exp(-\beta(\zeta_p - \Phi_p)_k) \right] \\
& \quad - \frac{(\Delta I_p)_k}{n_i A_r} Y(-\beta \Delta \zeta_p)_k + \frac{R_s}{n_i} - \frac{I_{maj}}{q n_i A_r}
\end{aligned} \tag{19}$$

- Pour les électrons :

$$\begin{aligned}
 & \frac{D_r}{\Delta x_{k-1}} [Z(\beta \Delta \zeta_n)_{k-1} \exp(\beta (\zeta_n - \Phi_n)_k) \\
 & \quad - Z(-\beta \Delta \zeta_n)_{k-1} \exp(\beta (\zeta_n - \Phi_n)_{k-1})] \\
 & \quad + \frac{(\Delta I_n)_{k-1}}{n_i A_r} Y(-\beta \Delta \zeta_n)_{k-1} \\
 & = \frac{D_r}{\Delta x_k} [Z(\beta \Delta \zeta_n)_k \exp(\beta (\zeta_n - \Phi_n)_{k+1}) \\
 & \quad - Z(-\beta \Delta \zeta_n)_k \exp(\beta (\zeta_n - \Phi_n)_k)] \\
 & \quad - \frac{(\Delta I_n)_k}{n_i A_r} Y(\beta \Delta \zeta_n)_k - \frac{R_s}{n_i} - \frac{I_{maj}}{q n_i A_r}
 \end{aligned} \tag{20}$$

La troisième équation est celle de poisson(10) :

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon^- \frac{A_{k-1} + A_k}{2} \frac{\Delta \psi_{k-1}}{\Delta x_{k-1}} - \varepsilon^+ \frac{A_k + A_{k+1}}{2} \frac{\Delta \psi_k}{\Delta x_k} \\
 & = \frac{\rho_{k-1} \Delta x_{k-1} A_{k-1} + 2\rho_k (\Delta x_{k-1} + \Delta x_k) A_k + \rho_{k+1} \Delta x_k A_{k+1}}{6}
 \end{aligned}$$

Pour toute la structure (M éléments), il existe un total de 3(M+1) équations pour 3(M+1) inconnues. Ces équations non linéaires sont résolues itérativement en utilisant la méthode de Newton. Une matrice jacobienne est générée en utilisant Les dérivés de chaque équation en termes de  $\psi$ ,  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$ , normalisé à  $k_B T/q$ . Les dérivés sont calculés à partir des expressions analytiques.

## Bibliographie

- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J. & Fthenakis, V.M., 2006. Environmental Impacts Of PV Electricity Generation - A Critical Comparison Of Energy Supply Options. *The 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (September), p.7.
- Antoniadis, H. et al., 2010. All screen printed mass produced silicon Ink selective emitter solar cells. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. pp. 1193–1196.
- Astronomy and Physics, 2017. bbrc1b.gif (550×328). Available at: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/imgmod/bbrc1b.gif> [Accessed July 8, 2017].
- Basore, P.A., 1994. Defining terms for crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2(2), pp.177–179.
- Basore, P.A., 1990. Numerical modeling of textured silicon solar cells using PC-1D. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 37(2), pp.337–343.
- Basore, P.A., 1991. PC-1D installation manual and user's guide. *Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States)*, p.96.
- Basore, P.A. & Cabanas-Holmen, K., 2014. Examples - PC2D. Available at: <http://www.pc2d.info/home/examples> [Accessed January 15, 2016].
- Basore, P.A. & Cabanas-Holmen, K., 2011. PC2D: A circular-reference spreadsheet solar cell device simulator. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1(1), pp.72–77.

- Basore, P.A. & Clugston, D.A., 1996. PC1D version 4 for Windows: from analysis to design. In *Proceedings of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996*. pp. 377–381.
- Benick, J. et al., 2008. High efficiency n-type Si solar cells on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-passivated boron emitters. *Applied Physics Letters*, 92(25), p.253504.
- Bonnaud, O., Mohammed-Brahim, T. & Ast, D., 2003. *Polysilicon TFT book*, Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes: Yue Kuo Kluwer Academic Publishers.
- Böscke, T. et al., 2011. Development of industrial n-type cells with boron emitter. *1st nPV workshop, Konstanz, Germany*.
- Burgers, A.R. et al., 2011. 19.5% efficient n-type Si solar cells made in production. *Proceeding of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany*, pp.1144–1147.
- Cabanas-holmen, K. & Basore, P.A., 2012. PC2D : Applied to a Selective Emitter Cell. In *Energy Procedia, Leuven, Belgium*. pp. 1–4.
- Castagné, C. & Vapaille, A., 1987. *"Dispositifs et Circuits Integres Semiconducteurs "*. Dunod Paris.
- Ceccaroli, B. & Lohne, O., 2011. Solar Grade Silicon Feedstock. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. pp. 169–217.
- Chapin, D.M., Fuller, C.S. & Pearson, G.L., 1954. A new silicon p-n junction photo- cell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), pp.676–677.

- Clugston, D.A. & Basore, P.A., 1997. PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*. pp. 207–210.
- Colville, F. & Clara, S., 2009. Laser-assisted selective emitters and the role of laser doping. *Photovoltaics International*, 5(6), pp.1–7.
- Dauwe, S. et al., 2002. Experimental evidence of parasitic shunting in silicon nitride rear surface passivated solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10(4), pp.271–278.
- Davis, J.R. et al., 1980. Impurities in silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 27(4), pp.677–687.
- Duerinckx, F. & Szlufcik, J., 2002. Defect passivation of industrial multicrystalline solar cells based on PECVD silicon nitride. In *Solar Energy Materials and Solar Cells*. pp. 231–246.
- Environment Canada, 2012. Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies A report funded under the Clean Energy Fund in partnership with Natural Resources Canada's CanmetENERGY. Available at: [http://www.ec.gc.ca/scitech/B53B14DE-034C-457B-8B2B-39AFCFED04E6/ForContractor\\_721\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Technology\\_e\\_09\\_FINAL-update\\_2-s.pdf](http://www.ec.gc.ca/scitech/B53B14DE-034C-457B-8B2B-39AFCFED04E6/ForContractor_721_Solar_Photovoltaic_Technology_e_09_FINAL-update_2-s.pdf) [Accessed April 15, 2017].
- EPIA, 2012. Le développement du photovoltaïque dans le monde. Available at: [http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/2010155958\\_spv01developementmondejuin2012.pdf](http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/2010155958_spv01developementmondejuin2012.pdf) [Accessed April 7, 2017].

- Favre, W., 2011. Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud*.
- Fischer, H. & Pschunder, W., 1973. Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells. *Proceedings of the 10th IEEE PSVC*, p.404–411.
- Glunz, S.W. et al., 2001. Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 90(5), pp.2397–2404.
- Goetzberger, A., Knobloch, J. & Voss, B., 1998. *Crystalline Silicon Solar Cells*, editorial John Wiley & Sons Ltd.
- Green, M., 2017. Corrigendum to “Solar cell efficiency tables (version 49).” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(4), pp.333–334.
- Green, M., 1982. *Solar cells—Operating principles, technology and system applications*, by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N, J.
- Green, M.A., 2002. Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1–2), pp.65–70.
- Gueymard, C.A., 2003. Direct solar transmittance and irradiance with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy*, 74, pp.355–379.
- Gueymard, C.A., 2001. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), pp.325–346.

- Gueymard, C.A., 2004. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), pp.423–453.
- Gueymard, C. & Myers, D., 2010. Solar resources for space and terrestrial applications. In L. Fraas & L. Partain, eds. *Solar Cells and their Applications*. A John Wiley & sons, inc, pp. 427–461.
- Hall, R., 1952. Electron-hole recombination in germanium. *Physical Review*.
- Hezel, R. & Schörner, R., 1981. Plasma Si nitride - A promising dielectric to achieve high-quality silicon MIS/IL solar cells. *Journal of Applied Physics*, 52(4), pp.3076–3079.
- Hoex, B. et al., 2007. Excellent passivation of highly doped p-type Si surfaces by the negative-charge-dielectric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 91(11), p.112107.
- Http://pveducation.org, 2017a. Absorption Coefficient | PVEducation. Available at: <http://pveducation.org/pvcdrom/absorption-coefficient> [Accessed April 21, 2017].
- Http://pveducation.org, 2017b. Measurement of Solar Cell Efficiency | PVEducation. Available at: <http://pveducation.org/pvcdrom/characterisation/measurement-of-solar-cell-efficiency> [Accessed May 12, 2017].
- Http://pveducation.org, 2017c. No Title. Available at: <http://pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Manufacturing/Images/FZ.jpg>.

- <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>, 2014. Multiphysics Simulation Software - Platform for Physics-Based Modeling. [www.comsol.com/comsol-multiphysics](http://www.comsol.com/comsol-multiphysics).
- [Http://www.silvaco.com/](http://www.silvaco.com/), 2012. Silvaco. Available at: <http://www.silvaco.com/> [Accessed April 3, 2017].
- <http://www.synopsys.com/>, 2009. Sentaurus TCAD User's Manual. In *Synopsys Sentaurus Device*. pp. 191–413.
- IEA, 2016. Key renewables trends: development of renewables and waste in the world. Available at: <http://www.iea.org/t&c> [Accessed April 7, 2017].
- ITRPV, 2016. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2015 Results. [www.itrpv.net](http://www.itrpv.net), (March), pp.1–37.
- Kalio, A. et al., 2011. Metallization of n-type silicon solar cells using fine line printing techniques. *Energy Procedia*, 8(April), pp.571–576.
- Kerr, M.J., 2002. Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells. *Thesis of PhD, Australian National University*, pp.1–228.
- Kirk, A.P., 2015. *Solar Photovoltaic Cells: Photons to Electricity*, Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Lelièvre, J.F., 2007. Elaboration de SiNx:H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques. *Thèse de doctorat, INSA Lyon*.
- Lennon, A., Yao, Y. & Wenham, S., 2013. Evolution of metal plating for silicon solar cell metallisation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(7), pp.1454–1468.

- Lim, B. et al., 2011. Light-Induced Degradation of the Carrier Lifetime in N-Type Czochralski-Grown Silicon Doped With Boron and Phosphorus. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp.944–948.
- Low, R. et al., 2011. High efficiency selective emitter enabled through patterned ion implantation. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. pp. 001924–001928.
- Macdonald, D. & Geerligs, L.J., 2004. Recombination activity of interstitial iron and other transition metal point defects in p- and n-type crystalline silicon. *Applied Physics Letters*, 85(18), pp.4061–4063.
- Mekemeche, A. et al., 2017. Two dimensional device simulation and performance optimization of n-type silicon solar cell structure using PC2D. *Solar Energy*, 146, pp.119–124.
- Mertens, K., 2014. *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*, first edit. John Wiley & Sons Ltd, ed., United Kingdom.
- Mihailetchi, V.D. et al., 2008. High efficiency industrial screen printed n-type solar cells with front boron emitter. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.
- Mihailetchi, V.D., Komatsu, Y. & Geerligs, L.J., 2008. Nitric acid pretreatment for the passivation of boron emitters for n-type base silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 92(6), p.63510.

- Ministère de l'Énergie, 2016. Les énergies renouvelables en Algérie. Available at: [https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Praesentationen/2016/160216-iv-algerien-10-creg.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Praesentationen/2016/160216-iv-algerien-10-creg.pdf?__blob=publicationFile&v=7) [Accessed April 7, 2017].
- Nagel, H., Berge, C. & Aberle, A.G., 1999. Generalized analysis of quasi-steady-state and quasi-transient measurements of carrier lifetimes in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 86(11), p.6218.
- NREL, 2016. efficiency\_chart.jpg (4348×2415). Available at: [https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency\\_chart.jpg](https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg) [Accessed April 12, 2017].
- Palmer, D.W., Bothe, K. & Schmidt, J., 2007. Kinetics of the electronically stimulated formation of a boron-oxygen complex in crystalline silicon. *Physical Review B*, 76(3), p.35210.
- Papet, P., 2007. Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin. *Thèse de doctorat, INSA Lyon*.
- PC1D, 2008. PC1D - Software for modelling a solar cell | School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering. Available at: <https://www.engineering.unsw.edu.au/energy-engineering/research/software-data-links/pc1d-software-for-modelling-a-solar-cell> [Accessed April 12, 2017].
- Petres, R. et al., 2005. Passivation of surfaces by PECVD silicon carbide films. In *Proc. 15th PVSEC*. pp. 128–129.

- Portail Algérien des Energies Renouvelables, 2015. Nouveau programme national de développement des énergies renouvelables (2015 -2030). Available at: <http://portail.cder.dz/spip.php?article4446> [Accessed April 8, 2017].
- Poulain, G., 2012. Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement. *Thèse de doctorat, INSA Lyon*.
- Poulain, G. et al., 2012. Selective laser doping from boron silicate glass. *Energy Procedia*, 27, pp.455–459.
- Power Clouds, 2015. Photovoltaïque: le record de production est attendu en 2016. Available at: <http://www.powerclouds.com/index.php/photovoltaique-le-record-de-production-est-attendu-en-2016/?lang=fr> [Accessed April 7, 2017].
- PVTECH, 2016. Solar cell technology roadmap for 2016 | PV Tech. Available at: <https://www.pv-tech.org/editors-blog/solar-cell-technology-roadmap-for-2016> [Accessed July 5, 2017].
- Rahman, M.Z., 2012. Status of Selective Emitters for p-Type c-Si Solar Cells. *Optics and Photonics Journal*, 2(June), pp.129–134.

- Renewable Energy Policy Network, 2016. Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016. Available at: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings\\_FRENCH.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_FRENCH.pdf).
- Ricaud, A., 1997. Photopiles solaires. *Presses polytechniques et universitaires romandes*.
- Richter, A. et al., 2010. Firing stable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN<sub>x</sub> Layer Stack Passivation for the Front Side Boron Emitter of n-type Silicon Solar Cells. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. pp. 1453–1459.
- Romero, M.F. et al., 2010. Plasma diagnostics and device properties of AlGaIn/GaN HEMT passivated with SiN deposited by plasma-enhanced chemical vapour deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, p.495202.
- Saga, T., 2010. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*, 2(3), pp.96–102.
- Sah, C.-T., Noyce, R.N. & Shockley, W., 1957. Carrier generation and recombination in P-N Junctions and P-N Junctions Characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45, pp.1228–1243.
- Schmidt, J., Aberle, a. G. & Hezel, R., 1997. Investigation of carrier lifetime instabilities in Cz-grown silicon. *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, pp.13–18.
- Schmidt, J. & Bothe, K., 2004. Structure and transformation of the metastable boron- and oxygen-related defect center in crystalline silicon. *Physical Review B*, 69(2), pp.1–8.

- Schroder, D.K., 1998. Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd Edition. In *Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd Edition*. pp. 465–522.
- Schubert, G., Huster, F. & Fath, P., 2006. Physical understanding of printed thick-film front contacts of crystalline Si solar cells-Review of existing models and recent developments. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18–19), pp.3399–3406.
- Schutz-kuchly, T., 2011. Investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques. *Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille*.
- Selberherr, S., 1984. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Springer Vienna.
- Sheoran, M. et al., 2008. Hydrogen diffusion in silicon from plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon nitride film at high temperature. *Applied Physics Letters*, 92(17), p.172107.
- Shockley, W., 1949. The theory of pn junctions in semiconductors and pn-junction transistors. *Bell Syst. Tech. J.*, 28.3, pp.435–489.
- Shockley, W. & Read, W.T., 1952. Statistics of the Recombination of Holes and Electrons. *Physical Review*, 87(46), pp.835–842.
- Shockley & Queisser, 1961. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), p.510.
- Sinton, R.A. & Cuevas, A., 1996. Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. *Applied Physics Letters*, 69(17), p.2510.

- SolarPower Europe, 2016. Wind Energy and Solar | Installed GW Capacity - Global and by Country. Available at: <http://www.fipowerweb.com/Renewable-Energy.html> [Accessed April 7, 2017].
- Sze, S.M. & Ng, K.K., 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- Szulc, J. et al., 1997. Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells. In *Proceedings of the IEEE*, volume 85. pp. 711–730.
- Thuillier, B., 2001. Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin. *Thèse de doctorat, INSA Lyon*.
- Tobías, I., del Cañizo, C. & Alonso, J., 2011. Crystalline Silicon Solar Cells and Modules. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. pp. 265–313.
- Verger, F. et al., 2003. The Cambridge Encyclopedia of Space. *Cambridge, UK: Cambridge University Press*, p.428.
- Veschetti, Y. et al., 2011. High efficiency on boron emitter n-type Cz silicon solar cells with industrial process. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1(2), pp.118–122.
- Voronkov, V. V. & Falster, R., 2010. Latent complexes of interstitial boron and oxygen dimers as a reason for degradation of silicon-based solar cells. *Journal of Applied Physics*, 107(5), p.53509.
- Wenham, S., 1993. Buried-contact silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1(1), pp.3–10.

# Productions Scientifiques du thésard

## Publications Internationales:

M. Belarbi, M. Beghdad and **A. Mekemeche**, « *Simulation and optimization of n-type interdigitated back contact silicon heterojunction (IBC-SiHJ) solar cell structure using Silvaco Tcad Atlas* », Solar Energy 127 (2016) 206–215.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.020>

**A. Mekemeche**, M. Beghdad, M. Belarbi, B. Semmache and Y. Cuminal, « *Two dimensional device simulation and performance optimization of n-type silicon solar cell structure using PC2D.* », Solar Energy, Volume 146, April 2017, Pages 119–124. <http://dx.doi.org//10.1016/j.solener.2017.02.018>

## Communication Internationale:

**A. Mekemeche**, M. Beghdad, B. Semmache & M. Belarbi, « *Study of silicon solar cells with homogeneous and selective emitter using PC2D.* », The First Incosole (International Conference on Solar Energy) 2015, University Bordj Bou Arreridj (Algeria); 4-5 May 2015.  
[http://solar.univbba.dz/images/PDF/INCOSOLE2015\\_book-ofabstracts.pdf](http://solar.univbba.dz/images/PDF/INCOSOLE2015_book-ofabstracts.pdf)

## Communication Nationale :

**A. Mekemeche**, F. Merad, A.-A. Kanoun, F. Benyettou, H. Bachir & M. Beghdad, « *Détermination par Excel des performances d'une cellule Solaire au Silicium* », Département de Physique et Laboratoire des SignauxSystèmes, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université de Mostaganem, présenté au CNPA 2012 (Congrès National de la Physique et de ses Applications) et organisé du 20 au 22 Novembre 2012 par l'Université Ibn Badis de Mostaganem.