



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف

THESE

*En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en
Physique*

Présentée par : **BENDJEBBAR Kamel Eddine**

Intitulé

Amélioration des rendements des cellules photovoltaïques à filière silicium

Faculté : *Physique*

Département : *Physique Energétique*

Domaine : *Sciences de la matière*

Filière : *Physique*

Intitulé de la Formation : *Physique*

Soutenue le : --/--/---- devant le jury composé de :

Membres	Grade	Qualité	Domiciliation
HAMDACHE Fatima	Professeure	Présidente	USTO-MB
RACHED Djaaffar	MCA	Encadrant	USTO-MB
BAHLOULI Samia	MCA	Co-encadrant	USTO-MB
AMRANI Bouhalouane	Professeur	Examineur	Univ Oran-1
RIANE Houaria	MCA	Examinatrice	Univ Mascara

Résumé :

Dans cette thèse, nous avons optimisé les cellules HIT (Silicium amorphe/Silicium cristallin) de type n et de type p en utilisant le logiciel ASDMP. Nous avons étudié les cellules solaires à hétérojonction de type **HIT n-c-Si** (oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si:H)/silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si:H)/silicium cristallin dopé n (n-c-Si)/Aluminium (Al)) et **HIT p-c-Si** (oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si:H)/silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si:H)/silicium cristallin dopé p (p-c-Si)/Aluminium (Al)) respectivement. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'influence de la jonction TCO/semiconducteur au niveau de la face avant de la cellule et de la jonction métal-semiconducteur au niveau de la face arrière de la cellule sur les performances de ces deux types de cellules solaires.

Les différents résultats obtenus lors de nos simulations nous ont permis de conclure que pour les cellules HIT n-c-Si, une augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} au niveau de la face arrière détériore les paramètres de sortie de la cellule. Le rendement diminue et par conséquent, l'Aluminium reste le meilleur métal pour l'élaboration du contact arrière de ce type de cellule car il a un travail de sortie égale à 4,06 eV considéré comme l'un des plus petits par rapport aux autres métaux. Au niveau de la face avant de la cellule, l'augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} élimine la barrière pour les trous améliorant ainsi les paramètres photovoltaïques. Expérimentalement, augmenter le ϕ_{b0} du contact avant peut se faire en choisissant un TCO avec un travail de sortie élevé. L'oxyde de zinc (ZnO) avec un travail de sortie égal à 5,2 eV pourrait être le meilleur TCO pour ce type de cellule solaire.

Pour les cellules HIT p-c-Si, au niveau du contact avant, le choix du matériau possédant un travail de sortie plus grand n'améliore pas les paramètres de sortie des cellules. Au niveau du contact arrière, les performances des cellules étudiées dépendent du matériau utilisé. En effet, contrairement au contact avant, une augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel arrière ϕ_{bL} élimine la barrière pour les trous ce qui va permettre à davantage de trous photogénérés de passer du silicium cristallin vers le métal. L'augmentation du champ électrique provoque une augmentation de V_{oc} qui conduit à une augmentation du rendement des cellules solaires. Le choix du travail de sortie du métal à l'arrière de la cellule solaire HIT p c-Si est déterminant pour améliorer les rendements de ce type de cellule. Un métal avec un travail de sortie élevé comme le palladium, le chrome ou le ruthénium pourrait être le meilleur choix comme contact arrière pour ce type de cellule solaire.

Mots clés : Cellules photovoltaïques, Silicium, Hétérojonctions, Modélisation, Rendement, Jonction, Barrière de potentiel.

Abstract

In this thesis, we optimized n-type and p-type HIT (Amorphous Silicon / Crystalline Silicon) cells using ASDMP software. We studied HIT n-c-Si heterojunction solar cells (indium tin oxide (ITO) / p-doped hydrogenated amorphous silicon (pa-Si: H) / intrinsic hydrogenated polymorphic silicon (i-pm-Si : H) / n-doped crystalline silicon (nc-Si) / Aluminum (Al)) and HIT p-c-Si (indium tin oxide (ITO) / n-doped hydrogenated amorphous silicon (n-a-Si: H) / Intrinsic hydrogenated polymorphic silicon (i-pm-Si: H) / p-doped crystalline silicon (pc-Si) / Aluminum (Al)) respectively. We were particularly interested in the influence of the TCO / semiconductor junction at the front face of the cell and the metal-semiconductor junction at the rear face of the cell on the performance of these two types of solar cells.

The various results obtained during our simulations allowed us to conclude that for the n-c-Si HIT cells, an increase in the height of the ϕ_{bL} potential barrier at the rear face deteriorates the output parameters of the cell. The efficiency decreases and therefore, Aluminium remains the best metal for the development of the rear contact of this type of cell because it has a work function equal to 4.06 eV considered as one of the smallest compared to other metals. At the level of the front face of the cell, the increase in the potential barrier height ϕ_{b0} eliminates the barrier for the holes, thus improving the photovoltaic parameters. Experimentally, increasing ϕ_{b0} at the front contact can be done by choosing a TCO with a high output work. Zinc oxide (ZnO) with a work function equal to 5.2 eV might be the best TCO for this type of solar cell.

For p-c-Si HIT cells, at the front contact, the choice of the material having a greater work output does not improve the output parameters of the cells. At the back contact, the performance of the studied cells depends on the material used. In fact, unlike the front contact, an increase in the potential barrier height ϕ_{bL} eliminates the barrier for the holes, which will allow more photogenerated holes to pass from the crystalline silicon to the metal. The increase in the electric field causes an increase in V_{oc} which leads to an increase in the efficiency of the solar cells. The choice of the metal work function at the back of the HIT p c-Si solar cell is decisive in improving efficiencies of this type of cell. A metal with a high work function like palladium, chromium or ruthenium might be the best choice as a back contact for this type of solar cell.

Title: Improvement of the efficiencies of silicon photovoltaic cells.

Keywords: Photovoltaic cells, Silicon, Heterojunctions, Modeling, efficiencies, Junction, Potential barrier.

في هذه الأطروحة ، قمنا بتحسين خلايا HIT (السيليكون غير المتبلور / السيليكون البلوري) من النوع n والنوع p باستخدام برنامج ASDMP. لقد درسنا الخلايا الشمسية غير المتجانسة من النوع HIT (أكسيد القصدير الإنديوم (ITO) / السيليكون غير المتبلور المهدرج (p-a-Si: H) / السيليكون متعدد الأشكال المهدرج جوهرياً (i-pm-Si: H) / السيليكون البلوري (n-c-Si) / الألومنيوم (Al)) و p-c-Si-HIT (أكسيد القصدير الإنديوم (ITO) / السيليكون غير المتبلور المهدرج (n-a-Si: H) / السيليكون متعدد الأشكال المهدرج جوهرياً (i -pm-Si: H) / السيليكون البلوري p-c -Si / الألومنيوم (Al)) على التوالي. نحن مهتمون بشكل خاص بتأثير تقاطع TCO / أشباه الموصلات في الوجه الأمامي للخلية وتقاطع أشباه الموصلات المعدنية في الوجه الخلفي للخلية على أداء هذين النوعين من الخلايا الشمسية.

سمحت لنا النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها خلال عمليات المحاكاة الخاصة بنا باستنتاج أنه بالنسبة لخلايا HIT n-c-Si ، تؤدي الزيادة في ارتفاع الحاجز المحتمل ϕ_{bL} في الوجه الخلفي إلى تدهور معاملات الإخراج للخلية. تتخفض الكفاءة وبالتالي ، يظل الألومنيوم أفضل معدن لتطويع الاتصال الخلفي لهذا النوع من الخلايا لأنه يحتوي على عمل ناتج يساوي 4.06 فولت يُعتبر من أصغر المعادن مقارنة بالمعادن الأخرى. على مستوى الوجه الأمامي للخلية ، تؤدي الزيادة في ارتفاع الحاجز المحتمل ϕ_{b0} إلى إزالة حاجز الثقوب ، وبالتالي تحسين المعلمات الكهروضوئية. من الناحية التجريبية ، يمكن زيادة ϕ_{b0} لجهة الاتصال الأمامية عن طريق اختيار التكلفة الإجمالية للملكية مع عمل ناتج مرتفع. قد يكون أكسيد الزنك (ZnO) مع عمل ناتج يساوي 5.2 فولت هو أفضل تكلفة إجمالية للملكية لهذا النوع من الخلايا الشمسية.

بالنسبة لخلايا HIT p-c-Si ، عند جهة الاتصال الأمامية ، لا يؤدي اختيار المادة التي لها ناتج عمل أكبر إلى تحسين معاملات الإخراج للخلايا. على مستوى التلامس الخلفي ، يعتمد أداء الخلايا المدروسة على المادة المستخدمة. في الواقع ، على عكس التلامس الأمامي ، تؤدي الزيادة في ارتفاع الحاجز الخلفي المحتمل ϕ_{bL} إلى إزالة حاجز الثقوب ، مما سيسمح لمزيد من الثقوب المتولدة بالضوء بالمرور من السيليكون البلوري إلى المعدن. تؤدي الزيادة في المجال الكهربائي إلى زيادة Voc مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الخلايا الشمسية. يعد اختيار عمل الإخراج المعدني في الجزء الخلفي من الخلية الشمسية HIT p c-Si أمراً حاسماً في تحسين إنتاجية هذا النوع من الخلايا. قد يكون المعدن الذي ينتج عنه عمل مرتفع مثل البلاديوم أو الكروم أو الروثينيوم هو الخيار الأفضل كجهة اتصال خلفية لهذا النوع من الخلايا الشمسية.

العنوان: تحسين إنتاجية الخلايا الكهروضوئية السيليكونية.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية ، السيليكون ، الوصلات غير المتجانسة ، النمذجة ، العائد ، التقاطع ، الحاجز المحتمل.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je remercie " الله " qui m'a donné la patience, le courage et la volonté pour réaliser cette thèse.

Paix et salut sur notre premier éducateur (محمد صلى الله عليه و سلم) le prophète pour ce qu'il a donné à l'humanité.

Je tiens aussi à présenter mes sincères remerciements à :

Mon Directeur de Thèse M. RACHED Djaaffar pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer, pour sa disponibilité tout au long de l'élaboration de cette thèse.

Mon co-encadreur M^{me} BAHLOULI Samia pour son aide, ses critiques et ses suggestions, ses précieux conseils, qui ont été pour moi d'un grand apport.

Je remercie également M^{me} F. HAMDACHE d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse, ainsi que M^{me} H. RIANE et monsieur B. BOUHALOUENE pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail.

Finalement, je remercie tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de cette thèse.

A vous tous, un grand Merci

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	8
Références	10
CHAPITRE I.....	12
Généralités sur le solaire photovoltaïque	12
I Introduction	13
I.1 Rayonnement solaire	13
I.2 Air mass(AM)	13
I.2.1 Les Conditions de Test Standard (STC)	14
I.3 Energie solaire en Algérie	14
I.3.1 Cadre réglementaire des énergies renouvelables en Algérie	16
I.3.2 Les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie.....	17
I.3.2.1 ENIE SOLAIRE	17
.....	17
I.3.2.2 CONDOR	17
I.3.2.3 ALGERIAN PV COMPANY	17
I.3.2.4 AURES SOLAIRE	18
I.4 Effet photovoltaïque	18
I.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	18
I.4.2 Les composants d'un système Photovoltaïque	19
I.5 Matériaux utilisés pour les cellules solaires photovoltaïques	20
I.5.1 Le silicium cristallin	23
I.5.2 Le silicium amorphe hydrogéné	23
I.5.3 Métastabilité du silicium amorphe	25
I.5.4 Le silicium polymorphe hydrogéné	25
I.6 Rappel sur les semiconducteurs	26
I.6.1 les semiconducteurs de type n	26
I.6.2 les semiconducteurs de type p	27
I.7 La jonction p-n	28
I.7.1 Structure et comportement d'une jonction p-n a l'équilibre.....	28
I.7.2 Les caractéristiques d'une jonction : La densité volumique des charges, le champ électrique interne, le potentiel de diffusion, la zone de charge d'espace.....	30
I.8 Schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque.....	34
I.9 La caractéristique courant tension	35
I.9.1 Courant de court-circuit (I_{cc})	35
I.9.2 Tension de circuit ouvert (V_{oc}).....	35

I.9.3 Facteur de forme (FF).....	36
I.9.4 Le rendement (η).....	36
I.10 La réponse spectrale (R_s).....	36
I.11 Conclusion.....	37
Références.....	37
CHAPITRE II.....	39
Cellules à Hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si).....	39
II.1 Introduction.....	40
II.2 Heterojonction HIT (Heterojunction with Interinsic Thin layer).....	40
II.2.1 Définition.....	40
II.2.2 Structure des cellules solaires à hétérojonctions de silicium.....	42
II.2.3 Les avantages des cellules HIT.....	42
II.3 Les différentes hétérojonctions pour le photovoltaïque.....	43
II.3.1 Cellule standard optimisée : PERL.....	44
II.3.2 Technologie TOPCon.....	44
II.3.3 Structures à contacts interdigités en face arrière.....	45
II.4 Description du modèle de Simulation.....	46
II.4.1 Calcul de la densité de charge effective.....	48
II.4.2 Recombinaisons dans les états localisés.....	52
II.4.3 Expressions des courants d'électrons et de trous.....	53
II.4.4 Méthode de résolution.....	53
II.5 Modèle d'Anderson.....	54
II.5.1 Cas d'une cellule HIT de type p (n-a-Si:H/p-c-Si).....	54
II.5.2 Cas d'une cellule HIT de type n (p-a-Si:H/n-c-Si).....	55
Figure II.10 Diagramme de bande d'une hétérojonction (p-a-Si:H/n-c-Si).....	56
II.6 Les logiciels de simulation.....	56
II.6.1 Le logiciel AMPS-1D.....	56
II.6.2 Le logiciel PC-1D.....	57
II.6.3 Le logiciel AFORS-HET.....	57
II.6.4 SCAPS-1D.....	58
II.6.5 ASDMP.....	58
II.7 Les dispositifs expérimentaux.....	59
II.8 Conclusion.....	60
Références.....	61
Chapitre III.....	63
Optimisation des contacts avant et arrière des cellules solaires HIT n-c-Si.....	63

III.1 Introduction	64
III.2 Présentation de la cellule solaire HIT n-c-Si	64
III.3 Analyse du diagramme de bande des faces avant et arrière de la structure HIT n-c-Si.	66
III.4 Optimisation du contact arrière des cellules solaires HIT n-c-Si	68
III.5 Optimisation du contact avant des cellules solaires HIT n-c-Si	73
III.6 Conclusion	78
Références	79
CHAPITRE IV	81
Optimisation des contacts avant et arrière des cellules solaires HIT p-c-Si	81
IV.1 Introduction	82
IV.2 Présentation de la cellule solaire HIT p-c-Si	82
IV.3 Analyse du diagramme de bande des contacts avant et arrière de la structure HIT p-c-Si.	84
IV.4 Optimisation du contact arrière de la cellule solaire HIT p-c-Si	86
IV.5 Optimisation du contact avant de la cellule solaire HIT p-c-Si	88
IV.6 Conclusion	91
Références	92
Conclusion générale et perspectives	94
ANNEXE: PRODUCTION SCIENTIFIQUE	98

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La civilisation et la technologie actuelle ne serait possible sans énergie. En effet, nombreuses sont les activités qui consomment énormément d'électricité (chauffage électrique, trains, voitures électriques..etc). En 2018, la production mondiale d'électricité était de 26700 TWh [01], celle de l'Algérie de 8143 GWh [02]. Par souci écologique et économique, le passage aux énergies renouvelables est indispensable. Diverses énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, géothermique, hydraulique, la biomasse et l'énergie solaire peuvent être des solutions surtout que leur prix a bien diminué ces dernières années. L'Algérie, de par sa situation géographique possède un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde ce qui nous a conduit à choisir d'étudier dans cette thèse, l'énergie photovoltaïque.

Le photovoltaïque est en pleine essor. En effet, un travail de recherche très important a été effectué pour réaliser les cellules solaires d'aujourd'hui [03]. En 2019, près de 114 GW de systèmes photovoltaïques ont été réalisés dans le monde [04]. Sur le marché, les cellules basées sur des substrats en silicium restent la technologie la plus dominante. Malgré un stade de fabrication très avancé, plusieurs laboratoires de recherches tentent d'augmenter les rendements de ce type de cellules solaires à moindre coût.

Les cellules solaires HIT (de type n ou de type p) qui font l'objet de cette thèse sont des hétérojonctions à base silicium cristallin (c-Si) qui joue le rôle d'absorbeur sur lequel est déposée une couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). Les défauts entre les deux couches sont passivés par une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque. Le premier module à hétérojonction « HIT Power 21TM » a été réalisé industriellement avec une puissance électrique de 180 watts pour une surface d'environ 1 m². Plus tard, l'entreprise SANYO a réalisé de nouveaux types de modules « HIT Power roof » conçu pour être posé sur les toits pour remplacer les tuiles [05]. Aujourd'hui, la réussite industrielle des cellules HIT a validé les avantages de ce type de cellules en atteignant des rendements de plus de 26% [6]. Afin d'éviter des expériences longues et coûteuses, nous avons étudié des cellules solaires à hétérojonctions (HIT) avec le logiciel ASDMP. Ce logiciel peut simuler la caractéristique courante tension $J=f(V)$, le potentiel, le champ électrique, le transport des porteurs de charges, les recombinaisons...etc.

Nous avons divisé cette thèse en trois chapitres qui s'intitulent :

- Chapitre I. Généralités sur le solaire photovoltaïque
- Chapitre II. L'hétérojonction silicium amorphe / silicium cristallin
- Chapitre III. Optimisation du contact avant et arrière sur des cellules solaires HIT n-c-Si
- Chapitre IV. Optimisation du contact avant et arrière sur des cellules solaires HIT p-c-Si

Le premier chapitre, sera consacré à l'énergie photovoltaïque : avantages et inconvénients du solaire photovoltaïque, le solaire en Algérie, le cadre réglementaire des énergies renouvelables ainsi que les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie. Nous allons par la suite définir tout ce qui est en rapport avec le principe de

fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque, la structure et le comportement d'une jonction p-n à l'équilibre) ainsi que les matériaux utilisés pour l'élaboration de ce type de dispositifs. La suite de ce chapitre aura pour rôle de présenter le modèle électrique équivalent à une cellule photovoltaïque ainsi que les caractéristiques courant-tension et les paramètres photovoltaïques. Nous terminerons par donner les définitions de la réponse spectrale externe (où rendement quantique) ainsi que la réponse spectrale interne.

Le deuxième chapitre sera consacré aux cellules solaires à hétérojonction, où l'on s'intéressera à leur définition, leurs évolutions historiques, leurs structures ainsi que leurs avantages. On y décrira également le principe physique de l'hétérojonction, la modélisation des photopiles et le modèle d'Anderson. Ce chapitre présentera également des logiciels de simulation comme PC1D, AMPS-1D, AFORS-HET et le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) que nous avons utilisé pour réaliser nos simulations. Ce logiciel a été développé par P.Chatterjee et validé par l'équipe de recherche du laboratoire LPICM (Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces) de l'école Polytechnique de Paris.

Le troisième chapitre se focalisera sur l'étude des jonctions métal-semiconducteur aux contacts avant et arrière (ITO/p-a-Si: H et n-c-Si/Al) au niveau des cellules solaires HIT n-c-Si suivantes : oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si: H)/silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si: H)/silicium cristallin dopé n (n-c-Si)/Aluminium (Al). Le but de cette étude est d'étudier et d'optimiser les jonctions métal-semiconducteur au niveau de l'avant et de l'arrière dans ce type de photopile afin de bien choisir le métal responsable des recombinaisons des porteurs de charge lors de leur collecte. Afin de mener cette étude, une modélisation numérique a été réalisée en utilisant le logiciel ASDMP.

Pour étudier de façon générale le fonctionnement des cellules solaires à hétérojonction avec couche mince intrinsèque HIT p-c-Si et HIT n-c-Si, nous avons choisi d'étudier dans le quatrième chapitre les jonctions métal-semiconducteur aux contacts avant et arrière de la cellule solaire HIT p-c-Si : (oxyde d'indium et d'étain (ITO) / silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si: H) / silicium polymorphe intrinsèque (i-pm-Si: H) / silicium cristallin dopé p (p-c-Si) / Aluminium (Al)). Le but est de bien établir une règle générale pour choisir le métal le plus adéquat à l'avant et à l'arrière de ce type de cellules solaires. Comme dans le chapitre 3, nos simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel ASDMP.

Références

[01] <https://www.iea.org>, consulté le 18 mars 2020

[02] <https://www-ceicdata-com>, consulté le 18 mars 2020.

[03] D.Reaux, Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 30 juin 2017.

- [04] <https://www.pv-magazine.com/2019/07/25/global-pv-market-114-gw-to-be-installed-in-2019-with-continued-growth-onwards> consulté le 18 mars 2020.
- [5] D.Rached, Thèse de Doctorat, « Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe ». USTO, 2010.
- [6] M.A. Green, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A.W.Y. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 54), Prog. Photovolt. Res. Appl. 27 (7) (2019) 565–57

CHAPITRE I
Généralités sur le solaire photovoltaïque

I Introduction

Le premier chapitre de cette thèse sera consacré sur les généralités de la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque. Ainsi, nous donnerons une définition sur le rayonnement solaire, puis l'énergie solaire en Algérie, les avantages et les inconvénients du solaire photovoltaïque, le cadre réglementaire des énergies renouvelables ainsi que les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire et enfin la structure et le comportement d'une jonction p-n à l'équilibre. Nous allons par la suite définir tout ce qui est en rapport avec le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque, la structure et le comportement d'une jonction p-n à l'équilibre) ainsi que les matériaux utilisés. La suite de ce chapitre aura pour but de présenter le modèle électrique équivalent à une cellule photovoltaïque, les caractéristiques courant-tension (I-V) et les paramètres photovoltaïques qui sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement en puissance (η). Nous terminerons ce chapitre par une définition de la réponse spectrale externe (où rendement quantique) ainsi que la réponse spectrale interne.

I.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie rayonnante émise par le soleil. La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'environ 300 000 km/s.

Le rayonnement solaire est de type électromagnétique. Depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons Gamma, la distribution se centre dans le visible autour de 0.55 micron.

La puissance énergétique (constante solaire ou densité d'énergie solaire) à l'extérieur de l'atmosphère est de 1350W/m^2 , au niveau de la surface terrestre elle est d'environ 1000W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère.

I.2 Air mass(AM)

Afin de comparer les performances des cellules solaires, la notion d'Air Mass (AM), ou « masse atmosphérique » a été créée. L'Air Mass est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I.1).

Ce nombre est défini par l'équation: $AM=1/\cos \theta$. Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales) [1,2].

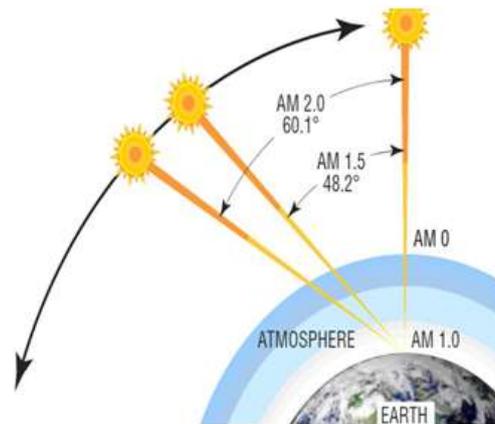
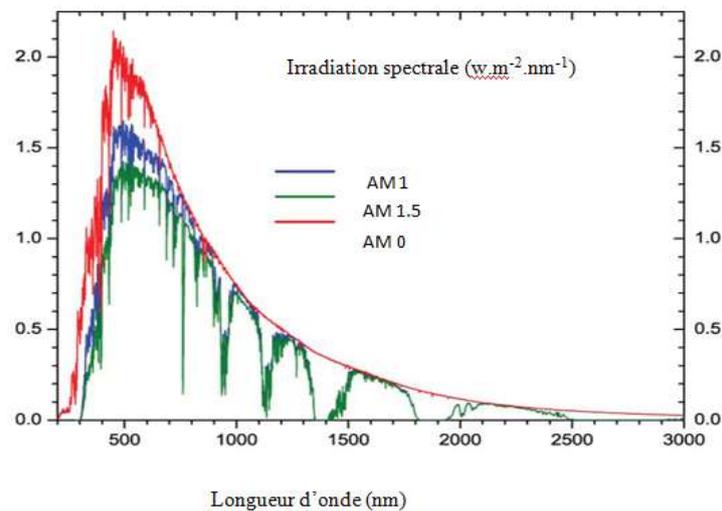


Figure I.1 Définition de l'air mass AMx.

Figure I.2. Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.
(Source NREL solar spectrum).

I.2.1 Les Conditions de Test Standard (STC)

Afin d'uniformiser les tests sur les panneaux solaires, des conditions d'essai sont mises en place pour comparer la puissance des différents panneaux solaires. Les conditions normalisées de test sont caractérisées par un rayonnement de 1000 W/m^2 , un spectre solaire AM1,5 : $(1/\cos\theta)=1,5$ cad $\theta=48^\circ$ et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions).

I.3 Energie solaire en Algérie

Malgré quelque inconvénients comme le coût élevé des panneaux solaires, les faibles rendements ainsi que la nécessité de batteries pour le stockage, le principal avantage de la

production d'énergie par les systèmes photovoltaïques réside dans l'aspect non polluant de cette technologie. Une fois mis en place les panneaux solaires s'intègrent dans l'environnement sans causer de nuisances sonores, ni de gaz à effet de serre. Les systèmes photovoltaïques ne génèrent pas de déchets contrairement à la production d'électricité par des moyens classiques.

Contrairement à l'énergie éolienne ou hydraulique, elle présente l'avantage d'une mise en œuvre sur une plus grande partie de la planète (à l'exception des latitudes extrêmes). Il est possible d'installer des générateurs photovoltaïques dans des régions ne présentant pas de réseau électrique préexistant notamment des sites isolés à cause du relief par exemple. Ils peuvent également être employés dans les espaces naturels protégés où le raccordement de bâtiments isolés ne pourrait se faire que par des lignes enterrées d'un coût exorbitant.

La haute fiabilité de cette technologie justifie son application dans le domaine spatial. Cette fiabilité s'explique par l'absence de pièces mobiles qui causeraient une usure prématurée du matériel.

L'Algérie possède un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde. La durée d'insolation sur le territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'irradiation journalière de 6000 Wh/m² environ est 10 fois la consommation mondiale actuelle. Ce gisement solaire dépasse les cinq milliards de GWh / an. L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1 m² est près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud (TAMENRASSET). [3]

En février 2016 lors du Conseil du Restreint Gouvernement, l'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin de préserver les ressources énergétiques d'origine fossile. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 (12 000 MW pour le marché national et 10 000 MW qui pourraient être dédiés à l'exportation) figure (I.3).

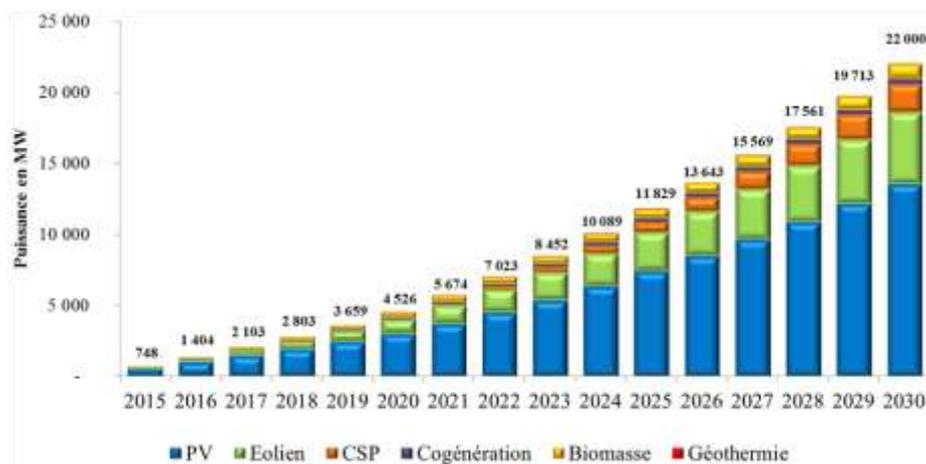


Figure I.3. Les énergies renouvelables dans la production nationale.

La phase d'expérimentation du programme (2011-2016) a connu la réalisation de plusieurs projets et centrales [3]:

- La Centrale électrique hybride (gaz–solaire) à Hassi Rmel de 150 MW dont 25 MW en solaire thermique (CSP), mise en service en juillet 2011.
- La ferme éolienne de 10 MW dans la région d'Adrar, mise en service en juin 2014.
- La centrale pilote photovoltaïque de 1,1 MWc à Ghardaïa, mise en service en juin 2014.
- La Centrale photovoltaïque 03 MW de Djanet (Illizi), mise en service en février 2015.
- La Centrale photovoltaïque 13 MW de Tamanrasset, mise en service en novembre 2015.
- La Centrale photovoltaïque de 09 MW Tindouf, mise en service en décembre 2015.
- La Centrale photovoltaïque 05 MW d'In-Salah (Tamanrasset) mise en service en février 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW d'Ain El-ibel (Djelfa) mise en service en avril 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW de Khnag (Laghouat), mise en service en avril 2016.
- La Centrale photovoltaïque 15 MW d'Oued El-Kebrit (Souk Ahras), mise en service en avril 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW de Sedrate Leghzal (Nâama), mise en service en mai 2016.
- La Centrale photovoltaïque 30 MW d'Ain-Skhouna (Saida), mise en service en mai 2016.

I.3.1 Cadre réglementaire des énergies renouvelables en Algérie

Le développement des énergies renouvelables est encadré par un ensemble de textes législatifs et réglementaires. Il s'agit essentiellement des lois relatives à La maîtrise de l'énergie, l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisations et la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. [3]

- Loi n° 04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable (JO n° 52 du 18 août 2004).
- Arrêté du 21 février 2008 fixant les règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité et les règles de conduite du système électrique (JO n° 25 du 18 Mai 2008).
- Arrêté interministériel du 19 avril 2008, portant Adoption du règlement technique relatif au « Module Photovoltaïque (PV) au silicium cristallin pour application terrestre ».
- Loi n° 09-09 du 30 décembre 2009 portant sur la loi de finances pour 2010, notamment son article 64 portant sur la création du fond national pour les Energies renouvelables et la cogénération (création du Fonds national pour les énergies renouvelables FNER) (JO n°78 du 31 décembre 2009) ;
- Arrêté du 2 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité produite à partir des installations utilisant la filière éolienne (JO n° 23 du 23 Avril 2014)

- Arrêtés ministériels du 02 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis pour la production d'électricité à partir d'installations utilisant la filière photovoltaïque et les conditions de leur application.
- Décret exécutif n° 15-69 du 11 février 2015 fixant les modalités de certification de l'origine de l'énergie renouvelable et de l'usage de ces certificats ; (JO n° 09 du 18 février 2015).

I.3.2 Les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie

Plusieurs entreprises Algériennes publiques et privés de production et assemblage de photopiles ont vu le jour dans le but de la production d'énergie à base de systèmes photovoltaïques. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer [3] :

I.3.2.1 ENIE SOLAIRE

Située à Sidi Bel Abbas, ENIE SOLAIRE (Entreprise Nationale des Industries Electroniques Solaires) est une unité de fabrication de photopile d'une capacité de 50 mégawatts.



I.3.2.2 CONDOR

Située à Bordj Bou Arreridj, CONDOR est spécialisée dans l'électronique. En janvier 2012, elle a créé une unité dédiée à la fabrication de panneaux photovoltaïques au silicium (mono et poly cristallin) de puissance allant de 28 W à 70 W.



I.3.2.3 ALGERIAN PV COMPANY

Située dans la zone industrielle de Tlemcen, ALGERIAN PV COMPANY a été créé en 2010. C'est une entreprise industrielle qui fournit des panneaux solaires photovoltaïques conformes aux normes Algériennes NA10454 et NA16562. Elle est dotée d'une ligne moderne modulable d'encapsulation de modules photovoltaïques pouvant produire 12 mégawatts annuellement.



I.3.2.4 AURES SOLAIRE

Située dans la zone d'activité de la commune d'Ain Yagout à Batna, c'est une unité privée de production de panneaux solaires d'une capacité annuelle de 30 MW, elle est.



I.4 Effet photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV), est formé à partir des mots photo (lumière en grec) et Volta du nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'effet photovoltaïque, c'est la conversion de l'énergie solaire en électricité par des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité.

Nous présentons dans ce qui suit, les premières utilisations historiques des cellules photovoltaïques :

- Les laboratoires Bell présentent la première cellule au silicium en 1954 ($\eta=4\%$).
- 1ère utilisation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain Vanguard1 en 1958 ($\eta=9\%$).
- 1ère application terrestre dans un phare au Japon en 1963.
- 1ère maison photovoltaïque, Solar One construite à l'université de Delaware USA en 1973.
- 1ère installation PV reliée au réseau électrique en Europe (Suisse) en 1982.

I.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en électricité nécessite 3 étapes:

1- Absorption de la lumière:

- a- Absorption des photons par la matière (électrons).
- b- Le photon transfère son énergie à un électron.
- c- L'électron va changer de niveau d'énergie.
- d- Création d'une paire électron-trou.

Cette première étape est importante, mais elle ne suffit pas pour générer le courant souhaité. Il faut parvenir à séparer les trous des électrons pour éviter leur recombinaison, et pouvoir ainsi les collecter.

2- Faire migrer les charges créées vers deux extrémités différentes :

La meilleure solution pour séparer les charges consiste à utiliser un champ électrique qui doit apparaître spontanément durant la fabrication des cellules. C'est pourquoi le fonctionnement même des cellules photovoltaïques repose sur l'utilisation de jonctions p-n.

3- Evacuer les charges dans des circuits externes.

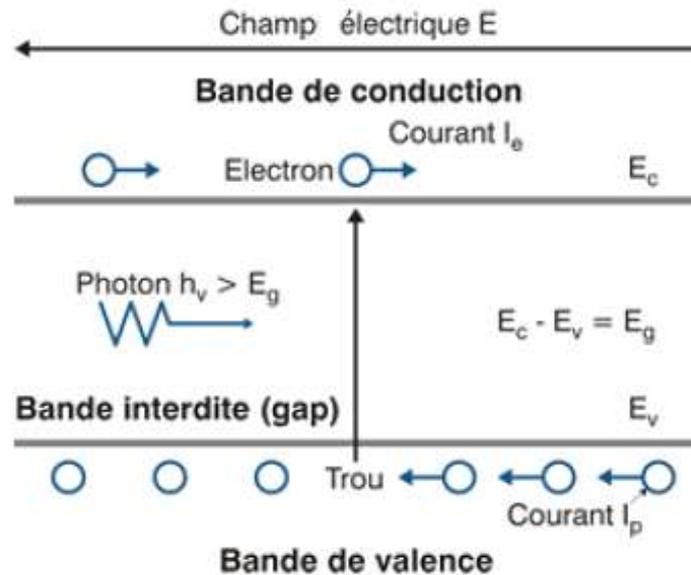


Figure I.4 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

I.4.2 Les composants d'un système Photovoltaïque

Les composants des centrales photovoltaïques sont composés de :

- **Panneaux photovoltaïques** : La plupart sont montés au sol avec un tracker solaire. Bien qu'il améliore les performances globales, il augmente également les coûts d'installation et de maintenance.
- **Régulateur ou contrôleur de charge** : son rôle est de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge. Cette fonction a un impact direct sur la durée de vie de la batterie.
- **Onduleur** : son rôle est de convertir la tension continue de batterie (12, 24 ou 48V) en une tension alternative (220V - 240V) identique à celle du réseau électrique urbain pour qu'il puisse être facilement transporté dans les lignes à tension du réseau.

- Les batteries solaires : Les batteries solaires sont adaptées au cycle de charge lent des panneaux solaires. Leur durée de vie dépend de la profondeur de décharge qui doit être comprise entre 15 et 25% de la capacité totale [3].

I.5 Matériaux utilisés pour les cellules solaires photovoltaïques

Les cellules solaires photovoltaïques sont constituées de matériaux semiconducteurs. Ce type de matériau possède un Gap inférieur à 3.5 eV et se comporte comme un isolant à très basse température. La majorité des photopiles commercialisées sont à base de silicium. La filière silicium utilise le silicium monocristallin ou polycristallin comme matériau absorbant.

Le faible coût de production (réduction de la matière utilisée) est la raison principale pour la fabrication des cellules en couches minces.

La figure 6 représente les différentes filières utilisées pour les matériaux photovoltaïques.

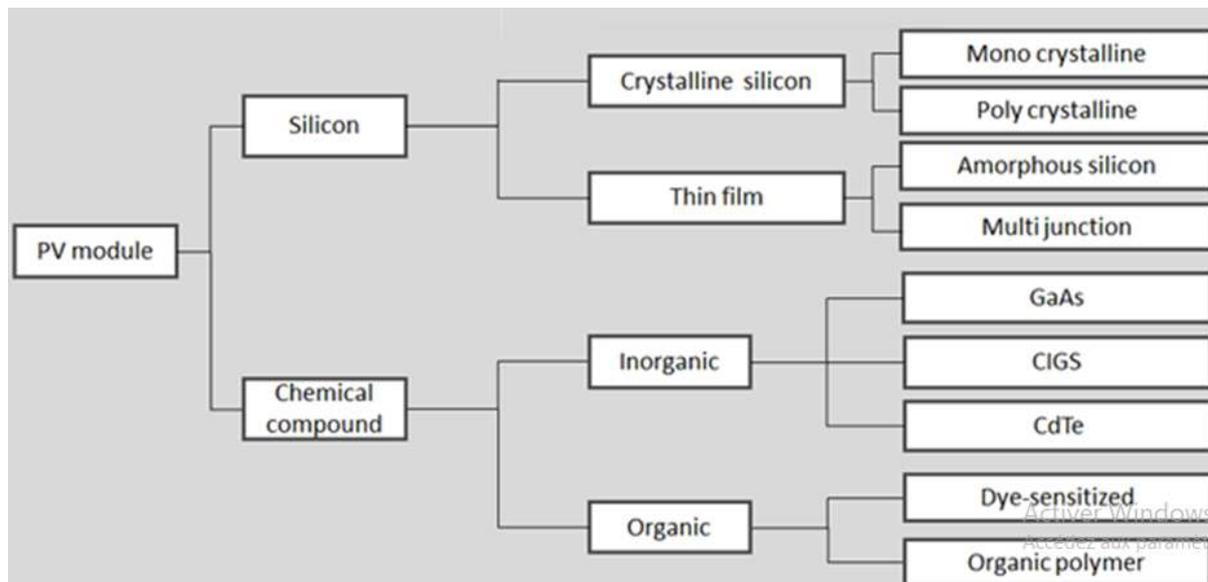


Figure I.5: Les filières photovoltaïques.

Les cellules photovoltaïques sont donc basées sur le choix matériau absorbant. Elles sont classées en trois générations.

- La première génération renferme les structures composées de silicium monocristallin ou multi cristallin, qui se différencient par le procédé industriel employé pour fabriquer les wafers obtenu par sciage du lingot.
- La deuxième génération rassemble les cellules dites à couches minces et les cellules organiques.
- Toutes les autres technologies appartiennent à la 3e génération.

Les cellules monocristallines sont composées d'un seul cristal de silicium pur. Cette technologie de fabrication de panneau solaire reste jusqu'à présent la plus efficace cependant le processus de fabrication reste complexe est par conséquent plus coûteux.

Pour les cellules poly-cristallines, leur fabrication est obtenue à partir de chutes de morceaux de silicium. Elles présentent un aspect multi-facette bleutée typique de la présence de plusieurs cristaux de silicium. Le rendement d'un panneau solaire poly-cristallin va de 11 à 15 %. Il est moins important que le panneau solaire monocristallin ce qui impose d'avoir un panneau légèrement plus grand.

La deuxième génération de photopile, qui contient entre autres les cellules solaires à base de CdTe (Telluride de cadmium), a-Si :H (Silicium amorphe hydrogéné), CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Selenium), GaAs (Arsénium de Gallium), englobe les cellules solaires en couches minces.

Le principe des dispositifs à couches minces, est le dépôt d'une fine couche d'un matériau dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques "nm" à quelques "µm" sur un substrat. Ces matériaux peuvent être des composés chimiques organiques ou inorganiques.

Ces couches minces sont formées à partir de couches successives de semi-conducteurs, déposées par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un matériau support (substrat) comme le verre ou le plastique. Avec l'augmentation des volumes de production ainsi que le prix de revient, ces technologies réservées initialement aux applications spatiales en raison de leur poids sont devenues compétitives avec les technologies cristallines de première génération. Malheureusement, ces technologies s'appuient dans la plupart des cas sur des éléments rares et toxiques.

Pour pallier à ces inconvénients, d'autres matériaux ont vu le jour comme le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) qui est un nouveau matériau absorbeur pour les cellules solaires à couches minces.

La Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV) est considérée comme la troisième génération. Ces cellules solaires sont à base de colorants ou bien celles à base de nanoparticules de silicium ou de germanium (5 nanomètres de diamètre) implantées dans une fine couche de verre placée à la surface de la cellule pour que la lumière solaire soit mieux absorbée. Parmi ces cellules : les cellules organiques, les cellules Grätzel et les cellules multi-jonctions.

Ces photopiles visent à passer la limite maximale de rendement des cellules qui est actuellement d'environ 30%. Pour cela, les concepts envisagés sont : L'ajustement du spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur pour la conversion des photons et l'utilisation de photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule.

La figure I.6 présente les meilleurs rendements obtenus par les différentes filières des cellules solaires de 1976 à 2021, ainsi que les firmes qui ont obtenu ces records.

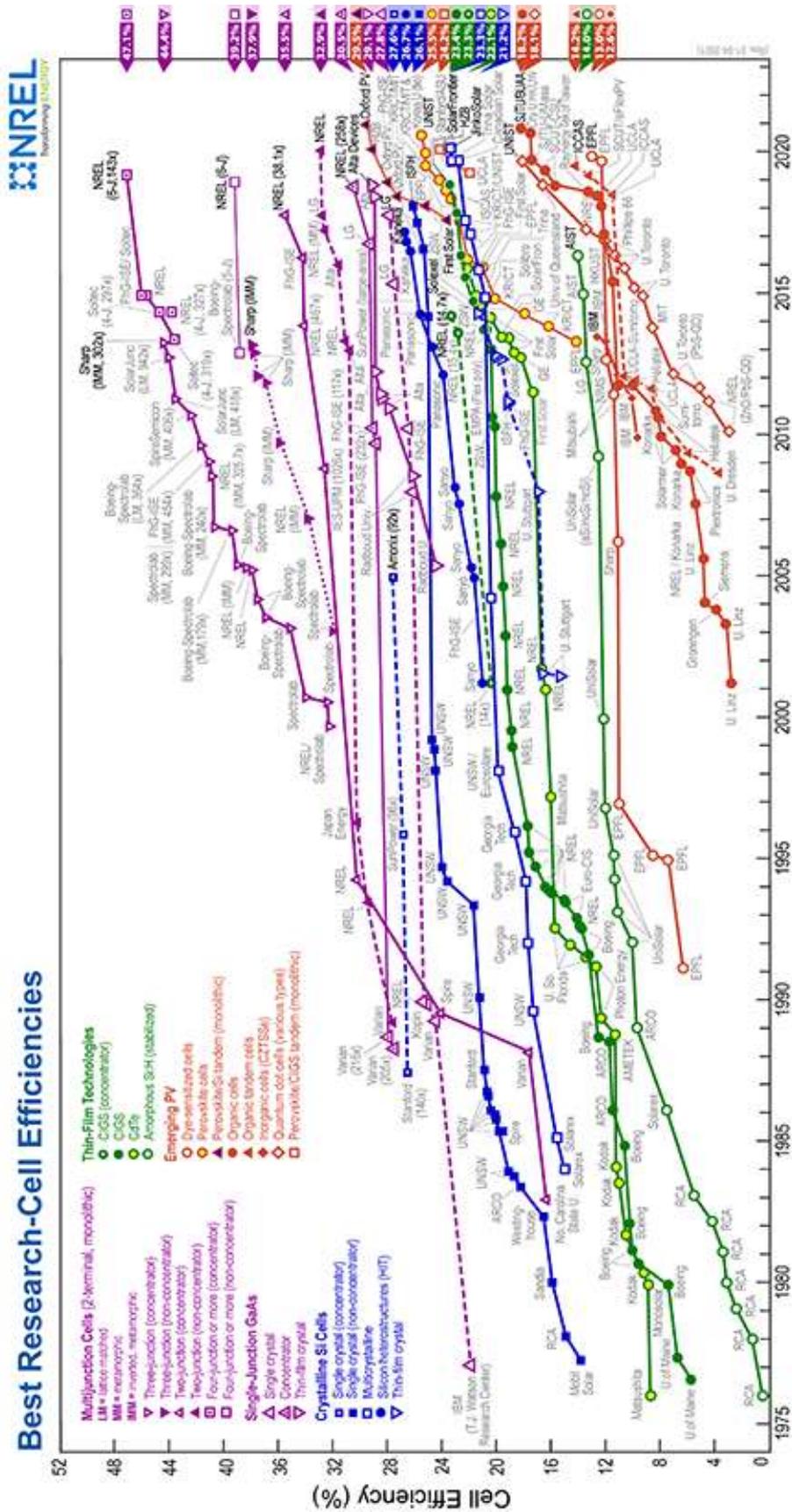


Figure I.6. Record des rendements en puissance des cellules photovoltaïques toutes filières confondues.

I.5.1 Le silicium cristallin

Le silicium est le 2^{ème} élément le plus abondant sur terre après l'oxygène. Son symbole est le Si et son numéro atomique est 14. N'existant pas à l'état libre mais sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc.) ou de silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, etc.), il est quasiment insoluble dans l'eau. Le silicium est l'élément principal utilisé pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques.

Grace à sa pureté, le silicium monocristallin présente les meilleures propriétés électroniques. Il est élaboré à partir du procédé Czochralski où par purification par la fusion de zone. Ces procédés sont réalisés à haute température. Le silicium se présente à la fin sous forme de lingots et il est découpé en wafer de 300 μm d'épaisseur. Cette étape provoque des pertes qui rendent ce matériau très coûteux.

Le silicium polycristallin (multicristallin) est fabriqué à partir des résidus provenant du silicium monocristallin. Il se présente aussi sous forme de lingot qui nécessite une étape de découpe en fine plaquette. Grace à son coût avantageux, ce matériau est le plus utilisé dans l'industrie du photovoltaïque malgré sa pureté moindre par rapport au silicium monocristallin [5].

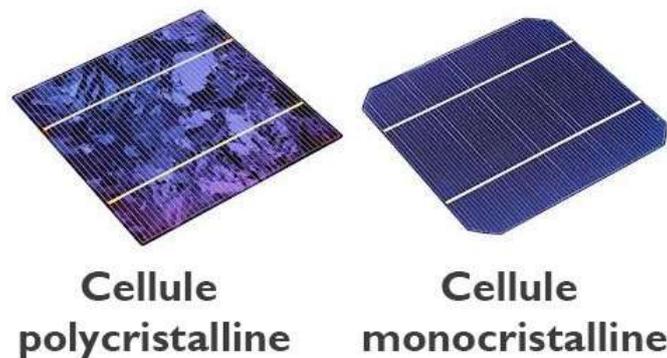


Figure I.7 Les cellules monocristalline et polycristalline.

I.5.2 Le silicium amorphe hydrogéné

Découvert vers les années soixante, le silicium amorphe (a-Si) est un matériau semiconducteur. A cause de sa grande densité de défauts, ce matériau n'était pas utilisable. Cependant, Chittik [6] et un an plus tard par Spear et LeComber [7] ont découvert vers la fin des années soixante que 99.9 % des défauts étaient saturés par de l'hydrogène ce qui rendait possible l'utilisation de ce matériau.

Grâce au silicium amorphe, plusieurs applications sont devenues possibles : les écrans plats sur les ordinateurs portables, les téléviseurs ainsi que les photopiles solaires. Une structure amorphe signifie qu'il y a un désordre à grande distance. Néanmoins, un ordre existe à courte distance. Les figure I.8 et figure I.9 représentent une structure cristalline et une structure amorphe [8].

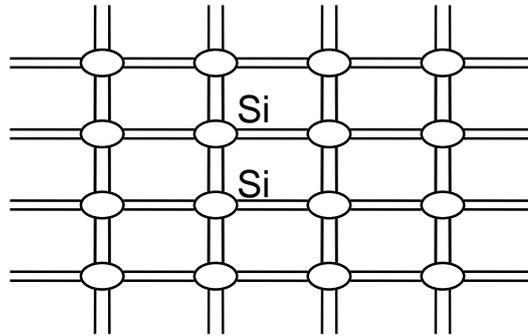


Figure I.8: Structure du silicium cristallin

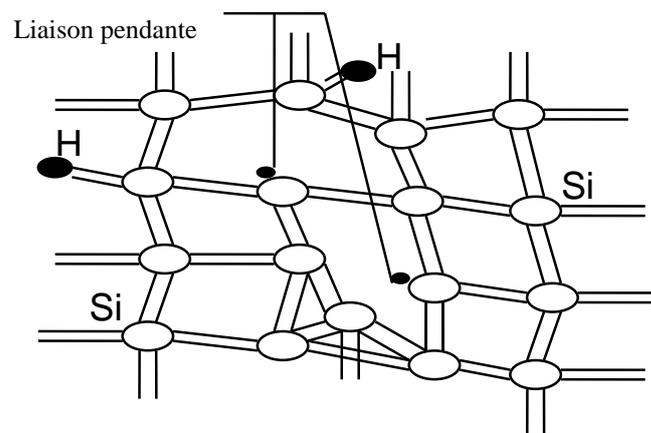


Figure I.9: Structure du silicium amorphe hydrogéné

A la différence des atomes du réseau cristallin, qui occupent une position bien définie et périodique, dans le silicium amorphe, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques, ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans le gap. Ils forment ce que l'on appelle les queues de bande. D'autre part, ces distorsions peuvent devenir suffisamment importantes pour empêcher une liaison de se former et forme ainsi des liaisons pendantes. Ces défauts profonds peuvent être modélisés par deux gaussiennes (l'une pour les défauts de caractère accepteur $D0^-$, l'autre de caractère donneur $D^{+/0}$), représentés sur la figure I.10. Ces états vont agir comme des pièges et vont avoir une influence majeure sur le rendement des cellules solaires à base de silicium amorphe.

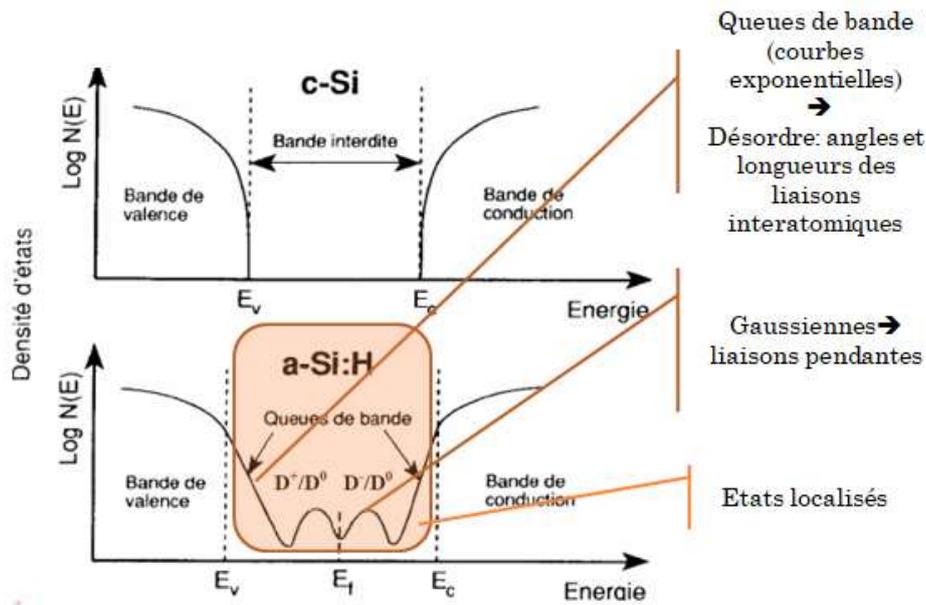


Figure I. 10. Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné.

I.5.3 Métastabilité du silicium amorphe

La métastabilité connue sous l'effet Staebler-Wronski, du nom des premiers auteurs l'ayant étudié est la création de défauts par éclaircissement intense prolongé. Ce phénomène est réversible en soumettant le matériau à un recuit à une température de l'ordre de 170°C .

I.5.4 Le silicium polymorphe hydrogéné

Ce matériau a été découvert en 1997 au Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM) à l'École Polytechnique de Paris, nommé silicium polymorphe hydrogéné ou silicium amorphe nanocristallin (pm-Si:H). De façon générale, ce matériau est un mélange de a-Si:H et de zones de particules nanocristallines d'une taille de 1 à 10 nm. Ce sont ces particules qui améliorent les propriétés optiques et électroniques par rapport au silicium amorphe. Les principaux résultats obtenus sont [8] :

- La densité d'états du polymorphe est inférieure au moins d'un facteur de 10 par rapport à l'amorphe.
- A température ambiante, le produit mobilité-durée de vie est 200 fois plus grand pour le polymorphe que pour l'amorphe.
- La section efficace de capture des électrons dans les états profonds est plus faible dans le polymorphe d'un facteur de 3 à 4 comparé à l'amorphe.
- Les propriétés électroniques sont meilleures que ce soit pour l'état vierge ou vieilli.
- La mobilité des trous est de $0.08 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour pm-Si:H, alors qu'elle est égale à $0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour a-Si:H.
- Excellente stabilité durant le vieillissement.

I.6 Rappel sur les semiconducteurs

Un semiconducteur intrinsèque dopé par des impuretés caractéristiques est un semiconducteur extrinsèque. Le dopage va permettre de changer les propriétés électriques du SC (La conductivité). Si par exemple, on introduit dans un cristal de silicium 1 atome de bore pour 10^5 atomes de silicium, on multiplie sa conductivité par 1000. Le dopage se réalise par l'introduction d'impuretés (dopants) qui vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

I.6.1 les semiconducteurs de type n

Soit le cas d'un semiconducteur de Silicium et introduisons des atomes dopants de la colonne V (phosphore P : 5 électrons périphériques). L'atome de phosphore P va remplacer un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant cinq électrons de valence, il va former quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins. Il reste donc un électron libre qui peut participer à la conduction électrique. L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n.

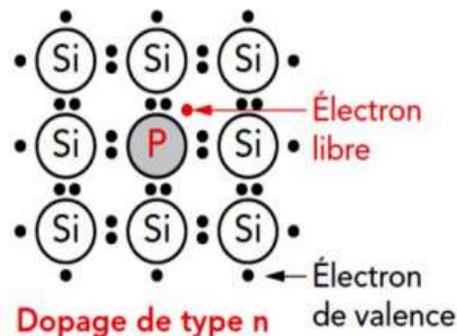


Figure I.11 : Semiconducteur dopé de type n [8].

Un semiconducteur dopé n a une densité d'électrons n plus élevée que celle des trous p . On dit que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous sont les porteurs minoritaires. Dans ce cas, $N_D \gg n_i$. Avec n_i la concentration intrinsèque des électrons.

La densité des électrons est donc proche de celle de la densité des donneurs N_D .

$$n = N_D \text{ et } p = n_i^2 / N_D$$

Le niveau de Fermi pour un semiconducteur type n est :

$$E_{FN} = E_c + K.T.Ln(N_D/N_c) \quad (\text{I.1})$$

N_c et la densité d'état effective dans la bande de conduction.

Plus la densité de donneurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. A la limite si $N_D = N_c$ le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.

I.6.2 les semiconducteurs de type p

Soit le cas d'un semiconducteur Silicium et introduisons des atomes dopants de la colonne III (le bore B, 3 électrons périphériques). Un atome dopant comme le bore B possédant trois électrons de valence, va conduire à un déficit d'électron dans le réseau appelé trou. L'atome de bore étant accepteur d'électron, on parle de dopage de type p.

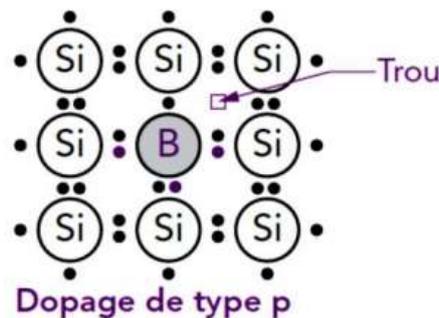


Figure I.12 : Semiconducteur dopé de type p [8].

Un semiconducteur dopé p a une densité de trous p plus élevée et une densité de d'électrons n plus faible. On dit que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous sont les porteurs majoritaires.

Dans ce cas, $N_A \gg n_i$. La densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur N_A .

$$p = N_A \text{ et } n = n_i^2 / N_A$$

Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type p:

$$E_{FP} = E_v - K.T.Ln(N_A/N_v) \quad (\text{I.2})$$

N_v et la densité d'état effective dans la bande de valence.

Plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence. A la limite si $N_A=N_v$ le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.

I.7 La jonction p-n

L'équilibre thermodynamique est défini par une température constante et aucune excitation n'est appliquée depuis l'extérieur (ni électrique, ni optique, ni mécanique ou chimique).

Une jonction p-n représente la mise en contact d'une surface de cristal de semiconducteur dopé p avec une surface de cristal de semiconducteur dopé n.

Dans le cas d'une homojonction, le semiconducteur de type p est constitué du même matériau que le semiconducteur de type n (Si, Ge...). Dans le cas contraire on parle d'hétérojonction. Les jonctions sont à la base des diodes de redressement classique, des diodes électroluminescentes LED, les diodes laser, les photodiodes, les photopiles, les transistors...etc.

I.7.1 Structure et comportement d'une jonction p-n a l'équilibre

Soient deux semiconducteurs de même bande interdite E_g de type n et p. Tant que les deux semiconducteurs sont isolés l'un de l'autre, chacun est électriquement neutre figure I.13.

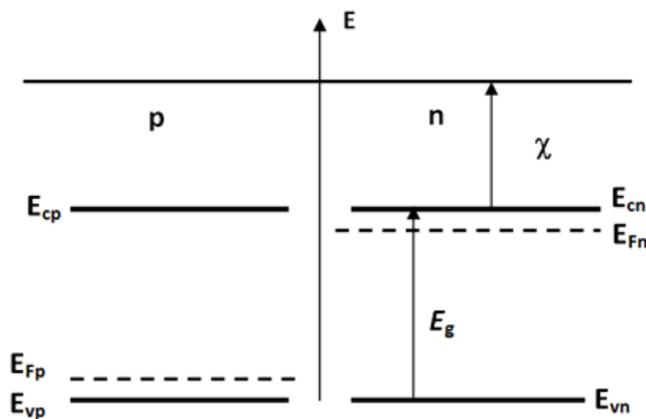


Figure I.13 : Deux semiconducteurs dopés de type n et p [8].

Lorsque le contact est établi on obtient une jonction p-n. Ce contact n'est pas une simple juxtaposition du cristal de type n avec un cristal de type p. En pratique, le contact doit être à une échelle atomique, soit une continuité du cristal de part et d'autre de la surface de la jonction.

Une fois la jonction p-n réalisée, un gradient de concentration en électrons et en trous apparaît de part et d'autre de la surface de contact. Il y aura une diffusion des porteurs de charge libres (électrons et trous) du côté où ils sont majoritaires vers celui où ils sont minoritaires. Les électrons de n vers p et les trous de p vers n. cette diffusion va engendrer la création d'un champ E et d'une barrière de potentiel définie par la relation :

$$E = - \frac{dV}{dx} \tag{I.3}$$

Cette barrière de potentiel et le champ électrique associé s'opposent à la diffusion des porteurs majoritaires d'une région à l'autre. Le champ électrique E (champ de diffusion) est dirigé du côté n vers le côté p et le potentiel correspondant est appelé potentiel de diffusion (barrière de potentiel) V_b . En dehors de la ZCE, le semi-conducteur reste électriquement neutre [9].

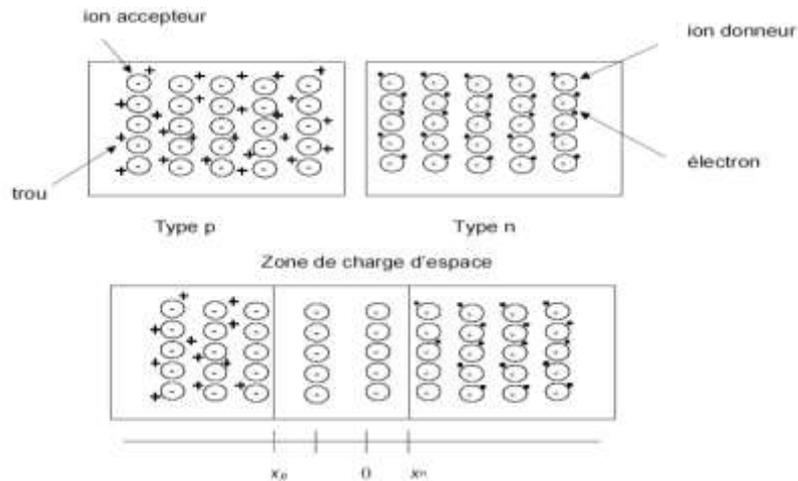


Figure I.14 : Présentation schématique de la zone de charge d'espace à l'intérieur de la jonction p-n.

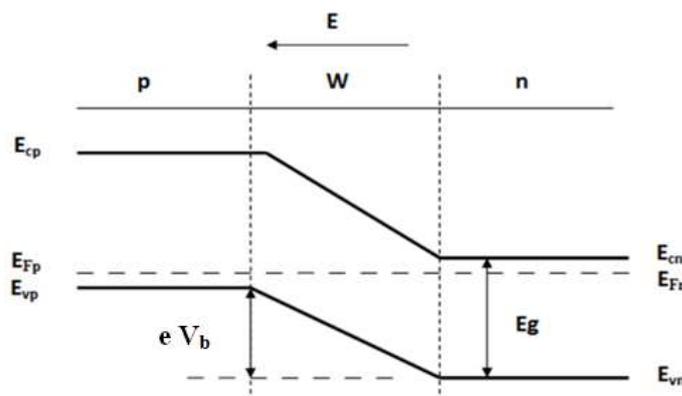


Figure I.15 Formation d'une jonction p-n [8].

I.7.2 Les caractéristiques d'une jonction : La densité volumique des charges, le champ électrique interne, le potentiel de diffusion, la zone de charge d'espace.

Pour déterminer, les caractéristiques d'une jonction, nous utilisons pour cela l'hypothèse de SCHOCKLEY qui stipule qu'il n'y a pas de charges mobiles dans la Zone de Charge d'Espace s'étend [9] :

- De $-x_p$ à 0 du côté "p"
- De 0 à x_n du côté "n"
- $W = x_p + x_n$: épaisseur de la ZCE

A $x = -x_p$, le semiconducteur passe de l'état neutre où tous les majoritaires présents à l'état déserté où tous les majoritaires absents. A $x = x_n$, le semiconducteur passe brutalement de l'état déserté où tous les majoritaires absents à l'état neutre où tous les majoritaires présents.

1- La densité volumique des charges :

- $\rho(x)=0$ pour $x < -x_p$ et $x > x_n$
- $\rho(x)= -e N_A$ pour $-x_p < x < 0$
- $\rho(x)= e N_D$ pour $0 < x < x_n$

2- Le champ électrique interne : Du coté n ($0 < x < x_n$), l'Équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{dE_n(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} = \frac{eN_D}{\varepsilon} \quad (\text{I.4})$$

Où ρ est la densité de charge ionique et ε permittivité du semiconducteur.

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_n(x_n)=0$, on trouve :

$$E_n = \frac{eN_D(x-x_n)}{\varepsilon} \quad (\text{I.5})$$

Du coté p ($-x_p < x < 0$), l'Équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{dE_p(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} = -\frac{eN_A}{\varepsilon} \quad (\text{I.6})$$

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_p(-x_p) = 0$ on trouve :

$$E_p = \frac{-eN_A(x+x_p)}{\varepsilon} \quad (\text{I.7})$$

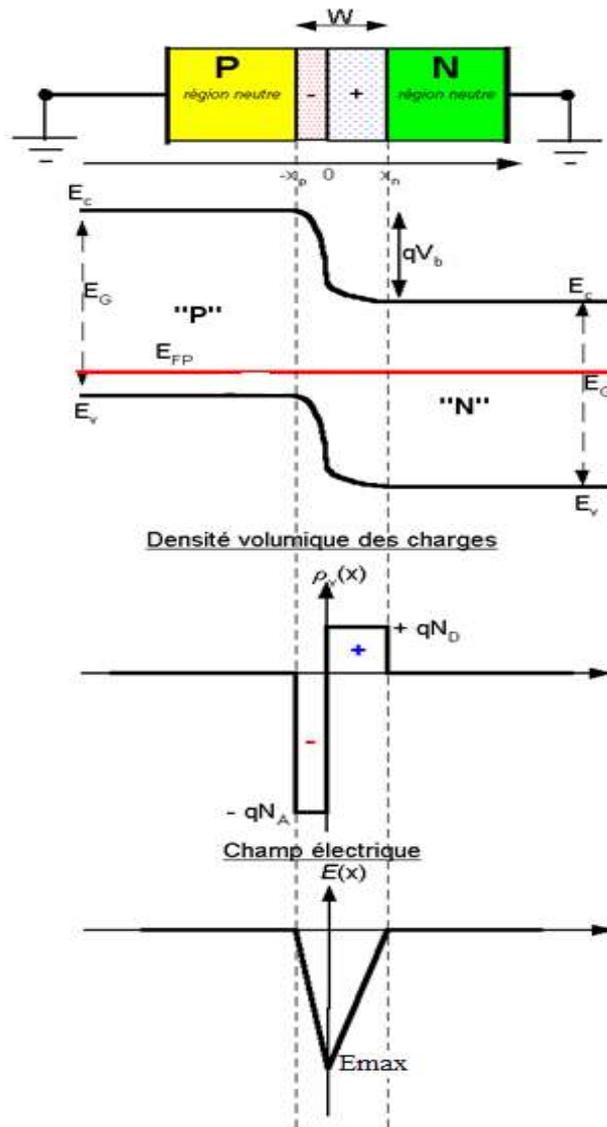


Figure I.16 Jonction p-n à l'équilibre thermodynamique : zone de charge d'espace, densité volumique de charge, Champ électrique interne [9].

Au niveau de la jonction métallurgique, à $x = 0$, $E_p(0) = E_n(0)$. Le champ électrique est une grandeur continue (figure I.15) :

$$E_p(0) = E_n(0) = \frac{-eN_A x_p}{\epsilon} = \frac{-eN_D x_n}{\epsilon} = E_{\max} \tag{I.8}$$

$$N_D x_n = N_A x_p \tag{I.9}$$

3- Le potentiel de diffusion V_b

La hauteur de la barrière de potentiel qui s'oppose au courant majoritaire est déduite de la figure I.15:

$$qV_b = E_{cp} - E_{cn} = E_{vp} - E_{vn} \quad (\text{I.10})$$

$$n_p = N_c \exp \left[\frac{-(E_{cp} - E_F)}{KT} \right] \quad (\text{I.11})$$

$$n_n = N_c \exp \left[\frac{-(E_{cn} - E_F)}{KT} \right] \quad (\text{I.12})$$

$$\frac{n_p}{N_c} = e^{-\frac{(E_{cp} - E_F)}{KT}} \quad (\text{I.13})$$

$$\frac{E_{cp} - E_F}{KT} = \ln \frac{N_c}{n_p} \quad (\text{I.14})$$

$$E_{cp} = KT \ln \left(\frac{N_c}{n_p} \right) + E_F \quad (\text{I.15})$$

De la même manière nous obtenons:

$$E_{cn} = KT \ln \left(\frac{N_c}{n_n} \right) + E_F \quad (\text{I.16})$$

$$qV_b = KT \ln \left(\frac{N_c}{n_p} \right) + E_F - KT \ln \left(\frac{N_c}{n_n} \right) - E_F \quad (\text{I.17})$$

$$qV_b = KT \left[\ln \left(\frac{N_c}{n_p} \right) - \ln \left(\frac{N_c}{n_n} \right) \right] \quad (\text{I.18})$$

$$qV_b = KT \ln \left(\frac{N_c}{n_p} \cdot \frac{n_n}{N_c} \right) \quad (\text{I.19})$$

$$qV_b = KT \ln \left(\frac{n_n}{n_p} \right) \quad (\text{I.20})$$

On a: $n_n = N_D$ et $n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$

La tension de diffusion est donc égale à :

$$V_b = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (I.21)$$

n_i : Densité intrinsèque de porteurs.

k : Constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$).

q : Charge élémentaire $1,6.10^{-19}C$.

T : Température en Kelvin.

N_D : Densité d'impuretés de type donneur (cm^{-3}).

N_A : Densité d'impuretés de type accepteur (cm^{-3}).

E_{cn} : Le bas d'énergie de la bande de conduction pour les électrons.

E_{vp} : Le maximum d'énergie de la bande de valence pour les trous.

E_F : L'énergie de Fermi.

n_n : La concentration des électrons dans la région n dans le cas d'équilibre thermodynamique.

p_p : La concentration des trous dans la région p dans le cas d'équilibre thermodynamique.

4- La zone de Charge d'Espace

A $x = 0$ (la surface de séparation entre les semiconducteurs de type n et p), nous avons d'après l'équation (I.8) une continuité du champ et du potentiel électrique:

$$E = \frac{-e N_A}{\epsilon \epsilon_0} x_p = \frac{-e N_D}{\epsilon \epsilon_0} x_n = E_{max} \quad (I.22)$$

$$x_n = |E_{max}| \frac{\epsilon \epsilon_0}{e N_D} \quad (I.23)$$

$$x_p = |E_{max}| \frac{\epsilon \epsilon_0}{e N_A} \quad (I.24)$$

$$\text{Sachant que [8] : } |E_{max}| = \frac{2V_d}{W} \quad (I.25)$$

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

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_0}{e} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] V_d} \quad (I.26)$$

I.8 Schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure I.17. Ce schéma comprend un générateur de courant photo-généré I_{ph} , des résistances série R_s et shunt R_p ainsi qu'une diode (la jonction) [10].

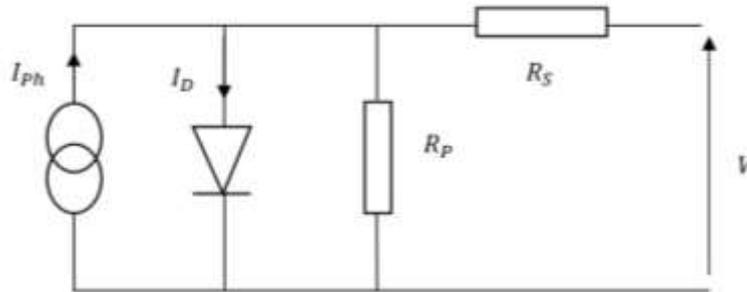


Figure I.17: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

R_s représente la résistance série. Elle est attribuée aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours au niveau des différentes couches de la cellule (couches et contacts). Cette résistance doit être la plus faible possible.

R_p représente la résistance shunt qui prend en compte les fuites de courant qui interviennent entre les bornes opposées d'une photopile. Cette résistance doit être la plus grande possible.

Une cellule solaire est un générateur d'énergie. Lorsqu'elle est éclairée, le courant circulant dans une charge s'écrit [10] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right\} - 1 \right] - \frac{q(V + IR_s)}{R_p} \quad (I.27)$$

V est la polarisation extérieure, appliquée à la diode.

I_{ph} : Le courant généré par absorption de photons.

I_s : Le courant de saturation de la diode.

n : Le facteur d'idéalité de la diode.

K : La constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J.k⁻¹.

T : La température absolue.

q : La charge élémentaire.

I.9 La caractéristique courant tension

La figure I.18 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une cellule sous un éclairement AM 1.5. [11] :

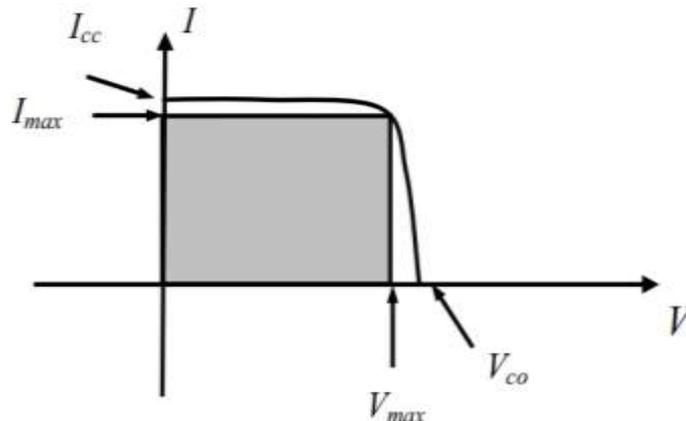


Figure I.18 : la caractéristique courant-tension $I(V)$

Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) est le rendement η .

I.9.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul ($V = 0$). C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

I.9.2 Tension de circuit ouvert (V_{oc})

La tension de circuit ouvert V_{oc} est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est connectée à aucune charge ou connectée à une charge de résistance infinie ($I = 0$). Le V_{oc} est donné par la relation :

$$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1\right) \quad (I.28)$$

Le Voc dépend du type de cellule solaire (homojonction, hétérojonction), des matériaux des différentes couches qui composent la cellule, de la nature des contacts de la couche active-électrode et de l'éclairement de la cellule.

I.9.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme ou le facteur de remplissage ou Fill Factor FF(%) est utilisé pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule (P_{max}) et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$ (figure I.15). Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{cc}} = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (I.29)$$

Le FF traduit les pertes provoquées par les résistances série R_s et parallèle R_p de la cellule [12]. Dans le cas limite $FF=1$, la puissance extraite de la cellule est maximale [13].

I.9.4 Le rendement (η)

Le rendement η (%) des cellules solaires indique le rendement de conversion en puissance. C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{V_m * I_m}{P_{inc}} + \frac{FF * V_{oc} * I_{cc}}{P_{inc}} \quad (I.30)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [1].

I.10 La réponse spectrale (R_s)

La réponse spectrale externe (ou rendement quantique) est le rapport entre le nombre de paires électrons-trous photo générées collectées par les contacts et le nombre de photons incidents pour une longueur d'onde donnée.

$$R_{s_{ext}} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{qN(\lambda)} \quad (I.31)$$

La réponse spectrale interne est le nombre de paires électrons-trous collectés divisé par le nombre de photons absorbés.

$$R_{s_{\text{int}}} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{qN(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (\text{I.32})$$

$J_{ph}(\lambda)$: La densité de courant fournie sous éclairage pour la longueur d'onde λ .

$N(\lambda)$: Le nombre des photons incidents.

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface d'une cellule solaire [8].

I.11 Conclusion

Nous avons présenté dans le premier chapitre de notre thèse, des notions fondamentales sur le solaire photovoltaïque, le potentiel solaire, le cadre réglementaire des énergies renouvelables ainsi que les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie. Nous avons par la suite défini le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque, la structure et le comportement d'une jonction p-n à l'équilibre) ainsi que les différents matériaux utilisés. La suite de ce chapitre a été dédiée la présentation du modèle électrique équivalent à une cellule photovoltaïque, les caractéristiques courant-tension et les paramètres photovoltaïques qui sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF), le rendement en puissance (η) ainsi qu'à la réponse spectrale interne et externe.

Références

- [1] A. LABOURET, M. VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [2] R. RADBEH, "Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones". Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [3] A. HAMED, "Contribution à l'étude de l'impact des paramètres météorologiques sur les performances des centrales solaires dans les régions Sahariennes". Mémoire de master. USTO-MB. 2019.
- [4] D. REAUX, "Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface". Science des matériaux. Université Paris-Saclay, 2017.
- [5] S. ZABARDJADE, "Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe". Thèse de Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2012
- [6] R.C.CHITTIK, J. H. ALEXANDER, H. F. STERLING, J. Electrochem. Soc, 116, (1969) 77
- [7] W.E. SPEAR, P. G. LECOMBER, Solid State Commun. 17, 1193 (1975)
- [8] D.RACHED, "Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe". Thèse de Doctorat. USTO, 2010

- [9] A.BEDAHOU, "Etude des énergies caractéristiques dans une photopile". Mémoire de master. USTO-MB. 2019. (Juin 2018).
- [10] A.BELFAR, "Modélisation et optimisations de deux cellules solaires n-i-p et n-i-p'-p à base de silicium amorphe (a-Si : H) et silicium nanocristallin (n-c-Si :H)", Thèse de Doctorat. USTOMB, 2013.
- [11] D.RÉAUX, "Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface", Thèse de doctorat, université paris-saclay paris-sud, 2017.
- [12] Y.VESCHETTI. "Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïque sue substrat de silicium mince". Thèse de Doctorat Louis Pasteur Strasbourg, 2005
- [13] S.GUITOUNI, "Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des Applications Photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri–constantine1, 2017.

CHAPITRE II
Cellules à Hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si)

II.1 Introduction

Les cellules solaires à hétérojonctions de silicium (HIT) sont basées sur un substrat de silicium cristallin (c-Si) dopé n ou p, une couche très fine de passivation en général du silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H), et une couche de quelque nanomètres de silicium amorphe dopé p (n). La technologie des hétérojonctions de silicium a été introduite par l'entreprise japonaise Sanyo dès les années 90, et a permis d'atteindre après plusieurs années de recherche des rendements record en cellule et en module. Ces cellules atteignent aujourd'hui des rendements de l'ordre de 26% (record de 26,6% par l'entreprise Kaneka en 2017). Les premières cellules ont été réalisées sur des structures avec un émetteur en silicium amorphe mais sans BSF. Le rendement était de l'ordre de 18% [1].

D'autres structures ont été développées dans lesquelles le a-Si:H est déposé sur la face arrière du substrat, créant ainsi deux hétérojonctions (double hétérojonction). Les rendements se sont considérablement améliorés dans le but d'atteindre un rendement de conversion maximal théorique de Shockley-Queisser [2] et qui est de l'ordre de 33%.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons en premier lieu donner des notions relatives aux cellules solaires à hétérojonctions HIT (a-Si:H/c-Si). Nous allons ensuite donner quelques avantages de ce type de cellule solaire ainsi que les différentes hétérojonctions pour le photovoltaïque. Une description assez détaillée du modèle utilisé pour la simulation des cellules solaires ainsi que du modèle d'Anderson sera également abordée dans ce chapitre. Enfin, nous terminerons par exposer les différents logiciels de simulation utilisés pour étudier les photopiles.

II.2 Heterojonction HIT (Heterojunction with Interinsic Thin layer)

II.2.1 Définition

Une jonction entre deux matériaux de gap différents est dite hétérojonction. Si les deux matériaux sont des semi-conducteurs, il s'agit d'une hétérojonction à semi-conducteurs. La figure II.1 illustre le diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction n-p à l'équilibre thermodynamique.

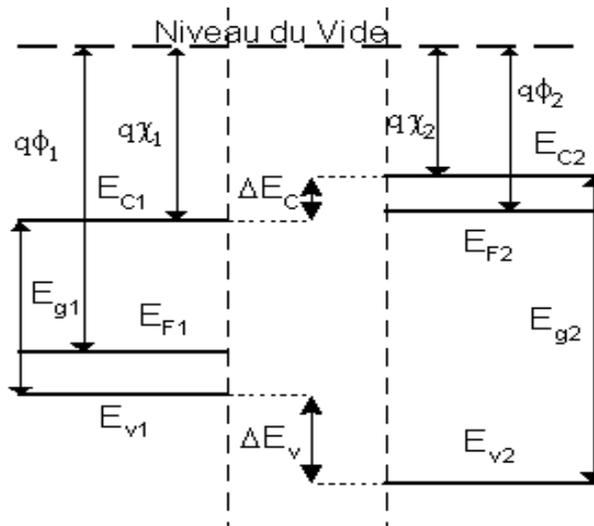


Figure II.1 : Deux semiconducteurs de type n p et n avant formation d’une hétérojonction.

Lorsque les deux semiconducteurs sont mis en contact, les porteurs diffusent d’une région à l’autre de la jonction. A l’équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi est le même le long de toute la cellule. Les photons ayant une énergie inférieure à E_{g2} et supérieure à E_{g1} traversent le premier semi-conducteur et sont absorbés par le second [3]. Les discontinuités de bandes ΔE_c et ΔE_v d’après la figure (II.1) :

$$\Delta E_c = e(\chi_2 - \chi_1) \tag{II.1}$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - e(\chi_2 - \chi_1) \tag{II.2}$$

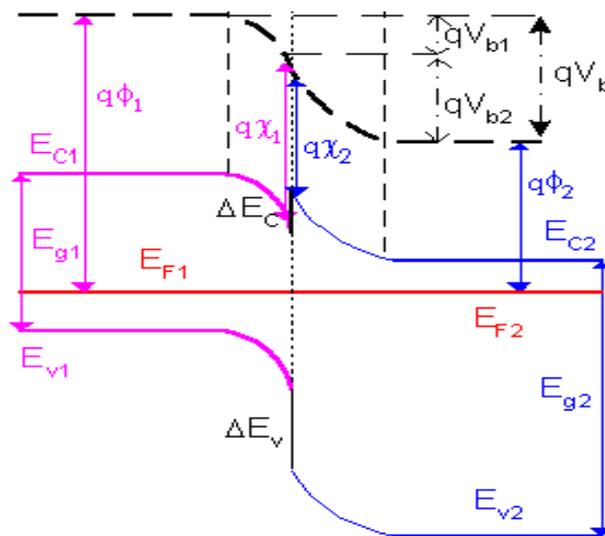


Figure II.2 : Deux semiconducteurs de type n p et n après formation d’une hétérojonction.

II.2.2 Structure des cellules solaires à hétérojonctions de silicium

Les cellules solaires à hétérojonctions de silicium sont constituées de substrat de silicium cristallin c-Si d'une épaisseur de quelques centaines de microns jouant le rôle d'absorbeur. Il est possible de réaliser des cellules HIT sur substrat de type p ou de type n.

La figure II.3 représente les différentes couches de matériaux d'une structure standard d'une cellule HIT.

La première couche est constituée d'ITO. Cette couche est transparente. Son rôle est d'améliorer l'absorption des photons dans la cellule. Son épaisseur est de l'ordre d'une centaine de nanomètre.

La deuxième couche constitue l'émetteur de cellule solaire. Elle est à base de silicium amorphe hydrogéné de type p ou n. Son épaisseur est de l'ordre de quelque nanomètre.

La troisième couche est la couche de passivation. Elle est en général constituée de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque. Son épaisseur est de l'ordre de l'angström.

La dernière couche représente la cathode de la cellule, elle est en aluminium et son épaisseur est d'une centaine de nanomètre.

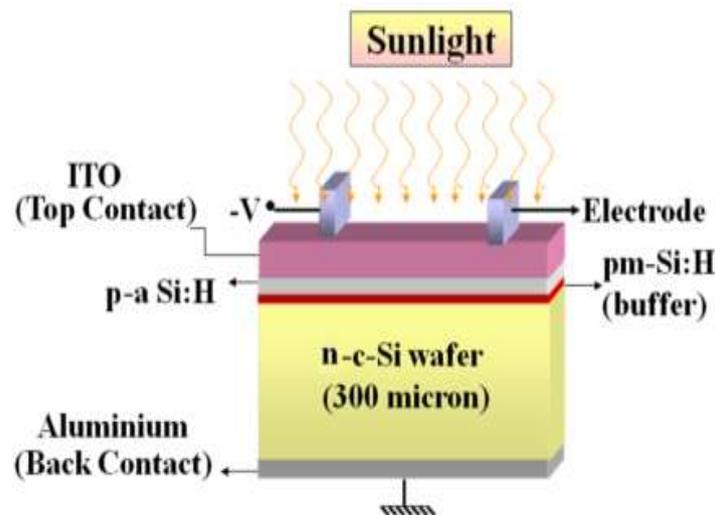


Figure II.3 : Schéma d'une cellule à hétérojonction p-a-Si:H/n-c-Si

II.2.3 Les avantages des cellules HIT

Le dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si:H sur du silicium cristallin c-Si présente un très grand avantage lors de la fabrication d'une cellule solaire HIT, car il se déroule à basse température (moins de 250 C°) ce qui réduit le risque de dégradation du silicium cristallin impliquant ainsi de très bons rendements.

La réduction de l'énergie nécessaire pour la fabrication d'une telle cellule présente un second avantage car cela réduit le coût de fabrication de la cellule. En conditions réelles, la température de fonctionnement est généralement supérieure à la température de caractérisation des cellules de 25°C (conditions STC).

Les cellules HIT voient leur performance diminuer moins rapidement avec la température que les cellules à homojonctions ou les cellules en couches minces [4].

Le procédé de fabrication est relativement simple. Il ne nécessite pas un nombre important d'étapes et exige moins de temps que le procédé standard, L'effet Staebler-Wronski portant sur l'instabilité du silicium amorphe dopé n'est pas observé pour les cellules HIT [5].

II.3 Les différentes hétérojonctions pour le photovoltaïque

Différentes combinaisons de matériaux sont possibles pour former des hétérojonctions adaptées à l'application photovoltaïque. La filière photovoltaïque en silicium domine actuellement le marché avec plus de 90% des cellules vendues (silicium cristallin et multicristallin) [6]. Le développement de cette filière ne présente aucun risque de problème de disponibilité de cette ressource puisque le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène.

La figure II.4 donne les performances de quelques filières en silicium cristallin.

Le rendement de conversion maximal théorique de Shockley-Queisser [2] est de l'ordre de 33% dans le cas d'une cellule à une seule jonction avec l'énergie de bande interdite $EG = 1.12$ eV du silicium cristallin. Le modèle de calcul peut-être amélioré en tenant compte de l'épaisseur et des recombinaisons intrinsèques des matériaux. La limite développée donne un rendement de 29% pour un substrat de 90 μm [7].

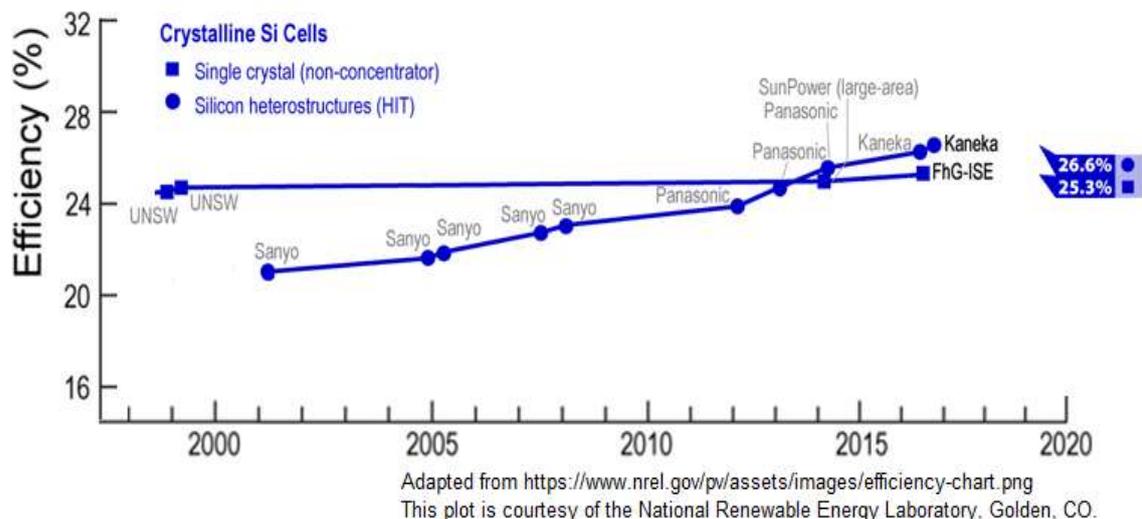


Figure II.4 Le rendement des HIT selon le NREL.

La recherche sur des structures avancées de cellules photovoltaïques au silicium est en plein essor afin d'atteindre les 33% théorique. Ces recherches ont permis de déboucher sur les cellules PERL, les cellules TOPCon, Structures à contacts interdigités en face arrière...etc.

II.3.1 Cellule standard optimisée : PERL

La structure PERL (Passivated Emitter, Rear Locally diffused cell) [8] est une cellule solaire qui présente une face avant texturée en pyramides inversées. Les grilles de contact ont une surface réduite ce qui offre l'avantage de diminuer l'ombrage formé par ces grilles et donc améliorer la transmission de la lumière dans la cellule [4].

La structure *PERL* représentée sur la figure II.5, détient le record mondial par l'université australienne University of New South Wales avec un rendement de 26.6%.

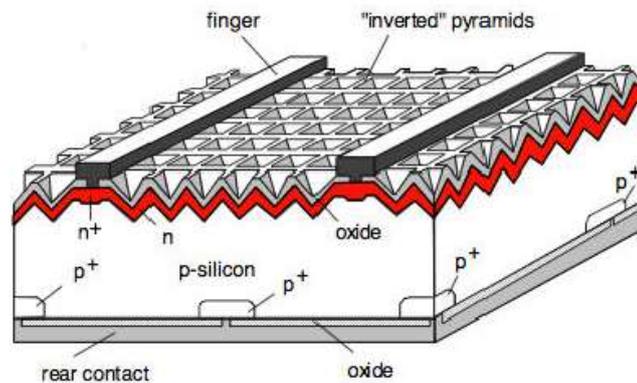


Figure II.5 – Structure PERL (Passivated Emitter, Rear Locally diffused cell):
Cellule solaire silicium à haut rendement [9]

II.3.2 Technologie TOPCon

Des chercheurs de l'institut allemand Fraunhofer ISE à Fribourg (Allemagne) ont atteint un rendement de conversion de 25,1% avec des cellules réalisées en utilisant la technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact (2015)) [10]. Dans cette technologie, la face arrière des cellules solaires est constituée d'un contact sans structuration. Ce contact est passivé et sélectif : il laisse passer les porteurs majoritaires sans que les porteurs minoritaires ne se recombinent. La couche de passivation recouvrant l'ensemble de la cellule est très fortement réduite (de 1 à 2 nm) de manière à laisser passer les porteurs par effet tunnel. Le BSF est créé par une fine couche de silicium fortement dopé [4].

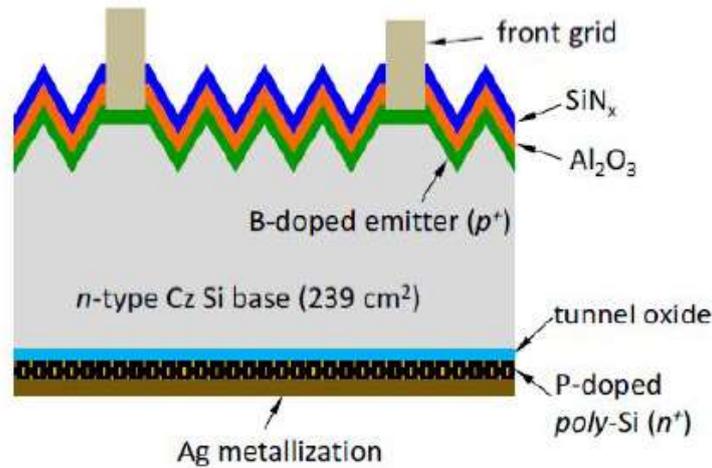


Figure II.6 Structure TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) :
Cellule utilisée par l'institut Fraunhofer ISE [10]

II.3.3 Structures à contacts interdigités en face arrière

Présentée pour la première fois en 1975 [11], l'architecture à contacts arrières interdigités *IBC* (Interdigitated Back Contact), est utilisée pour obtenir de hauts rendements. La cellule *IBC* représenté sur la figure II.7 présente un émetteur et un BSF localisés sur la face arrière de manière alternée. Cette technique permet d'éviter les ombrages liés aux contacts et métallisations sur la face avant et d'augmenter l'absorption. Un rendement de 25.2% a été atteint par l'entreprise SunPower [4] qui fabrique des cellules avec une architecture *IBC* et qui commercialise les modules associés.

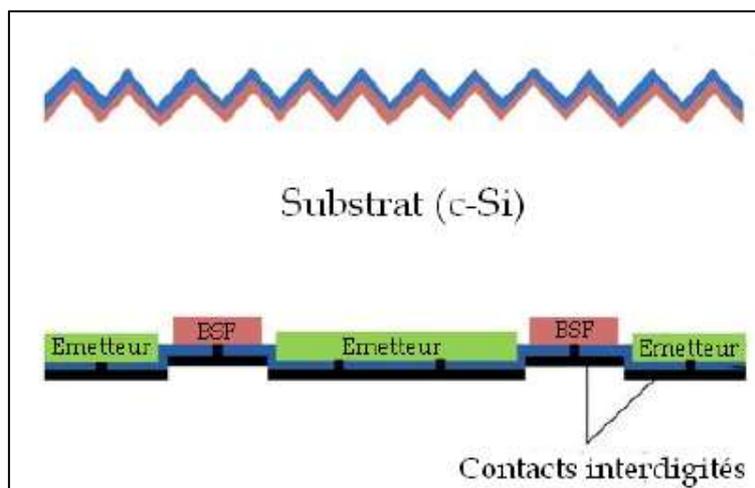


Figure II.7 Schéma d'une cellule *IBC* à contacts arrières interdigités

II.4 Description du modèle de Simulation

Afin de simuler la caractéristique courant-tension $J = f(V)$, le potentiel, le champ électrique au niveau des jonctions, le transport des porteurs de charges et les recombinaisons dans nos cellules solaires à base d'hétérojonctions (HIT), nous avons utilisé le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program).

ASDMP se compose d'un modèle applicable pour simuler des dispositifs à plusieurs couches où les propriétés sont différentes. Les couches peuvent être du silicium cristallin, amorphe, microcristallin...etc.

Pour éviter des expériences longues et coûteuses, le modèle analyse les densités de défauts et leur impact sur le fonctionnement global de ces dispositifs.

Ce logiciel a été développé par le Professeur Parsathi Chatterjee [12,13] et validé expérimentalement par l'équipe de recherche du professeur ROCA à l'Ecole Polytechnique de Paris, France [14]. En plus du modèle électrique, le modèle optique [15] tient compte des effets des réflexions et transmissions aux interfaces.

La partie électrique du modèle, résout simultanément l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et de trous qui sont résolues simultanément dans des conditions d'état d'équilibre et hors équilibre thermodynamique. Ces équations sont [16]:

$$\text{L'équation de Poisson :} \quad \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Le champ électrique :} \quad E = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{L'équation de continuité des trous :} \quad G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{L'équation de continuité des électrons :} \quad G(x) - R(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.6})$$

$$\text{La densité de charge effective :} \quad \rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (\text{II.7})$$

Toutes les équations et les approximations en été prises de la littérature [5,16].

Symboles	Désignation
$\psi(x)$	Le potentiel électrostatique.
$\rho(x)$	La densité de charge effective.
x	La position dans le dispositif.
ε	La constante diélectrique.
E	Le champ électrique.
p	La densité des trous dans la bande de valence par unité de volume.
n	La densité des électrons dans la bande de conduction par unité de volume.
q	La charge électronique.
R	Le taux de recombinaison.
p_T	La densité des trous piégés par unité de volume dans les états localisés continus dans le gap.
n_T	La densité des électrons piégés par unité de volume dans les états localisés continus dans le gap.
N_{net}^+	La densité de dopage effective.
G	Le taux de génération de paires électron-trou.
J_p	La densité du courant des trous.
J_n	La densité du courant des électrons.

Tableau II.1 : Les symboles est leurs désignations des grandeurs intervenant dans l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et de trous.

Les équations (II.8-11) représentent les conditions aux frontières sur les densités de courant à l'interface $x=0$ (TCO/p ou TCO/n) et $x=L$ (n/metal ou p/métal).

S_{no} , S_{p0} , S_{nL} et S_{nL} sont les vitesses de recombinaison de surface pour les électrons et les trous à ces interfaces.

$n(0)$ et $p(0)$ représentent les densités des électrons et des trous à $x = 0$.

$n(L)$ et $p(L)$ représentent les densités des électrons et des trous à $x = L$.

A l'équilibre thermodynamique à $x=0$ et $x=L$, $n_0(0)$, $p_0(0)$ et $n_0(L)$, $p_0(L)$ représentent respectivement les densités des électrons et des trous.

$$J_n(0) = qS_{n0} [n(0) - n_0(0)] \quad (\text{II.8})$$

$$J_p(0) = qS_{p0} [p(0) - p_0(0)] \quad (\text{II.9})$$

$$J_n(L) = qS_{nL} [n(L) - n_0(L)] \quad (\text{II.10})$$

$$J_p(L) = qS_{pL} [p(L) - p_0(L)] \quad (\text{II.11})$$

II.4.1 Calcul de la densité de charge effective

L'équation (II.7) représente la densité de charge effective $\rho(x)$. Le modèle inclut la présence des défauts ou d'impuretés comme le dopage et les états localisés continus dans le gap (les queues de bande) et les liaisons pendantes [5].

a- Les expressions des densités des électrons et des trous:

Dans le modèle, à l'équilibre thermodynamique, les densités des trous et des électrons libres sont données par :

$$n_0(x) = N_c(x) \exp\left[-\frac{\{E_c(x) - E_{F_0}\}}{kT}\right] \quad (\text{II.12})$$

$$p_0(x) = N_v(x) \exp\left[-\frac{\{E_{F_0} - E_v(x)\}}{kT}\right] \quad (\text{II.13})$$

N_c représente la densité d'état effective des électrons dans la bande de conduction.

N_v représente la densité d'état effective des trous dans la bande de valence.

Hors équilibre thermodynamique, les expressions des densités des trous et des électrons dans la bande de valence et de conduction p et n sont données par:

$$n(x) = N_c(x) \exp\left[-\frac{\{E_c(x) - E_{F_n}(x)\}}{kT}\right] \quad (\text{II.14})$$

$$p(x) = N_v(x) \exp\left[-\frac{\{E_{F_p}(x) - E_v(x)\}}{kT}\right] \quad (\text{II.15})$$

b- La densité de dopage effective :

La densité de dopage effective due à une introduction intentionnelle d'impuretés (dopage) ou involontaire (contamination) est exprimé par :

$$N_{net}^+ = N_D^+ - N_A^- \quad (\text{II.16})$$

$N_D^+ = N_D$ Représente la concentration des donneurs ionisés.

$N_A^- = N_A$ Représente la concentration des accepteurs ionisés.

c- Les états localisés continus dans le gap [16]:

$n_T(x)$ de l'équation (II.7) représente les états accepteurs dans le gap par unité de volume représentés par convention (D^{+0}). Ces états sont concentrés dans la moitié supérieure du gap des matériaux amorphes. Ces états gagnent (piègent) des électrons de la bande de conduction. n_T et donc le nombre d'électrons piégés par unité de volume.

$p_T(x)$ représente les états donneurs dans le gap par unité de volume représentés par (D^{+0}). Ces états sont concentrés dans la moitié inférieure du gap des matériaux amorphes. Ces états perdent leurs électrons dans la bande de valence. p_T est donc le nombre de trous piégés par unité de volume.

La distribution de ces états localisés ($n_T(x), p_T(x)$) dans le gap dans les semiconducteurs amorphes proviennent des queues de bande représentées par des courbes exponentielles (Modèle en U) et des défauts ou liaisons pendantes représentées par des Gaussiennes (Modèle en deux gaussiennes) (figure II.8).

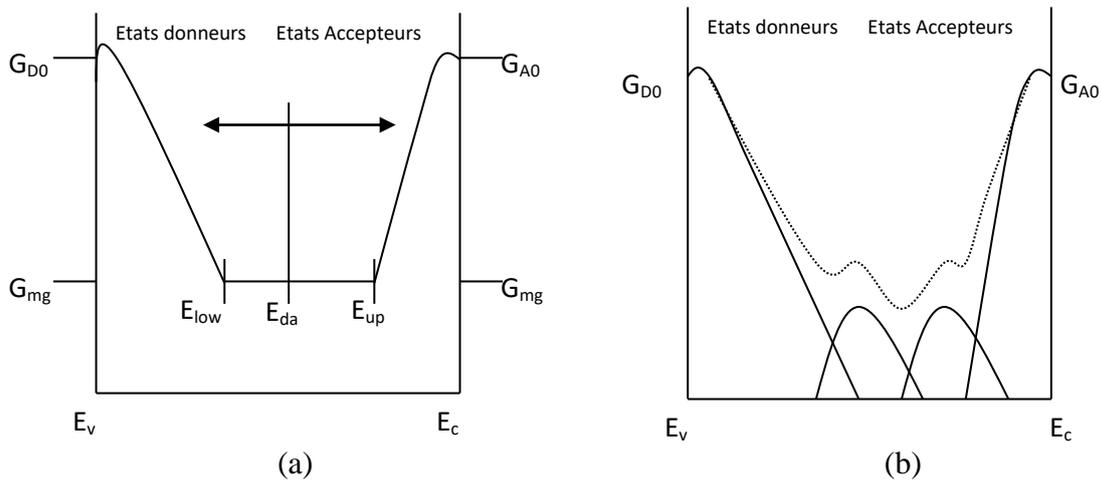


Figure II.8: Distribution des états localisés dans le gap. (a) Modèle en U (U-shaped model). (b) Modèle en deux gaussiennes.

Symboles	Désignation
D.O.S	La courbe en pointillé représente la densité d'états effective dans le gap.
G_{mg}	La distribution constante au milieu du gap.
G_{DO}	Le préfacteur exponentiel des états donneurs dans les queues de bandes.
G_{AO}	Le préfacteur exponentiel des états accepteurs dans les queues de bandes.
E_{da}	l'énergie à laquelle les états passent du type donneur au type accepteur.

Tableau II.2: Les symboles est leurs désignations des grandeurs intervenant dans la distribution des états localisés dans le gap.

c-1 Distribution dans les queues de bandes :

Dans le programme, les queues de bande des états donneurs et accepteurs sont modélisées par l'équation [16] :

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp[-E/E_D] \quad (\text{II.17})$$

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp[-E'/E_A] \quad (\text{II.18})$$

- E est mesurée à partir de E_v .
- E' est mesurée à partir de E_c .
- g représente la densité d'états (D.O.S. ($\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$)).
- E_D et E_A représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction.

Dans le modèle en U, la densité d'états dans le gap est une valeur constante égale à G_{mg} (figure II.8). Cette région plate est alors ajoutée à la région exponentielle des queues de bandes pour ainsi compléter le modèle en U.

c-2 Distribution dans le modèle en deux gaussiennes :

Dans le programme, la distribution de la densité d'états dans le gap est modélisée par les équations ci-dessous [16].

La première Gaussienne se compose d'états donneurs (D^{-0}) de densité d'états $N_{AG} \text{ cm}^{-3}$.

La deuxième Gaussienne (D^{+0}) se compose d'états accepteurs de densité d'états $N_{DG} \text{ cm}^{-3}$.

$$g_{AG}(E'') = \left(\frac{N_{AG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{AG}} \right) \exp \left\{ - \frac{(E'' - E_{AG})^2}{2\sigma_{AG}^2} \right\} \quad (\text{II.19})$$

$$g_{DG}(E''') = \left(\frac{N_{DG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{DG}} \right) \exp \left\{ - \frac{(E''' - E_{DG})^2}{2\sigma_{DG}^2} \right\} \quad (\text{II.20})$$

Où :

- E_{AG} et E_{DG} représentent les positions en eV des pics des deux Gaussiennes.
- E_{AG} est mesurée à partir de la bande de conduction.
- E_{DG} est mesurée à partir de la bande de valence.
- σ_{AG} et σ_{DG} représentent l'écart type des deux gaussiennes.
- Les énergies E'' et E''' sont mesurées respectivement à partir des pics E_{AG} et E_{DG} .

c-3 Expressions des états localisés continus dans le gap

Pour le calcul de n_T et p_T , le gap est divisé en un grand nombre d'intervalles. La densité d'états par énergie G_i est constante dans chacun de ces petits intervalles d'énergie $[E_1, E_2]$ et elle est calculée en utilisant la distribution des états localisés dans le gap représentées par des courbes exponentielles (Modèle en U) et par des Gaussiennes (Modèle en deux gaussiennes) (Figure II.8).

- Les états localisés continus piégés dans le gap à l'équilibre thermodynamique

Avec f_0 qui représente la fonction de probabilité d'occupation à l'équilibre thermodynamique, la densité des trous piégés dans la région des états donneurs dans le gap avec une énergie $[E_1, E_2]$ de densité d'état $G_i = G_D$ est donnée par :

$$p_t = G_D \int_{E_1}^{E_2} (1 - f_0(E)) dE \quad (\text{II.21})$$

La densité des électrons piégés dans la région des états accepteurs dans le gap avec une énergie $[E_1, E_2]$ de densité d'état $G_i = G_A$ est donnée par :

$$n_t = G_A \int_{E_1}^{E_2} f_0 dE \quad (\text{II.22})$$

• Les états localisés continus piégés dans le gap hors équilibre thermodynamique

Avec f qui représente la fonction de probabilité d'occupation hors équilibre thermodynamique, la densité des trous piégés dans la région des états donneurs dans le gap est donnée par :

$$p_t = G_D \int_{E_1}^{E_2} (1 - f) dE \quad (\text{II.23})$$

La densité des électrons piégés dans la région des états accepteurs dans le gap avec une énergie $[E_1, E_2]$ de densité d'état $G_t = G_A$ est donnée par :

$$n_t = G_A \int_{E_1}^{E_2} f dE \quad (\text{II.24})$$

II.4.2 Recombinaisons dans les états localisés

Les centres de recombinaison les plus efficaces sont ceux situés au milieu du gap. Trois mécanismes de recombinaison peuvent être considérés : les recombinaisons de Shockley-Read-Hall, les recombinaisons Auger et les recombinaisons radiatives (ou directes).

Le niveau d'énergie E_t dans la bande interdite peut capturer à la fois des électrons et des trous et fournir une étape intermédiaire à la recombinaison. Ainsi, quatre processus responsables des états localisés N_t dans le gap sont considérés.

- 1- Emission d'un électron avec une probabilité e_n . (Ou taux propre de génération).
- 2- Capture d'un électron avec une probabilité c_n . (Ou taux propre de recombinaison).
- 3- Emission d'un trou avec une probabilité e_p . (Ou taux propre de génération).
- 4- Capture d'un trou avec une probabilité c_p . (Ou taux propre de recombinaison).

$$e_n = a_n f N_t \quad (\text{II.25})$$

$$c_n = n(1 - f) N_t \sigma_n v_{th} \quad (\text{II.26})$$

$$e_p = a_p (1 - f) N_t \quad (\text{II.27})$$

$$c_p = p f N_t \sigma_p v_{th} \quad (\text{II.28})$$

Le terme de recombinaison est : $R = c_n - e_n = (c_p - e_p)$
(II.29)

σ_n et σ_p sont respectivement les sections efficaces de capture des électrons et des trous par les états N_t (cm^{-3}), v est la vitesse thermique, et a_n et a_p sont des constantes.

Les recombinaisons sont données par [17] :

$$R(\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}) = \sigma_n \sigma_p v_{th} G_t \int_{E_1}^{E_2} \left[\frac{np - n_i^2}{\sigma_n (n + n_1) + \sigma_p (p + p_1)} \right] dE \quad (\text{II.30})$$

II.4.3 Expressions des courants d'électrons et de trous

Les équations des électrons des trous, décrivent le modèle dérive-diffusion. Les expressions des courants d'électrons et de trous sont données par les équations :

$$J_p(x) = qp\mu_p \nabla E_{Fp} \quad (\text{II.31})$$

$$J_n(x) = qn\mu_n \nabla E_{Fn} \quad (\text{II.32})$$

Le terme qui contient les quasi-niveaux de Fermi est décomposé en deux termes bien connus : le courant de dérive et le courant de diffusion.

Le courant de dérive est provoqué par l'action d'un champ électrique qui accélère les porteurs. Ils acquièrent une vitesse proportionnelle au champ au travers d'un facteur de mobilité μ :

$$J_n = qn\mu_n E \quad (\text{II.33})$$

$$J_p = qp\mu_p E \quad (\text{II.34})$$

Hors des zones de champ électrique, le courant de diffusion devient majoritaire. Il est proportionnel au gradient de concentration dans la structure.

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (\text{II.35})$$

$$J_p = -qD_p \nabla p \quad (\text{II.36})$$

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion.

II.4.4 Méthode de résolution

A l'équilibre thermodynamique, il n'y a que l'équation de Poisson à résoudre. C'est une équation différentielle non linéaire du second ordre. Cette équation est résolue avec des conditions aux limites (équation II.8-11).

Hors équilibre thermodynamique, l'équation de Poisson et les équations de continuité sont résolues simultanément à partir de la méthode des différences finies et de Newton-Raphson afin d'obtenir le potentiel électrostatique, et les quasi-niveaux de Fermi des trous et des électrons en tous points dans le dispositif ($\psi(x)$, E_{F_p} et E_{F_n}).

De ces trois grandeurs découlent la concentration des porteurs chargés, la densité de charge effective, les états localisés continus dans le gap, la position des bandes de conduction et de valence, la densité de courant des trous et des électrons, les recombinaisons, le champ électrique ...etc.

Ces grandeurs ainsi calculées permettent de simuler la caractéristique courant-tension à l'obscurité et sous éclairage, la réponse spectrale, les diagrammes de bande, les profils de génération et de recombinaison des porteurs en tout point des dispositifs étudiés.

II.5 Modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson (1960) est un modèle utilisé pour les différents types d'hétérojonctions. Le principe de ce modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés, comme leurs permittivités électriques, les largeurs de leurs bandes interdites, la différence entre les valeurs de E_{g1} , E_{g2} et leurs affinités électroniques qui engendrent les discontinuités de bandes au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_c et ΔE_v .

Le modèle d'Anderson s'appuie sur l'approximation de Schokley qui stipule qu'il n'y a pas de charges mobiles dans la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et que le transport du courant se fait dans les régions quasi-neutres et par recombinaison/génération dans la ZCE.

II.5.1 Cas d'une cellule HIT de type p (*n-a-Si:H/p-c-Si*)

Dans une cellule HIT de type p (*n-a-Si:H/p-c-Si*), il apparaît une différence de hauteur de bande ΔE_v au niveau de la bande de valence entraînant ainsi une courbure de bande assez conséquente (figure II.9). A l'inverse, dans une cellule HIT de type n (*p-a-Si:H/n-c-Si*) la différence de hauteur de bande ΔE_c apparaît au niveau de la bande de conduction nettement moins prononcée (figure II.10). La courbure de bande a d'une importance considérable dans l'établissement du champ électrique à l'interface [5].

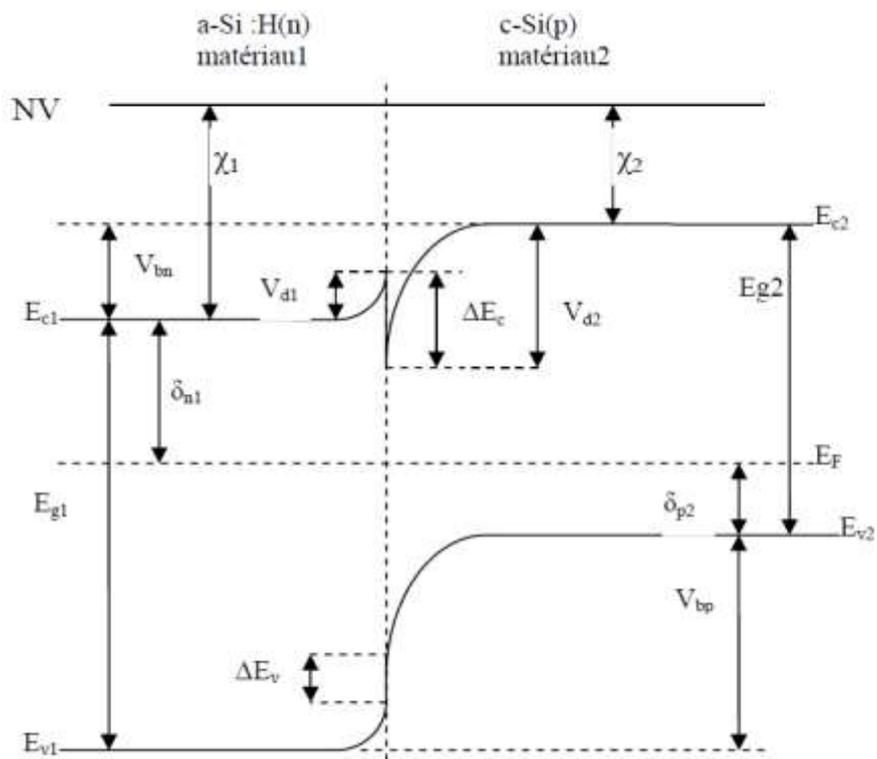


Figure II.9 Diagramme de bande d'une hétérojonction (n-a-Si:H/p-c-Si).

$$V_{bn} + \delta_{n1} = E_{g2} - \delta_{p2} \quad (\text{II.37})$$

$$V_{bn} - V_{d1} = V_{d2} - \Delta E_c \quad (\text{II.38})$$

En tirant V_{bn} de l'équation (II.37) et en le remplaçant dans (II.38), nous trouvons le potentiel induit:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = E_{g2} - \delta_{p2} - \delta_{n1} + \Delta E_c \quad (\text{II.39})$$

V_d est Le potentiel de diffusion dans une hétérojonction de type p.

II.5.2 Cas d'une cellule HIT de type n (p-a-Si:H/n-c-Si)

Le calcul du potentiel de diffusion peut-être déduit suivant la figure II.10 :

$$E_{g1} = V_{d1} + \Delta E_c + V_{d2} + \delta_{n2} + \delta_{p1} \quad (\text{II.40})$$

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = E_{g1} - \Delta E_c - \delta_{n2} - \delta_{p1} \quad (\text{II.41})$$

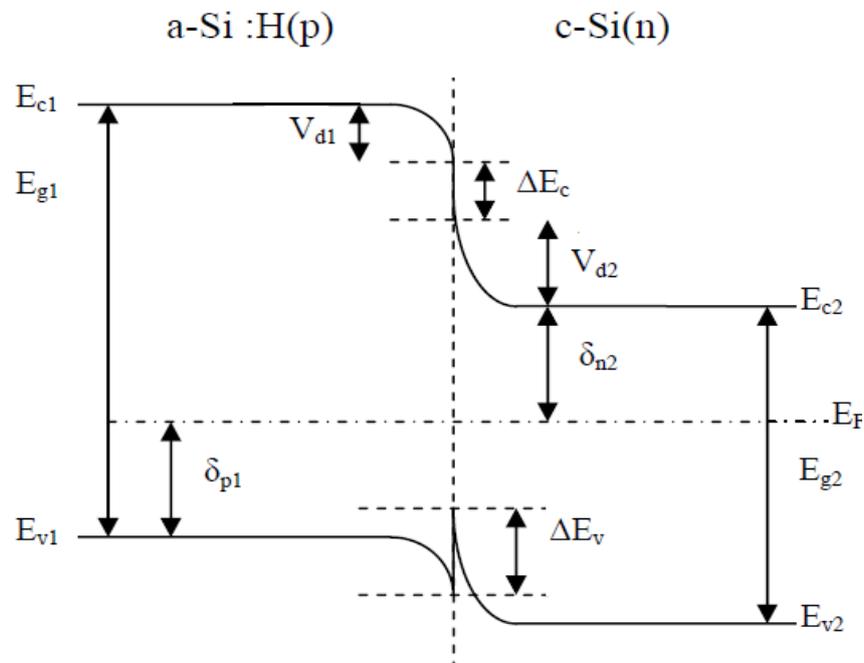


Figure II.10 Diagramme de bande d'une hétérojonction (p-a-Si:H/n-c-Si).

II.6 Les logiciels de simulation

Il existe plusieurs logiciels de simulation pour les cellules solaires. Nous pouvons citer AMPS, PC-1D, AFORS-HET, SCAPS-1D, ASDMP etc.

La simulation numérique permet de comprendre physiquement les différentes structures qui composent les photopiles et d'analyser les possibilités de leurs améliorations et cela en évitant des expériences longues et coûteuses. Nous présentons dans ce qui suit, quelques logiciels de simulation en s'intéressant en particulier au logiciel ASDMP qui a été utilisé pour la réalisation de nos simulations.

II.6.1 Le logiciel AMPS-1D

Développé par le professeur J.Fonash à l'Université de Pennsylvanie, le logiciel AMPS-1D pour Analysis of Microelectronic and Photonic Structures est distribué gratuitement. Ce logiciel analyse les phénomènes de transport dans les structures de types optoélectroniques. Il résout les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous pour analyser le comportement des structures. Comme le logiciel PC-1D, AMPS peut simuler toutes les cellules solaires à base de silicium. Cependant, AMPS ne permet pas de simuler les profils de

dopage, ainsi que l'éclairement des deux côtés de la cellule et ne prend pas en compte des indices de réfractances des matériaux. Il ne possède pas toutes les options pour simuler la structure HIT et le temps de calcul est très long. AMPS donne accès au :

- Caractéristique I-V sous éclairement et dans l'obscurité.
- Structure de bande,
- Durée de vie,
- Réponse spectrale,
- Taux de recombinaison.

II.6.2 Le logiciel PC-1D

C'est un logiciel très simple utilisé surtout pour simuler des cellules solaires à base de silicium. Le groupe de recherche SANYO a optimisé la structure HIT avec ce logiciel.

PC1D se base sur le calcul du potentiel électrostatique, et les potentiels de Fermi des électrons et des trous. Voici une liste de ses principaux paramètres :

- Type de matériau,
- Largeur de la bande interdite,
- Epaisseur de la région,
- Valeur du niveau de dopage,
- Constante diélectrique,
- Mobilité des porteurs,
- Concentration intrinsèque,
- Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde,
- Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde,
- Taux de recombinaison des porteurs,
- Taux de recombinaison en face avant et arrière.

II.6.3 Le logiciel AFORS-HET

AFORS-HET (Automate FOR Simulation of HETerostructures) est un code de calcul numérique qui permet de simuler des dispositifs semi-conducteurs. En spécifiant les propriétés de chaque couche et interface, AFORS-HET peut les empiler et ainsi les modéliser. Le programme résout l'équation de poisson et les équations de continuités des électrons et des trous présentées plus haut.

Avec un temps de calcul très court et une utilisation est très facile, ce logiciel permet de simuler les densités d'états de défauts (simulation des queues de bande et liaisons pendantes pour le silicium amorphe). Plusieurs variétés de techniques de caractérisations sont possibles :

- Caractéristique I-V sous éclairement,
- Structure de bande,
- Durée de vie,

- Réponse spectrale,
- Taux de recombinaison,
- Le rendement quantique interne,

II.6.4 SCAPS-1D

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un code de simulation de photopile unidimensionnel développé au Département d'électronique et de systèmes d'information (ELIS) de l'université de Gent en Belgique par Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Stefaan Degraeve, Johan Verschraege.

Le programme a été développé à l'origine pour les structures à base de CuInSe₂ et de la CdTe. Aujourd'hui, SCAPS est applicable aux cellules solaires cristallines (famille Si et GaAs) et aux cellules amorphes (*a-Si* et Si micromorphe), ainsi qu'à une multitude de cellules solaires à couches minces [17].

SCAPS est disponible gratuitement. Il propose une bibliothèque qui englobe différents matériaux, différentes structures, différents modèles optiques suivant les matériaux utilisés. Il contient plusieurs fenêtres. Le panneau action permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs, exécuter les calculs, sauvegarder les résultats...etc. [18].

II.6.5 ASDMP

Le code de calcul ASDMP (Amorphous Silicon Device Modelling Program) est un programme de simulation monodimensionnel des cellules solaires. Il a été développé par Professeur Parsathi Chatterjee (1992) [12-13].

Ce logiciel a été conçu au début pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe. Il a été ensuite généralisé au silicium cristallin et aux cellules HIT. Il comprend une partie électrique, et une autre partie optique.

La première se compose d'un programme détaillé qui repose sur les équations de continuité pour les électrons et les trous, et l'équation de Poisson. Il simule les caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage et la réflexion spectrale. Il détermine le champ électrique dans tout le dispositif, le taux de recombinaison, la densité des porteurs libres et piégés par les états du gap et la densité des électrons et des trous en fonction de la position.

Le modèle permet d'analyser l'influence de différents paramètres et leur impact sur la performance de la cellule. Il aide à déterminer les différentes directives à suivre pour optimiser les dispositifs. Ainsi, il permet d'économiser le temps et le coût de l'expérience.

Le programme peut être appliqué à un dispositif général de plusieurs couches dont les propriétés du matériau varient avec la position. Les différentes couches peuvent être cristallines, amorphes, poly cristallines ou multi cristallines.

L'aspect optique peut être décrit par une loi d'absorption exponentielle simple. Mais cette méthode néglige les réflexions multiples, le piégeage optique et la diffusion de la lumière par les rugosités. Pour cela, un modèle optique a été intégré à ASDMP. Cette dernière partie repose sur le modèle semi-empirique qui divise le flux incident en une partie diffusée par les

interfaces rugueuses et une autre partie qui reste spéculaire. Le piégeage optique est obtenu à la fois par réflexion aux interfaces due au changement d'indice pour la partie spéculaire et par réflexion totale à l'interface verre-air, et la lumière piégée revient vers la structure où elle sera de nouveau diffusée.

Le modèle optique est nécessaire pour simuler des cellules solaires dont certaines interfaces sont texturées.

```

TYPE OF DEVICE          0      ONLY ABS. REQD.          0
PROG. TYPE=1 MEANS AMORPHOUS SCHOTTKY BARRIER OR A 2-LAYER STRUCTURE.
PROG. TYPE=2 MEANS AMORPHOUS P-I-N OR ANY 3-LAYER STRUCTURE.
PROG. TYPE=3 MEANS AN N-LAYER STRUCTURE.
ONLY THDYN. EQUIL. VALUES REQD. IF YES=1, IF NO=0.
NTHSEM=NO. OF THICK SEMI LAYERS, NTHPT(IT), NTHPOS(IT) = NO. OF
INTERVALS, POSITION OF ITth SEMICONDUCTOR LAYER.
  NTHSEM                3
  NTHPT, NTHPOS         300800 50 5 6 7
  PROGRAM TYPE          3      TOTAL NO. OF X-PTS      1164
  N-LAYER POSITIONS    3 4 5 6 7
  NLAYER                7
  NP_F                  0
  IWHICH (0 OR 1)      0      ONLY THDYN. EQUIL.      0
  NO. OF P-LAYERS      1      NO. OF N-LAYERS         5
  NO. OF I-LAYERS      1
  P-LAYER POSITIONS    1
  N-LAYER POSITIONS    3 4 5 6 7

```

Figure II.11 : Interface de Cygwin présentant la page principale du logiciel ASDMP

Le logiciel ASDMP est conçu sous Fortran et fonctionne sous Linux. Nous avons utilisé l'interface Cygwin pour pouvoir exécuter ASDMP sous Windows. Cygwin est un logiciel simple. Ces commandes sont sous Unix. Les différents fichiers de sortis sont obtenus après une exécution de courte durée. Les caractéristiques électriques fournies par ce modèle sont :

- Caractéristique I-V sous éclairement,
- Structure de bande,
- Durée de vie,
- Réponse spectrale,
- Taux de recombinaison,
- Le rendement quantique interne.

II.7 Les dispositifs expérimentaux

Le dépôt du silicium amorphe hydrogéné est réalisé par la décomposition par décharge lumineuse alimentée par une tension radiofréquence (RF-PECVD, pour Plasma Enhanced

Chemical Vapor Deposition) de silane pur SiH_4 pour avoir (*a-Si:H*) ou dilué dans de l'hydrogène ou de l'hélium (*pm-Si:H*). Le principe de cette technique consiste à utiliser un plasma pour dissocier des molécules de gaz de silane SiH_4 , de l'hydrogène H_2 , de l'hélium He , etc. qui, une fois dissociées par les collisions inélastiques avec des électrons, constitueront un mélange d'espèces réactives.

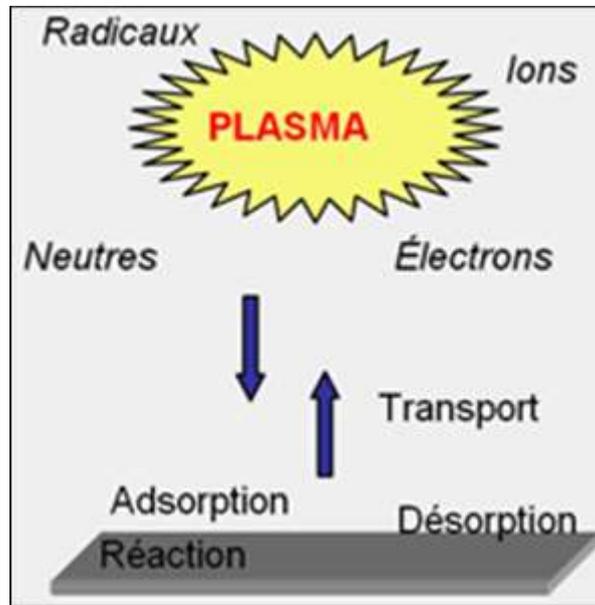


Figure II.12: Principe de la technique de dépôt PECVD

La première étape est la dissociation des molécules du gaz par impact électronique (réactions primaires), ces réactions, on obtient les ions SiH_3^+ , SiH_2^+ , SiH^+ et des radicaux libres SiH_3 , SiH_2 , SiH . Les produits de la réaction peuvent contribuer au dépôt ou subir des collisions avec les molécules du gaz (réactions secondaires) ce qui peut conduire à la formation d'agrégats, de nanocristaux et de poudres.

Ce sont toutes ces espèces qui vont interagir avec le substrat pour former une couche mince, suite à des réactions de surface et de volume dans lesquelles une grande partie de l'hydrogène est éliminée [5].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner des notions relatives aux cellules solaires à hétérojonctions en particulier les HIT en silicium. Nous avons cité quelques avantages de ce type de cellule solaire ainsi que les différents types d'hétérojonctions utilisées dans le photovoltaïque.

Une description détaillée du modèle de Simulation (logiciel ASDMP) ainsi que du modèle d'Anderson a été exposée dans ce chapitre. Enfin, nous avons clôturé ce chapitre par la présentation par des différents logiciels de simulation disponibles pour simuler les photopiles

en cas général, ainsi qu'un aperçu sur la technique la plus utilisée pour les dépôts des couches minces (PECVD).

Références

- [1] S. Taira, Y. Yoshimine, T. Baba, M. Taguchi, T. Kinoshita, H. Sakata, E. Maruyama, and M. Tanaka, Proceedings 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 3–7 September 2007, p. 932.
- [2] W. Shockley, H. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pages 510–519, 1961.
- [3] S. Vecchi, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière". Thèse de Doctorat L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2013
- [4] D. RÉAUX, "Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface", Thèse de doctorat, université paris-saclay préparée à l'université paris-sud, 2017.
- [5] D. RACHED, "Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe". Thèse de Doctorat. USTO, 2010
- [6] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME. Le solaire photovoltaïque. Les Avis de l'ADEME, 2016.
- [7] M. Kerr, P Campbell, A Cuevas. Lifetime and efficiency limits of crystalline silicon solar cells. Conference Record of the 29 th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 438–441, 2002.
- [8] J. Zhao, A. Wang, M. Green. 24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 7, page 471–474, 1999.
- [9] M. Green, J. Hansen. Catalogue of Photovoltaic Drawings. Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales, Sydney, 1998.
- [10] S. Glunz. The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern – Approaching 25% with a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact. European Photovoltaic Conference EU PVSEC, 2015.
- [11] R. Schwartz, M. Lammert. Silicon Solar Cell for high concentration application. Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting, pages 350–352, 1975.
- [12] P. Chatterjee, *J. Appl. Phys.* 76 (1994) 1301.
- [13] P. Chatterjee, F. Leblanc, M. Favre, and J. Perrin. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 426 (1996) 593.
- [14] U. Dutta, P. Chatterjee, P. Roca i Cabarrocas, P. Chaudhuri, R. Vanderhaghen. *J. Non-Cryst. Solids.* 338 (2004) 677.

[15] F. Leblanc, J. Perrin, and J. Schmitt, *J. Appl. Phys.* 75 (1994) 1074.

[16] N. Palit. Ph.D. Thesis, Energy Research, Indian Association for the Cultivation of Sciences”, India, 2000.

[17] <http://scaps.elis.ugent.be/>consulté le 21/04/2020.

[18] C. Bendenia, étude et simulation des propriétés électriques et optiques des cellules photovoltaïques organiques multicouches, Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis
Mostaganem, 13/02/2019.

Chapitre III

Optimisation des contacts avant et arrière des cellules solaires HIT n-c-Si

III.1 Introduction

L'étude des hétérojonctions entre le silicium amorphe hydrogéné et le silicium cristallin a-Si: H/c-Si est un domaine de recherche très actif pour les applications photovoltaïques. En effet, la HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) a fait l'objet d'une grande attention à travers plusieurs études en raison de son efficacité de conversion énergétique élevée et de sa structure relativement simple [1-6]. Les cellules solaires HIT c-Si présentent des avantages, par rapport aux autres technologies photovoltaïques au silicium cristallin en termes de basses températures de fabrication et de possibilités d'élaboration de modules bifaciaux [7-9].

La société Sanyo (Japon) a indiqué qu'une efficacité de conversion pouvant atteindre 24,7% pour les cellules solaires HIT avait été atteinte en 2013 [10]. En 2017, une efficacité record de 26,4% a été atteinte [11]. Cependant, selon des estimations faites, l'efficacité énergétique des cellules solaires à base de silicium sous rayonnement solaire non concentré pourraient atteindre les 30% [12]. Afin de produire des cellules solaires HIT à haute efficacité, plusieurs paramètres doivent être compris et optimisés avec soin.

Nous nous sommes donc intéressés dans ce chapitre, à l'étude des jonctions TCO/Semiconducteur et métal/semi-conducteur au niveau des faces avant et arrière (ITO/p-a-Si: H et n-c-Si/Al) sur des cellules solaires HIT n-c-Si suivantes : Oxyde d'Indium et d'Etain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si: H)/ silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si: H)/silicium cristallin dopé n (n-c-Si)/Aluminium (Al). Le but de cette étude et de bien analyser et par la suite bien optimiser les jonctions métal-semi-conducteur au niveau des faces avant et arrière dans ce type de photopile afin de bien choisir le matériau responsable des recombinaisons des porteurs de charge lors de leur collecte. Afin de mener à bien cette étude, une modélisation numérique a été réalisée en utilisant le logiciel ASDMP.

III.2 Présentation de la cellule solaire HIT n-c-Si

La cellule solaire HIT n-c-Si étudiée se compose de l'empilement suivant représenté sur la figure III.1.

1. Oxyde d'Indium et d'Etain ou Indium Tin Oxyde (ITO)
2. Silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si: H)
3. Silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si: H)
4. Silicium cristallin dopé n (n-c-Si)
5. Aluminium (Al).

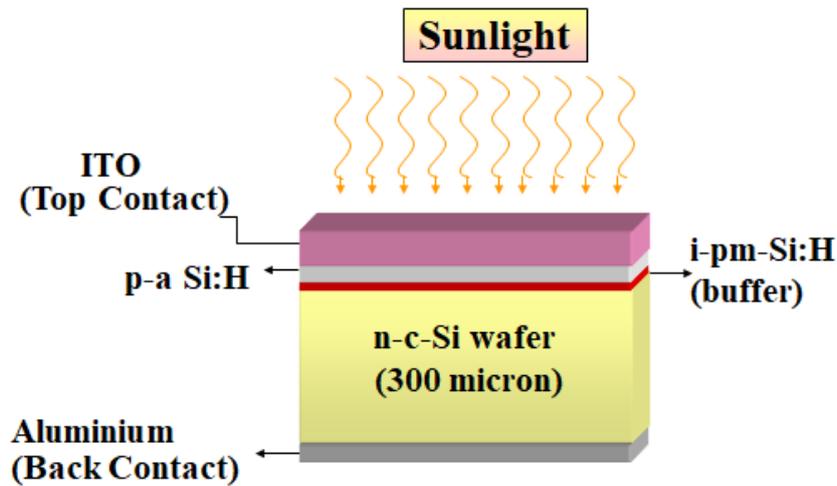


Figure III.1 : Structure de la HIT n-c-Si étudiée (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al).

Cette cellule est constituée d'un substrat de silicium cristallin dopé n (n-c-Si) d'une épaisseur de 300 μ m sur lequel est déposé, en face avant, du silicium polymorphe intrinsèque (i-pm-Si:H) d'une épaisseur de 30 Å. Cette couche intrinsèque est spécifique aux cellules HIT c-Si. Elle permet la passivation des défauts de surface existants à l'interface p-a-Si:H/n-c-Si. Ensuite, une couche de silicium amorphe dopé p est déposée pour constituer l'émetteur (p-a-Si:H) sur une épaisseur optimisée de 110 Å. Une couche antireflet (TCO: Oxyde Transparent Conducteur) à base d'ITO (Indium Tin Oxide) est déposée sur le silicium amorphe dopé p pour former la face avant.

A l'arrière de la cellule, une couche de métal constitué d'Aluminium est déposée au-dessous de la couche active n-c-Si pour constituer le contact arrière.

Notre étude s'est concentrée sur la face avant (TCO/p-a-Si:H) et le contact arrière (n-c-Si/métal) afin de bien choisir les matériaux responsables des recombinaisons des porteurs de charge lors de leur collecte. Les différents paramètres utilisés pour chaque couche sont résumés dans le tableau 1.

Paramètres	p-a-Si :H	i-pm-Si :H	n-c-Si
d (µm)	0.011	0.003	299
χ (eV)	3.90	3.95	4.22
E_{μ} (eV)	1.90	1.96	1.12
E_{ac} (eV)	0.27	0.92	0.06
N_D (cm ⁻³)	0	0	9.10 ¹⁴
N_A (cm ⁻³)	10 ¹⁹	0	0
$N_{D_{TOT}}, N_{A_{TOT}}$ (cm ⁻³)	10 ¹⁹	10 ¹⁴	3 10 ¹¹
E_D (eV)	0.050	0.050	0.005
E_A (eV)	0.030	0.030	0.003
G_{D0}, G_{A0} (cm ⁻³ eV ⁻¹)	4 10 ²¹	4 10 ²¹	10 ²⁰
μ_n (cm ² /V s)	20	30	1000
μ_p (cm ² /V s)	4	12	450
N_C, N_V	10 ¹⁹	2 10 ²⁰	5 10 ¹⁸
ϕ_{b0} (eV)	1.2-1.50		
ϕ_{bL} (eV)	0.06-0.68		

Tableau 1 : Principaux paramètres de la structure HIT n-c-Si étudiée.

III.3 Analyse du diagramme de bande des faces avant et arrière de la structure HIT n-c-Si.

Les figures 1 et 2 représentent le diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique de la jonction TCO/semi-conducteur (ITO/p-a-Si :H) au contact avant et de la jonction métal/semi-conducteur (n-c-Si/Al) au contact arrière de la cellule solaire HIT n-c-Si.

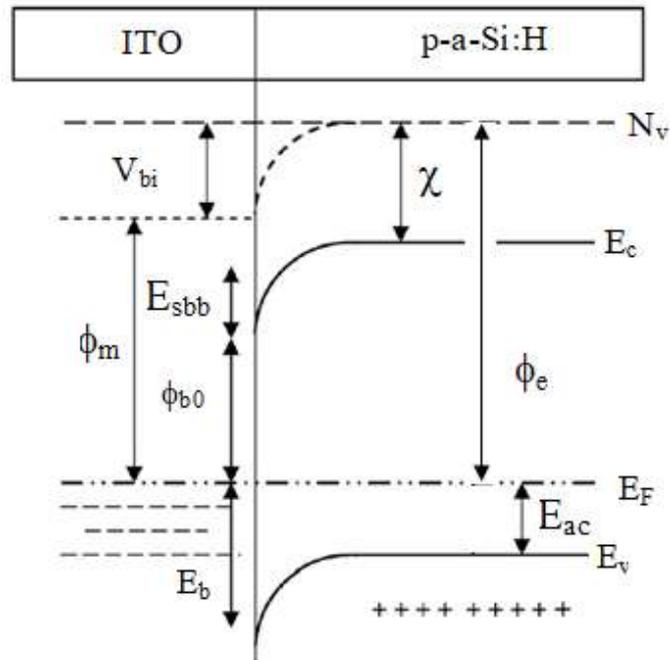


Figure III.2 : Représentation du diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique de la jonction ITO/p-a-Si:H.

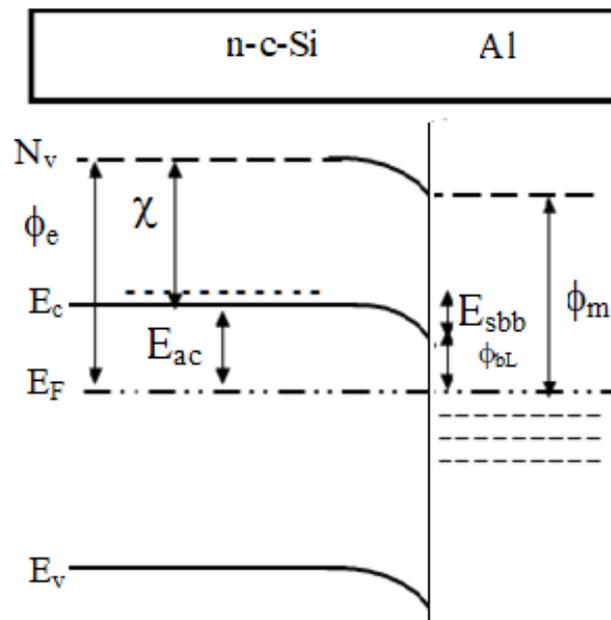


Figure III.3 : Représentation du diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique du contact n-c-Si/Al

χ : Affinité électronique.

ϕ_m : Travail de sortie du métal.

ϕ_e : Travail de sortie du semi-conducteur.

ϕ_{b0} : Hauteur de la barrière de potentiel du contact avant.

ϕ_{bL} : Hauteur de la barrière de potentiel du contact arrière.

E_{sbb} : courbure de bande.

E_{ac} : Energie d'activation.

Que ça soit pour le contact ITO/p-a-Si: H ou bien le contact n-c-Si/Al, une courbure de bande apparait vers le bas du fait que les travaux de sorties de ITO ($e\phi_{ITO} = 3.70$ eV) et de l'Aluminium ($e\phi_{Al} = 3.9$ eV) sont plus petit que ceux du silicium amorphe hydrogéné ($e\phi_{p-a-Si:H} = 4.80$ eV) [14,15] et du silicium cristallin ($e\phi_{n-c-Si} = 4,91$ eV) comme nous pouvons le constater sur les figures III.2 et III.3 respectivement [14,15,16,17].

En simulation, augmenter la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} ou bien ϕ_{b0} va permettre à la courbure de bande de passer du bas vers le haut. Le passage de cette courbure du bas vers le haut va augmenter le travail de sortie des matériaux utilisés (c'est-à-dire changement de l'Aluminium ou l'ITO par des matériaux ayant des travaux de sorties plus grands).

III.4 Optimisation du contact arrière des cellules solaires HIT n-c-Si

Dans le but d'optimiser le contact arrière de la cellule solaire HIT n-c-Si (n-c-Si/Al) et ainsi réduire le taux de recombinaison des porteurs de charge lors de leur collecte, le choix du métal est donc crucial car l'accord du travail de sortie à l'interface peut améliorer les rendements des cellules HIT.

Afin d'optimiser ce contact arrière, nous allons remplacer l'Aluminium par d'autre matériaux avec des travaux de sorties plus grand comme l'Argent, le Palladium, le Chrome ou le Ruthénium...etc. [18,19]. Nous allons donc tout simplement augmenter la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} pour permettre à la courbure de bande de passer du bas vers le haut (figure III.3) (c'est-à-dire changement de l'Aluminium par des métaux ayant des travaux de sorties plus grand). D'après le diagramme de bande de conduction et de valence au niveau du contact n-c-Si/Al (figure III.1) nous pouvons écrire :

$$\phi_{bL} = E_{ac} \pm E_{sbb} \quad (1)$$

L'énergie d'activation du silicium cristallin étant égale à $E_{ac} = 0.06$ eV, et E_{sbb} la courbure de bande à l'interface n-c-Si/Al. Nous allons faire varier ϕ_{bL} de 0,06 à 0,68 eV.

La figure III.3 représente le diagramme de la bande de conduction et de valence avec éclaircissement de notre cellule HIT n-Si avec une $\phi_{bL} = 0,06$ eV.

Les paramètres de sortie de cette cellule sont :

Une densité de courant de court-circuit $J_{sc} = 33.6 \text{ mA/cm}^2$, une tension en circuit ouvert $V_{oc} = 0,69 \text{ V}$, un facteur de forme $FF = 0,83$ et un rendement $\eta = 19,5\%$.

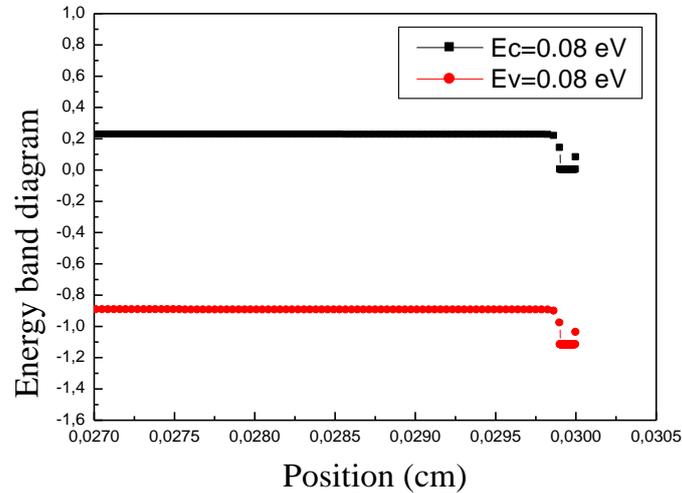


Figure III.3 : Représentation graphique du diagramme de la bande de conduction et de valence sous éclairage de la cellule HIT n-Si pour $\phi_{bL} = 0,08 \text{ eV}$.

La figure III.4 représente le potentiel induit V_{bi} en fonction de ϕ_{bL} . V_{bi} mesure la différence de potentiel entre la région dopée p et la région dopée n. Il mesure aussi la différence de potentiel au niveau de la jonction p-n. Nous pouvons remarquer que le V_{bi} diminue lorsque nous augmentons le ϕ_{bL} .

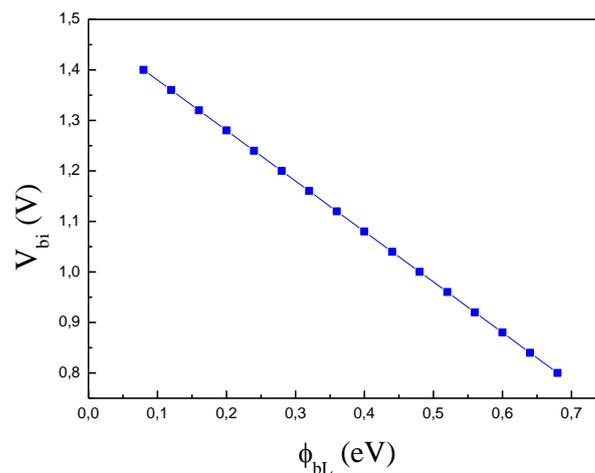


Figure III.4 : Représentation graphique du potentiel induit V_{bi} en fonction de ϕ_{bL} .

La figure III.5 représente la densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de ϕ_{bL} . J_{sc} n'est presque pas affectée par la variation du ϕ_{bL} , car elle dépend principalement de la densité de l'éclairage et non du matériau utilisé. Par contre, la réduction du V_{bi} a un impact direct sur la tension de circuit ouvert. En effet, nous pouvons remarquer que lorsque le ϕ_{bL} augmente, le V_{oc} chute de 0,69 V à 0,56 V. Cette chute entraînera certainement une baisse du rendement de la photopile étudiée.

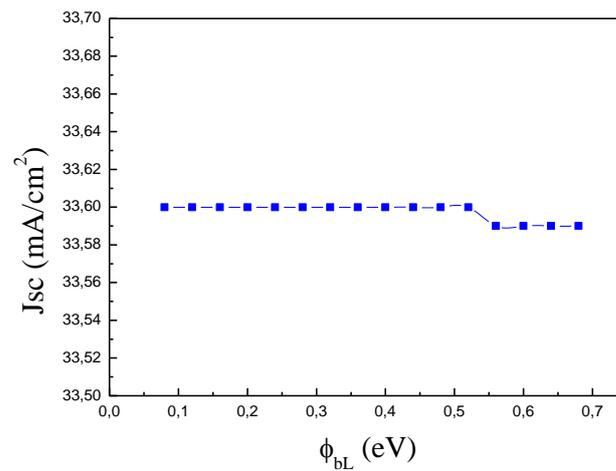


Figure III.5 : Représentation graphique de La densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de ϕ_{bL} .

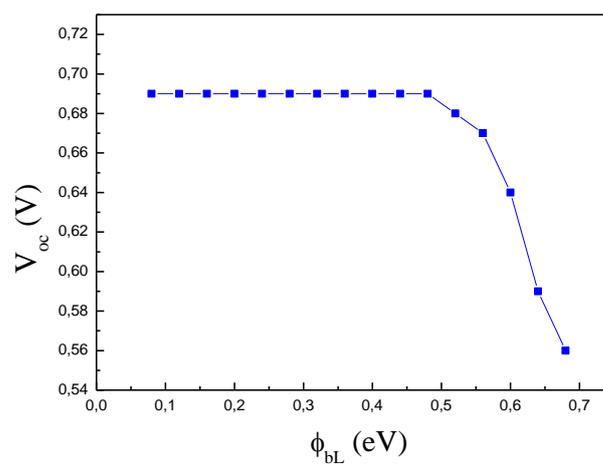


Figure III.6 : Représentation graphique de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de ϕ_{bL} .

Nous avons tracé par la suite le taux de recombinaison pour étudier l'impact de l'augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel au niveau du contact arrière sur le facteur de forme. Nous pouvons remarquer d'après la figure III.7 que lorsque ϕ_{bL} passe de 0,08 à 0,68 eV, nous obtenons une augmentation du taux de recombinaison des paires trou-électron créées dans la zone active (n-c-Si). Cette augmentation des recombinaisons aura un effet néfaste sur le facteur de forme. En effet, nous pouvons constater sur la figure III.8 que le facteur de forme FF chute de 0,83 à 0,69 %.

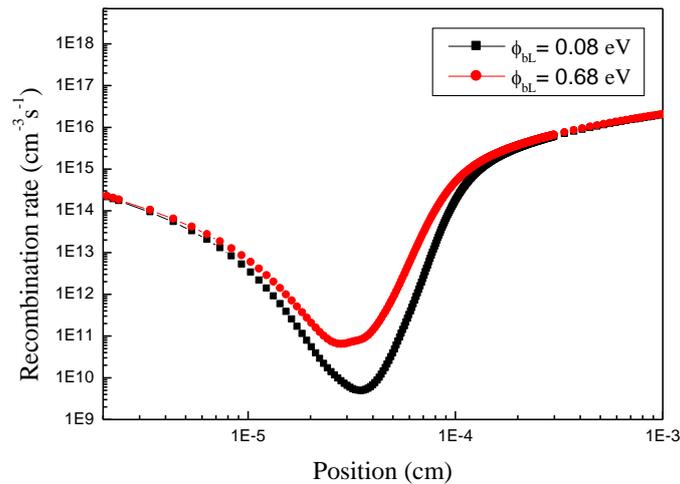


Figure III.7 : Représentation graphique du taux de recombinaison en fonction de ϕ_{bL} .

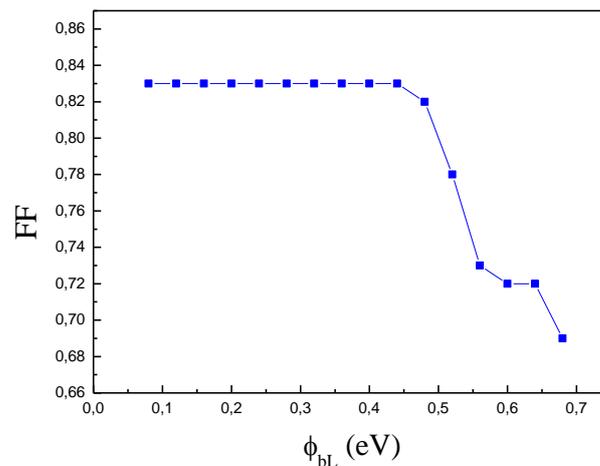


Figure III.8 : Représentation graphique du facteur de forme FF en fonction de ϕ_{bL} .

La figure III.9 représente le rendement η de la cellule étudiée en fonction de ϕ_{bL} . Nous pouvons remarquer une nette diminution du rendement qui chute de 19,5% à 13%. Cette diminution est donc attribuée à une diminution de la tension de circuit ouvert et au facteur de forme.

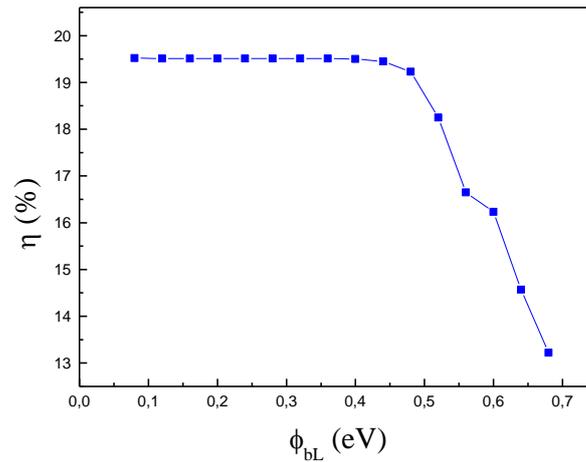


Figure III.9 : Représentation graphique du rendement η en fonction de ϕ_{bL} .

Pour pouvoir expliquer et vérifier les résultats obtenus, nous avons tracé le diagramme de la bande d'énergie pour des $\phi_{bL} = 0,08$ eV et $\phi_{bL} = 0,68$ eV sur la figure III.10.

Nous pouvons remarquer l'apparition d'une courbure de bande vers le haut créant une barrière de potentiel pour les trous photogénérés au niveau la jonction entre le métal et le semiconducteur (n-c-Si/Aluminium) lorsque $\phi_{bL} = 0,68$ eV.

En accord avec les résultats que nous avons obtenus précédemment, cette barrière empêche le passage des électrons vers le métal ce qui entraîne une augmentation du taux de recombinaison (Figure III.7) provoquant ainsi la diminution des paramètres de sortie des cellules étudiées.

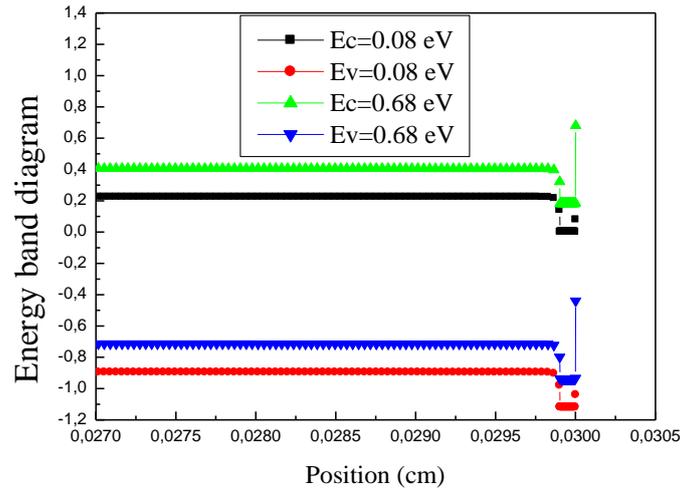


Figure III.10 : Représentation graphique du diagramme de la bandes de conduction et de valence sous éclaircissement de la cellule HIT n-Si pour $\phi_{bL} = 0,08$ eV et 0.68 eV.

Nous pouvons conclure d'après cette étude que l'augmentation de ϕ_{bL} (C'est-à-dire une augmentation du travail de sortie du métal) provoque une diminution des rendements des cellules étudiées. Le meilleur métal pour le développement du contact arrière de ce type de cellule solaire doit avoir un petit travail de sortie afin de minimiser la barrière potentiel qui empêche le passage des électrons vers ce contact arrière. L'Aluminium est donc le meilleur candidat pour cette mission car il a un travail de sortie de 3,9 eV considéré comme la plus faible de tous les métaux.

III.5 Optimisation du contact avant des cellules solaires HIT n-c-Si

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons faire une étude comparative du contact avant et arrière des cellules HIT n-c-Si. Une étude antérieure a montré qu'une augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} (figure III.2) au niveau du contact métal/semi-conducteur (ITO/p-a-Si :H) conduit à une augmentation des rendements des cellules solaires HIT [13]. Nous allons expliquer en profondeur les phénomènes physiques qui ont conduit à ces résultats afin de trouver qu'elles sont les meilleurs TCO susceptible d'avoir les meilleurs rendements de ce type de cellule solaire.

À cet effet, nous avons réalisé des simulations en changeant le E_{sbb} en utilisant l'équation 2 que l'on peut déduire de la figure III.2 qui représente le diagramme de bande de conduction et de valence au niveau du contact ITO/p-a-Si :H.

Nous avons fait varier le E_{sbb} (0.13 eV $< E_{sbb} < 0.43$ eV) de façon à obtenir 1.20 eV $< \phi_{b0} < 1.50$ eV.

$$\phi_{b0} = E_g - E_{ac} \pm E_{sbb} \quad (2)$$

Nous avons tracé le champ électrique dans la zone de déplétion (figure III.11) ainsi que le taux de recombinaison dans la couche active (figure III.12).

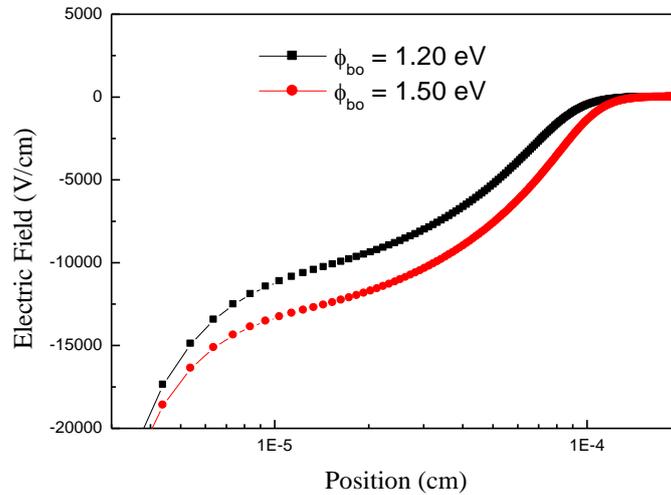


Figure III.11 : Représentation graphique du champ électrique en fonction de ϕ_{b0} .

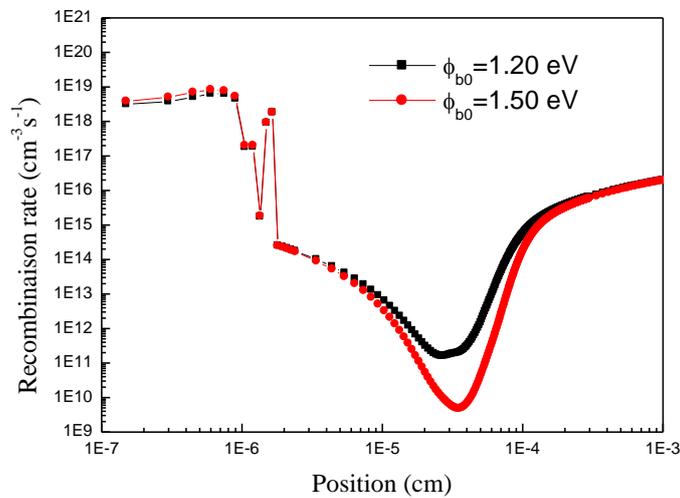


Figure III.12 : Représentation graphique du taux de recombinaison en fonction de ϕ_{b0} .

Nous pouvons remarquer qu'une augmentation de ϕ_{b0} de 1,20 à 1,50 eV provoque une augmentation du champ électrique qui facilite la séparation des porteurs de charges, réduisant ainsi le taux de recombinaison qui passe de $2 \cdot 10^{11}$ à $8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

L'augmentation du champ électrique vient du fait que lorsque ϕ_{b0} passe de 1,20 à 1,50 eV, la courbure de bande passe du bas vers le haut induisant une augmentation du V_{bi} (le champ dérive du potentiel induit).

Le V_{bi} étant la différence de potentiel entre la région dopée p et la région dopée n, nous pouvons remarquer qu'il augmente lorsque nous augmentons le ϕ_{b0} (figure III.13). L'amélioration de V_{bi} est le résultat de la réduction de la barrière de potentiel à l'interface ITO/p-a-Si: H. Cette réduction favorisera le passage des trous vers ITO et par conséquent une augmentation du V_{oc} .

Contrairement donc au comportement du contact arrière, nous pouvons déjà conclure que l'interface TCO/semiconducteur à l'avant de la cellule réagit favorablement à l'augmentation de ϕ_{b0} .

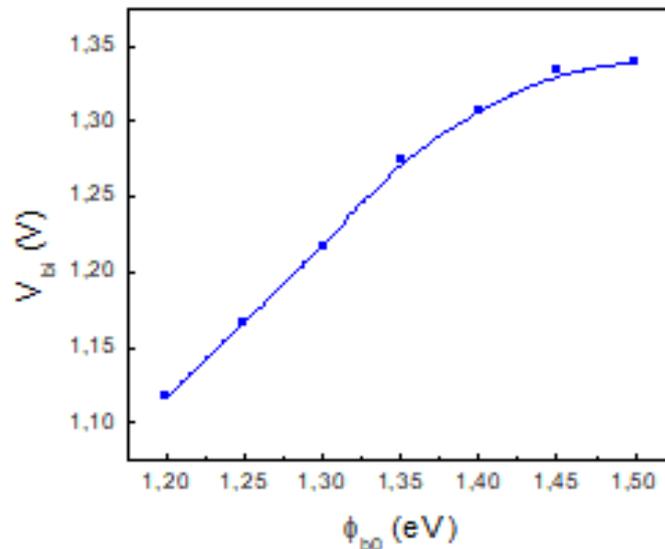


Figure III.13 : Représentation graphique du potentiel induit V_{bi} en fonction de ϕ_{b0} .

Comme pour le contact arrière, la densité de courant de court-circuit J_{sc} , représentée sur la figure III.14, n'est presque pas affectée par la variation de ϕ_{bL} lorsqu'il passe de 0,58 à 0,60 mA/cm², car le courant dépend de la densité de l'éclairage et non du matériau utilisé.

L'augmentation du V_{oc} de 0,59 à 0,70 V (figure III.15) est due à l'augmentation du V_{bi} qui a un impact direct sur la tension de circuit ouvert. Cette augmentation entraînera certainement une augmentation des figures de mérite de la photopile étudiée.

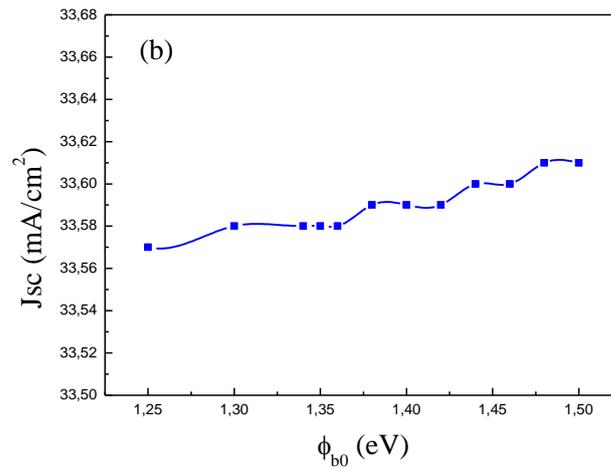


Figure III.14: Représentation graphique de La densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de ϕ_{b0} .

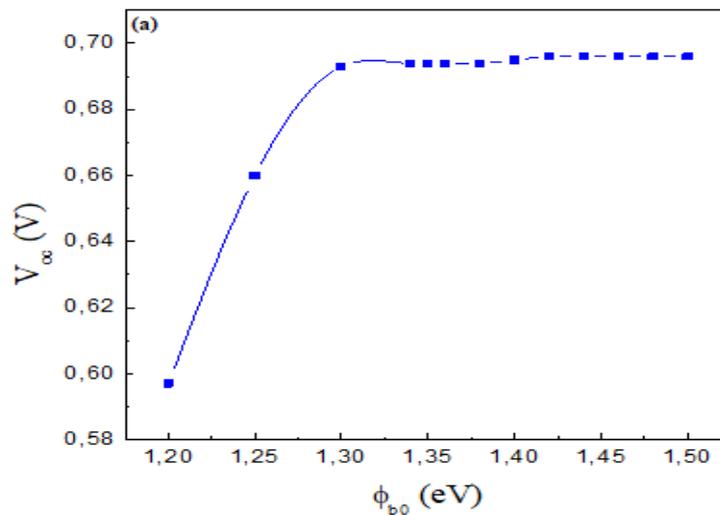


Figure III.15 : Représentation graphique de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de ϕ_{b0} .

Les figures III.16 et III.17 ci-dessous représentent le facteur de forme FF et le rendement en puissance des cellules solaires HIT n-c-Si en fonction de ϕ_{b0} .

Nous remarquons que le FF est très sensible à ϕ_{b0} vu qu'il passe de 0.6 à 0.83 %. Cette augmentation est directement liée à la diminution du taux de recombinaison des porteurs photo-généré dans la couche active (figure III.12). L'augmentation du rendement de 12.5 à 19.5 % est la conséquence de l'augmentation du V_{oc} et du FF.

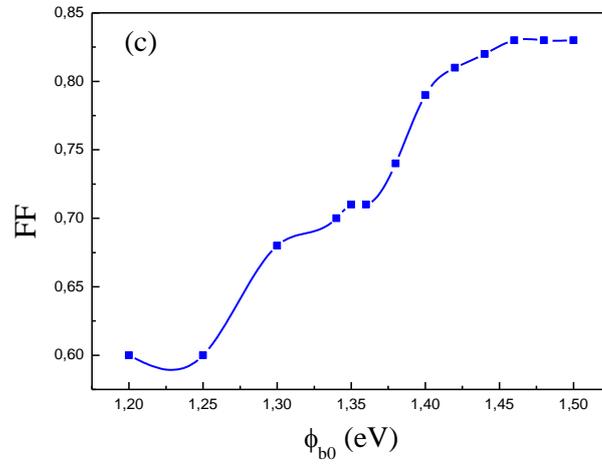


Figure III.16 : Représentation graphique du facteur forme FF en fonction de ϕ_{b0} .

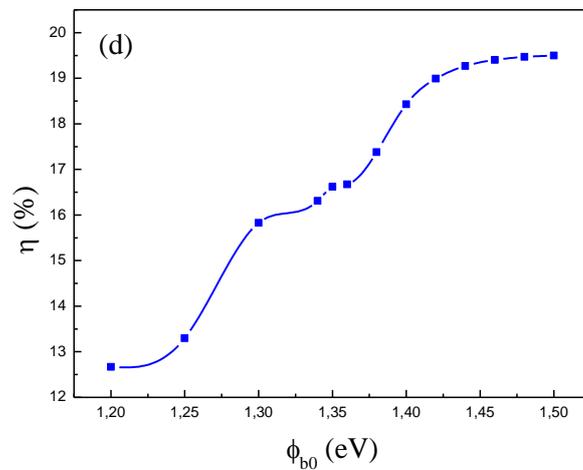


Figure III.17 : Représentation graphique du rendement η en fonction de ϕ_{b0} .

La réduction de la barrière de potentiel pour les trous est très significative sur la figure III.18, qui représente le diagramme de bande d'énergie sous illumination de la cellule étudiée pour $\phi_{b0} = 1,20$ eV et $\phi_{b0} = 1,50$ eV.

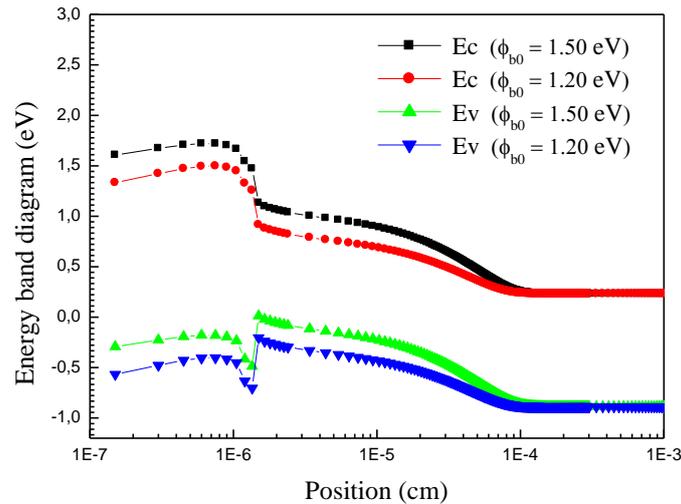


Figure III.18 : Représentation graphique du diagramme de la bande de conduction et de valence sous éclaircissement de la cellule HIT n-Si pour $\phi_{b0} = 1.20$ et 1.50 eV.

En effet, nous pouvons distinguer clairement sur le graphe III.18 que pour $\phi_{b0} = 1.20$ eV, la barrière de potentiel pour les trous (en bleu) est beaucoup plus importante que pour $\phi_{b0} = 1.50$ eV. Cette réduction favorise le passage des trous du silicium amorphe vers le TCO, ce qui conduit à l'augmentation du V_{oc} et du FF.

L'augmentation du rendement η de 12,5% à 19,5% pour les cellules solaires HIT n-c-Si est la conséquence de l'accroissement de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme.

Ces résultats montrent que pour avoir de bons rendements, il est essentiel d'augmenter le ϕ_{b0} . Expérimentalement, augmenté ϕ_{b0} revient à utiliser un TCO (oxyde transparent conducteur) avec un travail de sortie aussi grand que possible. Nos recherches nous ont donc permis d'améliorer l'efficacité de nos cellules HIT n-c-Si en choisissant un TCO avec un grand travail de sortie. L'oxyde de zinc (ZnO) avec un travail de sortie de 5,2 eV [15] pourrait être le meilleur TCO pour ce type de cellules solaires.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié des cellules solaires à hétérojonction de type HIT n-c-Si. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'influence de la jonction ITO/semiconducteur au niveau de la face avant ainsi que de la jonction métal/semiconducteur au niveau du contact arrière sur les performances des cellules étudiées. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel ASDMP.

Les différents résultats de simulations nous ont permis de conclure que :

Au niveau de la face arrière de la cellule, lorsque la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} augmente, il y a détérioration des paramètres photovoltaïques. Le rendement diminue de 19,5% pour $\phi_{bL} = 0,6$ eV à 13% pour $\phi_{bL} = 0,68$ eV. Par conséquent, l'Aluminium reste le meilleur métal pour l'élaboration du contact arrière de ce type de cellule car il a un travail de sortie égal à 4,06 eV considérée comme l'un des plus petits par rapport aux autres métaux.

Par contre, au niveau de la face arrière de la cellule, l'augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel élimine la barrière pour les trous, améliorant ainsi les paramètres photovoltaïques avec un rendement de conversion de 12,5% pour $\phi_{b0} = 1,2$ eV à 19,5% pour $\phi_{b0} = 1,5$ eV. Nous améliorons ainsi l'efficacité des cellules étudiées de 56%. Expérimentalement, augmenter la hauteur de la barrière de potentiel du contact avant peut se faire en choisissant un TCO avec un travail de sortie élevé. L'oxyde de zinc (ZnO) avec son travail de sortie égale à 5,2 eV pourrait être le meilleur TCO pour ce type de cellule solaire.

Références

- [1] L. Zhao, C. L. Zhou, H. L. Li, H. W. Diao, and W. J. Wang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, 673 (2008).
- [2] M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama, and O. Oota, *Prog. Photovoltaics* 8, 503 (2000).
- [3] K. Yamamoto, D. Adachi, H. Uzu, M. Ichikawa, T. Terashita, T. Meguro, N. Nakanishi, M. Yoshimi, and J. L. Hernández, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 08KD15 (2015).
- [4] D. Adachi, J. L. Hernández, and K. Yamamoto, *Appl. Phys. Lett.* 107, 233506 (2015).
- [5] M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. HohlEbinger, and A. W. H. Ho-Baillie, *Prog. Photovoltaics* 25, 668 (2017).
- [6] Cao Yu et al, *Jpn. J. Appl. Phys.* 57 08RB15 (2018)
- [7] S. De Wolf, A. Descoedres, Z. C. Holman, and C. Ballif, *Green* 2, 7 (2012).
- [8] T. Ishii, K. Otani, T. Takashima, and S. Kawai, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95, 386 (2011).
- [9] N. Aste, C. Del Pero, and F. Leonforte, *Sol. Energy* 109, 1 (2014).
- [10] M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, *IEEE J. Photovoltaics* 4, 96 (2014).
- [11] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, et al., *Nat. Energy* 2 (5) (2017) 17032.
- [12] W. Shockley, H.J. Queisser, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) 510-519.
- [13] D. Rached, M. Mostefaoui, *Thin Solid Films* 516, (2008) 5087.
- [14] Hölzl, J., and Schulte, F. K., *Work Functions of Metals*, in *Solid Surface Physics*, Höhler, G., Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1979
- [15] O. Tosoni, Ph.D. Thesis, Conception, élaboration et intégration d'électrodes transparentes optimisées pour l'extraction des charges dans des dispositifs photovoltaïques, Université de Grenoble, France, 2013.
- [16] P. Roca i Cabarrocas, S. Ramprasad, J.Z. Liu, V. Chu, A. Maruyama, S. Wager, 21st IEEE Photovoltaic Conference, 2 (1990) 1610.

[17] P. Roca i Cabarrocas, U. Eicker, 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, April 8-12, 1991, Lisbon, Portugal, p. 335.

[18] R. Jaramillo and S. Ramanathan, Solar Energy Materials & Solar Cells Kelvin force microscopy studies of work function of transparent conducting ZnO:Al electrodes synthesized under varying oxygen pressures, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95, pp. 602–605, 2011.

[19] J. Jia, A. Takasaki, N. Oka and Y. Shigesato, Experimental observation on the Fermi level shift in polycrystalline Al-doped ZnO films, Journal of Applied Physics, 112, p. 013718, 2012.

CHAPITRE IV
Optimisation des contacts avant et arrière des cellules
solaires HIT p-c-Si

IV.1 Introduction

Pour avoir un aperçu général du fonctionnement des cellules solaires à hétérojonction avec couche mince intrinsèque HIT p-c-Si et HIT n-c-Si, nous avons choisis d'étudier dans ce quatrième chapitre, les jonctions TCO/semiconducteur et métal/semiconducteur au niveau des contacts avant et arrière de la cellule solaire HIT p-c-Si : (oxyde d'indium et d'étain (ITO) / silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si: H) / silicium polymorphe intrinsèque (i-pm-Si: H) / silicium cristallin dopé p (p-c-Si) / Aluminium (Al)).

Le but de cette étude et de bien optimiser les jonctions des contacts à l'avant et à l'arrière de ce type de photopile, afin d'établir une règle générale pour choix du TCO et du métal responsable des recombinaisons des porteurs photogénérés lors de leur collecte. Nos simulations numériques ont été réalisées en utilisant le même logiciel que le chapitre III à savoir le logiciel ASDMP.

IV.2 Présentation de la cellule solaire HIT p-c-Si

La cellule solaire HIT p-c-Si étudiée et représentée sur la figure IV.1, se compose de l'empilement suivant : oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si: H)/silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si: H)/silicium cristallin dopé p (p-c-Si)/Aluminium (Al).

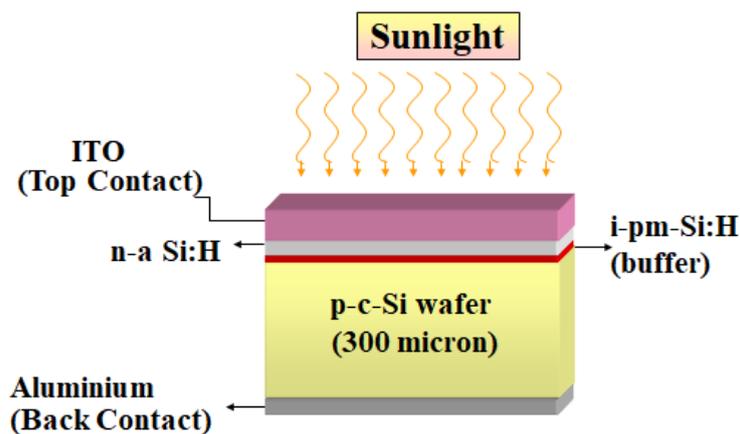


Figure IV.1 : Structure HIT p-c-Si étudiée (ITO/n-a-Si:H/i-pm-Si:H/p-c-Si/Al).

Cette cellule est constituée de l'empilement suivant :

- Une couche antireflet (TCO: Oxyde Transparent Conducteur) à base d'ITO (Indium Tin Oxide) est déposée sur le silicium amorphe dopé n pour former le contact avant.
- Une couche de silicium amorphe dopé n pour constituer l'émetteur (p-a-Si: H) d'une épaisseur optimisée de 110 Å.
- Un substrat de silicium cristallin dopé p (p-c-Si) d'une épaisseur de 300µm. C'est la couche active de la cellule solaire.
- Une couche de silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si: H) d'une épaisseur de 30 Å pour la passivation des défauts de surface existants à l'interface p-a-Si: H/n-c-Si.
- Enfin, une couche de métal constitué d'Aluminium est déposée sur la couche active n-c-Si pour constituer la face arrière.

Les différents paramètres utilisés pour chaque couche sont résumés dans le tableau 1.

Paramètres	p-a-Si :H	i-pm-Si :H	n-c-Si
d (µm)	0.011	0.003	299
χ (eV)	4	3.95	4.22
E_{μ} (eV)	1.80	1.96	1.12
E_{ac} (eV)	0.21	0.92	0.06
N_D (cm ⁻³)	10 ¹⁹	0	0
N_A (cm ⁻³)	0	0	9.10 ¹⁴
$N_{D_{TOT}}, N_{A_{TOT}}$ (cm ⁻³)	9.10 ¹⁸	10 ¹⁴	3 10 ¹¹
E_D (eV)	0.050	0.050	0.005
E_A (eV)	0.030	0.030	0.003
G_{D0}, G_{A0} (cm ⁻³ eV ⁻¹)	4 10 ²¹	4 10 ²¹	10 ²⁰
μ_n (cm ² /V s)	20	30	1000
μ_p (cm ² /V s)	4	12	450
N_C, N_V	10 ¹⁹	2 10 ²⁰	5 10 ¹⁸
ϕ_{b0} (eV)	0.12		
ϕ_{bL} (eV)	0.06-0.22		

Tableau 1 : Principaux paramètres de la structure HIT p-c-Si étudiée.

Pour faire une comparaison avec l'étude précédente, nous avons poursuivi notre étude sur les contacts avant et arrière afin de bien choisir le TCO et le métal responsable des recombinaisons des porteurs de charge lors de leur collecte.

IV.3 Analyse du diagramme de bande des contacts avant et arrière de la structure HIT p-c-Si.

Les figures IV.2 et IV.3 illustrent le diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique des jonctions au contact avant ITO/n-a-Si: H et au contact arrière p-c-Si/Al de la cellule solaire HIT p-c-Si (ITO/n-a-Si:H/i-pm-Si:H/p-c-Si/Al).

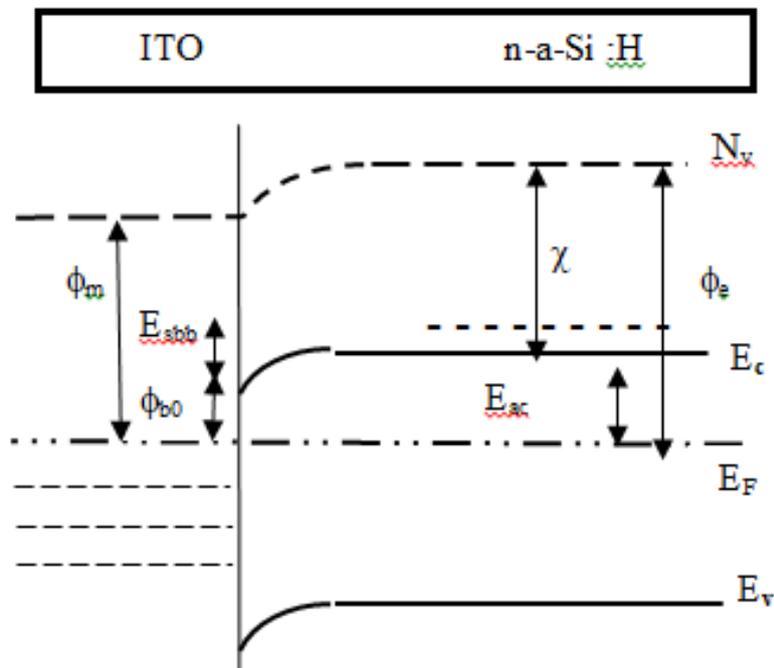


Figure IV.2 : Représentation du diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique du contact ITO/n-a-Si:H.

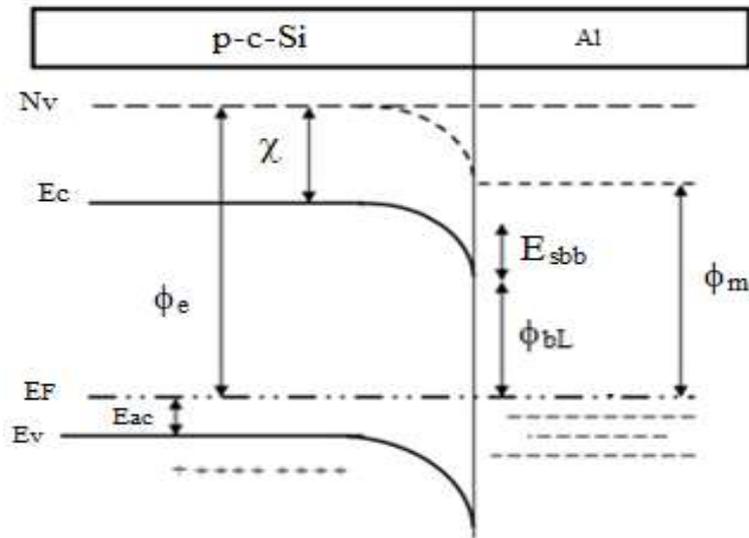


Figure IV.3 : Représentation du diagramme de bande à l'équilibre thermodynamique du contact p-c-Si/Al.

Avec:

χ : Affinité électronique.

ϕ_m : Travail de sortie du métal.

ϕ_e : Travail de sortie du semi-conducteur.

ϕ_{b0} : Hauteur de la barrière de potentiel du contact avant.

ϕ_{bL} : Hauteur de la barrière de potentiel du contact arrière.

E_{sbb} : courbure de bande.

E_{ac} : Energie d'activation.

Comme nous l'avons démontré dans le chapitre III, dans une structure HIT n-c-Si le choix du métal (Aluminium) à l'avant ou bien de l'ITO à l'arrière est un point crucial pour améliorer le rendement de ce type de cellule solaire.

La figure IV.3 qui représente le diagramme d'énergie à l'interface p-c-Si/Al montre une courbure de bande vers le bas au niveau de la bande de valence et de conduction car le travail de sortie de l'Aluminium qui est égal à $e\phi_{Al} \approx 3,9$ eV est plus petit que le travail de sortie de la couche p-c-Si égale à $e\phi_{p-c-Si} \approx 4,91$ eV [1,2]. Cette courbure de bande va créer une barrière potentielle à cette interface ce qui va empêcher la transmission des trous photogénérés vers le métal.

De même que pour le contact avant, nous pouvons voir sur la figure IV.2 la courbure de bande vers le bas au niveau de la bande de conduction et de valence puisque le travail de sortie de l'ITO $e\phi_{ITO} = 3.70$ eV est plus petit que le travail de sortie du silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si: H) $e\phi_{n-a-Si: H} \approx 4,21$ eV [3].

IV.4 Optimisation du contact arrière de la cellule solaire HIT p-c-Si

Afin d'optimiser le contact arrière de la cellule solaire HIT p-c-Si, nous allons tout simplement remplacer l'Aluminium par d'autres matériaux avec différents travaux de sortie comme l'Argent, le Palladium, le Chrome ou le Ruthénium...etc [4,5]. Nous allons faire les mêmes simulations que dans le chapitre III.

Nous allons augmenter la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} pour permettre à la courbure de bande de passer du bas vers le haut (figure IV.3). C'est-à-dire changement de l'Aluminium par des métaux ayant des travaux de sortie plus grands. D'après le diagramme de bande de conduction et de valence au niveau du contact n-c-Si/Al (Figure IV.2) nous pouvons écrire [6]:

$$\phi_{bL} = E_g - E_{ac} \pm E_{sbb} \quad (1)$$

En utilisant cette équation, nous allons faire varier le E_{sbb} ($0 < E_{sbb} < 0.16$ eV) de façon à obtenir 1.06 eV $< \phi_{bL} < 1.22$ eV (Tableau 1).

Sur la figure IV.4 qui représente le diagramme de bande d'énergie sous éclairage de la cellule HIT p-c-Si pour $\phi_{bL} = 1,06$ et $1,22$ eV, nous pouvons remarquer une courbure de bande vers le haut au niveau de la bande de valence et de conduction entre la jonction métal et le semiconducteur de type p (p-c-Si/Al).

En effet, lorsque la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} augmente, la courbure de la bande passe vers le haut. Cette courbure va permettre aux trous photogénérés de passer facilement de la couche active (p-c-Si) au contact (Aluminium) ce qui va améliorer les paramètres de sortie des cellules solaires étudiées.

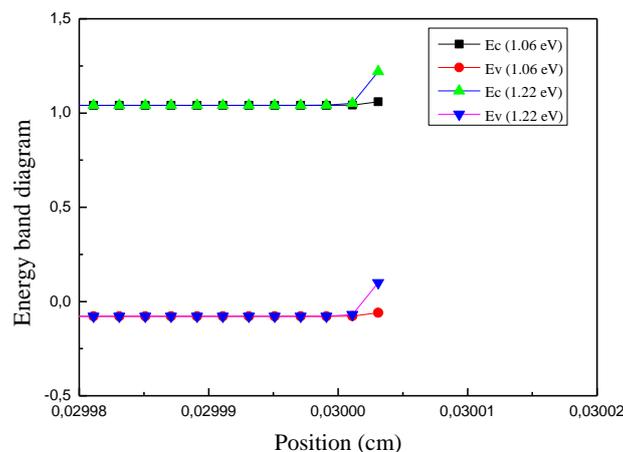


Figure IV.4 : Représentation graphique du diagramme de la bande de conduction et de valence sous éclairage de la cellule HIT p-c-Si pour $\phi_{bL} = 1.06$ eV et 1.22 eV.

La figure IV.5 représente la densité de courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement en puissance η de la cellule en fonction de la hauteur de la barrière de contact arrière ϕ_{bL} . D'après cette figure, nous constatons que la caractéristique courant-tension $J(V)$ dépend de la barrière de contact arrière. En effet, malgré qu'aucun changement majeur ne soit observé sur le FF, nous pouvons voir que le V_{oc} augmente lorsque le ϕ_{bL} augmente.

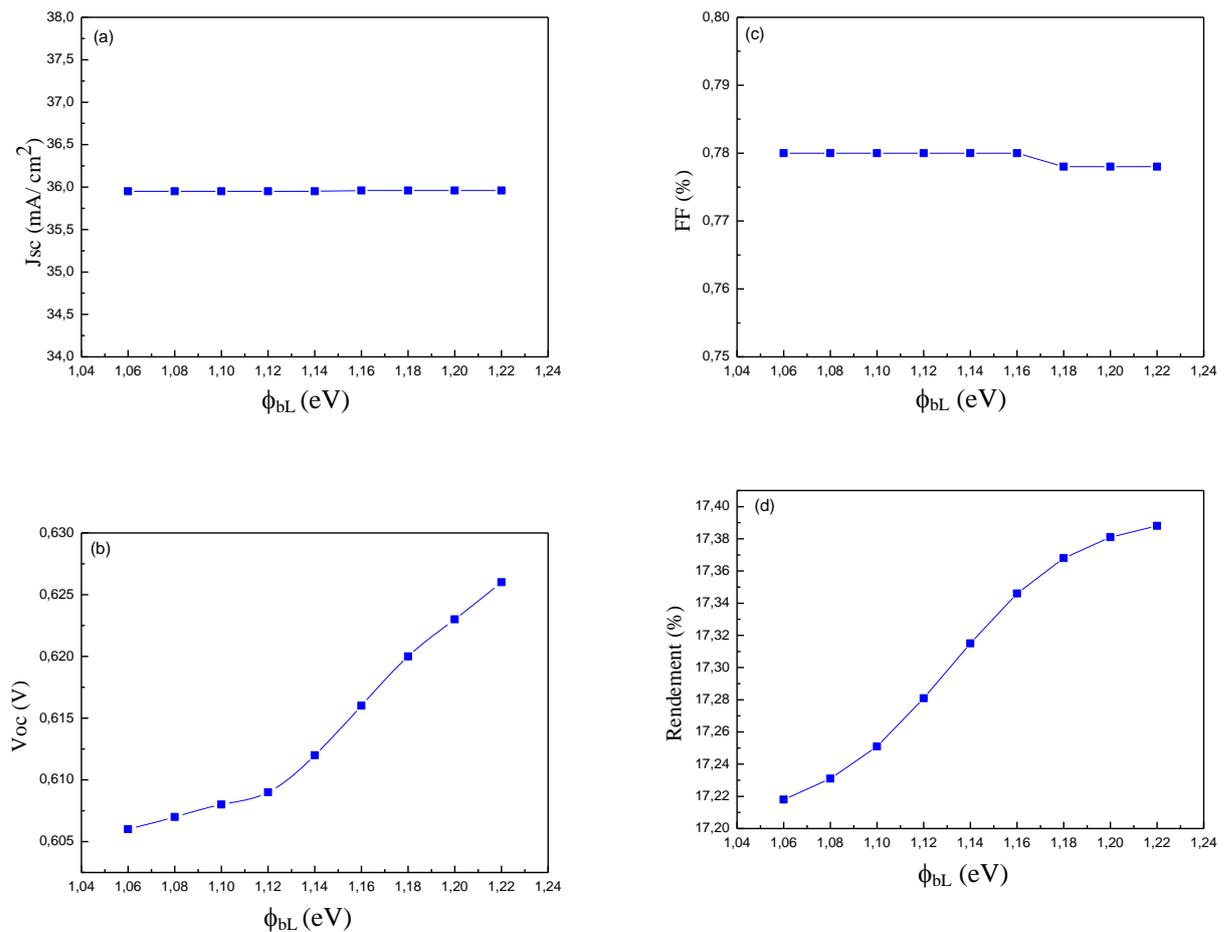


Figure IV.5 : Représentation graphique des paramètres photovoltaïques de la cellule étudiée (Densité de courant de court-circuit J_{sc} (a), tension de circuit ouvert V_{oc} (b), facteur de forme FF (c) et rendement (d)) en fonction de ϕ_{bL} .

La figure IV.6 représente la variation du champ électrique sous illumination en fonction de la position dans le dispositif pour $\phi_{bL} = 1,06$ et $1,22$ eV. Nous pouvons remarquer sur ce graphique une augmentation du champ électrique au niveau de la face arrière de la cellule lorsque la valeur de ϕ_{bL} augmente.

L'augmentation de ce champ électrique va laisser davantage de trous photogénérés passer de la couche p-c-Si jusqu'à l'Aluminium. L'augmentation du champ électrique provoque ainsi une augmentation du Voc qui passe de 0.60 à 0.63 V, ce qui conduit à une augmentation du rendement de conversion de la cellule solaire de 17,21 à 17,38 %.

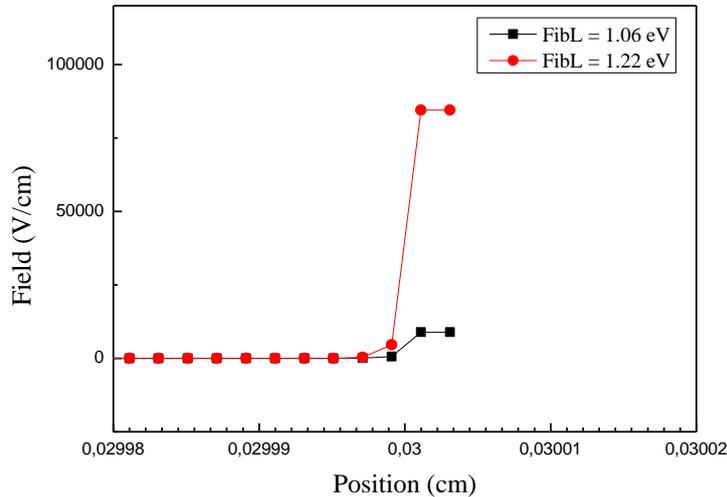


Figure IV.6 : Représentation graphique du champ électrique au niveau de la face arrière de la cellule HIT p-c-Si sous éclairage pour $\phi_{bL} = 1.06$ eV et 1.22 eV.

Ces résultats démontrent qu'un métal possédant un grand travail de sortie à l'arrière des cellules solaire HIT de type p-c-Si améliore les rendements de ce type de cellule. Le choix du métal comme le palladium, le chrome ou le ruthénium qui possèdent de des travaux de sorties élevés pourrait être le meilleur choix comme contact arrière pour ce type de cellule solaire.

IV.5 Optimisation du contact avant de la cellule solaire HIT p-c-Si

Nous allons procéder dans la deuxième partie de ce chapitre IV à une optimisation du contact avant de la cellule solaire HIT p-c-Si afin de faire une étude comparative du choix des contacts avant et arrière de ces cellules. A cet effet, nous allons remplacer l'ITO par d'autres matériaux avec différents travaux de sorties.

Une étude antérieure a montré qu'une augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} au niveau du contact TCO/semiconducteur (ITO/n-a-Si :H) ne conduit à aucune augmentation des rendements des cellules solaires HIT p-c-Si [3]. Pour confirmer ces résultats, nous allons dans nos simulations changer le E_{sbb} en utilisant l'équation 2 déduite de la figure IV.2 qui représente le diagramme de bande de conduction et de valence au niveau du contact ITO/n-a-Si :H.

$$\phi_{b0} = E_{ac} \pm E_{sbb} \quad (2)$$

Nous allons augmenter la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} pour permettre à la courbure de bande de passer du bas vers le haut (c'est-à-dire changement de l'ITO par des matériaux ayant des travaux de sorties plus grands). Nous avons fait varier le E_{sbb} ($0.09 \text{ eV} < E_{sbb} < 0.07 \text{ eV}$) de façon à obtenir $0.12 \text{ eV} < \phi_{b0} < 0.28 \text{ eV}$.

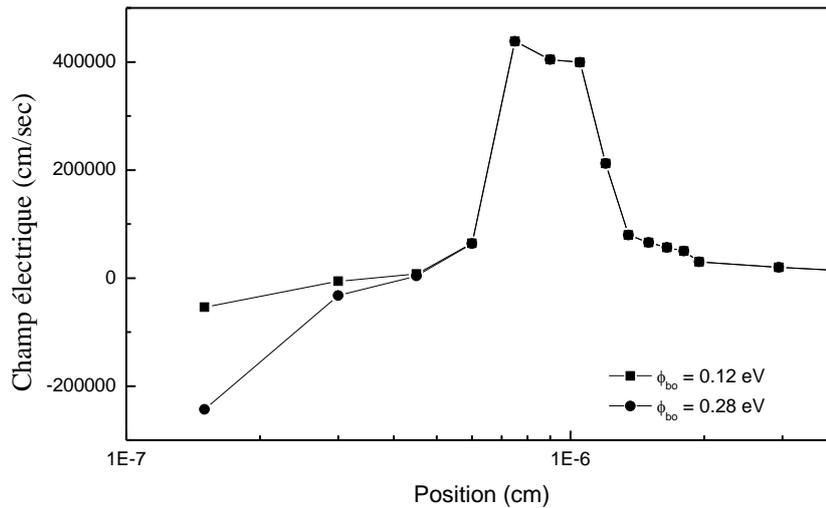


Figure IV.7 : Représentation graphique du champ électrique sous éclairage de la cellule HIT p-c-Si pour $\phi_{b0} = 0.12$ et 0.28 eV .

La figure IV.7 représente la variation du champ électrique de la cellule solaire étudiée pour deux valeurs du ϕ_{b0} . Une nette augmentation du champ électrique entre l'ITO et la couche n-a-Si :H est obtenue lorsque la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} augmente.

La grande intensité du champ électrique va faciliter le passage des trous photogénérés vers le TCO, ce qui mènera normalement à une augmentation du rendement. Nous avons de la même manière tracé la densité des porteurs libres des électrons sous éclairage de la cellule HIT p-c-Si pour $\phi_{b0} = 0.12 \text{ eV}$ et 0.28 eV (figure IV. 8). Nous remarquons qu'une augmentation de ϕ_{b0} mène à une augmentation de la densité des porteurs libres des électrons à l'interface (ITO/n-a-Si :H). Cette augmentation va normalement engendrer une amélioration des caractéristiques des cellules étudiées.

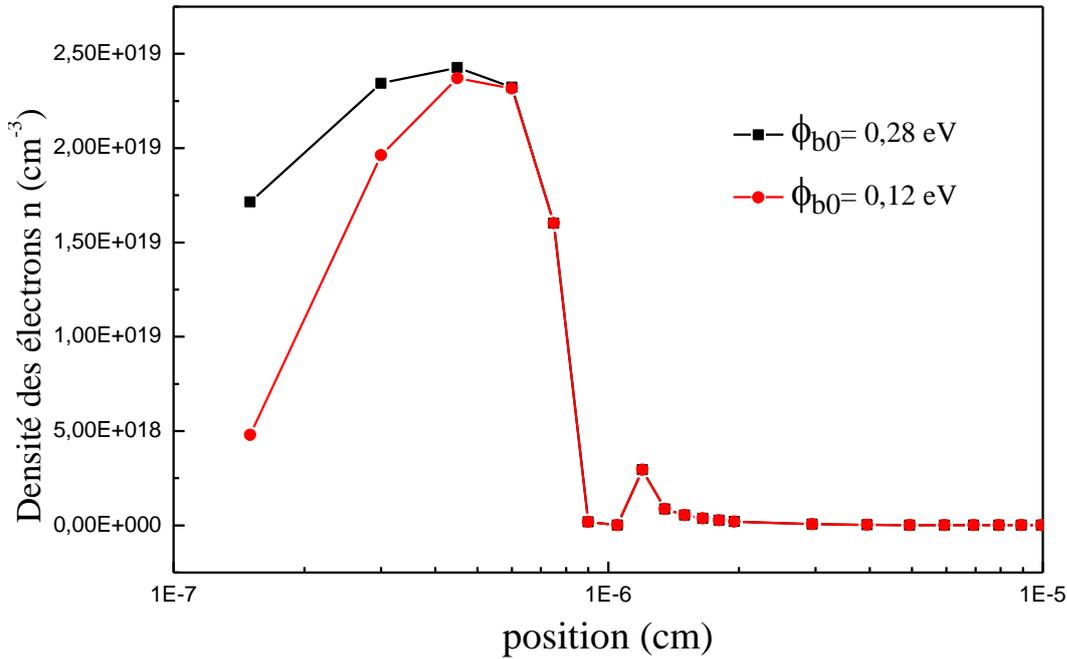


Figure IV.8: Représentation graphique de la variation de la densité des porteurs libres des électrons sous éclairage de la cellule HIT p-c-Si pour $\phi_{b0} = 0,12 \text{ eV}$ et $0,28 \text{ eV}$.

Le graphes IV.9 (a-d) représente la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du ϕ_{b0} dans la structure ITO/n-a-Si:H/i-pm-Si:H/p-c-Si/Al sous éclairage. Le courant de court-circuit J_{sc} (a), la tension de circuit ouvert V_{oc} (b), le facteur de forme FF (c) et le rendement η (d) en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} .

Nous remarquons que malgré l'augmentation du champ électrique et l'augmentation de la densité des électrons au niveau du contact ITO couche du silicium amorphe dopé n, aucun changement n'est observé, ni sur la tension en circuit ouvert V_{oc} ni sur le facteur de forme. La faible augmentation pour le courant de court-circuit n'engendre pas un changement majeur sur le rendement des cellules HIT p-c-Si étudiées.

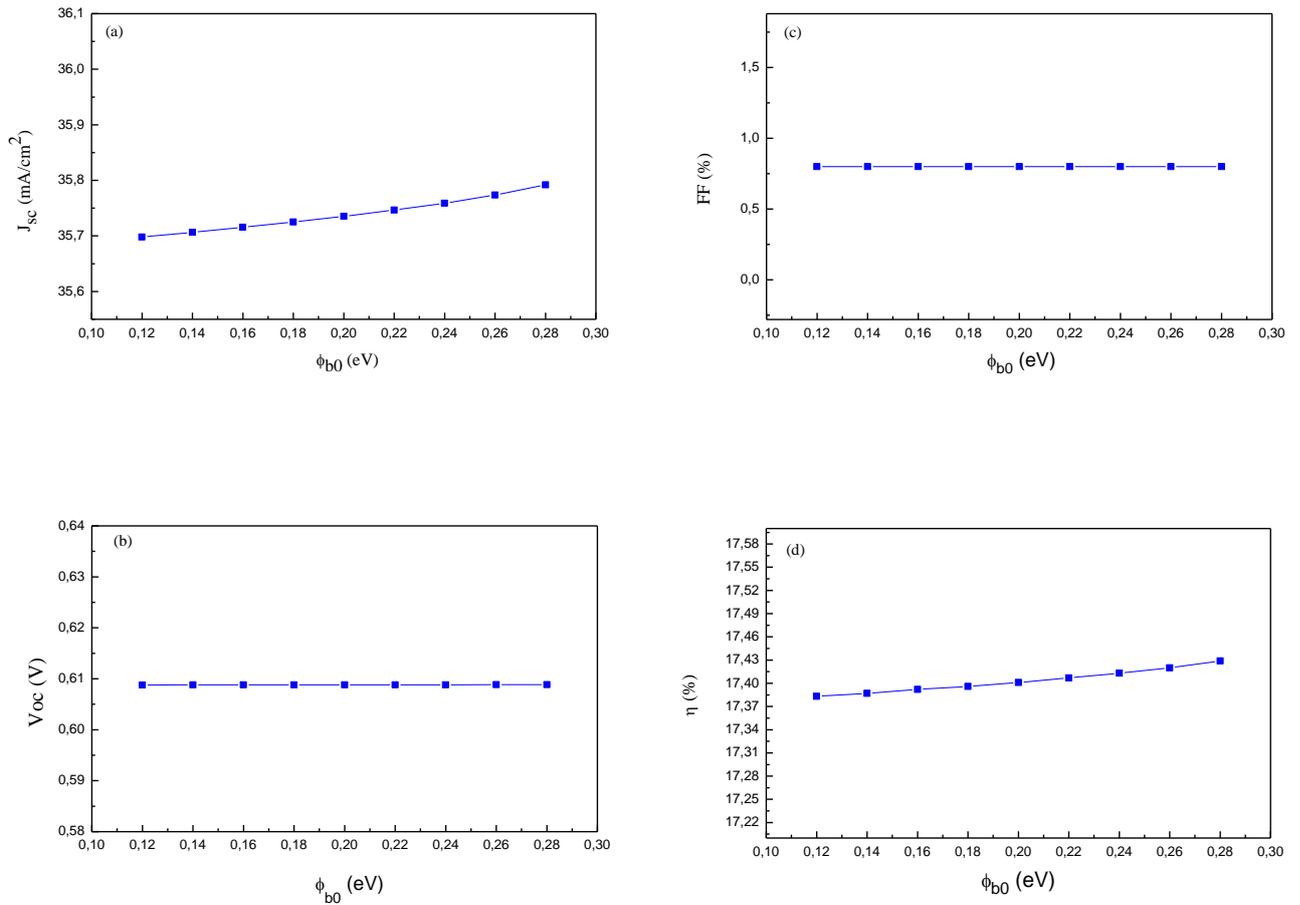


Figure IV.9 : Variation des paramètres photovoltaïque (courant de court-circuit J_{sc} (a), tension de circuit ouvert V_{oc} (b), Facteur de Forme FF (c) et rendement η (d)) sous éclairement de la cellule HIT p-c-Si en fonction de ϕ_{b0}

Une augmentation de ϕ_{b0} entre le métal et la couche n engendre une courbure de bande vers le haut créant une barrière de potentiel pour les électrons limitant ainsi leur passage vers le métal, ce qui ne va pas avoir une influence sur les rendements de ce type de cellules solaires.

Ces résultats nous informent que changer l'ITO par des matériaux possédant des travaux de sortie plus grand n'améliorent pas les paramètres de sorties des cellules HIT p-c-Si.

IV.6 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons étudié des cellules solaires à hétérojonction de type HIT p-c-Si. Pour faire une étude comparative avec les résultats trouvés dans le chapitre III,

nous avons étudié l'influence des différents matériaux au niveau des contacts avant et arrière (ITO/p-a-Si: H et n-c-Si/Al) sur les performances de ce types de cellules solaires.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel ASDMP.

Les différents résultats obtenus nous ont permis de conclure que :

Au niveau du contact avant de la cellule (TCO / silicium amorphe hydrogéné dopé n), le choix du matériau possédant un travail de sortie plus grand n'améliore pas les paramètres de sortie des cellules.

Au niveau du contact arrière (silicium cristallin dopé p/Aluminium), les performances des cellules étudiées dépendent du matériau utilisé. En effet, contrairement au contact avant, une augmentation de la hauteur de la barrière de contact arrière ϕ_{bL} entraîne une flexion de la bande vers le haut au niveau de la bande de valence.

L'augmentation du travail de sortie du métal à l'arrière de ce type de cellule élimine la barrière pour les trous ce qui va permettre à davantage de trous photogénérés de passer du silicium cristallin au métal.

L'augmentation du champ électrique provoque une augmentation de Voc qui conduit à une augmentation du rendement de la cellule solaire de 17,21 à 17,38%.

Ces résultats montrent que le choix du travail de sortie du métal à l'arrière de la cellule solaire HIT de type p c-Si est déterminant pour améliorer les rendements de ce type de cellule.

Le choix d'un métal avec un travail de sortie élevé comme le palladium, le chrome ou le ruthénium pourrait être le meilleur choix comme contact arrière pour l'optimisation de ce type de cellule solaire.

Références

[1] Hölzl, J., and Schulte, F. K., Work Functions of Metals, in *Solid Surface Physics*, Höhler, G., Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1979

[2] O. Tosoni, Ph.D. Thesis, Conception, élaboration et intégration d'électrodes transparentes optimisées pour l'extraction des charges dans des dispositifs photovoltaïques, Université de Grenoble, France, 2013.

[3] D. Rached, H. Madani Yssaad, W.L. Rahal, J. Nano- Electron. Phys. N°5 05012 (2018).

[4] R. Jaramillo and S. Ramanathan, Solar Energy Materials & Solar Cells Kelvin force microscopy studies of work function of transparent conducting ZnO:Al electrodes synthesized

under varying oxygen pressures, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, pp. 602–605, 2011.

[5] J. Jia, A. Takasaki, N. Oka and Y. Shigesato, Experimental observation on the Fermi level shift in polycrystalline Al-doped ZnO films, *Journal of Applied Physics*, 112, p. 013718, 2012.

[6] W.L. Rahal, D. Rached, *J. Nano- Electron. Phys.* Vol 9 N° 4, 04001 (2017).

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

La production d'électricité en utilisant les énergies renouvelables présente de nombreux avantages. Leur emploi est en pleine croissance depuis quelques dizaines d'années. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire et en particulier l'énergie photovoltaïque. La production d'électricité par système photovoltaïque est un des moyens le plus écologique actuellement afin de résoudre les problèmes liés au bouleversement climatique planétaire causé par l'homme moderne.

Nous avons choisi d'étudier dans cette thèse les cellules solaires HIT. Ces cellules solaires présentent des avantages, par rapport aux autres technologies photovoltaïques au silicium cristallin, en termes de basses températures de fonctionnement. En termes de rendement de conversion, en 2013, un rendement de conversion de 24,7 % a été atteint et un record de plus de 26.5 % a été atteint en 2020.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons présenté tout ce qui est en rapport avec le solaire photovoltaïque (avantages et des inconvénients, principe de fonctionnement, comportement d'une jonction p-n à l'équilibre, modèle électrique équivalent, caractéristiques Courant-Tension $J(V)$...etc.).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté tout ce qui est en rapport avec les cellules à hétérojonction (évolution historique, principe physique, modélisation, logiciels de simulation). Le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) que nous avons utilisé dans nos simulations a été présenté dans ce chapitre. Ce code de calcul a été développé par P.Chatterjee et validé par l'équipe de recherche du laboratoire LPICM (Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces) de l'école Polytechnique de Paris.

Dans le troisième et quatrième chapitre, nous avons étudié les cellules solaires à hétérojonction de type HIT n-c-Si (oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si:H)/ silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si:H)/silicium cristallin dopé n (n-c-Si)/Aluminium (Al)) et HIT p-c-Si (oxyde d'indium et d'étain (ITO)/silicium amorphe hydrogéné dopé n (n-a-Si:H)/ silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque (i-pm-Si:H)/silicium cristallin dopé p (p-c-Si)/Aluminium (Al)) respectivement.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'influence de la jonction TCO/semiconducteur au niveau de la face avant de la cellule et de la jonction métal-semiconducteur au niveau de la face arrière de la cellule sur les performances de ces deux types de cellules solaires.

Les différents résultats obtenus lors de nos simulations nous ont permis de conclure que :

- Pour les cellules HIT n-c-Si, au niveau de la face arrière, une augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{bL} détériore les paramètres de sortie de la cellule.

Le rendement diminue et par conséquent, l'Aluminium reste le meilleur métal pour l'élaboration du contact arrière de ce type de cellule car il a un travail de sortie égale à 4,06 eV considérée comme l'un des plus petits par rapport aux autres métaux.

Par contre, au niveau de la face avant de la cellule, l'augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} élimine la barrière pour les trous améliorant ainsi les paramètres photovoltaïques. Expérimentalement, augmenter la hauteur de la barrière de potentiel du contact avant peut se faire en choisissant un TCO avec un travail de sortie élevé. L'oxyde de zinc (ZnO) avec un travail de sortie égal à 5,2 eV pourrait être le meilleur TCO pour ce type de cellule solaire.

- Pour les cellules HIT p-c-Si, au niveau du contact avant, le choix du matériau possédant un travail de sortie plus grand n'améliore pas les paramètres de sortie des cellules.

Au niveau du contact arrière, les performances des cellules étudiées dépendent du matériau utilisé. En effet, contrairement au contact avant, une augmentation de la hauteur de la barrière de contact arrière ϕ_{bL} élimine la barrière pour les trous ce qui va permettre à davantage de trous photogénérés de passer du silicium cristallin vers le métal.

L'augmentation du champ électrique provoque une augmentation de Voc qui conduit à une augmentation du rendement des cellules solaires. Le choix du travail de sortie du métal à l'arrière de la cellule solaire HIT de type p c-Si est déterminant pour améliorer les rendements de ce type de cellule.

Le choix du métal un travail de sortie élevé comme le palladium, le chrome ou le ruthénium pourrait être le meilleur choix comme contact arrière pour ce type de cellule solaire.

Ces travaux nous a permis de répondre à quelques questions, néanmoins, des perspectives de recherches restent ouvertes :

- Des dépôts expérimentaux sur les deux types de cellules HIT étudiées seront nécessaires pour confirmer les résultats obtenus.
- L'étude de l'influence de la densité d'état de l'interface présente entre les jonctions métal et le semiconducteur (de type p et n) par rapport à la variation de la barrière de

potentiel à l'avant et à l'arrière des HIT serait essentielle, sachant qu'elle joue un rôle déterminant dans la qualité des cellules photovoltaïques.

- L'étude de la sensibilité des durées de vie des porteurs minoritaires τ dans la couche active des deux structures HIT serait intéressante et cela en faisant varier les sections efficaces de capture des défauts chargés et neutres dans les queues de bandes et dans le gap.

ANNEXE: PRODUCTION SCIENTIFIQUE