



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Thème

Simulation des performances des cellules photovoltaïques à
hétérojonction : GaInP /GaAs

Réalisé par :
Mallek Asma

Devant le jury composé de :

M ^{lle} . Boudaoud Chahrazad	MCB	UAMOB	Encadreur
M. Touka Nassim	MCA	UAMOB	Examineur
M ^{me} . Mahdid Saida	MAA	UAMOB	Examineur

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant tout développement, nous remercions Dieu pour la force et la santé qu'il nous a accordées pour mener ce travail à terme.

Je tiens également à exprimer à ma promotrice Boudaoud Chahrazad mes respectueuses gratitude. J'ai été très sensible à sa grande disponibilité, ses nombreux conseils et orientations. Ses précieux encouragements nous ont permis le bon déroulement et l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont aux membres de jury Madame Mahdid Saida et Monsieur Touka Nassim d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

J'exprime mes profondes gratitude et reconnaissance à mes parents et toute ma famille pour leur soutien et confiance.

En fin mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la lumière de ma vie, mes très chers parents :

Il n'y a pas de meilleurs mots à utiliser aujourd'hui que "Merci" Mama et Papa pour votre amour infini et votre sacrifice. Vous m'avez donné le plus beau des cadeaux ; l'éducation ; le meilleur héritage que les parents puissent transmettre à leurs enfants .je vous souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé et je vous dois mes succès.

Mes très chères sœurs qui m'ont toujours encouragé : Abir, Fatin ,Wissal .

A mes frères : Abed Alhakim , Anes.

A mes Amies.

A Toute la promotion 2021/2022.

Merci et bon courage à toutes mes amies d'étude de la spécialité Physique des Matériaux

A tout ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque présente une solution alternative importante aux combustibles fossiles, c'est une énergie propre et durable. Une cellule solaire est un dispositif électrique qui directement convertit l'énergie des photons en courant continu par un phénomène physico-chimique appelé l'effet photovoltaïque. La première cellule photovoltaïque à base de silicium est fabriquée en 1954, avec un rendement rapporté de 6%. Aujourd'hui d'autres matériaux alternatifs sont utilisés en parallèle avec le silicium, dont on trouve les matériaux III-V, notamment, GaInP et GaAs. L'objet de ce travail est d'optimiser les performances d'une cellule solaire à base des semi-conducteurs GaInP et GaAs. L'étude a été effectuée en utilisant le logiciel de simulation SCAPS-1D. La cellule modélisée a une structure à double hétérojonction (tandem) composée d'une cellule supérieure de type pn à base de GaInP et une cellule inférieure de type pn à base de GaAs. Les résultats obtenus donnent un rendement de conversion égal à 32.67 %.

Mots clés : Semi-conducteur III-V, cellule solaire à hétérojonction, simulation numérique, SCAPS-1D.

ملخص

تقدم الطاقة الشمسية الكهروضوئية حلاً بديلاً مهماً للوقود الأحفوري ، فهي طاقة نظيفة ومستدامة. الخلية الشمسية عبارة عن جهاز كهربائي يحول طاقة الفوتون مباشرة إلى تيار مباشر من خلال ظاهرة فيزيائية كيميائية تسمى التأثير الكهروضوئي. تم تصنيع أول خلية كهروضوئية قائمة على السيليكون في عام 1954 ، بكفاءة تبلغ نسبة 6%. تُستخدم اليوم مواد بديلة أخرى بالتوازي مع السيليكون ، والتي نجد منها مواد III-V ، على وجه الخصوص ، GaAs و GaInP . الغرض من هذا العمل هو تحسين أداء الخلية الشمسية بناءً على أشباه الموصلات GaInP و GaAs. أجريت الدراسة باستخدام برنامج محاكاة SCAPS-1D تحتوي الخلية المنمذجة على بنية مزدوجة غير متجانسة (ترادفية) تتكون من خلية من نوع pn تستند إلى GaInP و خلية من نوع pn تستند إلى GaAs. النتائج التي تم الحصول عليها تعطي عائد تحويل يساوي 32.67%.

الكلمات المفتاحية: أشباه الموصلات ، خلية شمسية غير متجانسة ، محاكاة رقمية ، SCAPS-1D

Abstract

Solar photovoltaic energy is an important alternative to fossil fuels; it is a clean and sustainable energy. A solar cell is an electrical device that directly converts photon energy into direct current through a physical-chemical phenomenon called the photovoltaic effect. The first silicon-based photovoltaic cell was developed in 1954, with a reported efficiency of 6%. Today, other alternative materials are used in parallel with silicon, including III-V materials, notably, GaInP and GaAs. The aim of this work is to optimize the performances of a solar cell based on GaInP and GaAs semiconductors. The study was performed using the SCAPS-1D simulation software. The modeled cell has a double heterojunction (tandem) structure composed of a GaInP-based top pn cell and a GaAs-based bottom pn cell. The results obtained give conversion efficiency equal to 32.67%.

Keywords: III-V semiconductor, heterojunction solar cell, numerical simulation, SCAPS-1D.

TABLE DE MATIERE

Remerciements	2
Dédicaces	3
Résumé	4
ملخص.....	4
Abstract	5
Table de matière	6
Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
INTRODUCTION GENERALE	1
I.2 Rayonnement solaire	5
I.2.1 Spectre solaire	5
I.2.2 Masse d'air	6
I.3 Semi-conducteurs.....	7
I.3.1Semi-conducteurs intrinsèque	7
I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèque	8
I.3.2.1 Semi-conducteur dopé N	8
I.3.2.2 Semi-conducteur dopé P :	8
I.4 Cellule solaire photovoltaïque	9
I.4.1 Structure d'une cellule solaire	9
I.4.1.1 Texturation	10
I.4. 1.2 Contacts face avant et arrière.....	10
I.4.1.3 La couche fenêtre (OTC).....	11
I.4.1.4 BSF	11

I.4.1.5 Couche antireflet.....	12
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	12
I.4.2.1 La jonction pn	12
1.4.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	13
I.4.3.1 Circuit électrique équivalent V.....	13
I.4.3.2 Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V=0$).....	15
I.4.3.3 Tension à circuit ouvert V_{CO}	15
I.4.3.4 Facteur de forme.....	15
I.4.3.5 La puissance maximale (P_{max})	16
I.4.3.6 Rendement de conversion η :.....	16
I.4.4 Rendement quantique et réponse spectrale.....	16
I.5 Conclusion	17
Références	18
II.1 Introduction	21
II.2 La cellule solaire à multi jonction	21
II.2.1 Le choix de la structure GaInP/ GaAs	22
II.2.2 La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs	22
II.3 Propriétés des matériaux utilisés	23
II.3.1 Le matériau GaInP	23
II.3.1.1 Structure cristalline de GaInP	23
II.3.1.2 Propriétés électriques et physiques du GaInP	24
II.3.2 L'Arséniure de gallium (GaAs).....	25
II.3.2.1 Structure cristalline de GaAs	25
II. 3.2.2 Structure des bandes d'énergie de GaAs	26
II. 3.2.3 Propriétés électriques et physiques du GaAs.....	27

II.3.3 Propriétés optiques.....	27
II.4 Conclusion.....	28
Références	29
III.1 Introduction	31
III.2 Présentation du logiciel de simulation	31
III.2.1 Le fonctionnement du SCAPS-1D.....	31
III.3 Simulation d'une structure à double hétérojonction à base de GaInP/GaAs.....	35
III.3.1 Présentation de la structure simulée	35
III.3.2 Résultats de simulation	36
III.3.2.1 L'influence de l'épaisseur de la couche p-GaInP	36
III.3.2.2 L'influence de l'épaisseur de la couche n-GaInP	37
III.3.2.3 L'influence de l'épaisseur de la couche p-GaAs	38
III.3.2.4 L'influence de l'épaisseur de la couche n-GaAs	39
III.3.2.5 Paramètres électriques optimisés	40
III.3.2.6 L'influence de la température	41
III.4 Conclusion	43
Références	44
CONCLUSION GENERALE	45

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1: Spectre solaire [3].	6
Figure I- 2: Définition de l'Air Mass.	6
Figure I- 3: structure en bandes d'énergie des matériaux : insolant, semi-conducteurs et métaux.	7
Figure I- 4: Types de semi-conducteurs extrinsèques au zéro absolu [7].	9
Figure I- 5: schéma d'une cellule solaire standard [8].	9
Figure I- 6: Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [8].	10
Figure I- 7: le principe du champ électrique BSF [12].	11
Figure I- 8: Couche antireflet.	12
Figure I- 9: Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium et illustration des phénomènes de photo-génération et de collecte des porteurs de charges pour différentes longueurs d'onde (différentes profondeurs de pénétration des photons).	13
Figure I- 10: circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure I- 11: Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire sous éclairement [15].	14
Figure II- 1: La cellule solaire à hétérojonction [2].	22
Figure II- 2: Extrait du tableau périodique des éléments de Mendeleïev [4].	23
Figure II- 3: Structure cristalline de GaInP [5].	24
Figure II- 4: Structure cristalline du GaAs [4].	26
Figure II- 5: Structure de bande d'un semi-conducteur à gap (a) direct et (b) indirect [3].	27
Figure III- 1: Fenêtre principale du simulateur solaire SCAPS-1D (Version 2. 9. 4).	32
Figure III- 2: Présentation d'une structure sous SCAPS-1D. (a) Panneau de définition de la cellule solaire, (b) Panneau définissant les propriétés de chaque couche.	33
Figure III- 3: Panneau décrivant les propriétés des contacts de la cellule solaire.	33
Figure III- 4: Panneau décrivant le mode de Simulation Batch.	34
Figure III- 5: Panneau des courbes des résultats de la simulation.	35
Figure III- 6: Structure simulée.	35
Figure III- 7: Caractéristique $I(V)$ de la structure de base simulée.	36

Figure III- 8: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de p-GaInP.	37
Figure III- 9: , VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de n-GaInP.	38
Figure III- 10: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de p-GaAs.	39
Figure III- 11: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de n-GaAs.	40
Figure III- 12: Caractéristique I(V) de cellule solaire optimisée.	41
Figure III- 13: Caractéristique I(V) en fonction de la température.	42
Figure III- 14: ICC, VCO, FF, et η en fonction de la température.	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II- 1: Propriétés électroniques et cristallines du matériau $GaxIn_{1-x}P$ à 300 K .. 25

Tableau III- 1: Epaisseurs optimisées. 40

INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie est nécessaire pour le développement économique et social. La source principale de l'énergie électrique est produite par des ressources non renouvelables telles que la combustion du carbone, pétrole, gaz, et le nucléaire. Cependant les réserves de ces derniers sont limitées et seront épuisées dans quelques décennies. En plus l'utilisation de ce type de production d'énergie est très toxique et il est responsable du réchauffement de la planète et l'émission des gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables sont les énergies alternatives et non polluantes telles que l'éolienne, géothermie et l'énergie solaire [1].

L'une des énergies renouvelable très utilisée dans le monde, non polluante, est le solaire photovoltaïque. Ce dernier reposant sur la transformation directe des rayons lumineux du soleil en électricité possède un potentiel important parmi les différentes énergies renouvelables. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m^2 .

L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir :

- Energie maitrisable et adaptable aux situations de toutes les régions
- Frais de maintenance relativement faibles
- Permette de produire l'énergie électrique sans dégrader l'environnement
- Constitue des ressources pratiquement inépuisables.
- Les systèmes exigeant peu d'entretien, sont fiables, non polluants et silencieux [2].

Aujourd'hui, 94% de marche PV est base sur le silicium (Si), qui a un rendement maximal en laboratoire de 25,6%. Ce rendement est très proche de la limite théorique maximale de rendement pour une jonction simple. C'est-a-dire qu'afin de dépasser ce rendement, une jonction tandem est nécessaire. De nos jours, les rendements record au niveau laboratoire sont obtenus avec des multijonctions à base de matériaux III-V, comme montre dans la Figure 1. Malgré leurs bonnes performances, ces matériaux ont un cout de production élevé par rapport au Si. C'est la raison pour laquelle plusieurs groupes ont étudié l'incorporation des matériaux III-V avec Si pour réaliser une cellule solaire tandem a haut rendement et bas cout. Récemment, une jonction tandem InGaP/Si a été réalisée avec un rendement de 29,8%. Ce rendement est proche de celui de la cellule tandem InGaP/GaAs a rendement record pour une cellule a double jonctions de 31,6%, réalisée par Alta Device [3].

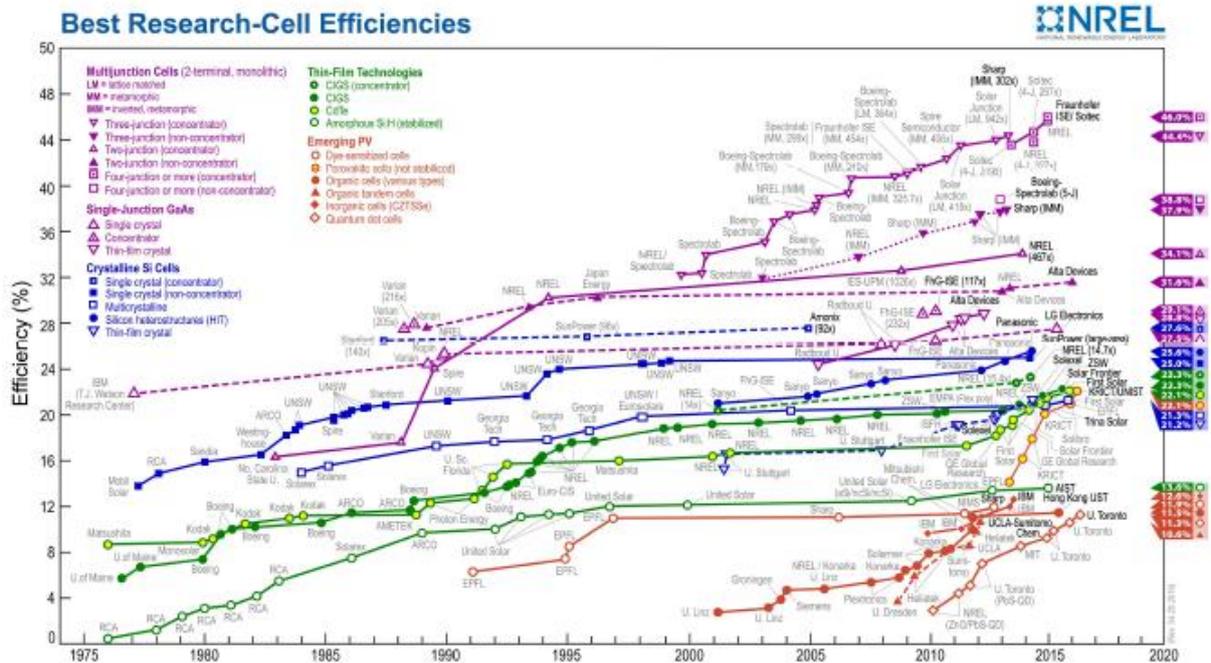


Figure 1: L'état de l'art des rendements records [4].

Le travail de mémoire est présenté de la manière suivante :

Le premier chapitre présente des notions importantes sur le rayonnement solaire, les semi-conducteurs, et le photovoltaïque. Ensuite, il décrit les constituants de la cellule solaire, et il explique le fonctionnement d'une cellule solaire et ses caractéristiques sous ensoleillement.

Le deuxième chapitre décrit les matériaux semi-conducteurs III-V ainsi que les principales propriétés des alliages : GaInP et GaAs.

Dans le troisième chapitre, nous abordons une présentation du logiciel de simulation SCAPS-1D utilisé dans cette étude et des résultats de simulation de la cellule solaire GaInP/GaAs modélisée.

Références

- [1] DJAAFAR Fatiha, Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques. 2018. Thèse de doctorat. Université Oran (USTOMB).
- [2] BENAICHA, Mouna. Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid.
- [3] EL-HUNI, Walid. Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V. 2016. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay (COMUE).
- [4] « Best Research-Cell Efficiency Chart ». <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (consulté le mars 30, 2020).

CHAPITRE I : L'énergie solaire photovoltaïque

I.1.Introduction

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie du photon en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière. Le terme « photovoltaïque » vient du grec « phos, photo » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité [1]. Dans ce premier chapitre nous allons définir le rayonnement solaire, la masse d'air, et le spectre solaire puis nous allons représenter les semi-conducteurs ; et nous allons terminer ce chapitre par la description des constituants, du principe de fonctionnement, et des caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.

I.2 Rayonnement solaire

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m²). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière. Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la terre avec une puissance d'environ 1 367 W/m².

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à laquelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation I.1 [2]:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec : h est la constante de Planck, ν est la fréquence (Hz), $c = 300\,000$ km/s est la vitesse de la lumière, et λ est la longueur d'onde (μm).

I.2.1 Spectre solaire

Le spectre solaire, en première approximation, s'apparente au spectre d'émission du corps noir à la température de 5250⁰C. La figure I-1 présente le spectre du corps noir à la température de 5250⁰C, le spectre du rayonnement solaire hors de l'atmosphère ainsi que celui au niveau de la mer avec les raies d'absorption de certains constituants de l'atmosphère comme la vapeur d'eau, l'oxygène et l'ozone [3].

Ces spectres montrent les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprise entre 0.2 μm (ultraviolet) et 4 μm (infrarouge); 97.5% de l'énergie est comprise dans la zone des

longueurs d'onde inférieures à $2.5 \mu\text{m}$, notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre 0.4 et $0.78 \mu\text{m}$ [4].

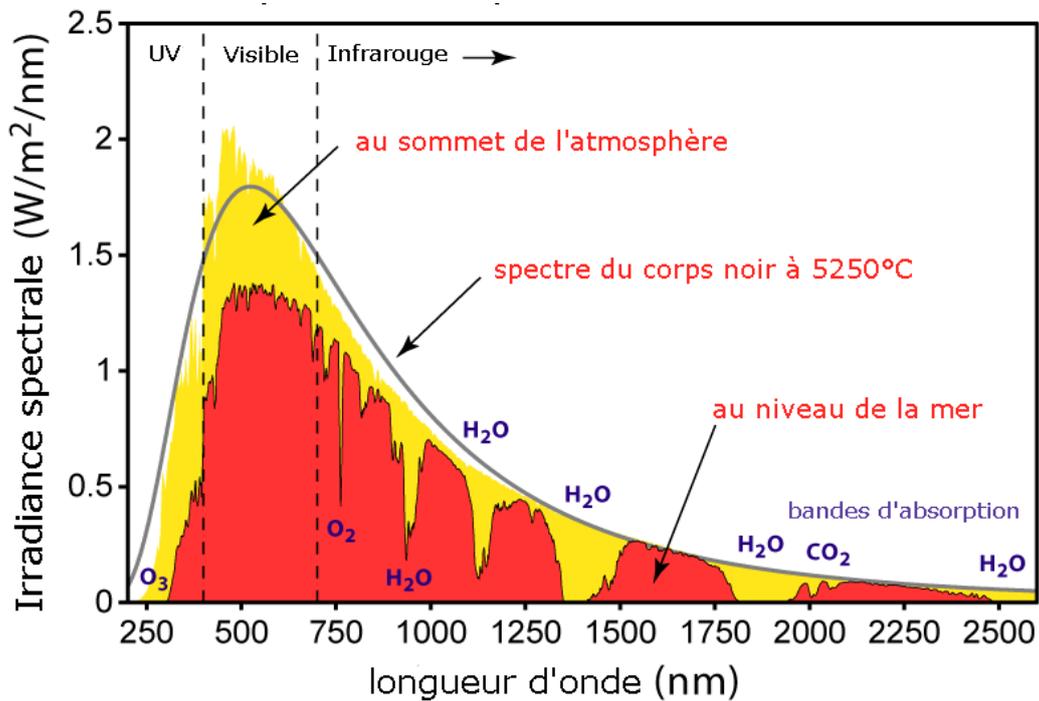


Figure I- 1: Spectre solaire [3].

I.2.2 Masse d'air

La notion d'air mass "masse d'air" a été entrée, afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde. Elle varie en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith.

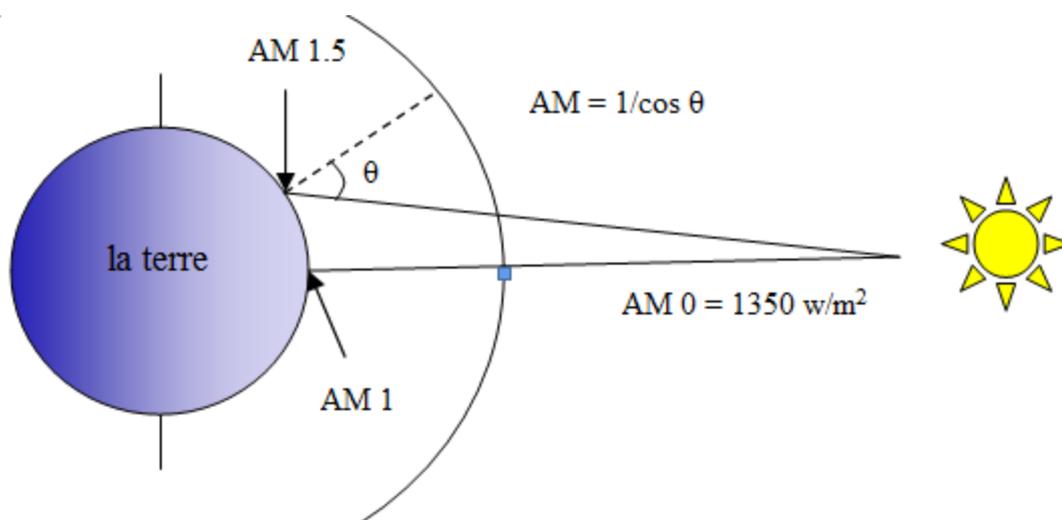


Figure I- 2: Définition de l'Air Mass.

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1367 W/m^2 (AM0) hors atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire global reçu au niveau du sol pour $\theta = 48^\circ$ (AM1.5) atteint 1000 W/m^2 , avec un petit arrondissement [5].

I.3 Semi-conducteurs

Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ varie de 10^{-3} à $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. La conduction électrique se fait par les électrons et les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs. Un semi-conducteur peut être soit pur (intrinsèque), soit dopé par des impuretés (extrinsèque) qui permettent de contrôler sa résistivité. Si on prend, par exemple, du Silicium assez pur et qu'on lui ajoute un atome de Bore ou de Phosphore pour atomes de Silicium, sa résistivité passe de 10^3 à environ $10^{-2} \Omega$. La figure I-3 présente les structures des bandes d'énergie de l'isolant, du semi-conducteur et du métal [6].

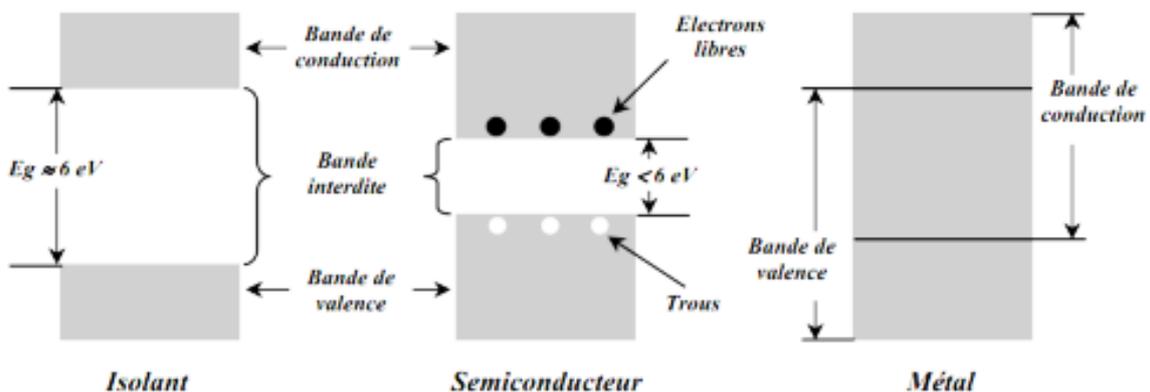


Figure I- 3: structure en bandes d'énergie des matériaux : isolant, semi-conducteurs et métaux.

I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèque

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Dans un semi-conducteur intrinsèque la concentration des électrons est identique à la concentration des trous. Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque n_i est obtenu en faisant : $n=p$, par conséquent :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} = \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \quad (I.2)$$

Aussi le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est très proche du milieu de la bande interdite à la température ordinaire. La concentration intrinsèque des porteurs de charge est donnée par [7] :

$$n_i^2 = n.p = N_C.N_V.exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (I.3)$$

I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèque

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes ou tout simplement dopants. On obtient alors un semi-conducteur extrinsèque ou dopé. Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p.

I.3.2.1 Semi-conducteur dopé N

Les atomes de silicium ou de germanium par exemple se cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons pour chaque liaison. Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (phosphore, arsenic ou antimoine), cet atome prend la place d'un atome du cristal : 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5^{ème} électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur N_d qui se situe juste en dessous de la bande de conduction.

I.3.2.2 Semi-conducteur dopé P :

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (bore, aluminium ou gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur N_a . Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides ; lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence [5].

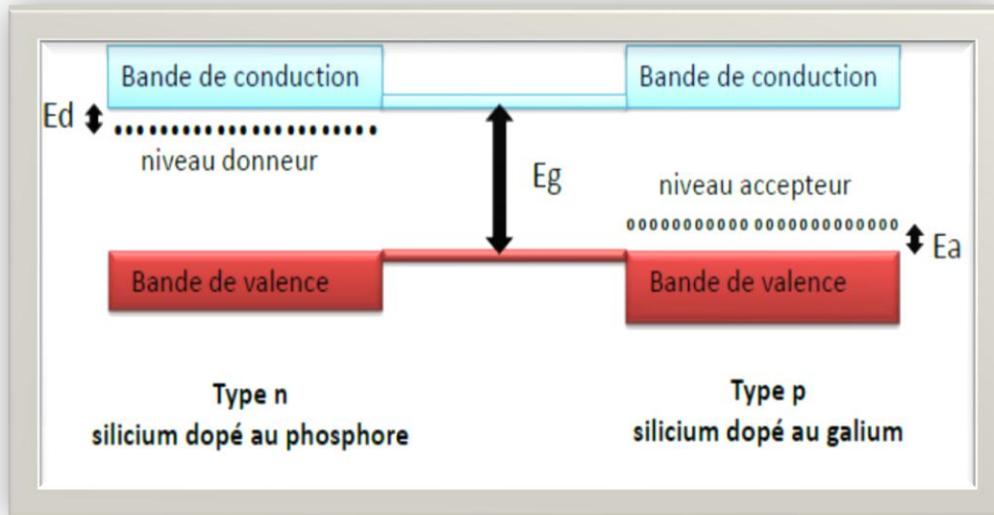


Figure I- 4: Types de semi-conducteurs extrinsèques au zéro absolu [7].

I.4 Cellule solaire photovoltaïque

I.4.1 Structure d'une cellule solaire

Les premières cellules solaires c-Si réalisées dans les années 1950 utilisaient des substrats de Type n (dopés Phosphore). À cette époque, leur première application n'était pas terrestre, mais spatiale, pour l'alimentation de satellites. Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules PV ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules PV a ensuite rapidement évolué, et abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la Figure I-5.

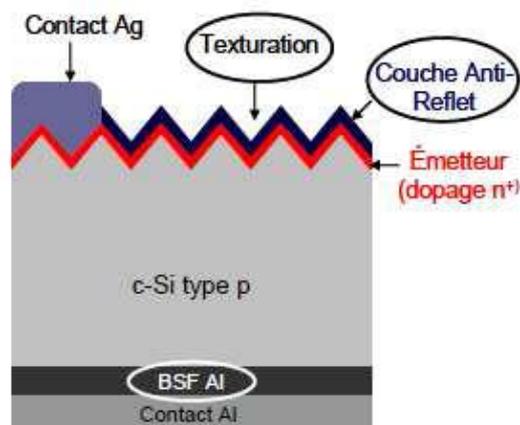


Figure I- 5: schéma d'une cellule solaire standard [8].

I.4.1.1 Texturation

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), allée à une couche antireflet, permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées (quelques μm). Dans le cas d'un double réflexion, le coefficient de réflexion total devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale de cette surface. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, TMAH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multi-cristallins [8].

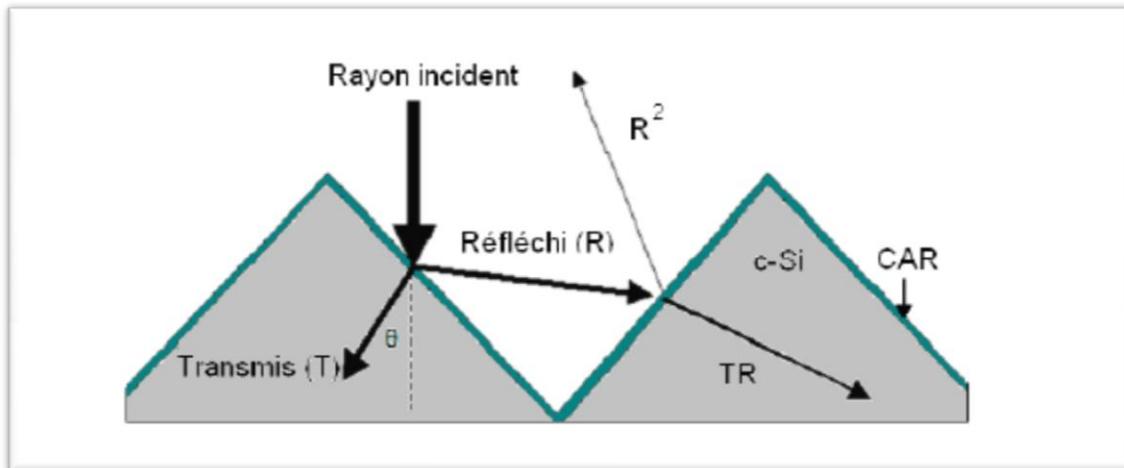


Figure I- 6: Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [8].

I.4. 1.2 Contacts face avant et arrière

Les contacts métallique à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés .les contacts doivent être ohmiques .c'est -à-dire que la caractéristiques $I=f(V)$ du contact doit être linéaire .la résistance des contacts est un paramètre très important .la forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. [7] Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont

généralement réalisés par sérigraphie. Pour la cellule photovoltaïque à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. [9]

I.4.1.3 La couche fenêtre (OTC)

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre. Cette couche nommée Souvent l'oxyde transparent conducteur (OTC), elle doit être à la fois conductrice et Transparente, de façon à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière où sa Transmission doit être supérieure à 80% dans le domaine du spectre solaire. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure $10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , et les plus utilisés sont l'oxyde d'indium et d'étain et l'oxyde de zinc (ZnO). Leur transparence est liée à la valeur de leur bande Interdite tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. La couche fenêtre permet de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque, son épaisseur est de l'ordre de 300 nm à 500 nm [10].

I.4.1.4 BSF

Un **BSF** (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure $P-P^+$. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le **BSF** tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison [11].

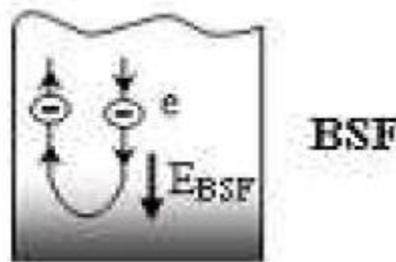


Figure I- 7: le principe du champ électrique BSF [12].

I.4.1.5 Couche antireflet

La couche antireflet est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière. Le Principe d'action est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la CAR est égal à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad (N=0, 1, 2, 3) \quad (I.4)$$

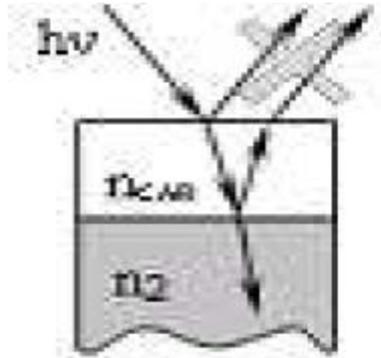


Figure I- 8: Couche antireflet.

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur [12].

I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

I.4.2.1 La jonction pn

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation se base sur trois mécanismes : l'absorption des photons incidents, la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique par la photo-génération de porteurs de charges (paires électron/trou) puis enfin la collecte de ces charges (collecte du courant). La génération des porteurs de charge provient de la migration énergétique des électrons de la bande de valence (BV) vers des niveaux d'énergie situés dans la bande de conduction (BC), grâce à l'énergie du photon incident qui doit être donc supérieure à la différence d'énergie entre ces deux bandes, appelée énergie de gap E_g .

Pour rendre possible la collecte des porteurs de charges générés, un champ électrique permettant de dissocier spatialement les paires électron/trou est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction pn, qui consiste à mettre deux régions dopées l'une de type p et l'autre de type n en contact. La Figure I-9 schématise une structure de cellule solaire type avec ses zones dopées et la jonction pn réalisée. La séparation des charges est alors induite par

le champ électrique produit par la différence des dopages : les électrons diffusent vers la zone dopée n, tandis que les trous diffusent vers la zone dopée p.

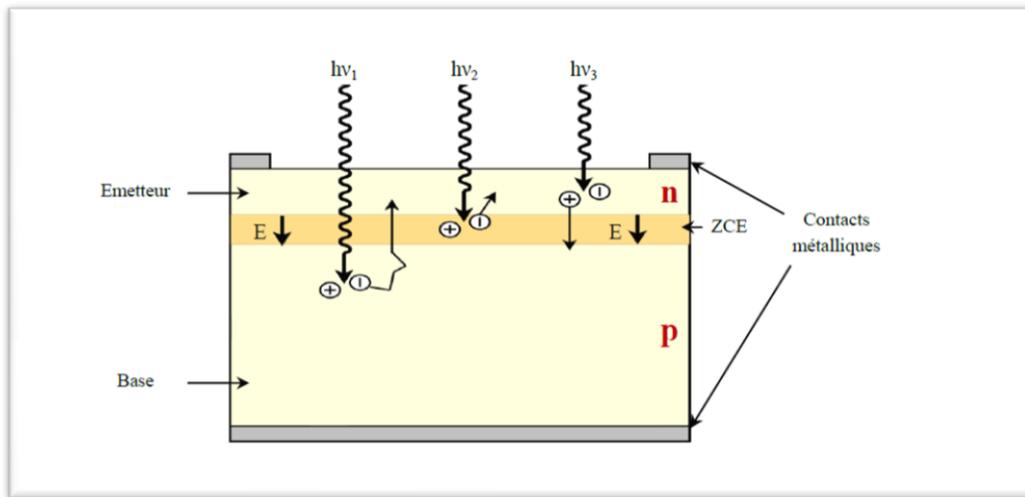


Figure I- 9: Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium et illustration des phénomènes de photo-génération et de collecte des porteurs de charges pour différentes longueurs d'onde (différentes profondeurs de pénétration des photons).

La différence de concentration de porteurs entre la zone dopée p et celle de type n produit un potentiel de diffusion V_d à la jonction des deux zones. Le potentiel de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE, voir Figure I-9). À l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée, et sa largeur est généralement inférieure à $1 \mu\text{m}$. On distingue alors dans la diode p/n, deux types de zones : les zones neutres (émetteur et base) où il n'y a aucun champ électrique, et la ZCE où le champ électrique intrinsèque accélère les porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. Lorsque la base et l'émetteur de la diode sont réalisés dans un seul et même matériau, on parle d'une structure à homo-jonction. Les structures à hétérojonction consistent quant à elles à mettre en contact deux matériaux différents pour réaliser la jonction [13].

1.4.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

I.4.3.1 Circuit électrique équivalent V

Comme le montre la Figure I-10, une cellule photovoltaïque idéale peut être modélisée comme une source de courant (I_{ph} le courant photogénèse) mise en parallèle avec une diode. Pour correspondre. Davantage à la réalité, une résistance parallèle (ou résistance de shunt,

notée R_{SH}) et une résistance série (notée R_S) sont ajoutées à ce modèle à une diode. Une cellule photovoltaïque performante à une résistance série la plus faible possible pour réduire les pertes en tension et une résistance parallèle la plus élevée possible pour minimiser le courant de fuite I_{sh} .

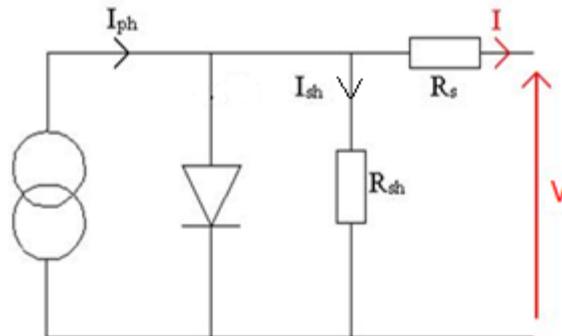


Figure I- 10: circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Afin de caractériser une cellule photovoltaïque, et de déterminer son rendement de conversion, on réalise des mesures courant-tension sous éclairage, dans des conditions standards : puissance lumineuse de 1000W/m^2 sous un spectre AM1.5, à une température de 25°C . La courbe de mesure présentée par la figure I-11 (caractéristique $I(V)$ sous éclairage). permet de déterminer la tension de circuit-ouvert (V_{OC}), la densité de courant de court-circuit (J_{SC}) et le facteur de forme (FF) de la cellule [14].

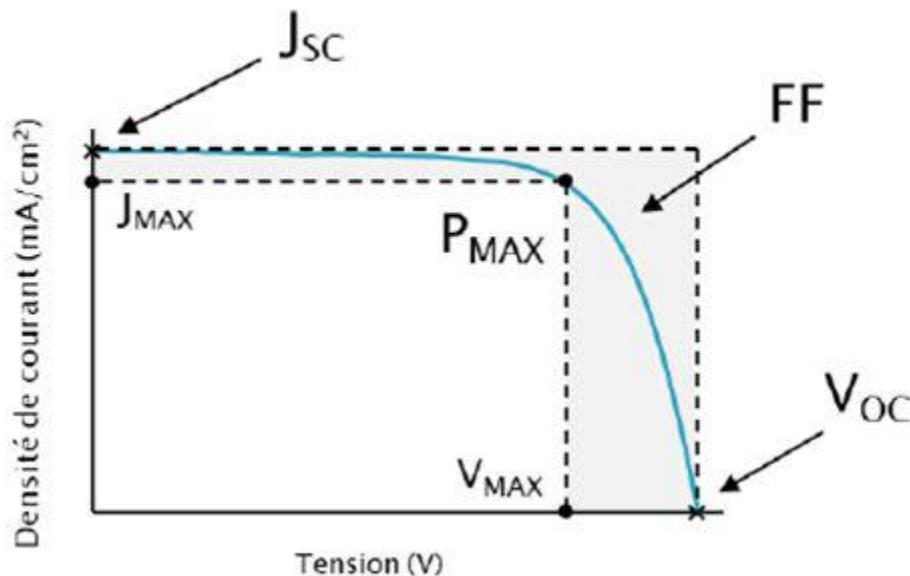


Figure I- 11: Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire sous éclairage [15].

I.4.3.2 Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V=0$)

Le courant de court-circuit I_{CC} est le courant maximum que l'on peut obtenir avec la cellule, en condition de court-circuit, il augmente en principe linéairement avec l'intensité d'illumination, dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la température [35] et de la mobilité des porteurs de charge. Il est donc très fortement corrélé à la morphologie de la couche active [16] :

$$I_{CC} = -I_{ph} \quad (I.5)$$

I.4.3.3 Tension à circuit ouvert V_{CO}

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclairagements supérieurs à 100 W/m^2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte). On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

Elle est liée au courant de court circuit I_{CC} et le courant de saturation I_S par une relation logarithmique :

$$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_S} + 1\right) \quad (I.6)$$

I.4.3.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_M , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{CO} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = \frac{P_M}{V_{CO} I_{CC}} = \frac{V_M I_M}{V_{CO} I_{CC}} \quad (I.7)$$

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle. Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension [17]

I.4.3.5 La puissance maximale (P_{max})

La puissance maximale, notée P_M , correspond à la puissance maximale fournie par la cellule solaire. Elle est calculée comme étant le produit entre le courant maximal I_M et la tension maximale V_M .

$$P_M = I_M \times V_M \quad (I.8)$$

Ainsi graphiquement elle correspond au rectangle de plus grande surface sous la courbe $I(V)$. La puissance idéale correspond plutôt au produit entre le I_{cc} et la V_{co} [15].

I.4.3.6 Rendement de conversion η :

Le rendement de conversion est aussi une caractéristique électrique importante de la cellule solaire et qui exprime le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule solaire et la puissance lumineuse qu'elle reçoit

$$\eta = \frac{P_M}{P_{inc}} = \frac{V_M I_M}{P_{inc}} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_{inc}} \quad (I.9)$$

Cette expression montre que les performances d'une cellule résultent directement des valeurs des trois paramètres I_{cc} , V_{co} , FF qui sont fonctions d'une part des propriétés spécifiques du matériau comme par exemple le gap, et d'autre part des paramètres technologiques du matériau tels que la profondeur de la jonction, l'épaisseur de la zone de charge d'espace, ou la présence de résistances parasites [17].

I.4.4 Rendement quantique et réponse spectrale

Le rendement quantique d'une cellule solaire est défini comme le rapport du nombre d'électrons dans le circuit externe produit par un photon incident d'une longueur d'onde donnée. Ainsi, on peut définir l'efficacité quantique externe et interne (noté par $EQE(\lambda)$ et $IQE(\lambda)$, respectivement). Ils diffèrent dans le traitement des photons réfléchis de la cellule : tous les photons impatant sur la surface de cellules sont pris en considération en valeur de l' EQE mais seulement les photons qui ne sont pas réfléchis sont considérés en valeur d' IQE . Si le rendement quantique interne est connu, le courant photogénéré total est donné par

$$I_{ph} = q \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \{1 - R(\lambda)\} IQE(\lambda) d(\lambda) \quad (I.10)$$

où : $\Phi(\lambda)$ est le flux de photon incident sur la cellule à la longueur d'onde λ .

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion de la surface supérieure.

λ est la longueur d'onde de la lumière absorbée par la pile solaire.

Les valeurs du rendement quantique interne et externe sont par habitude mesurées pour évaluer la performance d'une cellule solaire en employant des filtres ou des monochromateurs d'interférence.

La réponse spectrale (notée par $SR(\lambda)$), avec l'unité(A/W) est défini comme le rapport du phot courant produit par une cellule solaire sous illumination monochromatique d'une longueur d'onde donnée, à la valeur de l'irradiation spectrale à la même longueur d'onde. Depuis le nombre de photons et d'irradiation sont reliés, la réponse spectrale peut être écrite en termes de rendement quantique comme [18] :

$$SR(\lambda) = \frac{\lambda q}{hc} \times QE(\lambda) = 0.808 \times \lambda \times QE(\lambda) \quad (I.11)$$

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions essentielles du soleil et de rayonnement solaire, nous avons décrit la structure de base de la cellule solaire. Ensuite nous avons décrit le fonctionnement de la cellule en définissant la jonction p-n et en expliquant l'effet photovoltaïque. Enfin, nous avons parlé des paramètres électriques de la cellule photovoltaïque.

Références

- [1] EL AMIN, Ketfi Mohammed. Etude et adaptation des cellules biologiques photosensibles à des microsystèmes optoélectroniques. 2011. Mémoire de magistère. Université mohamed boudiaf des sciences et de la technologie d'oran.
- [2] MAROUF, Yacine. Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V. 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [3] EL GMILI, Youssef. Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque. 2013. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [4] BOUZIDI, Kamel. Etude Comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires. 2018. Thèse de doctorat.
- [5] AMER, Hamzaoui. Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin. 2012. Mémoire de magistère. Université de Sétif 1-Ferhat Abbas.
- [6] ELBAR, Mourad. Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco. 2018. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [7] MANCER, Mansoura. Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs). 2012. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [8] DJERIOUAT, K. Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions: GaInP/GaAs. 2010. Mémoire de Magister, Université Tlemcen.
- [9] OLEKSIY, Nichiporuk. Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités. Institut national des sciences appliquée de Lyon, 2005.
- [10] BOUANANI, Boualem, et al. Etude technologique et électrique des cellules solaires en couches minces à hétérojonctions ZnO/CdS/CIGS utilisant les logiciels Athena et Atlas de Silvaco. 2015. Thèse de doctorat.
- [11] MAROUF, Yacine. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco. 2013. Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra.

- [12] KROUR, Safia. Optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques. 2015. Mémoire de Magister. Université Setif.
- [13] CHAMPORY, Romain. Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées: conception électro-optique et développement technologique. 2016. Thèse de doctorat. Lyon.
- [14] RIVALLAND, Adrien. Elaboration et caractérisation de cellules solaires photovoltaïques tandem CuGaSe₂/silicium cristallin: vers une approche monolithique à deux terminaux. 2020. Thèse de doctorat. Nantes.
- [15] BERTRAND, Camille. Synthèse et étude de chromophores organométalliques pour cellules solaires hybrides à colorant et à hétérojonction volumique. 2018. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.
- [16] BRUHAT, Elise. Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés. 2019. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [17] BENSMAIN, Asmaa, et al. Investigation de l'ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonction a-Si: H/c-Si: Modélisation et simulation numérique. 2018. Thèse de doctorat.
- [18] ELBAR, Mourad. Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco. 2018. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra.

CHAPITRE II : Propriétés des matériaux III-V

II.1 Introduction

Les matériaux III-V sont des alliages des éléments du groupe III et du groupe V du tableau Mendeleïev. Ces alliages peuvent se constituer de deux éléments, les alliages binaires comme GaAs, InP, AlSb ou trois éléments, les alliages ternaires comme InGaP, AlGaAs, AlInN, ou aussi de quatre éléments, les alliages quaternaires comme GaInAsP. Les matériaux III-V en général ont l'avantage de présenter des propriétés électroniques et optiques différentes selon la fraction des éléments dans l'alliage : propriétés électroniques comme la structure des bandes, la masse effective et les mobilités des porteurs, ou propriétés optiques comme l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption et la bande interdite. Grâce à cette capacité, ils sont devenus très utilisés non seulement dans le domaine de l'électronique comme pour les transistors, ou de l'optique comme pour les diodes électroluminescentes, mais aussi dans le photovoltaïque [1]. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux matériaux GaInP et GaAs qui sont au cœur de ce travail.

II.2 La cellule solaire à multi jonction

La cellule solaire à mono jonction permet d'absorber une certaine partie du spectre solaire, alors que les photons solaires émis par le soleil possèdent une énergie variant de 0 à 4eV [29]. Quand un rayon lumineux frappe une cellule solaire à mono jonction, seulement les photons ayant une énergie de gap (E_g) inférieure à celle d'un matériau semi-conducteur sont absorbés. Les photons dont l'énergie de gap est supérieure sont reflétés ou sont transmis sous forme de chaleur. Pour cela, et pour une utilisation optimale du spectre solaire, les cellules solaires à multi couches (hétérojonction) sont apparues. Les cellules solaires tandem (multi couches) sont constituées de plusieurs couches à base des matériaux semi-conducteurs. Ces dernières possèdent des gaps d'énergies descendants permettant ainsi l'absorption d'une grande partie du spectre solaire (la quasi-totalité) et donc la diminution des pertes par thermalisation et par transmission.

La cellule solaire tandem (dite monolithique) est constituée de plusieurs cellules solaires (deux et plus). Ces cellules sont interconnectées par des diodes (jonctions tunnels). La cellule GaInP/GaAs étudiée dans ce travail se constitue d'une cellule supérieure InGaP qui doit posséder une énergie de gap supérieure à celle de la cellule inférieure GaAs pour permettre l'absorption d'une grande partie des photons lumineux. Alors que la cellule inférieure permet l'absorption des photons dont l'énergie est faible [2].

II.2.1 Le choix de la structure GaInP/ GaAs

Sous un spectre solaire AM1.5, le choix des matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des cellules solaires joue un rôle très important pour obtenir des meilleurs rendements. Ce choix dépend principalement du gap d'énergie. Le gap d'énergie optimal des cellules solaires à mono jonction et qui donne un meilleur rendement ne doit pas dépasser 1.4 eV comme le GaAs. La société américaine Alta Devices atteint un rendement de 28.8% pour une cellule mono jonction GaAs. L'empilement d'une autre jonction augmente la performance de la cellule (par exemple, GaInP). Les jonctions utilisées en tandem doit posséder des gaps descendants (1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieur et 1.1eV pour la cellule inférieur). Le rendement est amélioré à plus de 30% en utilisant une cellule à double jonction à base de matériau GaInP/GaAs sans concentration. Par l'utilisation des hétérojonctions, une grande partie de spectre est absorbée et donc plus de courant électrique est généré.

II.2.2 La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs

Pour augmenter le rendement, plusieurs jonctions sont mises en tandem. Quand un rayon lumineux frappe une cellule solaire à multi jonction, il sera absorbé par la cellule supérieure (InGaP). Alors une partie sera pénétrée dans la deuxième cellule (GaAs). La tension générée par la cellule tandem est la somme des tensions de chaque cellule.

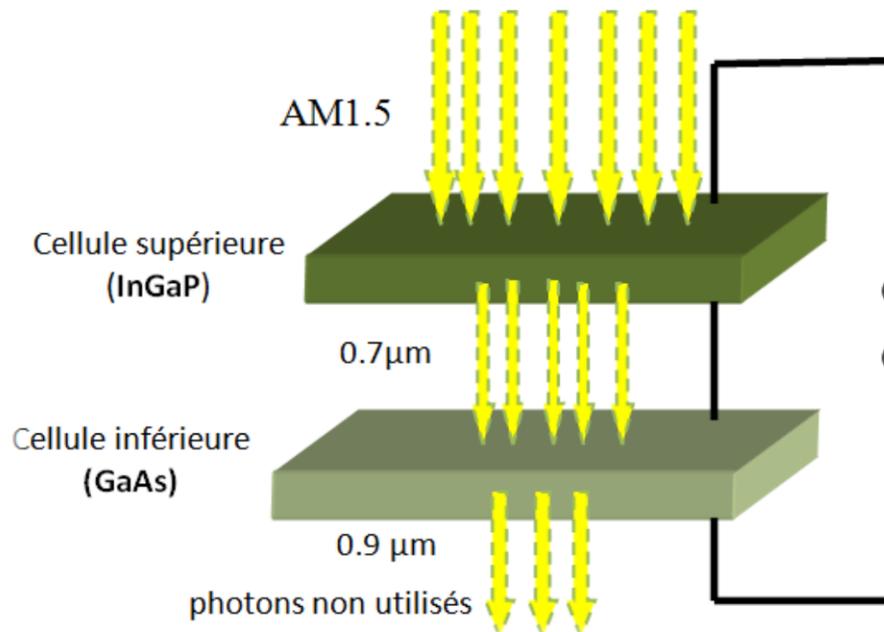


Figure II- 1: La cellule solaire à hétérojonction [2].

II.3 Propriétés des matériaux utilisés

Dans son article de 1952[23], Von H. Welker a découvert que les éléments III et V du tableau de Mendeleïev présenté sur la Figure II-2 peuvent servir de matériaux pour réaliser des semi-conducteurs présentant des propriétés électroniques intéressantes [3]. Ces semi-conducteurs III-V peuvent se cristalliser sous deux phases : Blende de Zinc (ZB) ou Wurtzite (WZ) selon les conditions thermodynamiques et la nature des constituants atomiques [4].

IIIA	IVA	VA	VIA
5 10.811 B Bore	6 12.011 C Carbone	7 14.007 N Azote	8 15.999 O Oxygène
13 26.981 Al Aluminium	14 28.086 Si Silicium	15 30.974 P Phosphore	16 32.065 S Soufre
31 69.723 Ga Gallium	32 71.61 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Sélénium
49 114.82 In Indium	50 118.71 Sn Etain	51 121.76 Sb Antimoine	52 127.60 Te Tellure
81 204.38 Tl Thallium	82 207.2 Pb Plomb	83 208.98 Bi Bismuth	84 209 Po Polonium

Figure II- 2: Extrait du tableau périodique des éléments de Mendeleïev [4].

II.3.1 Le matériau GaInP

II.3.1.1 Structure cristalline de GaInP

Le $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ est un matériau ternaire, composé à partir des deux semi-conducteurs binaires : GaP ($x=1$, $E_g=2.26$ eV) et InP ($x=0$, $E_g=1.344$ eV). Comme la plupart des matériaux semi-conducteurs III-V, le GaInP cristallise en un réseau zinc-blende, présentée sur la figure II-3. Il a un gap direct pour une fraction molaire du Gallium inférieure à 0.74 et un gap indirect sinon. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour $x = 0.516$. En lui ajoutant l'Aluminium, on obtient l'alliage AlInGaP qui possède un gap variant entre 1.43 et 2.2 eV et qui maintient toujours une bonne interface avec le GaAs, ce qui donne plusieurs combinaisons dans la conception des cellules solaires monolithiques. En plus, pour la réalisation des couches fenêtres, le matériau GaInP a des propriétés excellentes par rapport au matériau AlGaAs. Il ne présente pas de défauts liés à l'incorporation de l'oxygène lors de sa croissance et il possède une faible vitesse de recombinaison à la surface. Avec la possibilité

d'utiliser le Ge comme une couche substrat pour la cellule tandem GaInP/GaAs, l'addition d'une troisième cellule devient possible [5].

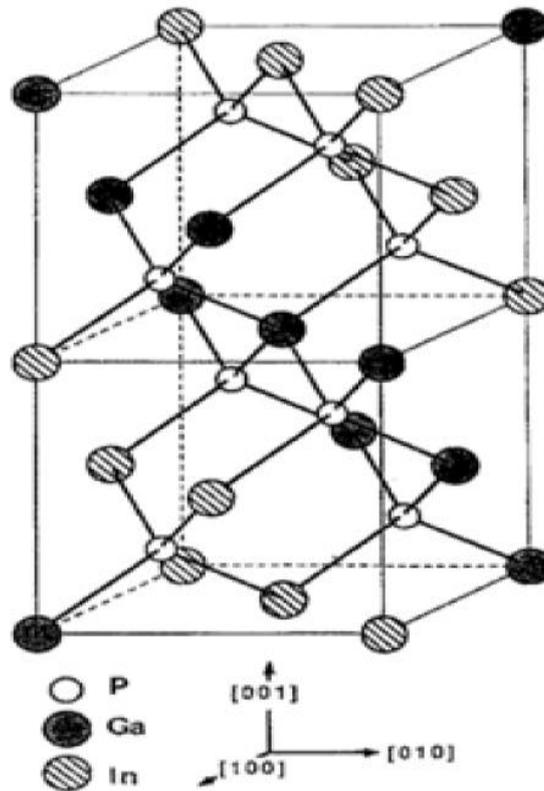


Figure II- 3: Structure cristalline de GaInP [5].

II.3.1.2 Propriétés électriques et physiques du GaInP

Les tableaux II-1 récapitule les propriétés physiques et électriques de GaInP à la température ambiante (300K°).

Tableau II- 1: Propriétés électroniques et cristallines du matériau $GaxIn_{1-x}P$ à 300 K [5, 6].

Paramètre	$Ga_xIn_{1-x}P$	$Ga_{0.51}In_{0.19}P$
Energie de gap E_g (eV)	$E_{g(x)} = -0.2722x^2 + 1.1925x - 1.3399$	1.849
Densité ($g.cm^{-3}$)	$4.81 - 67x$	4.47
Constante électrique ϵ_r	$\epsilon(x) = 12.5 - 1.4x$	11.8
Affinité électrique χ	$\chi(x) = 4.38 - 0.58x$	4.1
Recombinaison radiative A_0 (cm^3/s)	$A_0(E_g) = -2.362 \times 10^{-10} E_g^2 + 7.202 \times 10^{-10} E_g - 4.21 \times 10^{-10}$ $A_0(E_g) = (1 \pm 0.3) 10^{-10}$; pour $x = 0.5$ et $T = 300k$	
Recombinaison en surface	Surface libre : $(2 \div 5) \times 10^4$ cm/s GaInP/GaAs : 1.5 cm/s	
Densité effective d'états N_c (cm^{-3}) et N_v (cm^{-3})	$N_c = 2(\pi q k T m_e^* / h^2)^{3/2}$ $N_v = 2(\pi q k T m_h^* / h^2)^{3/2}$	$6.5x 10^{17}$ $1.45x 10^{19}$
Masse effective des électrons et des trous $m_{e(x)}^*, m_{h(x)}^*$	$m_{e(x)}^* / m_0 = 0.0254x^2 - 0.114x + 0.08$ $m_{h(x)}^* / m_0 = 0.19x + 0.6$	$m_e^* / m_0 = 0.111$ $m_h^* / m_0 = 0.500$
concentration des porteurs intrinsèques n_i	$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right]$	391

II.3.2 L'Arséniure de gallium (GaAs)

II.3.2.1 Structure cristalline de GaAs

En 1920, le premier GaAs ayant une structure zinc blende a été créé par Goldschmidt. Le paramètre de maille du GaAs est déterminé dans les années 1960 en faisant varier la température. En se basant sur des mesures de diffraction de rayons X, Straumanis *et al.* ainsi que Pierron *et al.* présentent l'évolution du paramètre de maille avec une précision de 10^{-4} Å pour des températures entre 0 et 65°C et entre -62 et 200°C respectivement. Ces deux travaux trouvent le même paramètre de maille 5.653 Å pour une température de 24°C [3]. La structure du GaAs est similaire à celle du silicium (zinc-blende) avec une alternance des plans de gallium et d'arsenic. Ces réseaux sont constitués de deux sous réseaux cubiques à faces

centrées interpénétrées, l'un étant formé par des éléments III (Ga) et l'autre par des éléments V (As) [7].

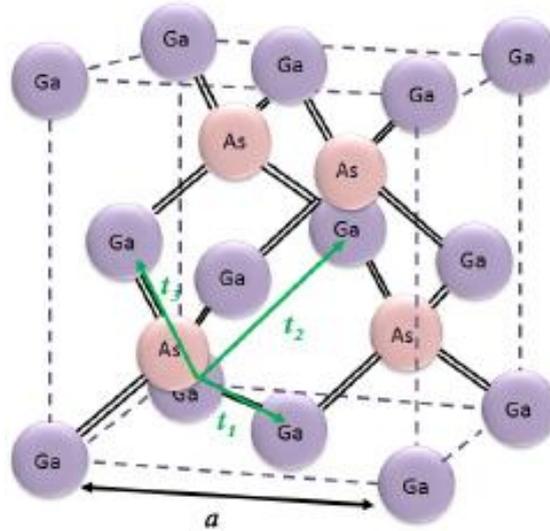


Figure II- 4: Structure cristalline du GaAs [4].

II. 3.2.2 Structure des bandes d'énergie de GaAs

La plupart des semi-conducteurs III-V comme le GaAs possède une structure de bande à gap direct où le maximum de la bande de valence (BV) et le minimum de la bande de conduction (BC) se trouvent au même point c'est à dire ayant le même vecteur d'onde \vec{k} dans la zone de Brillouin (figure II-5). Ainsi, les électrons ayant une énergie égale à l'énergie du gap (E_g) passe de la BV à la BC sans changer leur quantité de mouvement. Dans ce cas, la probabilité de génération et de recombinaison de pair d'électron-trou est importante. Les semi-conducteurs IV (Si) ont une structure de bande à gap indirect. Contrairement aux semi-conducteurs III-V, les deux bandes (BV et BC) se trouvent sur deux vecteurs d'ondes différentes. Alors la recombinaison d'un électron et d'un trou de vecteurs d'ondes différentes représentés dans la figure II-5(b) (électron en X (courbe rouge) et trou en Γ (courbe bleu)) doit nécessairement se faire par l'intermédiaire d'un phonon en changeant sa quantité de mouvement $p = \hbar \cdot \Delta \vec{k}$ afin de conserver le moment cristallin du réseau.

Ainsi, les efficacités radiatives des semi-conducteurs III-V (GaAs) sont bien supérieures aux semi-conducteurs à gap indirect (Si). Cette propriété fait que les semi-conducteurs III-V sont de meilleurs candidats pour la fabrication de dispositifs optoélectroniques tels que les diodes lasers et les diodes électroluminescentes [3].

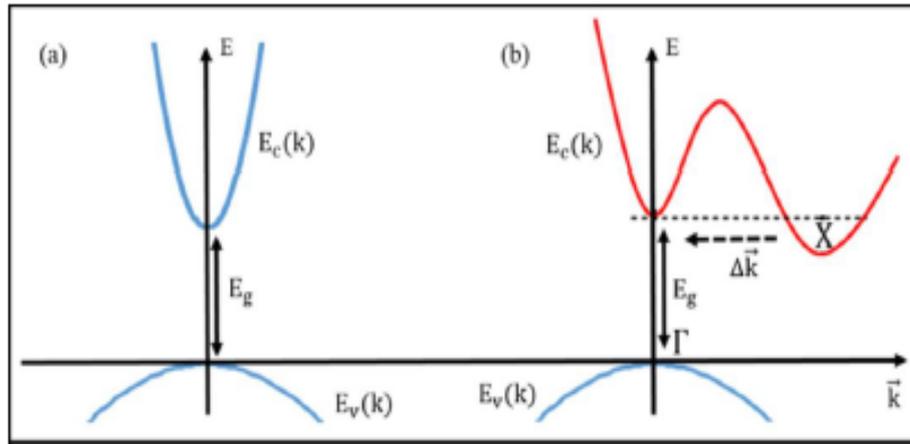


Figure II- 5: Structure de bande d'un semi-conducteur à gap (a) direct et (b) indirect [3].

II. 3.2.3 Propriétés électriques et physiques du GaAs

Les tableaux II-2 récapitule les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante (300K°).

Tableau II-2 : Propriétés électroniques et cristallines du matériau GaAs à 300 K [5, 6].

Paramètre	Valeur
Paramètre de maille	5.65 Å°
Energie de gap E _g	1.424 eV
Densité	5.32 g/cm ³
Constante diélectrique ε _r	13.18
Affinité électrique χ	4.07 eV
Recombinaison radiative	10 ⁻¹⁰ cm ³ /s
Recombinaison en surface	Surface libre : 4.10 ⁵ cm/s
Densité effective d'état N _c	4.7.10 ¹⁷ cm ⁻³
Densité effective d'état N _v	9.8.10 ¹⁸ cm ⁻³
m _e [*] /m ₀	0.067
m _h [*] /m ₀	0.642

II.3.3 Propriétés optiques

Le gap d'énergie, les constantes optiques et diélectriques sont des paramètres importants et jouent un rôle important en physique des semi-conducteurs. Une connaissance précise de la structure de bandes du matériau étudié est nécessaire pour l'évaluation de son domaine d'application, les transitions directes et indirectes en fonction de la composition sont particulièrement d'une importance principale pour l'étude et la fabrication des cellules

solaires à hétérojonction. L'absorption des photons pour créer une concentration hors d'équilibre des porteurs minoritaires est la base de l'effet photovoltaïque dans la cellule solaire. L'absorption optique et la photogénération des porteurs minoritaires dans un semi-conducteur peuvent être caractérisées par un coefficient d'absorption (λ) dépendant de la longueur d'onde. L'absorption se produit lorsque l'énergie des photons est suffisante pour le transit de l'électron depuis la bande de valence jusqu'à la bande de conduction.

Les constantes optiques sont: l'indice de réfraction (n), le coefficient d'extinction (k) et le coefficient d'absorption (α), qui dépendent de la longueur d'onde (λ) [8].

L'indice de réfraction (n) qui permet de réduire les pertes optiques dans la cellule solaire est donné par la formule suivante :

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1} \quad (\text{II.1})$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$$

Par ailleurs, le coefficient d'extinction (k) est exprimé par l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1} \quad (\text{II.2})$$

Il permet de calculer par la suite le coefficient d'absorption (α) par la formule suivante :

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (\text{II.3})$$

h est la constante de Planck, c et ν : sont la vitesse et la fréquence de la lumière dans le vide.

Ces deux paramètres nous permettent de calculer le coefficient de réflexion normal à l'interface matériau/vide qui est donné par [6] :

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (\text{II.4})$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé des cellules à multijonctions, puis nous avons présenté la structure d'une cellule solaire GaInP/GaAs à double hétérojonction ; et enfin nous avons présenté les différents paramètres électriques, physiques, et optiques des matériaux utilisés dans notre étude : GaInP et GaAs.

Références

- [1] EL-HUNI, Walid. Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V. 2016. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay (COmUE).
- [2] DJAAFAR Fatiha, Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques. 2018. Thèse de doctorat. Université Oran (USTOMB).
- [3] MEHDI, Hussein. Étude de la passivation du GaAs (100) par nitruration par plasma N₂ sous ultra-vide. 2018. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne.
- [4] AZAIZIA, Sawsen. Alliages à base de GaAs pour applications optoélectroniques et spintroniques. 2018. Thèse de doctorat. Toulouse, INSA.
- [5] ABDERREZEK, M. Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement. 2015. Thèse de doctorat. these Dr. en Sci. Univ. Setif.
- [6] BENAICHA, Mouna. Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid.
- [7] BLOT, Xavier. Réalisation, caractérisation et modélisation de collages de matériaux III-V pour cellules photovoltaïques à concentration. 2015. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [8] LAIADI, Widad. Simulation numérique d'effet de la couche fenêtre Al_xGa_{1-x}As sur la résistance aux irradiations spatiales d'une cellule solaire en arsenic de gallium (GaAs). 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

CHAPITRE III : Structure simulée et résultats de simulation.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation SCAPS-1D utilisé dans ce travail. Le logiciel SCAPS-1D comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. A fin d'améliorer les performances en matière de rendement de la cellule photovoltaïque, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur des différentes couches, et l'influence de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire réalisée.

III.2 Présentation du logiciel de simulation

SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation unidimensionnel librement accessible aux groupes de recherche sur les cellules solaires, développé au département Électronique et Systèmes d'Information (ELIS) de l'Université de Gand, en Belgique [1]. SCAPS-1D a été initialement testé avec des cellules solaires à base des matériaux $CuInSe_2$ et $CdTe$, et maintenant ses capacités sont étendues à de nombreux dispositifs tels que les cellules cristallines et amorphes, c'est-à-dire Si , $GaAs$, $CIGS$, $CZTS$, *Perovskite*, etc. [1,2].

III.2.1 Le fonctionnement du SCAPS-1D

Après le lancement du simulateur SCAPS-1D à partir de l'icône (1- Run SCAPS), la fenêtre principale du simulateur « Action Panel » apparaît (Figure III-1).

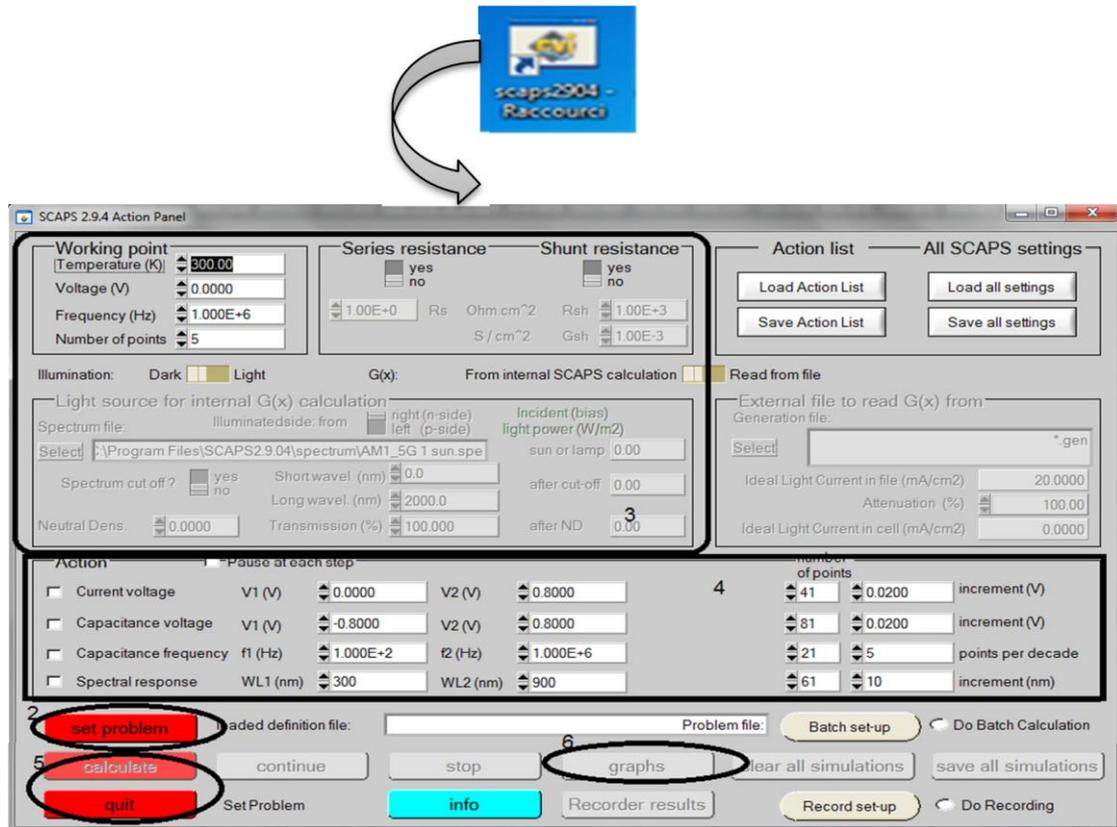
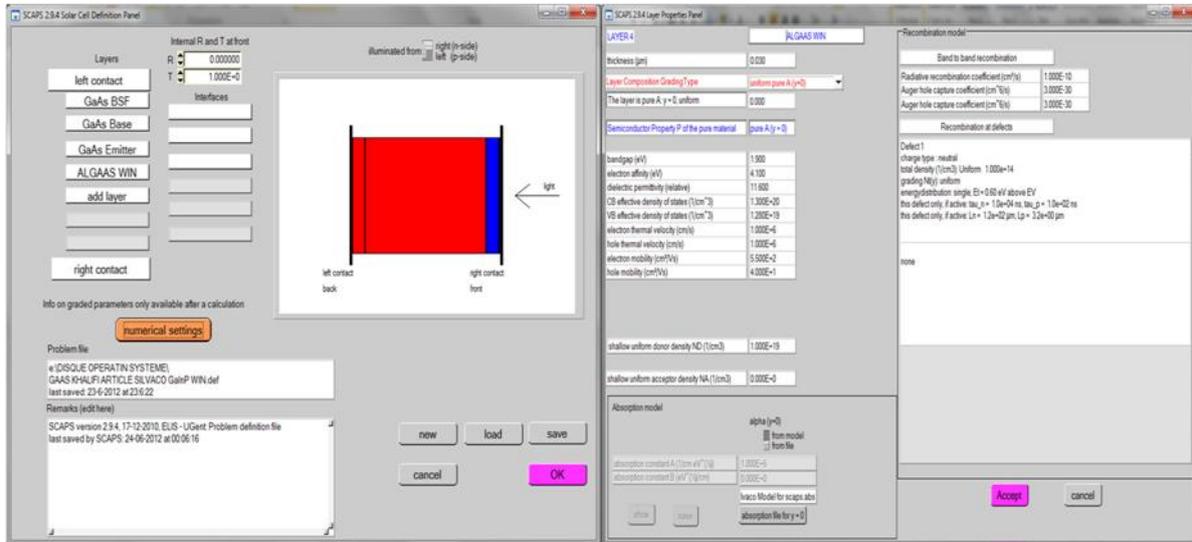


Figure III- 1: Fenêtre principale du simulateur solaire SCAPS-1D (Version 2. 9. 4).

Elle est constituée de plusieurs panneaux dédiés aux actions de base suivantes :

Fenêtre 2 : Définition du problème : Toutes les propriétés électriques et optiques ainsi que la géométrie de la cellule solaire à étudier sont définies à travers ce menu. Après le click sur le bouton, une autre fenêtre s'affiche (Figure III-2.a). Cette dernière donne la possibilité de : créer une nouvelle structure « New », charger une ancienne « Load » ou sauvegarder la structure en cours de simulation « Save ».

Dans le cas de création d'une nouvelle structure « New », on introduit les couches une par une, avec leurs propriétés optiques et électriques (Figure III-2.b). Le sens de la lumière peut être choisi en direction du contact avant ou arrière. Les propriétés des contacts sont choisies par la sélection de la fenêtre Left contact / Right contact, ce qui ouvre une nouvelle fenêtre (Figure III-3). Les propriétés spécifiées dans cette fenêtre sont : la vitesse de recombinaison des électrons et des trous aux interfaces avant et arrière, le travail de sortie du métal et les propriétés optiques de l'interface.



(a)

(b)

Figure III- 2: Présentation d’une structure sous SCAPS-1D. (a) Panneau de définition de la cellule solaire, (b) Panneau définissant les propriétés de chaque couche.

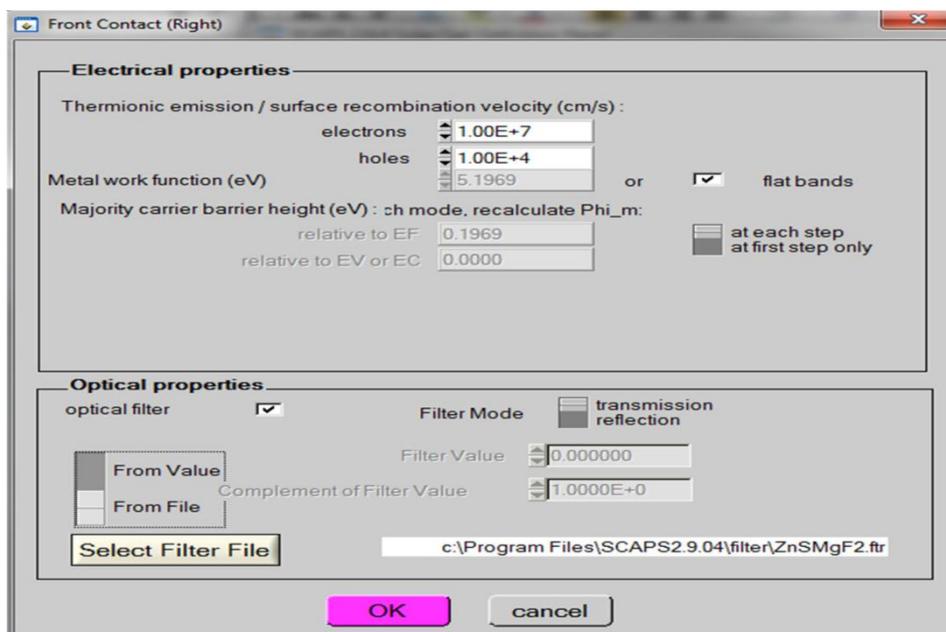


Figure III- 3: Panneau décrivant les propriétés des contacts de la cellule solaire.

Fenêtre 3 : Sert à spécifier les paramètres de travail pour faire la simulation. Ces paramètres sont : la température ambiante, l’éclairement ou l’obscurité, le spectre solaire utilisé et les résistances parasites. Ces paramètres sont considérés fixes et ne varieront pas durant la simulation.

Fenêtre 4 : Indique ce que nous voulons avoir comme paramètres de sortie après la simulation : les courbes courant-tension et la réponse spectrale.

Fenêtre 5 : Pour le lancement des calculs qui peut se faire en deux modes, soit en mode simple (variation d'un seul paramètre), soit en mode Batch. Dans le mode Batch l'étude peut se faire sur un ou plusieurs paramètres. L'utilisateur a la possibilité de choisir les paramètres, l'intervalle et le mode de variation (linéaire ou logarithmique) (Figure III-4).

Fenêtre 6 : Utilisée pour l'affichage des courbes de simulation. Après la simulation de la structure choisie, SCAPS-1D commute vers la présentation des résultats sous forme graphique (Figure III-5). A cette étape on peut imprimer ou sauvegarder les courbes sous forme data (excel).

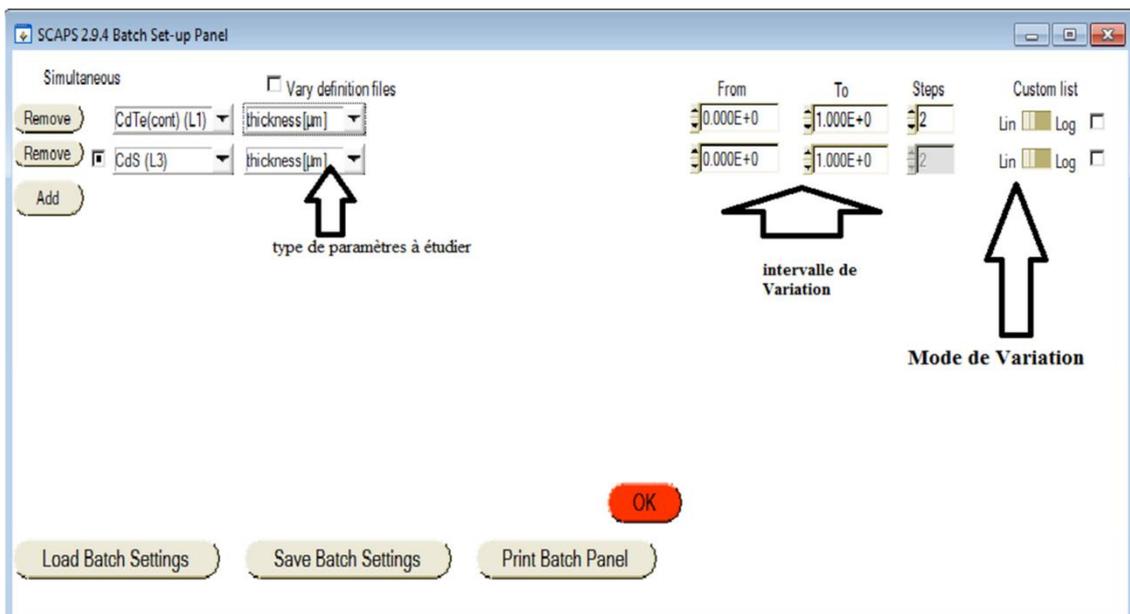


Figure III- 4: Panneau décrivant le mode de Simulation Batch.

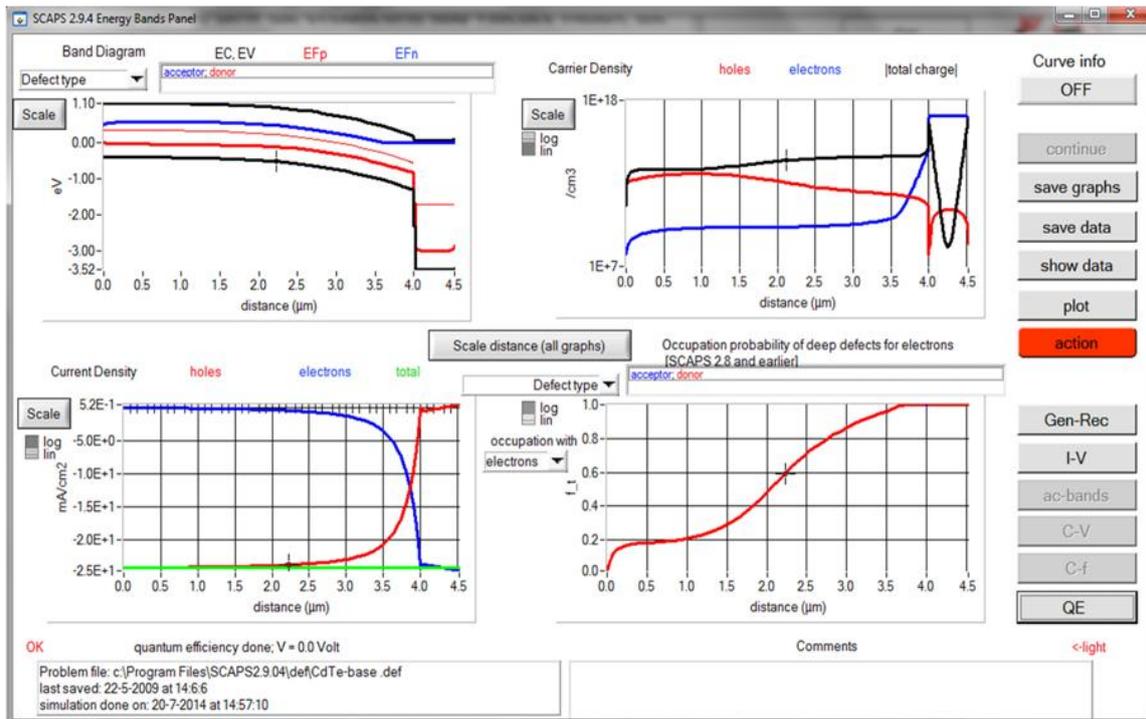


Figure III- 5: Panneau des courbes des résultats de la simulation.

III.3 Simulation d'une structure à double hétérojonction à base de GaInP/GaAs.

III.3.1 Présentation de la structure simulée

La structure modélisée sur ce travail est une structure à double hétérojonction basé sur les matériaux GaInP et GaAs, la structure de base est prise de la Référence [3]. La figure III.6 présente la structure de la cellule étudiée ainsi que les épaisseurs et les dopages des différentes couches.

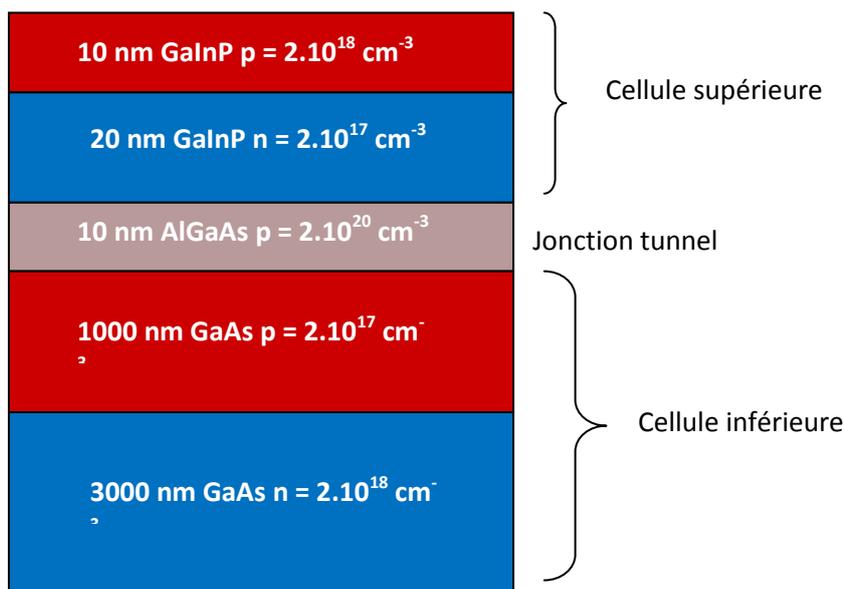


Figure III- 6: Structure simulée.

La figure III.7 montre la caractéristique I (V) de la structure de base étudiée. Les valeurs mesurées pour les différents paramètres électriques de la cellule sont : 29.04 mA/cm² pour le courant de court circuit, 1.08 V pour la tension de circuit ouvert, et 28.08 % pour le rendement de conversion.

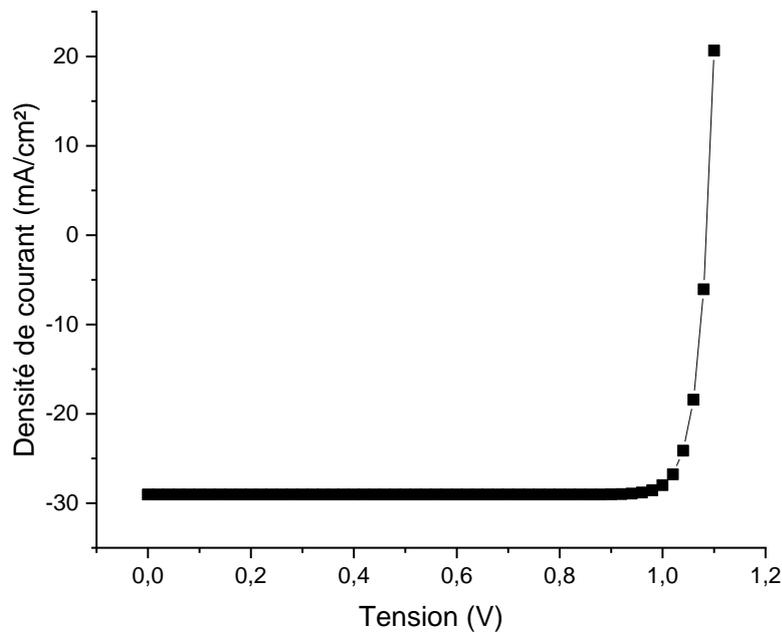


Figure III- 7: Caractéristique I (V) de la structure de base simulée.

III.3.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus pour la structure de base sont proches de ceux de la référence [3], par la suite nous allons simuler l'influence de la variation des épaisseurs des différentes couches et l'influence de la température sur les paramètres électriques de la cellule solaire.

III.3.2.1 L'influence de l'épaisseur de la couche p-GaInP

Nous allons commencer notre étude par simuler l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche émetteur de la cellule supérieure, les résultats trouvés montrent une diminution de I_{CC} , FF, et η lorsque l'épaisseur de la couche p-GaInP augmente, la tension de circuit ouvert reste presque constante ; des meilleures valeurs sont mesurés pour une épaisseur égale à 0.01 μm .

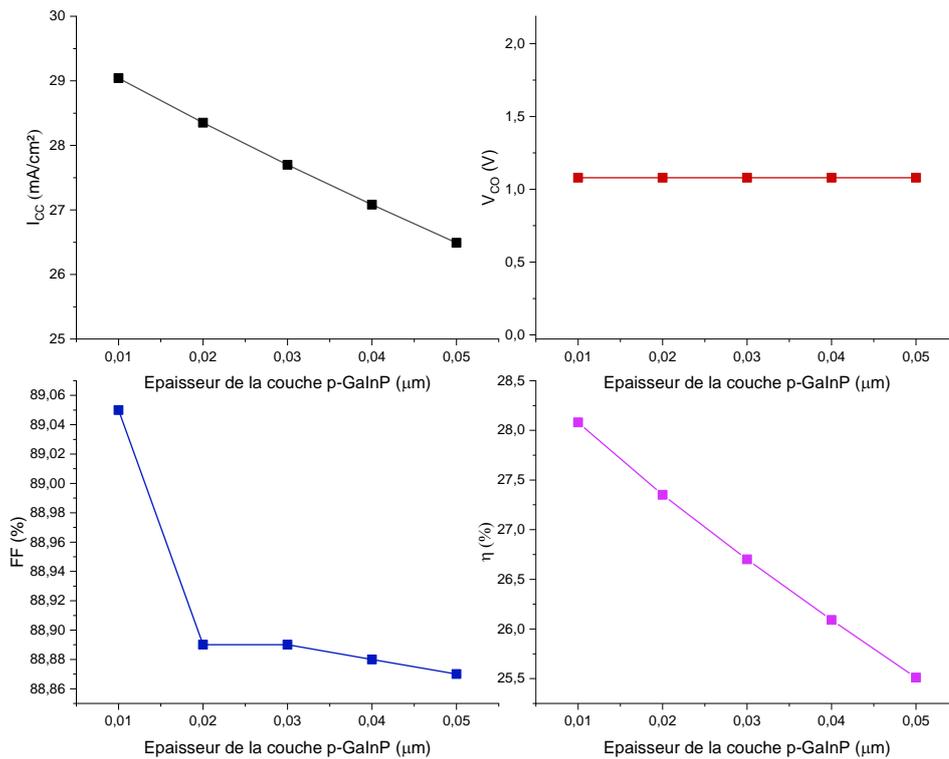


Figure III- 8: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de p-GaInP.

III.3.2.2 L'influence de l'épaisseur de la couche n-GaInP

Dans la deuxième partie, nous allons étudier l'effet de l'épaisseur de la base de la cellule supérieure sur les paramètres électriques de la cellule. La figure III.9 présente les résultats obtenus, des valeurs maximales sont mesurées pour une épaisseur de la couche n-GaInP égal à 0,02 μm .

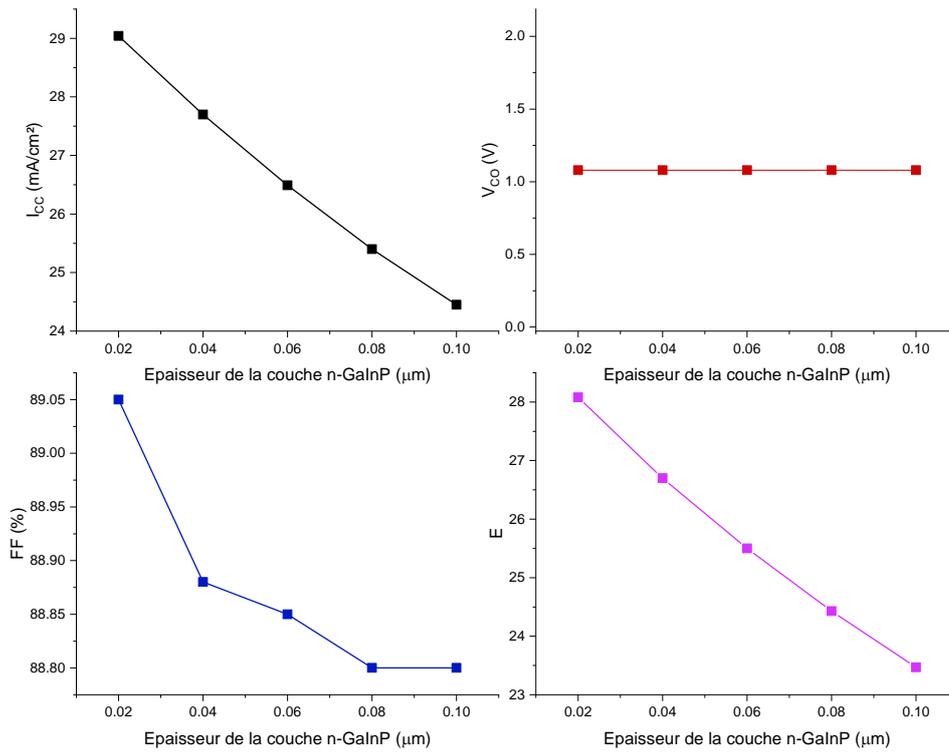


Figure III- 9: , VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de n-GaInP.

III.3.2.3 L'influence de l'épaisseur de la couche p-GaAs

Dans cette partie, nous allons étudier la variation des paramètres électriques de la cellule solaire étudiée en fonction de l'épaisseur de la couche émetteur de la cellule inférieure, les résultats de la figure III.10 montrent que lorsque l'épaisseur de l'émetteur croit ; I_{CC} , V_{CO} , et η les valeurs croissent aussi, un meilleur rendement de conversion égal à 28.24 % est mesuré pour une épaisseur égal à 2.5 μm.

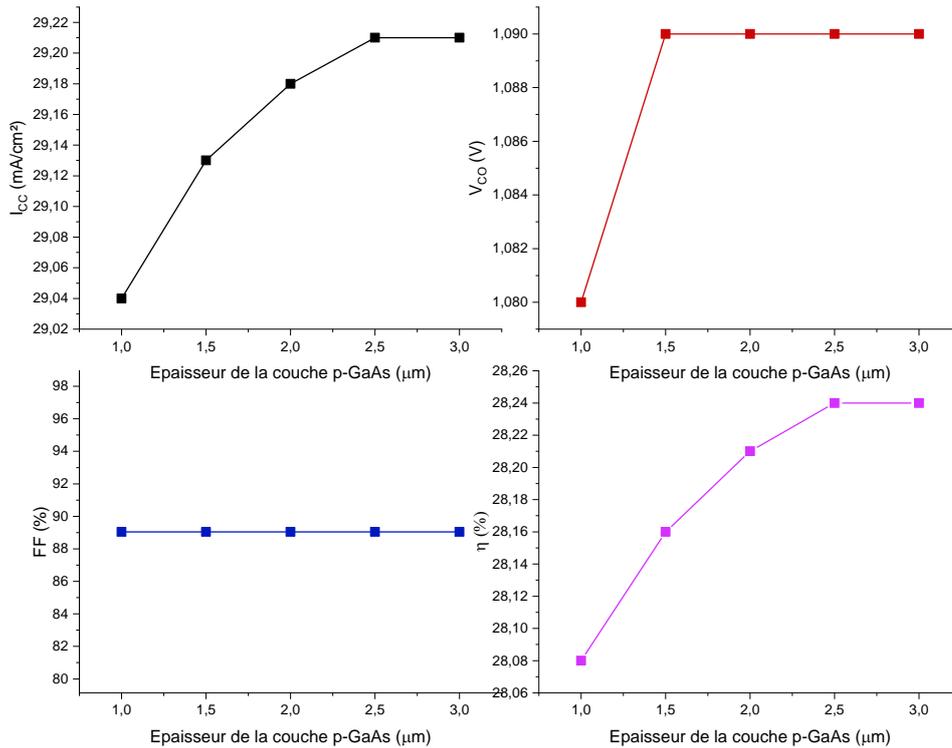


Figure III- 10: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de p-GaAs.

III.3.2.4 L'influence de l'épaisseur de la couche n-GaAs

Dans cette étude nous allons simuler l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche base de la cellule inférieure sur les paramètres électriques de la structure étudiée. La figure III.11 présente les résultats obtenus ; on remarque bien que le courant de court circuit et le rendement de conversion augmentent avec l'épaisseur, la tension de circuit ouvert atteint une valeur maximale égale à 1.1 V pour une épaisseur égale à 5 μm , et le facteur de forme reste inchangé de 3 à 4 μm puis il commence à diminuer.

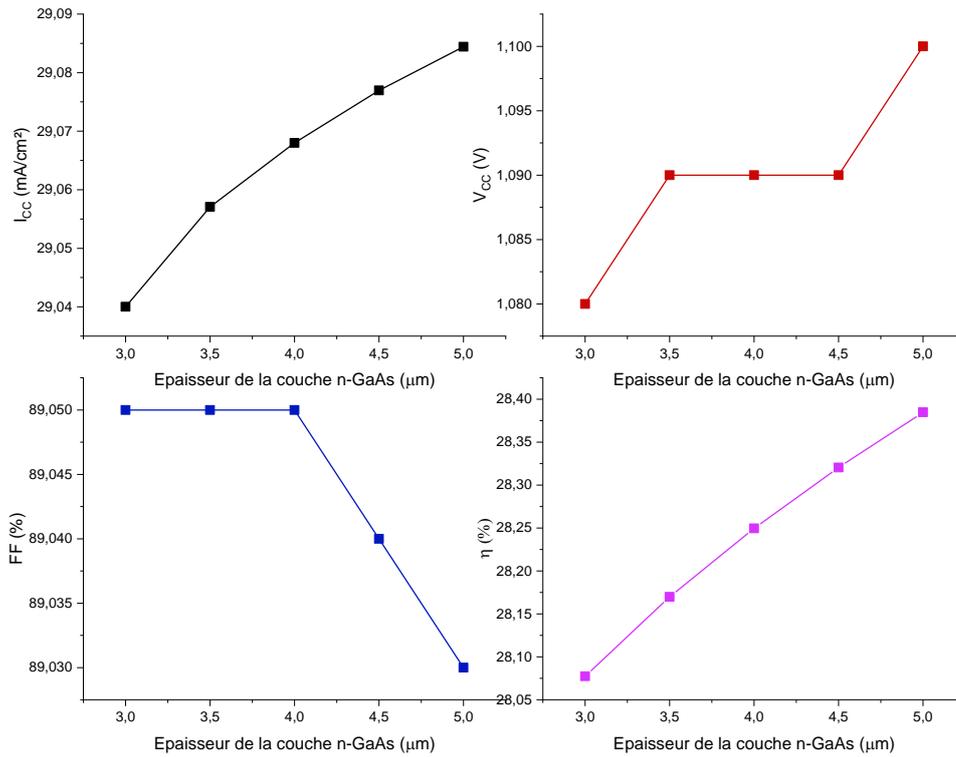


Figure III- 11: ICC, VCO, FF, et η en fonction de l'épaisseur de n-GaAs.

III.3.2.5 Paramètres électriques optimisés

Dans les simulations réalisées précédemment, nous avons optimisé les épaisseurs des différentes couches de la cellule solaire étudiée, le tableau III.1 résume les valeurs optimisées des épaisseurs et la figure III.11 présente la caractéristique I(V) de la structure optimisée.

Tableau III- 1: Epaisseurs optimisées.

Épaisseur (μm)	Cellule supérieure		Cellule inférieure	
	Emetteur	Base	Emetteur	Base
	0.01	0.02	2.50	5.00

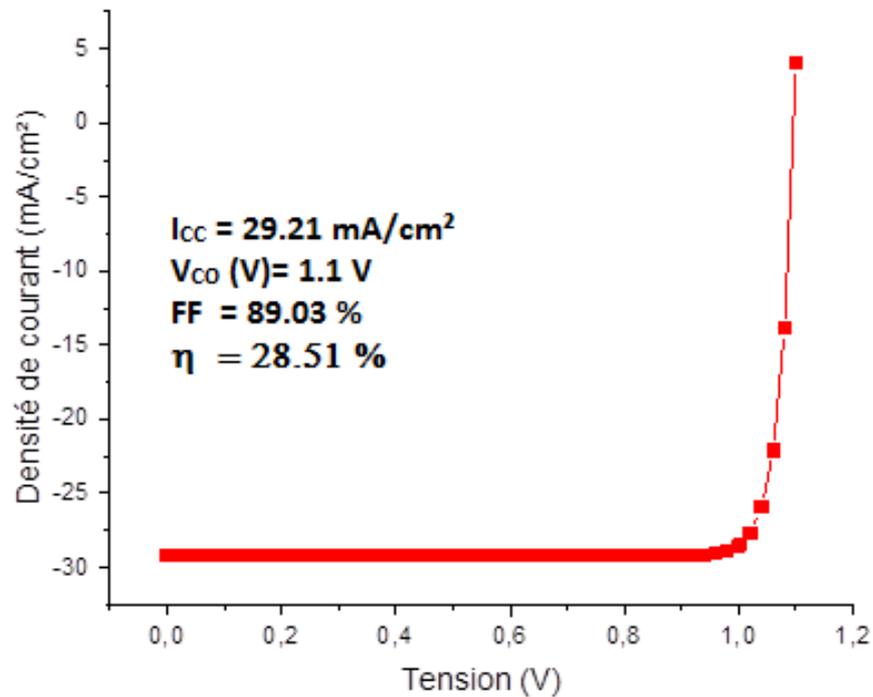


Figure III- 12: Caractéristique I(V) de cellule solaire optimisée.

III.3.2.6 L'influence de la température

Dans la dernière partie de cette étude, nous allons simuler l'influence de la température sur les paramètres de sortie de la cellule solaire étudiée (I_{cc} , V_{co} , FF, et η). La figure III.13 présente la caractéristique I(V) en fonction de la variation de la température, les meilleurs résultats sont obtenus pour une température égal à 200 K.

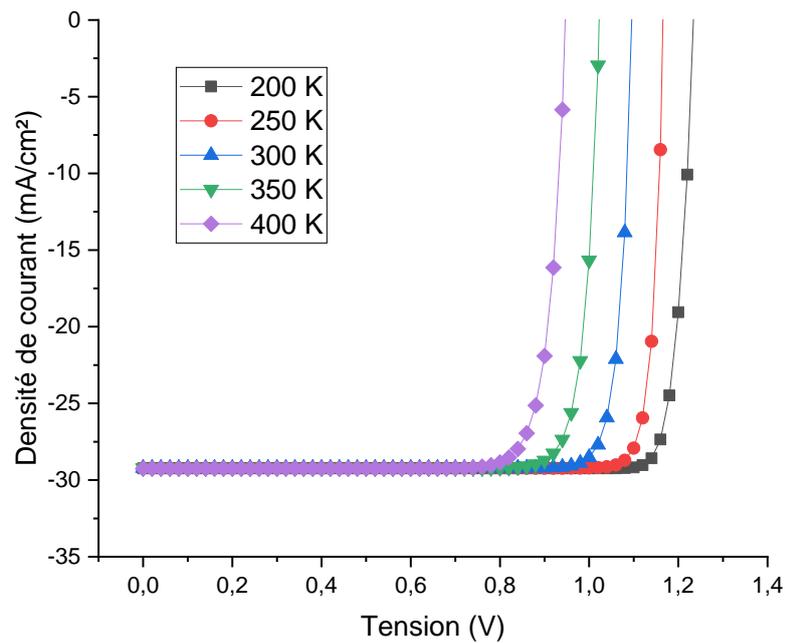


Figure III- 13: Caractéristique I(V) en fonction de la température.

La figure III.14 présente les résultats mesurés pour les différents paramètres électriques de la cellule solaire, on remarque que le courant de court circuit diminue avec la température jusqu'à une température égale à 300 K, puis il commence à augmenter ; les trois paramètres : V_{CO} , FF, et η diminuent avec la température.

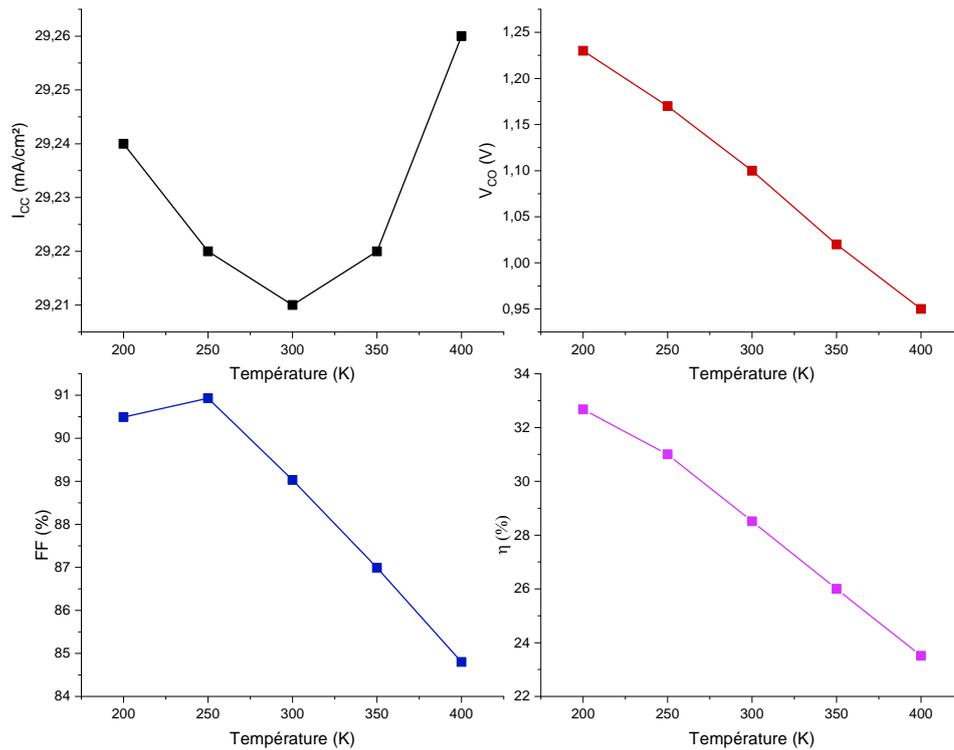


Figure III- 14: ICC, VCO, FF, et η en fonction de la température.

III.3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation SCAPS-1D. La structure de cellule solaire étudiée est présentée par la suite, et dans le but d’optimiser les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée, une étude de simulation de l’effet des variations des différents paramètres de la cellule solaire est réalisée.

Références

- [1] Sekar, K. (2021). Cellules solaires pérovskite hybrides à base de formamidinium-césium (FA-Cs): Simulation et analyse expérimentale (Doctoral dissertation, Université de Limoges; El Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Insituto Politécnico National. Cinvestav (Méxique)).
- [2] Mahfoud, A. (2018). Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement (Doctoral dissertation).
- [3] MOHAMED, Esmeel T., MAKKA, Ali OM, MEHMOOD, Mubbashar, et al. Performance simulation of single and dual-junction GaInP/GaAs tandem solar cells using AMPS-1D. Sustainable Energy Technolo

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail consiste à optimiser les performances d'une cellule solaire à base des semi-conducteurs InGaP et GaAs. L'étude a été effectuée en utilisant le logiciel de simulation SCAPS-1D.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le rayonnement solaire, la masse d'air, et le spectre solaire, puis nous avons présenté les constituants, le principe de fonctionnement, et les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les différents paramètres électriques, physiques, et optiques des matériaux utilisés dans notre étude : GaInP et GaAs.

Le troisième chapitre décrit logiciel SCAPS-1D, qui est utilisé pour la simulation électrique des cellules solaires, et présente les résultats de l'étude réalisée. Afin d'améliorer les performances en matière de rendement de conversion de la cellule photovoltaïque, nous avons étudié l'influence des épaisseurs des différentes couches de la structure étudiée et de la température sur le rendement électrique de la cellule. Les résultats de simulation obtenus présentent une amélioration du rendement de conversion de 4.59 %. Le tableau ci-après donne les valeurs optimisées des paramètres de sortie de la cellule solaire étudiée.

	I_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)
Structure de base	29,04	1,08	89,05	28,08
Structure optimisée	29.24	1.23	90.49	32.67