

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة محمد بوضياف المسيلة

UNIVERSITÉ MOHAMMED BOUDHIAF DE M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE



MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ÉLECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ÉLECTRONIQUE

THÈME

**ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA CELLULE
InGaP/GaAs/Ge PAR SIMULATION**

Proposé et dirigé par :

M. Dr. Bouchama Idris

Réalisé par :

Melouki Dilmi.

N° d'ordre : 2016/ME02/89/385

PROMOTION JUIN 2016



Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu, le bon dieu qui m'accordé la volonté et le courage pour la réalisation de ce Projet.

Et tout particulièrement, je tiens à remercier énormément mon encadreur
Dr. Bouchama Idris.

Pour son aide
et pour m'avoir diriger durant ce travail.

Je transmette ma sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'examen et l'étude de mon mémoire et pour l'honneur qu'ils mon fait en participant au jugement de ce travail.

J'associe volontiers à ce remerciement, Mr : Ali Saoucha Salim, (étudiant doctorat), pour son aide son soutient, et de sa sympathie.

A tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à l'aboutissement de ce travail, j'aimerais leur dire merci.

Enfin, je ne peux pas terminer ces remerciements sans une pensée à Dr. "Melouki Azzedine", l'enseignant de Chimie.

Dédicaces

Merci à dieu seul, la prière et le salut sur notre prophète Mohammed

A Mes parents, A ma femme la mère de mon fils Mohammed Amin

A Mes frères et sœurs

Tous Mes amis

A tous, je dédié cette thèse

MELOUKI. D

ملخص

الخلايا الشمسية متعددة الأقطاب المصنوعة اساسا من عناصر الجدول الدوري III-V، واصل أدائها في الزيادة منذ اواخر سنوات 90، سمحت باستعمالها من اجل الخلايا الشمسية ذات المردودية العالية. البنيات ذات الاقطاب الثلاثية الحالية على أساس GaInP/GaAs/Ge أو GaInP/GaAs/GaInAs تعطي كفاءة تحويل قياسية. ونحن مهتمون في هذا العمل أن ندرس الخلية متعددة الاقطاب المصنوعة على أساس الممتصات GaInP/GaAs/Ge بواسطة أداة محاكاة ذات بعدين: Atlas SILVACO-TCAD. الهدف الرئيسي لعملنا يستند في المرحلة الاولى، على الحصول على أداء الخلايا الفردية على اساس الممتصات GaInP، GaAs، Ge كل على حدى. كفاءة التحويل وكفاءة الكم لكل خلية على حدى تم تقييمها. في المرحلة الثانية، قمنا بمقارنة أداء الخلايا الفردية التي تم الحصول عليها في القسم الأول مع تلك الخلية الثنائية جنباً إلى جنب GaInP/GaAs و GaInP/GaAs/Ge والخلايا متعددة الاقطاب GaInP/GaAs/Ge. تم تحديد تركيز المستقبلات لكل ممتصة للخلية متعددة الاقطاب GaInP/GaAs/Ge قبل تحليل تأثيرها على الكفاءة العامة للخلايا الشمسية متعددة الاقطاب المدروسة. أفضل كفاءة تحويل تم الحصول عليها للخلية المتعددة الاقطاب GaInP/GaAs/Ge هو في حدود 15.16%.

الكلمات المفتاحية: خلايا متعددة الاقطاب، Atlas SILVACO-TCAD، العناصر III-V، الشرائح الرقيقة.

ABSTRACT

Multi-junction solar cells based on III-V elements, whose performances have been increasing since the late 90s, make them suitable for high efficiency solar cells. Current triple-junction structures based on GaInP/GaAs/Ge or GaInP/GaAs/GaInAs present record conversion efficiency. We are interested in this work to study the multi-junction cells based on the absorbers GaInP/GaAs/Ge using two dimensional simulation tool: Atlas SILVACO-TCAD.

The main goal of our work is based, firstly, on getting the performance of individual cells based on the absorbers GaInP, GaAs and Ge separately. The conversion efficiency and the quantum efficiency of each individual cell were estimated. Secondly, we try to make a comparison of the performances of the individual cells obtained in the first section with those of the Tandem GaInP/GaAs and multi-junction GaInP/GaAs/Ge cells. The carrier concentrations of each absorber in multi-junction cell were determined to analyze their influence on the overall efficiency of the multi-junction solar cell studied. The best conversion efficiency obtained for the multi-junction GaInP/GaAs/Ge cell of is about 15.16%.

Keywords: Multi-junction cells, Atlas SILVACO-TCAD, III-V elements, Thin films.

RÉSUMÉ

Les cellules solaires multi-jonctions à base d'éléments III-V, dont les performances n'ont cessé d'augmenter depuis la fin des années 90, permettent de les utiliser pour les cellules solaires à haut rendement. Les structures triple-jonctions actuelles à base de GaInP/GaAs/Ge ou GaInP/GaAs/GaInAs présentent des rendements de conversion record. Nous nous intéressons dans ce travail à étudier les cellules multi-jonctions à base des absorbeurs GaInP/GaAs/Ge par un outil de simulation deux dimensions : Atlas SILVACO-TCAD.

Le but principal de notre travail est basé, dans un premier temps, sur l'obtention des performances des cellules individuelles à base des absorbeurs GaInP, GaAs et Ge séparément. Le rendement de conversion et le rendement quantique de chaque cellule individuelle ont été estimés. Dans un deuxième temps, on a fait une comparaison des performances des cellules individuelles obtenues dans la première section avec celles de la cellule Tandem GaInP/GaAs et de la cellule multi-jonctions GaInP/GaAs/Ge. La concentration des accepteurs de chaque absorbeur pour la cellule multi-jonctions GaInP/GaAs/Ge a été déterminé afin d'analyser leur influence sur le rendement global de la cellule solaire multi-jonctions étudiée. Le meilleur rendement de conversion obtenu pour la cellule multi-jonctions GaInP/GaAs/Ge est de l'ordre de 15.16%.

Mots Clés : Cellules Multi-jonctions, Atlas SILVACO-TCAD, Éléments III-V, Couches minces.

Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	xi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Références du chapitre 1	4
CHAPITRE 2 : LES CELLULES SOLAIRES	5
2.1 Conversion photovoltaïque	6
2.1.1 Historique	6
2.1.2 Description de la conversion photovoltaïque	7
2.1.3 Description de la cellule solaire	8
2.1.4 Principe physique de fonctionnement	8
2.1.5 Architecture de la cellule photovoltaïque	11
2.1.6 Principaux éléments dans la cellule	11
2.1.7 Modélisation de la cellule solaire	14
2.2 Différentes technologies photovoltaïques	16
2.3 Cellules multi-jonctions à haut rendement	17
2.4 Panneau solaire	18
2.5 Conclusion	19
2.6 Références du chapitre 2	20
CHAPITRE 3 : LES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS	21
3.1 Notion générale sur les matériaux semi-conducteurs	21
3.1.1 Classification des matériaux	21
3.1.2 Bandes d'énergie	23
3.1.3 Porteurs de charge	24
3.1.4 Dopage et impuretés des semi-conducteurs	27
3.1.4.1 Semi-conducteur intrinsèque	27
3.1.4.1.1 Concentration en porteurs intrinsèques	27
3.1.4.2 Semi-conducteurs extrinsèques	29
3.1.4.2.1 Semi-conducteur dopé n	29
3.1.4.2.2 Semi-conducteur dopé p	30
3.1.5 Gap direct et indirect	31
3.1.6 Génération–Recombinaison	32

3.1.6.1	Génération du paire électron-trou	33
3.2	Multi-jonction	34
3.2.1	Jonction PN à l'équilibre	34
3.2.2	Polarisation de la jonction en direct	36
3.2.3	Polarisation de la jonction en inverse	37
3.2.4	Hétérojonctions	38
3.2.5	Composé binaire GaAs	39
3.2.6	Composé ternaire GaInP	39
3.3	Conclusion	40
3.4	Références du chapitre 3	41
	<i>CHAPITRE 4 : LOGICIEL DE SIMULATION SILVACO-ATLAS</i>	43
4.1	Définitions	43
4.2	Entrées et sorties dans SILVACO-ATLAS	44
4.2.1	Deckbuild	45
4.2.2	Tonyplot	45
4.3	Structure d'entrée dans SILVACO-ATLAS	46
4.4	Contour général de construction d'ATLAS	48
4.4.1	Mesh	49
4.4.2	Régions	49
4.4.3	Electrode	50
4.4.4	Dopage	51
4.4.5	Matériel	52
4.4.6	Modèles physiques	53
4.4.7	Contacts	53
4.4.8	Interface	53
4.4.9	Lumière	53
4.4.10	Méthode de la solution	53
4.4.11	Spécification de la solution	54
4.4.12	Extraction des données et traçage	54
4.5	Conclusion	54
4.6	Références du chapitre 4	55

	CHAPITRE 5 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	56
5.1	Cellule solaire à une seule jonction	57
5.1.1	Cellule solaire à base de l'absorbeur Ge	57
5.1.1.1	Présentation de la structure	57
5.1.1.2	Résultats et discussions	58
5.1.2	Cellule solaire à base de l'absorbeur GaAs	59
5.1.2.1	Présentation de la structure	59
5.1.2.2	Résultats et discussions	60
5.1.3	Cellule solaire à base de l'absorbeur InGaP	61
5.1.3.1	Présentation de la structure	61
5.1.3.2	Résultats et discussions	62
5.2	Cellule solaire à double jonction : Tandem(InGaP/GaAs)	63
5.2.1	Présentation de la structure	63
5.2.2	Résultats et discussions	63
5.3	Cellule solaire à triple jonction (InGaP/GaAs/Ge)	66
5.3.1	Présentation de la structure	66
5.3.2	Résultats et discussions	66
5.3	Influence de dopage du couches absorbeurs sur la cellule InGaP/GaAs/Ge	69
5.3.1	Influence du dopage d'absorbeur GaAs	69
5.3.2	Influence du dopage d'absorbeur InGaP	70
5.3.3	Influence du dopage d'absorbeur Ge	71
5.4	Conclusion	72
5.5	Références du chapitre 5	73
	CHAPITRE 6 : CONCLUSION GÉNÉRALE	74

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure (2.1)	: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.	6
Figure (2.2)	: Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum.	6
Figure (2.3)	: Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque.	8
Figure (2.4)	: Schéma d'une cellule solaire standard.	11
Figure (2.5)	: 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).	13
Figure (2.6)	: Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin.	15
Figure (2.7)	: Caractéristique I(V) d'une cellule solaire.	16
Figure (2.8)	: Différentes technologies photovoltaïques.	16
Figure (2.9)	: Principe de la cellule multi-jonction.	17
Figure (3.1)	: Résistivité pour différents types de matériaux.	22
Figure (3.2)	: Table périodique partiel.	22
Figure (3.3)	: Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau.	23
Figure (3.4)	: Bandes d'énergie dans différents types de matériaux.	24
Figure (3.5)	: Représentation symbolique du mécanisme de conduction dans les bandes de valence et de conduction. Les densités de courant résultantes sont dans le même sens.	25
Figure (3.6)	: Représentation symbolique du mécanisme de déplacement des électrons dans la bande de valence.	25
Figure (3.7)	: Structure cristalline du Silicium pur	27
Figure (3.8)	: Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température [°K]	29
Figure (3.9)	: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n.	30
Figure (3.10)	: Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P.	30
Figure (3.11)	: Différence entre une bande interdite directe et indirecte d'un semi-conducteur	32
Figure (3.12)	: Types de mécanismes de recombinaison.	34
Figure (3.13)	: Représentation d'une jonction PN à l'équilibre.	35
Figure (3.14)	: Jonction polarisée dans un sens direct.	36
Figure (3.15)	: Caractéristique I-V de la jonction PN en polarisation directe	37
Figure (3.16)	: Jonction polarisée dans un sens inverse	37
Figure (3.17)	: Caractéristique I-V de la jonction PN en polarisation inverse	38

Figure (3.18)	: Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction	38
Figure (4.1)	: Environnement virtual wafer fabrication.	44
Figure (4.2)	: Atlas entrés et sorties.	44
Figure (4.3)	: Menu de commandes de deckbuild.	45
Figure (4.4)	: Fenêtre de base de tonyplot.	46
Figure (4.5)	: Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS.	48
Figure (4.6)	: Atlas mesh.	49
Figure (4.7)	: Régions créées dans la cellule solaire à triple-jonctions à base de InGaP/GaAs/Ge.	50
Figure (4.8)	: Déclaration des électrodes dans ATLAS.	51
Figure (4.9)	: ATLAS dopage.	52
Figure (5.1)	: Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur Ge.	57
Figure (5.2)	: Caractéristique (J-V) de la cellule (Ge) étudiée.	58
Figure (5.3)	: Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur GaAs.	59
Figure (5.4)	: Caractéristique (J-V) de la cellule GaAs étudiée.	60
Figure (5.5)	: Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur InGaP.	61
Figure (5.6)	: Caractéristique (J-V) de la cellule InGaP étudiée.	62
Figure (5.7)	: Structure de la cellule solaire à double jonction InGaP/GaAs.	63
Figure (5.8)	: Caractéristique (J-V) de la cellule InGaP/GaAs.	64
Figure (5.9)	: Caractéristique (J-V) des cellules : Tandem (InGaP/GaAs), Top (InGaP), Bottom (GaAs).	65
Figure (5.10)	: Rendements quantiques de la cellule solaire InGaP/GaAs.	65
Figure (5.11)	: Structure de cellule solaire triple jonction InGaP/GaAs/Ge.	66
Figure (5.12)	: Caractéristique (J-V) de la cellule InGaP/GaAs/Ge étudiée.	67
Figure (5.13)	: Caractéristique (J-V) des cellules : Triple (InGaP/GaAs/Ge), Top (InGaP), Middle (GaAs), Bottom (Ge).	68
Figure (5.14)	: Rendements quantiques des trois cellules InGaP, GaAs et Ge	68
Figure (5.15)	: Variations de I_{cc} , V_{co} , η et FF en fonction du dopage NA de la couche absorbante GaAs.	69
Figure (5.16)	: Variations de paramètres photovoltaïques en fonction du dopage NA(InGaP).	70
Figure (5.17)	: Variations de paramètres photovoltaïques en fonction de NA(Ge).	71

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau (3.1)	: Bande interdite, concentration intrinsèque des porteurs, densité effective de la bande de conduction et la bande de valence à $T = 300$ K° pour différents semiconducteurs	28
Tableau (4.1)	: Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.	47
Tableau (5.1)	: Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base (Ge).	57
Tableau (5.2)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (Ge) simulés sous éclairage AM1.5G.	58
Tableau (5.3)	: Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base (GaAs).	59
Tableau (5.4)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (GaAs) simulées sous éclairage AM1.5G.	60
Tableau (5.5)	: Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base (InGaP).	61
Tableau (5.6)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (InGaP) simulées sous éclairage AM1.5G.	62
Tableau (5.7)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire Tandem (InGaP/GaAs) simulées sous éclairage AM1.5G.	63
Tableau (5.8)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à triple-jonction (InGaP/GaAs/Ge) simulées sous éclairage AM1.5G.	66

Chapitre 1:

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Notre travail est dans le cadre général de la recherche à l'énergies renouvelables (spécialement l'énergie photovoltaïque).

La problématique de l'énergie est au centre de l'actualité mondiale. Avec une consommation et une demande croissante liée au développement industriel, la production de l'énergie est une question centrale de notre société avec des implications économique, géopolitique, environnementale et sociale. La production mondiale d'énergie est largement dominée par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui représentent 78% du marché en 2008. Ces sources d'énergie fossiles non renouvelables qui sont néfastes à l'environnement disposent de stocks encore disponibles pour quelques décennies [1.1].

Une fois ces ressources épuisées, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire cette énergie, qui dite les énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Ces sources d'énergies proviennent directement ou indirectement du soleil.

Les études indiquent également que l'utilisation de seulement 0,1% de l'énergie solaire incidente sur la surface de la terre est suffisante pour satisfaire la demande actuelle de l'énergie dans le monde entier. Le dispositif qui se base sur cette technologie de production de puissance se nomme cellule photovoltaïque ou pile solaire [1.2].

Actuellement plusieurs régions en Algérie et plusieurs laboratoires de recherche s'intéressent à l'énergie photovoltaïque, ce qui a permis de faire plusieurs études concernant les cellules solaires et d'évoluer des structures photovoltaïques. Cela a permis récemment de mettre à jour d'une nouvelle cellule solaire en couches minces pour obtenir un rendement très élevé.

Dans le but de convertir le rayonnement solaire en électricité, des dispositifs appelés cellules photovoltaïques (PV) ont été développés. Les matériaux permettant d'absorber les particules composant la lumière, ou photons, sont les semi-conducteurs. Une cellule PV est obtenue en mettant en contact un matériau semi-conducteur dopé p, où les trous sont les porteurs majoritaires, avec un matériau semi-conducteur dopé n, où les électrons sont les porteurs majoritaires, formant ainsi une jonction p-n. La différence de dopage entre les deux

côtés de la jonction p-n crée un champ électrique à l'interface. Ainsi, la cellule PV absorbe certains photons du spectre solaire pour générer des paires électron-trou qui vont être séparées à l'aide de jonction p-n. Le circuit est fermé en introduisant une charge, créant ainsi de l'électricité. Ce phénomène appelé : l'effet photovoltaïque [1.3].

Aujourd'hui, les cellules photovoltaïques standards, mises sur le marché, ont un rendement électrique qui avoisine les 17%. Ceci en considérant que l'énergie de la lumière du soleil est convertie totalement en électricité [1.2].

Nous distinguons trois classes de cellules solaires, Celles-ci diffèrent les unes par rapport aux autres par :

- leur coût de production,
- leurs dimensions,
- leur rendement électrique et quantique,
- leur structure.

Les cellules de la première génération sont composées de cristaux simples de silicium et sont très chères à produire. Alors que la production de cellules de deuxième génération nécessite un coût plus faible, mais restent limitée dans la miniaturisation par les lois de Moore. Les cellules solaires de troisième génération possèdent le meilleur rendement de conversion avec une miniaturisation optimale. Cette dernière a été résolue par l'introduction des nanofils, des nanostructures et des nanomatériaux dans les matrices photovoltaïques. Les propriétés remarquables des nanostructures leur permettront d'être les éléments de choix des systèmes photovoltaïques pour la levée des verrous technologiques [1.2].

Nous nous intéressons dans notre travail à étudier la cellule multi-jonctions à base des absorbeurs InGaP/GaAs/Ge par un outil de simulation (2D) : Atlas SILVACO-TCAD.

La simulation numérique de la structure photovoltaïque a été effectuée pour comparer les performances des cellules individuelles par la cellule double et/ou triple-jonctions. Les paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques de 3^{ième} génération.

Pour simuler l'influence des différents paramètres de notre structure, nous définissons une cellule solaire de référence avec un ensemble de paramètres fixés, puis nous varions d'autre paramètres afin d'analyser leur influence sur le rendement de la cellule solaire.

Le logiciel Atlas SILVACO.TCAD présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs à semi-conducteurs VWF (Virtual Wafer Fab), ainsi que les cellules solaires en couches minces.

Le module Atlas : simulateur physique de dispositifs à semi-conducteurs 2D ou 3D permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs à semi-conducteurs en couche minces.

Ce mémoire est constitué de six chapitres, dont trois chapitres sont théoriques et un quatrième qui sera consacré pour la partie de simulation. Il est organisé comme suit :

- Le premier chapitre : C'est l'introduction générale ;
- Le deuxième chapitre : Consacré à des généralités sur le secteur photovoltaïque, l'éclairage ainsi que les principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires et les caractéristiques des cellules solaires multi-jonctions ;
- Le troisième chapitre : Présente des notions générales sur les matériaux semi-conducteurs, les composés binaires (III-V) et ternaires ;
- Le quatrième chapitre : Consacré à la description et l'application du logiciel de simulation Atlas SILVACO-TCAD ;
- Le cinquième chapitre décrit la partie de simulation de la structure étudiée : Une description détaillée des conditions et des différentes structures des cellules étudiées et les résultats essentiels aboutis de cette étude ;
- Le sixième chapitre : C'est la conclusion générale et les perspectives.

Références du chapitre 1

[1.1] D. Djicknoum, "Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière", Thèse de Doctorat, Université Paris -Sud 11, 2010.

[1.2] Z. Zakarya, "Etude des Propriétés Physiques et Optiques des Couches Mincees et des Nanomatériaux pour les Matériaux IV-IV. Application aux Cellules Solaires de Troisième Génération", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.

[1.3] K. Gitanjali, "Épitaxie par faisceaux chimiques d'alliages nitrures dilués à base d'aluminium pour des applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke (Québec) Canada, 2014.

Chapitre 2 :

LES CELLULES SOLAIRES

2

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires et les caractéristiques des cellules solaires multi-jonctions ;

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m².

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m². Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global AM1.5G avec une puissance de 1000 W/m², et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière.

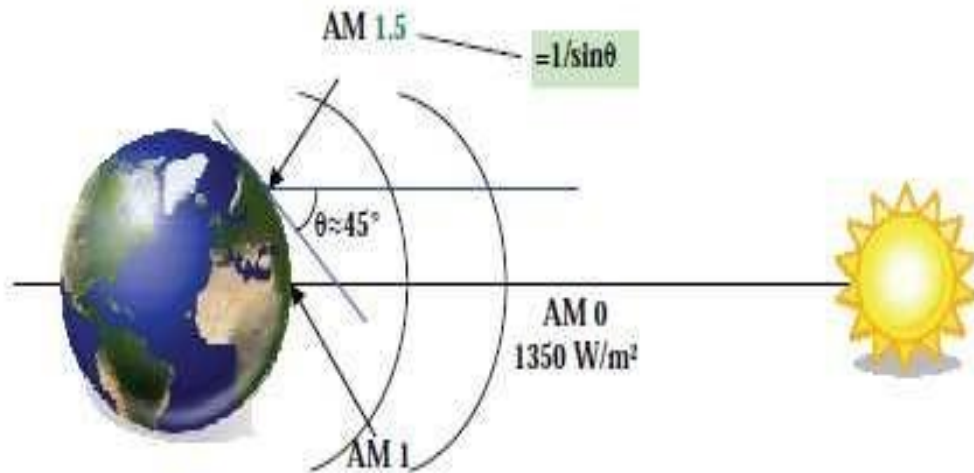


Figure (2.1) : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [2.1].

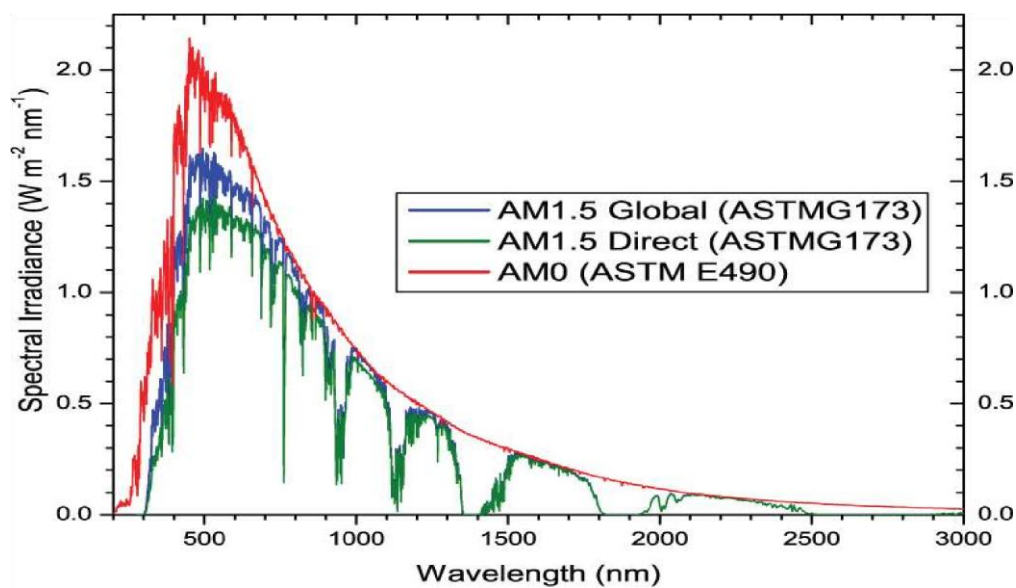


Figure (2.2) : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum [2.1].

2.1 Conversion photovoltaïque

2.1.1 Historique

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable. Ces dispositifs ont été initialement étudiés dès 1839 par Antoine- César Becquerel qui a remarqué que si la lumière brillée sur des diodes cela induit un courant électrique. Cependant, une cellule solaire relativement efficace générant une quantité raisonnable de puissance n'a pas été créé jusqu'en 1954, lorsque Chapin, Fuller et

Pearson ont développé une cellule solaire à base de silicium pour les laboratoires Bell (Bell Labs). Depuis la création de la première cellule solaire rentable, la recherche sur la technologie et l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires a augmenté rapidement. L'accent mis récemment sur l'utilisation des énergies renouvelables et le besoin de puissance dans les régions éloignées telles que l'espace a mis cette recherche dans le premier rang [2.2].

2.1.2 Description de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire. Dans ce sens, l'énergie photovoltaïque utilise la fusion nucléaire.

Pour des applications photovoltaïques, c'est le nombre de photons par unité de longueur d'onde qui est réellement utile puisque ce sont les photons qui créent des paires électron-trou. Par exemple, avec un rendement quantique de 1, chaque photon crée une paire électron-trou. Par conséquent, le nombre de photons en fonction de la longueur d'onde est l'information pratique à connaître dans les applications photovoltaïques. En utilisant la formule de Planck, on déduit de l'irradiance (une énergie par unité de surface et de longueur d'onde) ce nombre de photons. On obtient alors le graphique (2.3) . La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm – 670 nm. Le nombre total de photons sur la plage « utile » 300 nm – 1107 nm est d'environ $2,72 \cdot 10^{21}$.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semiconducteurs (amorphes ou cristallins, alliages ou pas) pour transformer un photon en une paire électron-trou. Si l'on utilise un seul matériau semiconducteur (simple jonction), il y a un compromis entre le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) et l'énergie délivrée par photon. Un matériau avec un gap important absorbe moins de photons car il a une longueur d'onde de coupure plus petite, le courant est donc plus faible. Un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais a une tension plus faible. En effet, les paires électron-trou créées thermalisent très vite à l'énergie égale à la bande interdite E_g du semiconducteur. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Queisser [2.3]. Le graphique (2.4) est le résultat de leurs calculs. Avec un seul matériau et sans technologies « exotiques » le rendement de conversion maximal est de 31% pour un gap d'environ 1,4 eV. Le gap du silicium cristallin n'est pas très loin de cet optimum, avec 1,12 eV le maximum théorique accessible pour une simple jonction en c-Si est d'environ 29 % [2.4].

Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E=h.c/\lambda \quad (2.1)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde [2.1].

2.1.3 Description de la cellule solaire

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur e égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'une plaque métallique a recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.

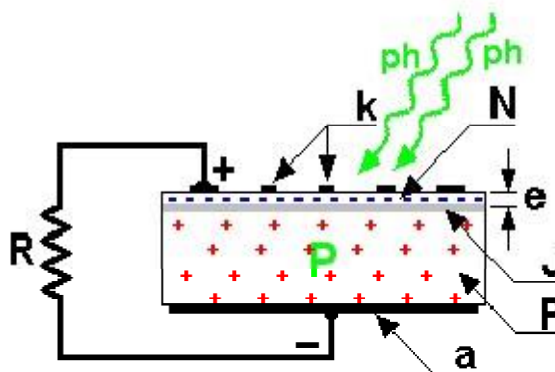


Figure (2.3) : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque [2.5].

2.1.4 Principe physique de fonctionnement

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique dans la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique.

Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique [2.6].

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinaées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau, ...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes [2.7].

Les cellules photovoltaïques effectuent «la transformation directe d'une énergie électromagnétique (lumière) en énergie électrique de type continu directement utilisable » en trois étapes :

- ✓ L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- ✓ Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement ;
- ✓ La collecte des charges ;

a) Absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir principalement trois événements optiques qui sont :

- La réflexion, auquel cas la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- La transmission, où cette fois la lumière traverse l'objet ;
- L'absorption, où ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique.

b) Transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement

Tout solide est constitué d'atomes qui comprennent un noyau et un ensemble d'(é) gravitant autour. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux (é) périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces (é) libérés sont susceptibles de produire un courant si l'on les attire ensuite vers l'extérieure. En régime permanent, l'(é) libéré laisse un trou (h) qui se traduit par une charge positive. Si cet (é) est attiré en dehors, c'est l'(é) d'un atome voisin qui va venir combler ce (h), laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un (é) voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'(é) dans un sens, et de (h) dans l'autre sens ; ce qui donne un courant électrique : ce phénomène physique, dit : la photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car il comporte des (é) libérables; un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette « libération » des (é) par les photons, si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes et donc les énergies mises en jeu également.

c) Collecte des charges

Le comportement des porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les régions électriquement neutres « n » et « p », les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent au courant par leur diffusion, il se crée un courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires (e-h) créées par les photons sont dissociées par le champ électrique interne (jonction), l'(e) est propulsé vers la région de type « n » et le (h) vers la région de type « p ». Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération.

2.1.5 Architecture de la cellule photovoltaïque

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 (2.4).

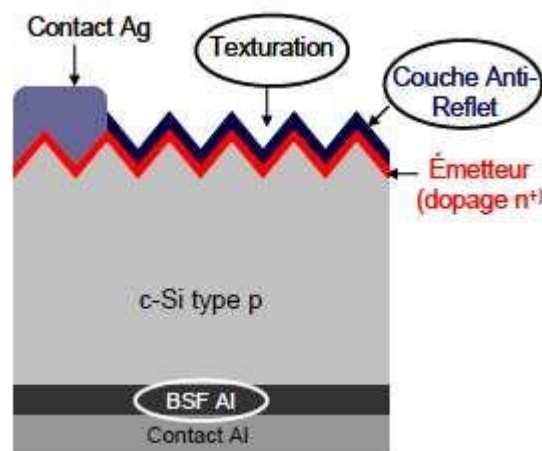


Figure (2.4) : Schéma d'une cellule solaire standard [2.8].

2.1.6 Principaux éléments dans la cellule

- ❖ Le substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.
- ❖ Un contact ohmique inférieur.
- ❖ Une couche absorbante.
- ❖ Une couche tampon.
- ❖ Un oxyde transparent conducteur (OTC) : ITO, ZnO.
- ❖ Un contact ohmique supérieur (grille métallique) : Ni-Al.

a) Couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1-1,7 eV.

b) Couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC). Si un contact couche absorbante/OTC est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister mais son rendement sera limité par :

- L'inadaptation des bandes interdites ;
- Les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains.

De ce fait il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- ✓ Une bande interdite intermédiaire permettant une transition « souple » entre celle du semi-conducteur et celle de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- ✓ Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- ✓ Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains.

c) Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)

Celle-ci doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire la transmission des couches doit être supérieure à 80%. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO et de 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. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO puis une couche dopée de $\text{ZnO}:\text{Al}$ ou de ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite tout courant de fuite entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon plus épaisse.

A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, la totalité du substrat de silicium cristallin est utilisé. Ces substrats (wafers) sont découpés à la scie à fil dans des lingots cristallisés selon différents procédés (CZ, FZ, Block-cast). Une épaisseur de 80 μm suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons soit absorbée. Cependant les techniques actuelles de découpe de wafers ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 100 μm . De plus, la réduction des épaisseurs fragilise les plaques et augmente le taux de casse tout au long du procédé de fabrication (cellules et modules). Les substrats

multicristallins les plus utilisés au niveau industriel ont une forme carrée d'approximativement 15 cm de côté, alors que pour le monocristallin c'est la forme pseudocarrée de 12.5 cm de côté qui est la plus répandue. Trois grandes avancées technologiques, ont permis l'augmentation du rendement des cellules PV. Il s'agit de la texturation de surface, de l'usage d'une couche antireflet ainsi que celle d'un champ de surface arrière (Back Surface Field BSF).

d) Texturation et couche anti-reflet

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée 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'une 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 multicristallins [2.8].

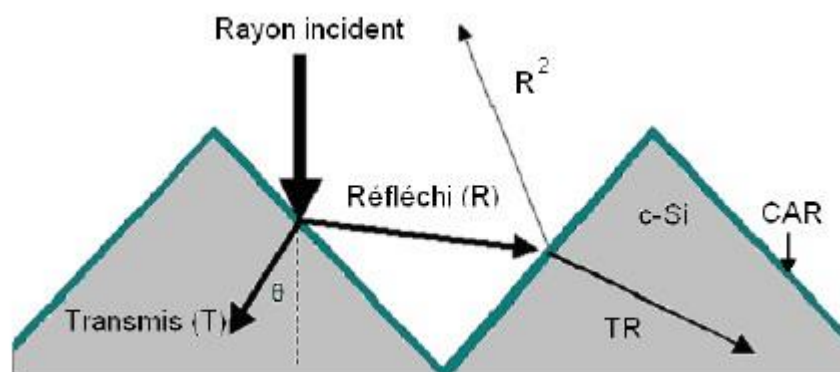


Figure (2.5) : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [2.8].

Une couche antireflet déposée sur la face avant des cellules aide à améliorer le confinement optique. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le semiconducteur, et ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche

possède un indice de réfraction (n_{CAR}) ainsi qu'une épaisseur (e_{CAR}) adaptés au milieu extérieur d'indice n_{ext} .

e) Champ de surface arrière

En face arrière des cellules c-Si standard, il est nécessaire de contacter la base à l'aide d'un contact métallique. Au contact, la vitesse de recombinaison de surface atteint des valeurs très élevées qui diminuent le rendement des dispositifs. Pour réduire le taux de recombinaison sur cette face arrière, il est possible de diminuer les défauts d'interface ou d'éloigner un des types de porteurs. L'efficacité d'un champ répulsif en face arrière a été d'abord démontrée par la réalisation d'un gradient de dopage. La jonction formée éloigne les porteurs minoritaires de la face arrière, et diminue les recombinaisons au contact. Dans le cas des cellules standard sur c-Si de type p, la technique la plus répandue au niveau industriel.

Pendant la réalisation du BSF Aluminium, des phénomènes de passivation des défauts volumiques (gettering) peuvent également apparaître. Cette étape technologique agit donc doublement sur la longueur de diffusion des porteurs, en diminuant à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques.

Les meilleurs rendements atteints par les cellules standards fabriquées industriellement sont de l'ordre de 15 à 16% aussi bien sur c-Si monocristallin que multicristallin. Les modules fabriqués à l'aide de ces cellules montrent donc des performances légèrement inférieures à ces valeurs, de l'ordre de 14% en moyenne [2.8].

2.1.7 Modélisation de la cellule solaire

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{cc} - I_{Sat} \left[\exp\left(\frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{serie})}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{serie})}{R_{shunt}} \quad (2.2)$$

Où, $V_T = (K \times T) / e$: le potentiel thermodynamique,

I_{sat} : le courant de saturation de la jonction,

K : la constante de Boltzman (1.381×10^{-23} Joules/Kelvin),

T : la température de la cellule en Kelvin,

E : la charge d'un électron,

N : le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{CELL} : le courant fourni par la cellule,

V_{CELL} : la tension aux bornes de la cellule,

I_{CC} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit,

R_{shunt} : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction,

R_{serie} : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

La Figure (2.6) représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation (2-2).

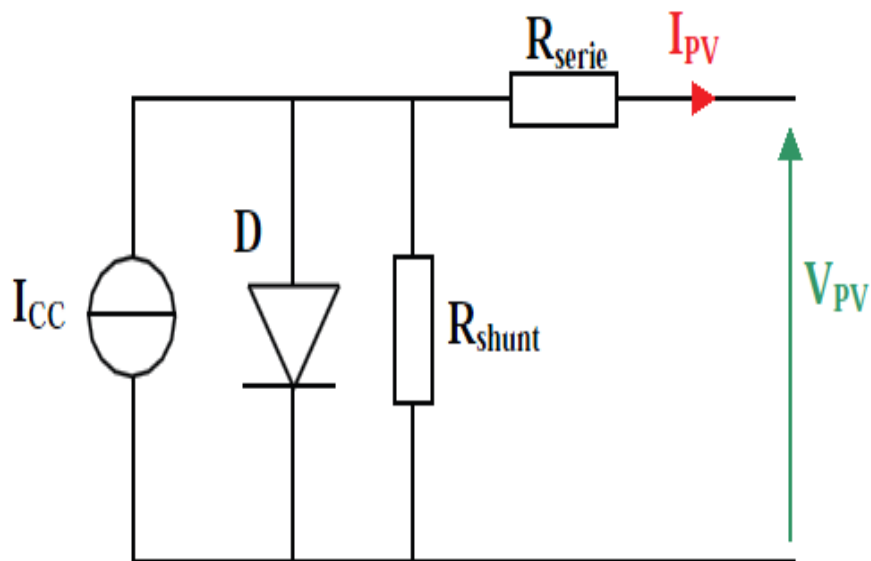


Figure (2.6) : Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin [2.9].

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

I_{cc} : Densité de courant de court-circuit (mA.cm^{-2})

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V)

FF: Facteur de forme (%)

η : Rendement de conversion (%)

Sachant que :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (2.3)$$

Avec P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface ; S : surface de la cellule photovoltaïque.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (2.4)$$

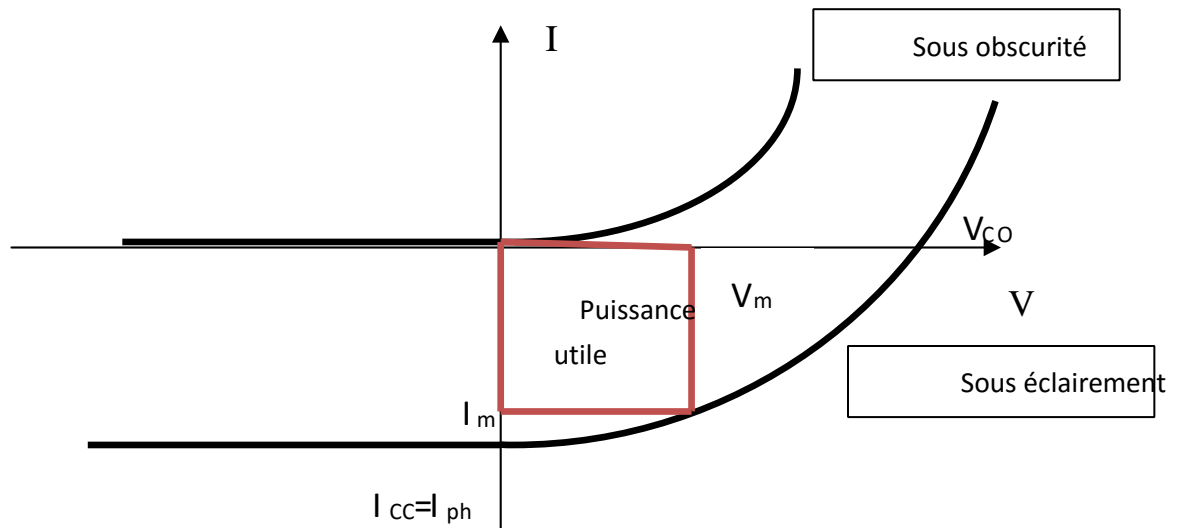


Figure (2.7) : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire.

2.2 Différentes technologies photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

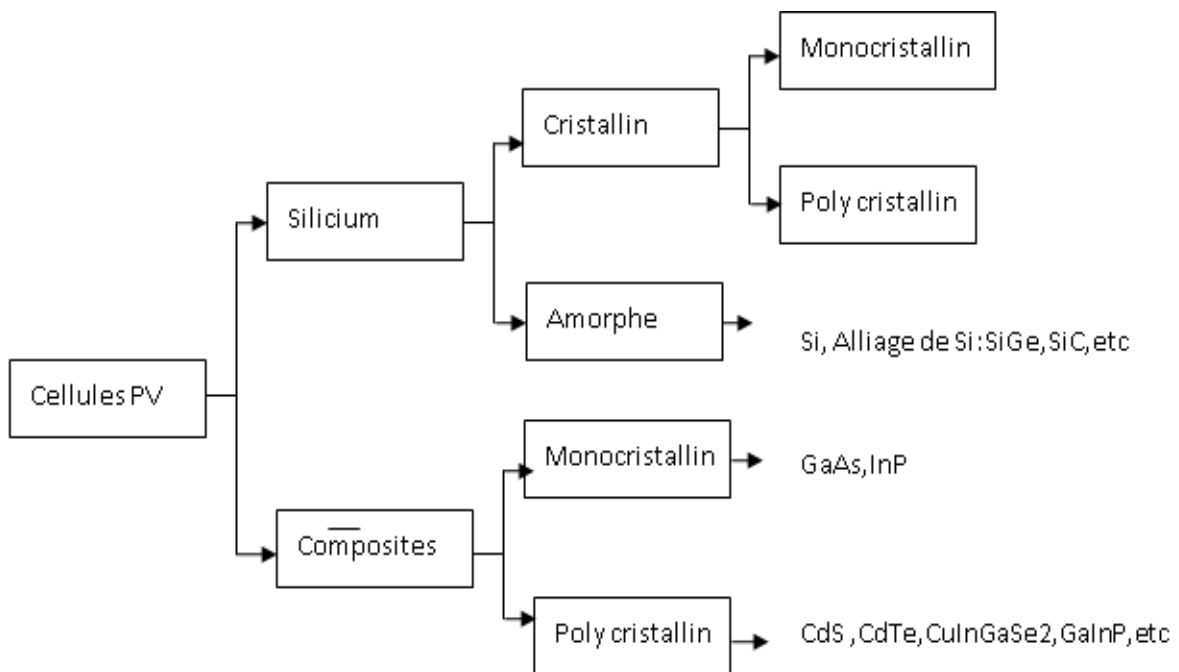


Figure (2.8) : Différentes technologies photovoltaïques.

2.3 Cellules multi-jonctions à haut rendement

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée E_g en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, Figure (2.9). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants

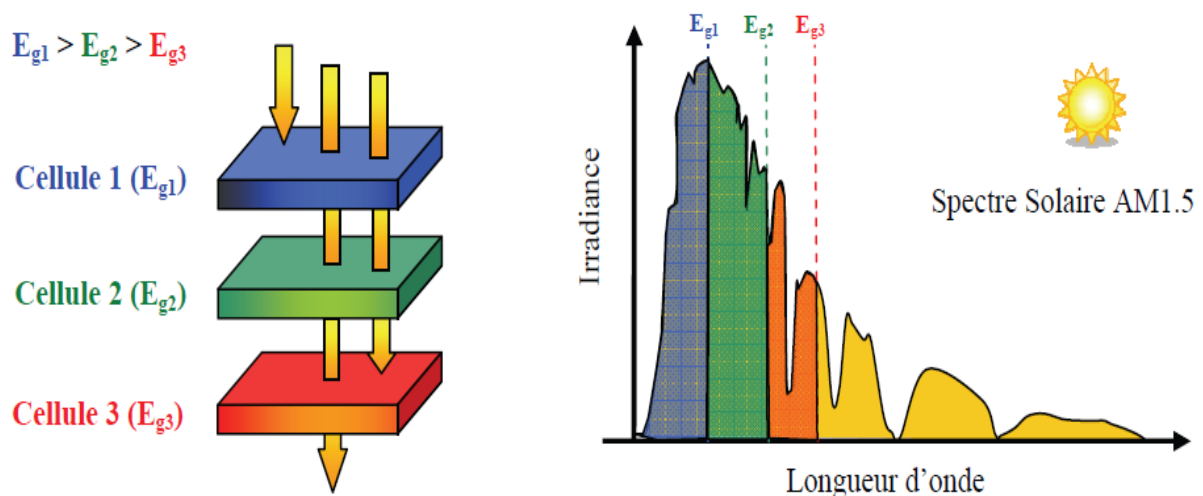


Figure (2.9) : Principe de la cellule multi-jonction.

Des cellules PV multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication, de loin, les plus élevés actuellement (fabrication sous ultra vide, croissance très lente, problème de casses et de défauts aux interfaces). Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales. En effet, dans ce domaine, le critère principal n'est pas le prix par watt

crête (€/Wc) mais plutôt le nombre de watts par kilogramme (Wc/kg). Il faut savoir qu'envoyer un satellite dans l'espace coûte entre 3 000 € et 30 000 € par kilogramme (le prix dépend de l'altitude de mise en orbite). Dès lors, il est compréhensible qu'on utilise les technologies photovoltaïques les plus performantes afin d'optimiser le poids de l'ensemble et faire en sorte qu'il soit le plus longtemps possible autonome.

Un dernier avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM0.

Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités. Aujourd'hui, les véhicules de courses terrestres ou bateaux en utilisent pour assurer leur autonomie. Mais cela reste des cellules beaucoup trop chères pour des applications domestiques.

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions [2.1].

2.4 Panneau solaire

Un panneau solaire est un dispositif qui permet de produire de l'électricité à partir de la lumière. Un panneau solaire est à la base de la partie alimentation embarquée sur les satellites qui gravitent autour de la terre.

Actuellement, la plupart des panneaux photovoltaïques produisent largement plus d'énergie au cours de leur vie que l'énergie nécessaire à leur production. On a vu apparaître ces dernières années la notion de remboursement énergétique noté EPT (Energy Payback Time). Selon les technologies et les lieux de production, l'EPT s'étend de 2 à 4 ans pour des panneaux ayant une durée de vie de 15 à 25 ans. Les progrès de fabrication ont été considérables ces dernières années permettant d'avoir des fonctionnements de générateurs

photovoltaïques garantis au delà de 25 ans avec en plus des coûts de fabrication qui tendent à baisser quand on ramène le prix de l'installation au prix du Watt Crête.

A l'avenir, une complémentarité des différentes sources d'énergie autant fossiles que renouvelables devrait se mettre en place progressivement pour obtenir globalement une production plus maîtrisable en adéquation avec nos besoins.

Il reste encore quelques problèmes techniques à résoudre pour rendre cette énergie compétitive par rapport aux autres solutions et en premier lieu, le fait d'être une source intermittente d'électricité difficile à anticiper et à contrôler la rend difficile à exploiter au moment où on en a besoin. La question du prix élevé de l'électricité photovoltaïque est également souvent avancée comme un frein important au développement de cette ressource énergétique, à juste titre. Cependant, ce prix, aujourd'hui à environ 5 € par Wcrête, baisse régulièrement avec les avancées technologiques diverses. L'objectif des professionnels est de passer dans quelques années, sous la barre symbolique de 1 € par Wcrête. Quelle que soit la baisse des coûts atteinte, cela rend cette énergie de plus en plus intéressante pour le grand public.

Pour l'utilisateur final, la nature technologique de la cellule utilisée pour produire de l'énergie importera donc peu en premier lieu. Les paramètres plus pertinents sont donc tout d'abord le prix du watt crête du module (€/Wc), son rendement, sa durée de vie, sa taille, son poids, son apparence esthétique et l'impact de la fabrication et du retraitement sur l'environnement.

2.5 Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque, et en fin, nous avons parlé sur les cellules multi-jonctions à haut rendement et les panneaux solaires.

2.6 Références du chapitre 2

- [2.1] M. Petibon Stéphane. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». 2009
- [2.2] G, Adam. R, Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012
- [2.3] W. Shockley , H.J. Queisser. « Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells ». J. Appl. Phys, 32 :510–519, 1961.
- [2.4] Jérôme Damon-Lacoste. « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si :H/c-Si .rôle prépondérant de l'hydrogène ». 2007
- [2.5] H. Mourad. « Mise en oeuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche ». N° 24-2007
- [2.6] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; «Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference », 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May 1996 Page(s):1275 - 1278
- [2.7] W. Shockley , Hans J. Queisser ; « detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells » ; J. APPL. PHYS. 32, 510 (1961); DOI:10.1063/1.1736034.
- [2.8] T. Desrues. " Developement des cellules solaires à hétérojonctions " N° d'ordre 2009ISAL0084
- [2.9] Z. Zakarya, Etude des Propriétés Physiques et Optiques des Couches Minces et des Nanomatériaux pour les Matériaux IV-IV. Application aux Cellules Solaires de Troisième Génération”, Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.

Chapitre 3 :

LES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS

3 Le succès industriel des dispositifs à semi-conducteurs est en grande partie dû aux technologies de pointe qui ont été développées pour leur préparation. Les semi-conducteurs ont pris une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, la télécommunication, la télévision, les voitures et les appareils électroménagers, etc.

Dans tous les matériaux semi-conducteurs, les composés III-V sont d'une classe bien définie avec des propriétés qui sont des sources d'intérêt en termes de connaissances et d'applications fondamentale, Ce chapitre couvre des notions sur les matériaux semi-conducteurs en général, les composés binaires (III-V) et ternaires.

3.1 Notion générale sur les matériaux semi-conducteurs

3.1.1 Classification des matériaux

Une manière commune de classement, un matériau est classé suivant ses propriétés électriques. Selon le niveau de la résistivité d'un élément, elle peut être classée par catégorie comme isolateur, conducteur, ou semi-conducteur. La capacité de résister ou de conduire l'électricité d'un matériel dépend de beaucoup de facteurs ; la structure de réseau, les électrons libres, l'énergie de bande interdite, et la température. Quelques matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent en tant qu'un isolateur ou conducteur. Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium et l'arséniure de gallium peuvent agir en tant qu'isolateur ou conducteur et sont donc considérés des semi-conducteurs. La figure (3.1) montre la gamme typique des conductivités pour des isolateurs, des conducteurs, et des semi-conducteurs.

Des semi-conducteurs peuvent être trouvés sous la forme élémentaire ou composée. Le silicium et le germanium sont des exemples des semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV dans le tableau périodique. La figure (3.2) montre une table périodique partielle. En plus des semi-conducteurs du groupe IV, des composés peuvent être faits avec des éléments à partir des groupes III et V. Les exemples des semi-conducteurs III-V incluent le phosphure en aluminium (AlP), nitrure de gallium (GaN), phosphure d'indium (InP), arséniure de gallium (GaAs). Notamment, Il est possible de faire des composés de

semi-conducteur à partir des groupes II-VI, tel que l'oxyde de zinc (ZnO), tellurure de cadmium (CdTe), sulfure de Mercurey (HgS).

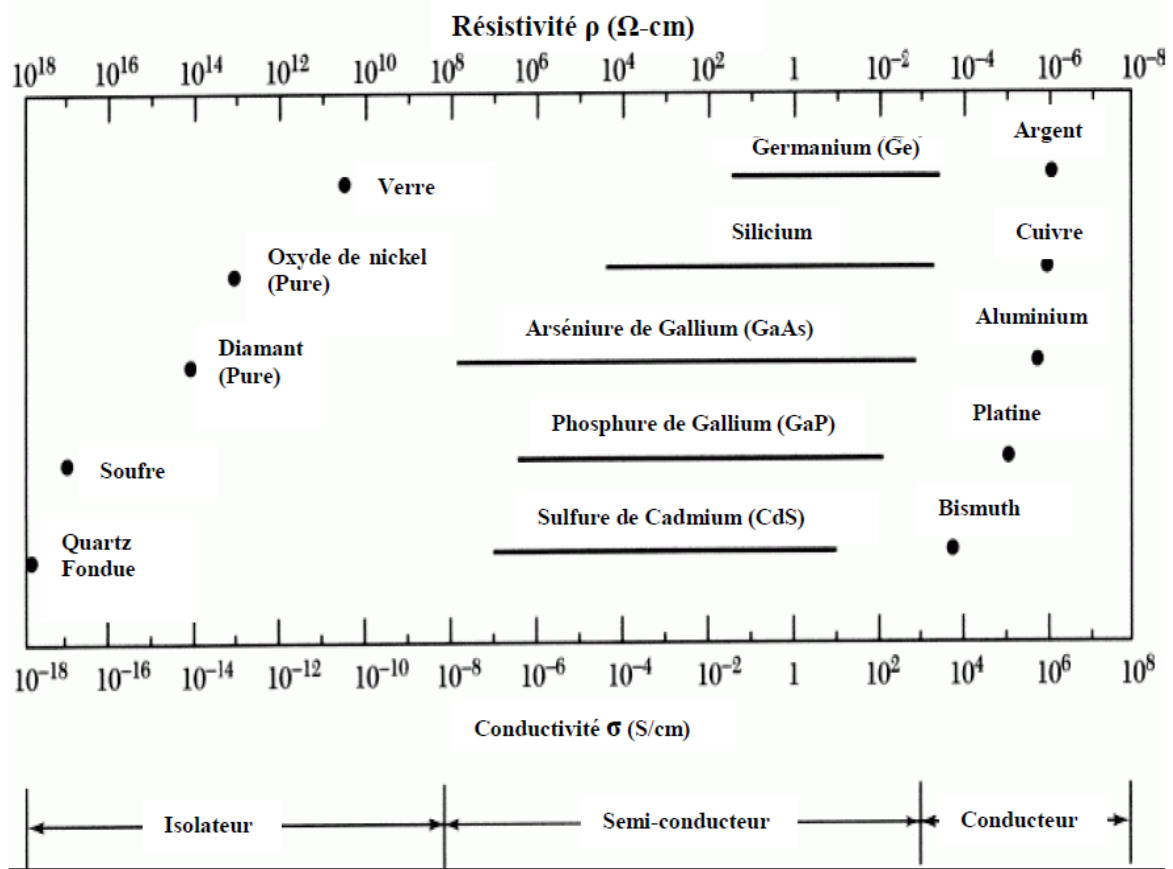


Figure (3.1) : Résistivité pour différents types de matériaux [3.1].

	3A	13	4A	14	5A	15	6A	16			
	5	B	6	C	7	N	8	O			
	10.811	Boron	12.0107	Carbon	14.0067	Nitrogen	15.9994	Oxygen			
	13	Al	14	Si	15	P	16	S			
	26.9815	Aluminium	28.0855	Silicon	30.9738	Phosphorus	32.065	Sulfur			
2B	12	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se
	65.409	Zinc	69.723	Gallium	72.64	Germanium	74.9216	Arsenic	78.96	Selenium	
	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	
	112.411	Cadmium	114.818	Indium	118.710	Tin	121.760	Antimony	127.60	Tellurium	
	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	
	200.59	Mercury	204.383	Thallium	207.2	Lead	208.9804	Bismuth	[209]	Polonium	

Figure (3.2) : Table périodique partiel [3.2].

3.1.2 Bandes d'énergie

Les semi-conducteurs et les métaux possèdent une structure cristalline particulière, c'est à dire que les atomes sont groupés en réseaux régulièrement disposés dans l'espace. Dans ces réseaux, la distance inter atomique étant faible, de l'ordre de quelques Å, les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés, et il en résulte des interactions de nature électrostatique entre les divers atomes. Les états d'énergie électroniques sont distribués selon une loi de dispersion appelée structure de bandes, représentée par une succession de bandes permises pouvant être séparées par des bandes interdites. Toutes les directions de propagation des électrons, c'est à dire tous les points du réseau réciproque, doivent être examinées afin d'établir l'existence d'une bande interdite (le terme anglais "gap") [3.3].

Dans le diagramme de bande de la figure (3.3), la distance inter atomique est représentée graphiquement à l'encontre de l'énergie d'électrons. Le diagramme de bande montre que lorsque les atomes du même élément sont infiniment éloignés les uns des autres, ils ont les mêmes niveaux d'énergie. Toutefois, lorsque les atomes sont rapprochés, les électrons de chaque atome s'interagissent, et les niveaux d'énergie discrets divergent dans une bande d'énergie autorisée représentée par la partie grise du graphique de la figure (3.3).

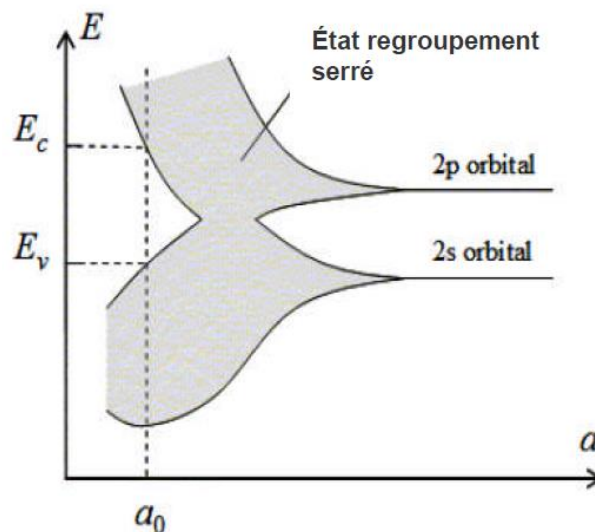


Figure (3.3) : Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau [3.4].

Dans un solide à 0 °K, toutes les bandes d'énergie les plus basses sont remplies, sauf la dernière qui peut être partiellement remplie ou complètement remplie. Lorsque cette bande est partiellement remplie, on a affaire à un conducteur car si on applique un champ électrique, les électrons qui ont l'énergie la plus élevée peuvent acquérir une énergie supplémentaire en occupant des niveaux d'énergie très voisins disponibles. Lorsque cette bande est remplie, on a

affaire à un isolant à 0 °K car l'application d'un champ électrique ne peut fournir assez d'énergie pour lui faire franchir la bande interdite afin d'atteindre les premiers niveaux disponibles : les électrons ne peuvent acquérir un mouvement collectif correspondant au passage du courant [3.5].

On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'existe entre ces bandes, comme illustré à la figure (3.4).

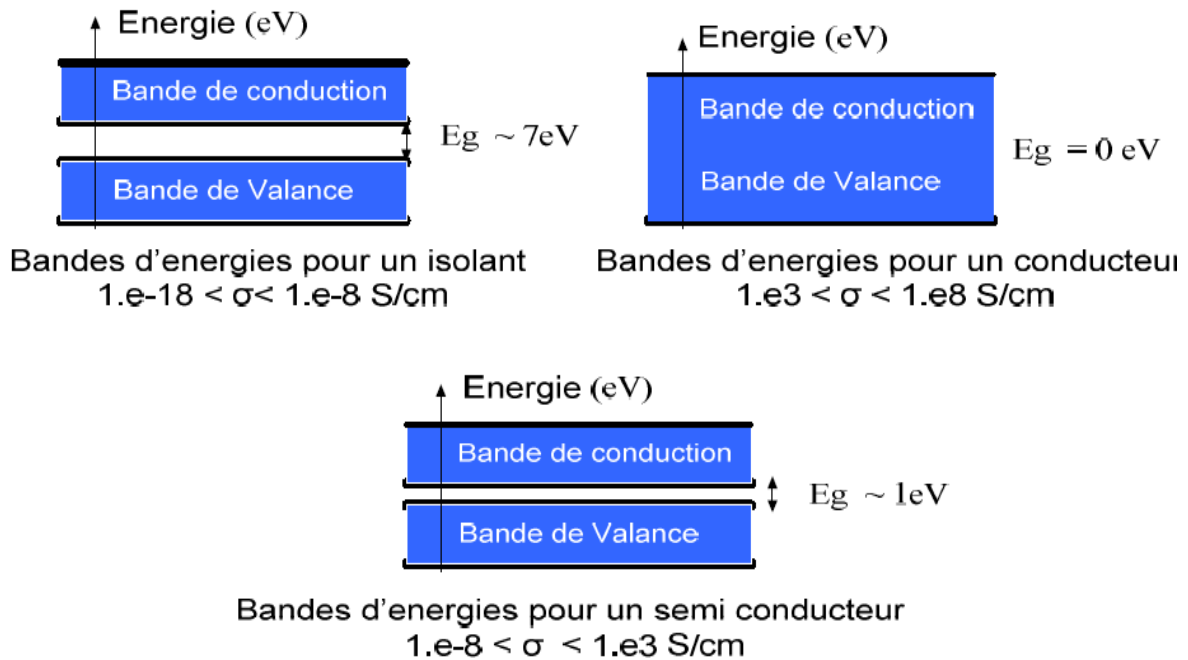


Figure (3.4) : Bandes d'énergie dans différents types de matériaux [3.6].

3.1.3 Porteurs de charge

Pour l'application des semi-conducteurs dans les cellules solaires, l'aspect le plus important d'un matériau est la caractéristique courant-tension. Le courant est le mouvement de la charge à travers un matériau, les charges dans un semi-conducteur qui peuvent se déplacer à l'intérieur du matériau par suite de la force appliquée sont appelées les porteurs. Les porteurs doivent circuler vers les bandes de conduction et à partir des bandes de valence dans le but de créer un courant dans le semi-conducteur [3.7].

Il existe deux types de conduction : la conduction par électrons et la conduction par trous. Dans un cristal semi-conducteur intrinsèque, certaines liaisons entre les atomes se cassent. L'électron est alors libre de se déplacer dans le cristal. Sur l'emplacement de la liaison rompue on dit qu'il y a un trou. Pour chaque liaison rompue, il y a formation d'une paire électron- trou.

Sous l'effet du champ électrique les électrons (charge $-e$) se déplacent dans le sens inverse du champ, les trous (charge $+e$) se déplacent dans le sens du champ [3.5]. La figure (3.5) décrit très simplement ce phénomène.

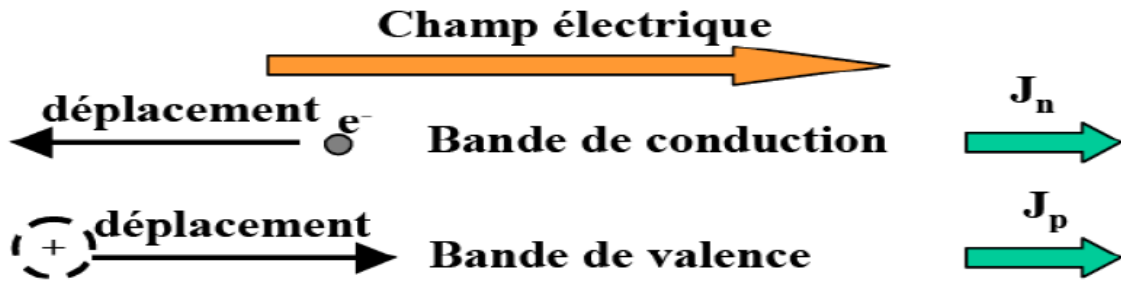


Figure (3.5) : Représentation symbolique du mécanisme de conduction dans les bandes de valence et de conduction. Les densités de courant résultantes sont dans le même sens [3.8].

Quand le réseau est formé entre les différents atomes, il y a une probabilité finie qui à n'importe quelle température au-dessus de zéro Kelvin (0 K°), un électron de la bande de valence sera frappé librement et une défectuosité électronique connue sous le nom de trou sera laissée. Le trou laissé maintient une charge positive égale à la valeur absolue de la charge d'électron [3.1]. Un nouveau électron de valence peut venir occuper ce trou et ainsi de suite.

La figure (3.6) donne une idée du mécanisme mis en jeu. On retrouve un mécanisme similaire à celui des pièces d'un jeu de taquin ou « pousse-pousse ».

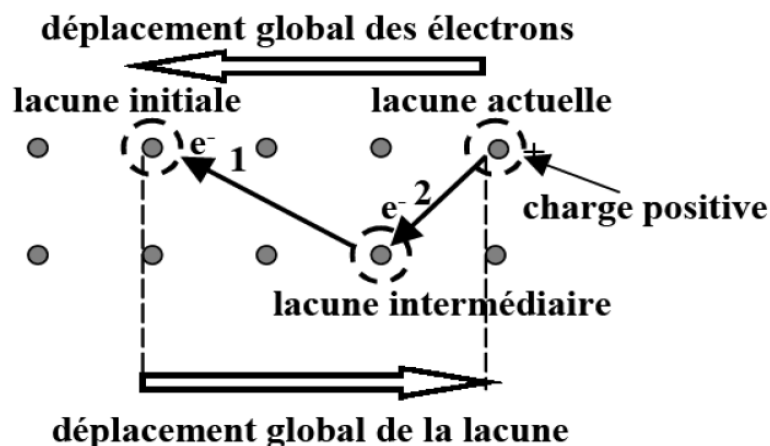


Figure (3.6) : Représentation symbolique du mécanisme de déplacement des électrons dans la bande de valence [3.8].

On peut noter que si les électrons se déplacent de la droite vers la gauche, les trous se déplacent de la gauche vers la droite, c'est-à-dire dans le sens inverse.

A l'équilibre thermique, les densités totales d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont données par les expressions suivantes [3.9] :

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_F - E_C}{kT}\right] = N_C \exp\left[\frac{E_F - E_C}{kT}\right] \quad (3.1)$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_V - E_F}{kT}\right] = N_V \exp\left[\frac{E_V - E_F}{kT}\right] \quad (3.2)$$

Où : N_C et N_V sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence [3.9].

Les densités d'états énergétiques (densité d'électrons ou de trous) s'expriment par les relations suivantes [3.8] :

$$dN_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c^*}{\eta^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} dE \quad (3.3)$$

$$dN_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v^*}{\eta^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} dE \quad (3.4)$$

L'électron libre ainsi que le trou est connu comme paire électron-trou (EHP) et peut être décrit par le phénomène d'ionisation ou de génération. Quand un électron libre et un trou se combinent disparaissent, un processus qui est connu sous le nom de recombinaison. Le taux de recombinaison est proportionnel au nombre d'électrons libres et de trous existants. Lorsque l'équilibre thermique de la génération et de la recombinaison est maintenu le nombre d'EHP sera constant. Le Germanium réagit de la même façon même s'il a 32 électrons au total, 28 qui constituent le noyau atomique, laissant 4 électrons de valence [3.1]. Recombinaison et génération sera discuté plus en détail plus tard.

Les électrons et les trous ont chacun une mobilité associée à chaque matériau à base de la simplicité avec laquelle les porteurs de charge libres peuvent se déplacer à travers le matériau. Bien que les électrons et les trous soient de charge égale, les électrons ont une plus grande mobilité. Les électrons et la mobilité des trous sont fonction de caractéristiques matérielles telles que la structure en réseau, la taille des atomes dans la matière, et l'orientation du canal, dans lequel le support de charge se déplace. La mobilité d'électrons et de trous détermine les paramètres tels que la conductance et la résistivité d'un matériau, qui sont des facteurs importants pour les cellules solaires [3.4].

3.1.4 Dopage et impuretés des semi-conducteurs

Il y a deux types de semi-conducteurs, intrinsèque et extrinsèque. Les semi-conducteurs intrinsèques sont complètement purs, signifiant qu'ils ont seulement un type d'élément ou un composé dans sa structure cristalline [3.7], et ayant un taux d'impuretés très faible (moins de 1 atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur). Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leur conductivité augmente avec la température [3.5].

3.1.4.1 Semi-conducteur intrinsèque

Il est impossible de créer des semi-conducteurs intrinsèques totalement purs parce qu'à un certain point pendant le processus de croissance les impuretés contaminent le matériel [3.7]. Si un lien de semi-conducteur intrinsèque est cassé, un électron libre et un trou sont créés simultanément, de même, si un électron est excité de la bande de valence à la bande de conduction alors un trou sera simultanément créé dans la bande de valence [3.1]. On peut considérer que le trou s'est déplacé par combinaisons d'électrons. La structure cristalline du silicium pur est présentée dans la figure (3.7) :

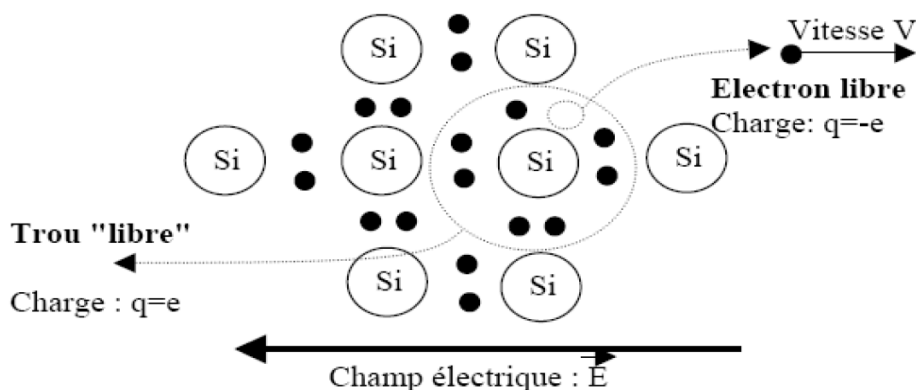


Figure (3.7) : Structure cristalline du Silicium pur [3.6].

3.1.4.1.1 Concentration en porteurs intrinsèques

Dans des conditions d'équilibre, un semi-conducteur intrinsèque a un nombre égal des trous (p) et des électrons (n) qui est finalement égal à la concentration en porteur intrinsèque (n_i). Les nombres de p et n sont égaux à un semi-conducteur intrinsèque parce que les porteurs sont créés uniquement par paires dans un matériau très pur [3.1]. Ceci se résume à cette équation :

$$n = p = n_i \quad (3.5)$$

Les concentrations des porteurs mobiles sont fonction de la largeur de bande interdite E_g (voir tableau (3.1)), mesurée par rapport à l'énergie thermique kT . Pour les petites valeurs de T ($kT \ll E_g$), n_i est petite, ce qui implique moins de porteurs mobiles. Le nombre moyen de porteurs (électrons ou trous mobiles) qui existent dans un matériau semi-conducteur intrinsèque peut être trouvé à partir de la loi d'action de masse [3.10] :

$$n_i = AT^{1.5} \exp\left[-\frac{E_g}{(kT)}\right] \quad (3.6)$$

Où :

T est la température absolue, en K°

k est la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K ou 8.62×10^{-5} eV/K)

E_g est la largeur de la bande interdite en eV. Elle est donnée par

$$E_g = E_c - E_v \quad (3.7)$$

A est une constante dépendant du matériau donné et il est donné par :

$$A = \frac{2}{h^3} (2\pi m_o k)^{3/2} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_o m_o} \right)^{3/4} \quad (3.8)$$

Où h est la constante de Planck ($h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js ou 4.14×10^{-15} eV s).

m_o est la masse au repos d'un électron.

m_n^* est la masse effective d'un électron dans le matériau.

m_p^* est la masse effective d'un trou dans le matériau.

	E_g (eV)	n_i (cm ⁻³)	N_C (cm ⁻³)	N_V (cm ⁻³)
InSb	0.18	1.6×10^{16}		
InAs	0.36	8.6×10^{14}		
Ge	0.67	2.4×10^{13}	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}
Si	1.124	1.0×10^{10}	7.28×10^{19}	1.05×10^{19}
GaAs	1.43	1.8×10^6	4.35×10^{17}	5.33×10^{18}
GaP	2.26	2.7×10^0		
GaN	3.3	$\ll 1$		

Tableau (3.1) : Bande interdite, concentration intrinsèque des porteurs, densité effective de la bande de conduction et la bande de valence à $T = 300 K^\circ$ pour différents semiconducteurs [3.11].

Les cristaux semi-conducteurs purs, qui ne contiennent pas d'atomes étrangers, sont appelées intrinsèque. Dans un semi-conducteur intrinsèque à $0 K^\circ$ il n'y a pas de EHP, lorsque la température augmente, cependant, la chaleur absorbée par le matériau créera un certain

nombre de EHP et la conductivité du matériau augmente. Depuis que EHP sont responsables de la conductivité, ils sont appelés porteurs intrinsèques. Leur nombre augmente de façon logarithmique. Ceci est montré dans la figure (3.8) pour Si, Ge et GaAs.

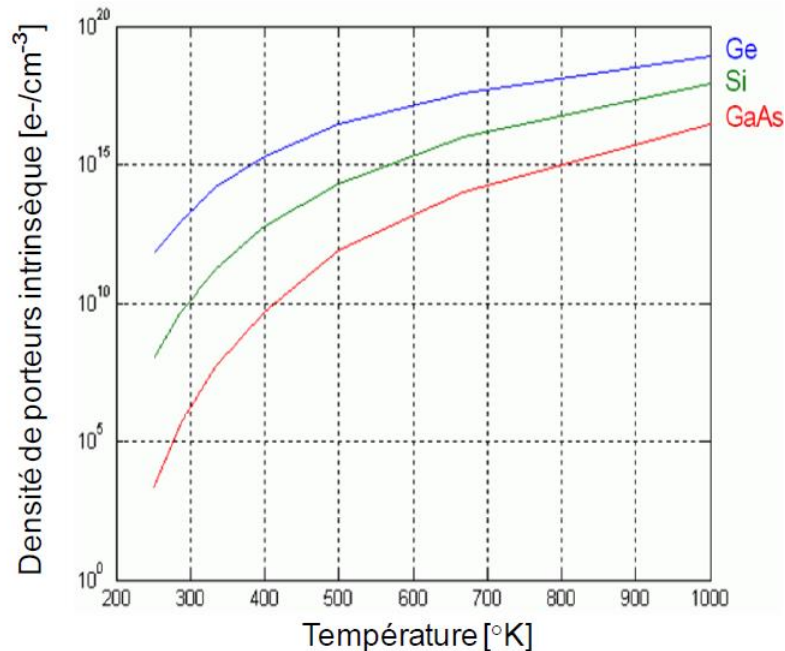


Figure (3.8) : Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température [°K] [3.12].

3.1.4.2 Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèques sont créés en ajoutant des atomes d'impuretés dans les matériaux intrinsèques. Heureusement, ajouter des impuretés dans un matériel peut être bénéfique aux performances du semi-conducteur. L'ajout des impuretés dans la substance avec l'intention de contrôler ses caractéristiques de fonctionnement est connu sous le nom de dopage [3.7], ce processus peut engendrer des changements des propriétés électriques.

Le dopage est employé pour contrôler le nombre d'électrons ou de trous dans un matériel par l'addition d'une quantité déterminée d'impuretés, avec résultats des matériaux de type-p ou de type-n en concordance avec le nombre des trous ou des électrons libres [3.1].

3.1.4.2.1 Semi-conducteur dopé n

Les dopants de type-n sont également connus comme donneurs, car ils sont des éléments ou des composés avec cinq électrons de valence ou plus qui donneront un électron après que les quatre autres forment des liaisons covalentes avec le matériau intrinsèque dans lequel ils ont été placés.

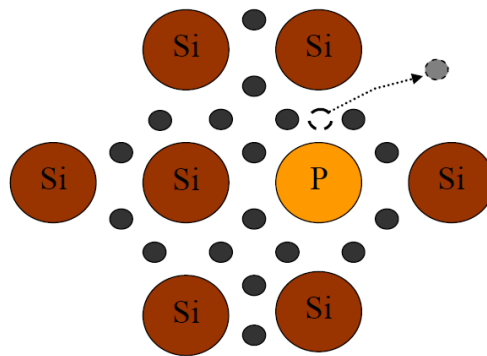


Figure (3.9) : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n [3.6], [3.8].

Dans le matériau de type-n, les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires [3.7]. Prenons le cas d'un atome de la colonne V, par exemple le phosphore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 5 électrons, comme représenté sur la figure (3.9). Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 9 électrons sur sa couche externe. Dès que l'énergie thermique sera suffisante, cet électron va quitter son orbite pour circuler dans le cristal. Il rejoint dans ce cas la bande de conduction du cristal. Le noyau de l'atome de phosphore ayant une charge (due à ses protons) qui n'est plus compensée, cet atome va s'ioniser positivement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un électron au cristal (dans sa bande de conduction), on l'appelle atome donneur. Notons que la charge totale du cristal reste nulle, le cristal étant globalement neutre.

3.1.4.2.2 Semi-conducteur dopé p

Les dopants de type-p, ou accepteurs, sont des éléments ou des composés ayant trois ou moins d'électrons de valence et acceptent des électrons, forment des liaisons covalentes avec quatre ou plusieurs de leurs cinq trous. Les matériaux de type-p ont des trous comme porteurs majoritaires et des électrons comme porteurs minoritaires [3.7].

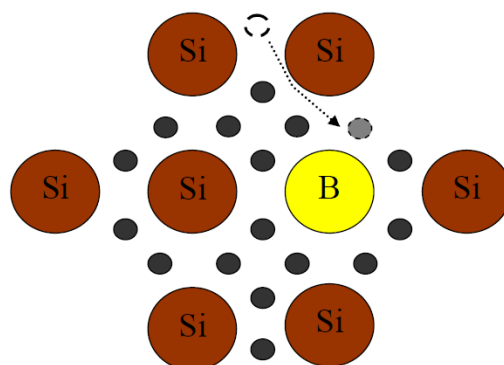


Figure (3.10) : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P [3.6], [3.8].

Prenons le cas d'un atome de la colonne III, par exemple le bore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 3 électrons, comme représenté sur la figure (3.10). Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 7 électrons sur sa couche externe. Dès que l'énergie thermique sera suffisante, un électron de valence voisin va quitter son orbite pour venir créer un octet autour de l'atome de bore. Il crée dans ce cas une lacune dans la bande de valence du cristal, c'est-à-dire qu'il crée un trou. Le noyau de l'atome de bore ayant une charge due à ses protons insuffisants, cet atome va s'ioniser négativement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un trou au cristal (dans sa bande de valence), on l'appelle atome accepteur, puisqu'il accepte un électron. Notons que la charge totale du cristal reste toujours nulle, le cristal étant globalement neutre.

Le nombre des porteurs majoritaires est analogue au dopage dans une matière, tandis que le nombre des porteurs minoritaires est analogue à la température. Notons que les deux types p et n du matériau reste neutres. Toutefois, l'effet de dopage est optimal pour les propriétés électriques de la matière, même à de très faibles concentrations [3.12].

3.1.5 Gap direct et indirect

Les comportements « directs » et « indirects » sont suffisamment importants qu'ils méritent une mention spéciale. Les aspects critiques des structures de bandes d'énergie de ces deux types de semi-conducteurs sont représentés schématiquement sur la figure (3.11). L'énergie minimale de la bande de conduction dans les matières indirectes à une autre dynamique que celle de l'énergie maximale de la bande de valence. Les électrons dans la bande de conduction vont rapidement se déplacer à l'énergie de la bande minimale. Les trous également vont rapidement se déplacer à l'énergie maximale de la bande de valence. Par conséquent, les électrons et les trous n'ont normalement pas la même dynamique dans un semi-conducteur indirecte tandis que dans un matériau direct, ces quantités de mouvement sont égales. Cela a des conséquences sur la durée de vie des porteurs minoritaires et les propriétés optiques des semi-conducteurs [3.13].

Lorsque la bande de valence et la bande de conduction coïncident en vecteur d'onde k , le semi-conducteur a une bande interdite directe. Lorsque la bande de valence et la bande de conduction ont différents vecteurs d'onde k , le semi-conducteur possède une bande interdite indirecte.

Le vecteur d'onde k représente la différence de dynamique. Afin d'exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction dans un semi-conducteur à bande interdite indirecte, en plus d'un photon, un phonon est nécessaire. Le phonon est une vibration en réseau. Le phonon transfère son mouvement pour l'électron au moment où le photon est absorbé. Par conséquent, un semi-conducteur à bande interdite direct est généralement préférable pour l'optoélectronique. Le silicium est un exemple d'un semi-conducteur à bande interdite indirecte. L'Arséniure de gallium et le nitrure d'indium gallium sont des exemples de semi-conducteurs à bande interdite directe [3.2].

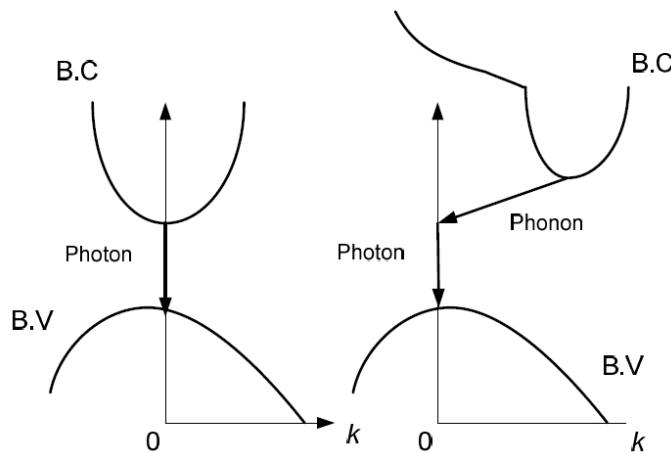


Figure (3.11) : Différence entre une bande interdite directe et indirecte d'un semi-conducteur [3.9].

La structure de bande est la relation entre l'énergie de la particule et son vecteur d'onde k : $E(k)$. On représente l'évolution de l'énergie de l'électron par la courbe $E(k)$ en forçant le vecteur d'onde k à demeurer dans une direction remarquable de l'espace des k , c'est à dire une direction cristallographique du réseau réciproque [3.9].

3.1.6 Génération–Recombinaison

Lorsqu'il y a dans la bande de conduction et dans la bande de valence un excès d'électrons libres et de trous libres par rapport aux concentrations d'équilibre thermique, différents processus tendent à ramener le système vers son état d'équilibre. Ces processus sont traduits dans les équations de conservation par les termes G et R , qui caractérisent la création (génération) et la disparition (recombinaison) des porteurs dans un semi-conducteur [3.14]. Une équation importante pour les considérations suivantes est l'équation de continuité, dans sa forme générale pour la concentration d'un certain type de particule i ;

$$\frac{\partial n_i(x)}{\partial t} = G_i(x) - R_i(x) - \text{div } j_i(x) \quad (3.9)$$

Cette relation exprime que la densité des particules n_i de type i dans un élément de volume à l'emplacement x augmente avec le temps lorsque ces particules sont produites à un taux G_i , que n_i diminue quand les particules à l'emplacement x sont anéantis au taux R_i , ou quand ils s'échappent de l'élément de volume à l'emplacement x , parce que la densité de courant des particules j_i circulant vers la droite est supérieure à celle circulant vers la gauche, exprimée par $\text{div } j_i > 0$ [3.15].

3.1.6.1 Génération du paire électron-trou

Les électrons et les trous sont produits par des procédés qui peuvent fournir au moins l'énergie minimum de génération ϵ_G d'une paire électron-trou. Cela comprend l'ionisation par impact, dans lequel un électron (ou un trou) avec une énergie cinétique suffisante frappe un électron lié (dans la bande de valence) hors de son état lié et le favorise à un état dans la bande de conduction, en créant ainsi un électron et un trou. Le même processus pour exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction peut se faire avec une vibration du réseau géant fournissant l'énergie, ou par l'absorption d'un photon. En présence d'impuretés fournissant des états d'énergies dans le gap d'énergie, l'excitation peut se dérouler en plusieurs étapes et l'énergie générée ϵ_G peut être fournie en portions plus petites par des phonons ou même des photons [3.15].

3.1.6.2 Recombinaison des porteurs libres

Les électrons qui se déplacent librement à travers le cristal ont tendance à se recombiner avec les trous. De cette façon, les EHP disparaissent. Ce phénomène est appelé recombinaison et sa vitesse est proportionnelle au nombre de trous et d'électrons libres existants. Lorsque la recombinaison se produit, l'électron et le trou cessent d'être des porteurs libres. Au cours de ce phénomène, l'électron transite dans un état d'énergie inférieure. Pour cela, il doit libérer un quantum d'énergie égale à la différence de son origine et son état final [3.12]. Cette énergie peut être classée en trois façons : radiative où l'émission d'un photon (lumière), non radiative où l'émission d'un phonon (chaleur), et Auger où un transfert d'énergie cinétique à un autre électron libre ou trou [3.7].

La recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison directe (de bande à bande) ;
- Recombinaison indirect (de bande aux impuretés, avec l'aide de pièges) ;
- Recombinaison Auger ;
- Recombinaison de surface.

Ces processus sont présentés dans la figure 3.12.

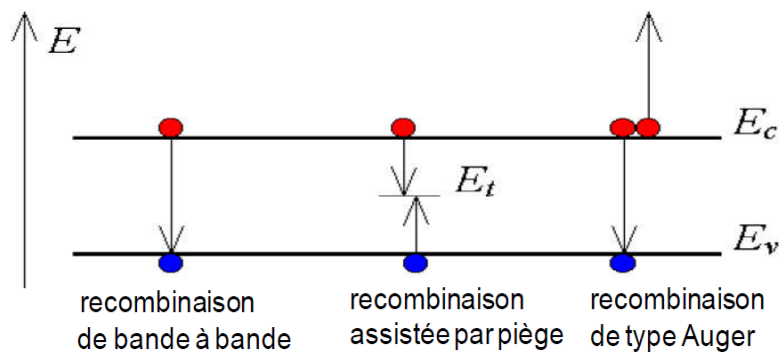


Figure (3.12) : Types de mécanismes de recombinaison [3.7].

3.2 Multi-jonction

3.2.1 Jonction PN à l'équilibre

L'implémentation réussite d'une jonction PN est essentielle dans l'électronique moderne et les dispositifs à semi-conducteurs, y compris le transistor à jonction bipolaire (BJT), le transistor à effet de champ de structure métal-oxyde-semi-conducteur (MOSFET), le redresseur, diode Zener, et les dispositifs photovoltaïques.

Une jonction PN est formée pour contrôler efficacement les caractéristiques électriques d'un matériau [3.1]. On sait qu'elle ne permet le passage du courant que dans un sens [3.6], et qu'elle est constituée de deux zones respectivement dopées P et N juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte, figure (3.13), c'est à- dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes.

Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [3.16].

La force qui maintient l'équilibre sans aucune force externe est la barrière de potentiel intégré V_{bi} . Cette barrière maintient l'équilibre en séparant les électrons porteurs majoritaires dans la région n et les électrons porteurs minoritaire dans la région P. De même, il sépare les trous porteurs majoritaires dans la région P et les trous porteurs minoritaire dans la région N. Parce que cette tension maintient l'équilibre et ne produit pas de courant. La représentation mathématique de cette tension est [3.7].

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (3.10)$$

Où : N_a est la concentration d'accepteur (cm^{-3}), N_d la concentration de donneur (cm^{-3}), et q est la charge élémentaire (C).

La largeur de la région de déplétion (W) est également liée au niveau de dopage des deux régions. Elle peut être calculée en utilisant l'équation (3.11) [6].

$$W = \left\{ \frac{2 \varepsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.11)$$

Les valeurs typiques de la largeur de la région de déplétion sont de 0.1 à 10 μm .

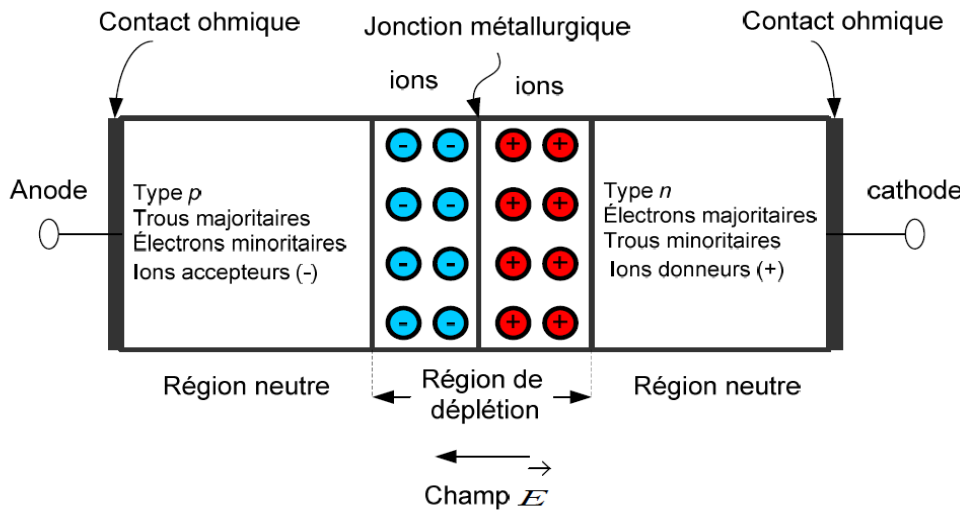


Figure (3.13) : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre [3.17].

3.2.2 Polarisation de la jonction en direct

Si on polarise la jonction sous une tension directe V_{direct} , elle réduit la hauteur de la barrière qui devient $(V_{bi}-V_{direct})$ entraînant une diminution de l'épaisseur W (dans l'équation (3.11) V_{bi} est remplacé par $(V_{bi}-V_{direct})$). De nombreux électrons de la région N et de trous de la région P peuvent alors franchir cette barrière de potentiel et, se présentant alors dans un "milieu hostile", ils sont recombinés, figure (3.14). Cette recombinaison consomme près de la région de déplétion W des trous dans la région P (des électrons dans la région N). Pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre P se mettent en mouvement vers la zone où se produit la recombinaison (déficit en trous). Les électrons de la région neutre N sont soumis à un phénomène analogue [3.16].

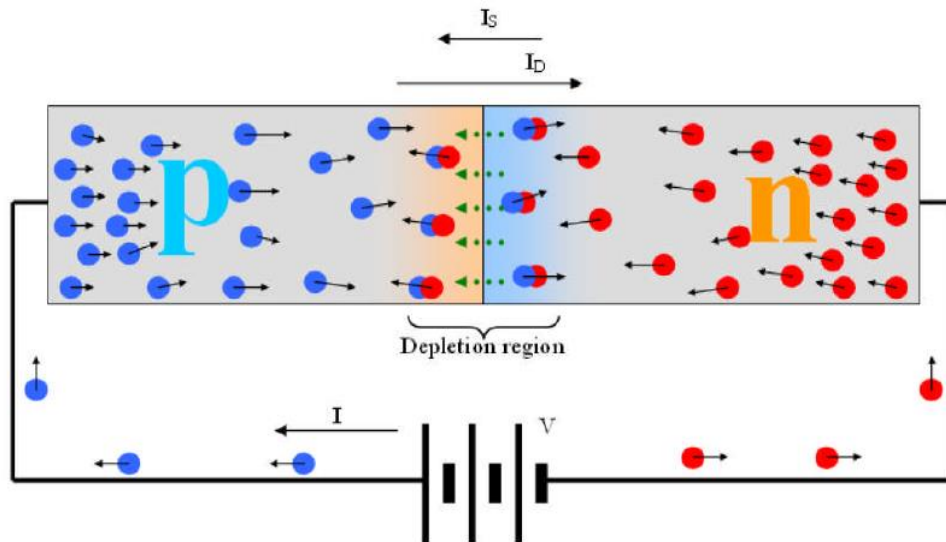


Figure (3.14) : Jonction polarisée dans un sens direct [3.1].

Comme les porteurs majoritaires continuent à partir de la région N vers la région P, ils deviennent minoritaires où ils diffusent et éventuellement se recombinent avec les trous majoritaires. De même, les trous en permanence générés dans la région P seront disponibles à se recombiner avec les électrons traversant la barrière de potentiel. Une partie du courant étant produite est due à la saturation (I_S) et une partie est due à la diffusion (I_D).

Toutefois, dans l'état de polarisation direct le courant de diffusion est beaucoup plus grand que le courant de saturation (l'équation (3.12)) en raison de la diminution de la région de déplétion. La figure (3.15) montre la caractéristique courant –tension (I - V) d'une jonction PN dans l'état de polarisation directe.

$$I_{Total} = I_S + I_D \approx I_D \quad (3.12)$$

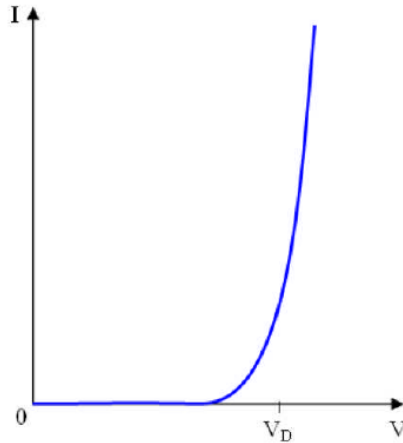


Figure (3.15) : Caractéristique I-V de la jonction PN en polarisation directe [3.1].

3.2.3 Polarisation de la jonction en inverse

Si on polarise la jonction en sens inverse, la hauteur de barrière de potentiel entre les régions P et N est renforcée par la tension extérieure inverse appliquée (V_{inv}) et devient ($V_{bi} + V_{inv}$). Le champ électrique dans la région de charge d'espace augmente ainsi que son épaisseur W (dans l'équation (3.11), V_{bi} devient $V_{bi} + V_{inv}$). Les porteurs majoritaires des régions N et P n'ont pas l'énergie nécessaire pour sauter cette barrière de potentiel. La jonction est alors traversée par un très faible courant de saturation I_S . La (figure 3.16) nous montre l'origine du courant inverse de saturation I_S de cette jonction [3.16].

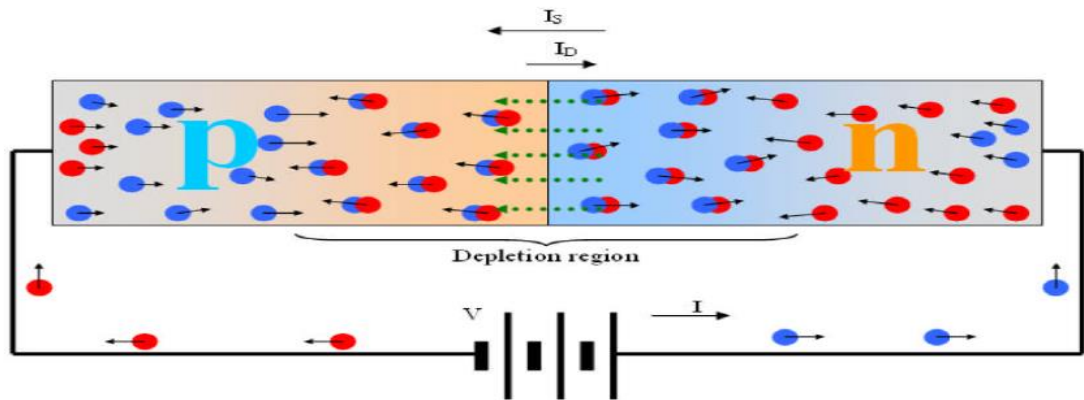


Figure (3.16) : Jonction polarisée dans un sens inverse [3.1].

La largeur de région de déplétion est donnée par l'équation (3.13).

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.13)$$

$$I_{Total} = I_S + I_D \approx I_S \quad (3.14)$$

En cas de polarisation inverse, la probabilité qu'un électron aura suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière de potentiel est très faible et la jonction va agir comme un isolant, en ne permettant pas le courant de circuler. Avec la croissance de la région de déplétion, le courant de diffusion (I_D) est très faible et le courant total dans le système est approximativement égal au courant de saturation (I_S) (l'équation (3.14)).

Idéalement, ce courant serait égal à zéro, mais en réalité, il ya une petite quantité de courant de saturation, comme illustré dans la figure (3.17).

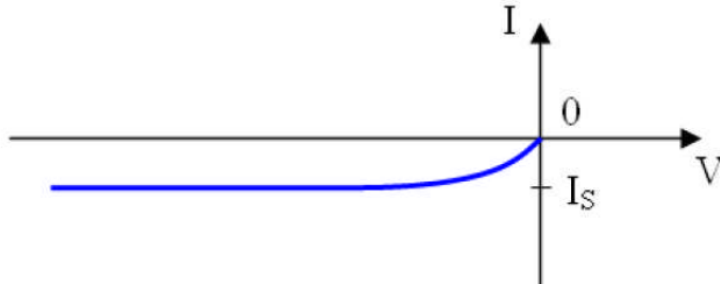


Figure (3.17) : Caractéristique I-V de la jonction PN en polarisation inverse [3.1].

3.2.4 Hétérojonctions

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semi-conducteur, sont appelées homojonctions. Par contre, les jonctions réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées hétérojonctions [3.18]. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semiconducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions.

Le schéma de la figure (3.18) donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

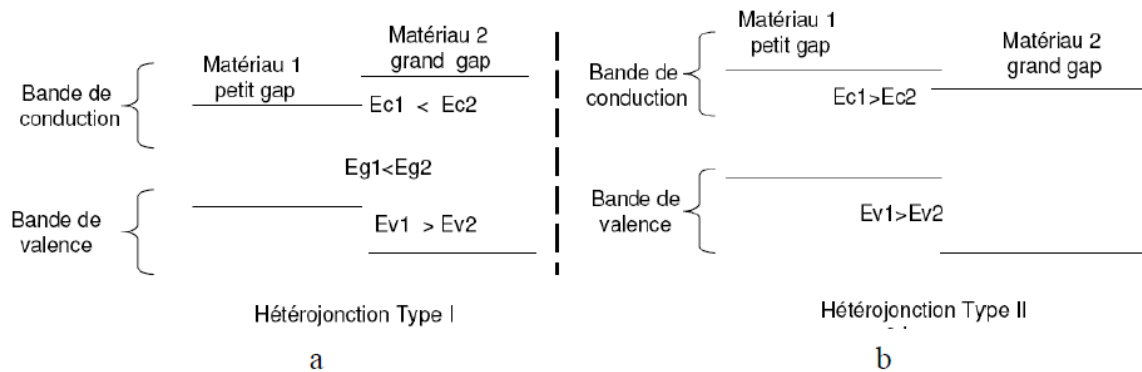


Figure (3.18) : Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction [3.19].

Pour l'hétérojonction de type I (figure (3.18.a)), les offsets de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Une énergie est donc nécessaire pour faire déplacer les porteurs du matériau petite bande interdite au matériau grande bande interdite. Les hétérojonctions (GaAs-AlGaAs, InP-InGaAs, Si-SiGe) sont des hétérojonctions de type I. Les hétérojonctions de type II (figure (3.18.b)) dites à bande interdite décalée favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs.

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

L'hétérojonctions iso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage [3.20], les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires [3.18], et l'hétérojonctions aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment [3.20], les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semiconducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires [3.18].

3.2.5 Composé binaire GaAs

La structure de bande directe du GaAs, lui confère des propriétés électroniques intéressantes. La masse effective des électrons est très faible dans la vallée centrale Γ , et par conséquent, la mobilité électronique est élevée. La hauteur de bande interdite est élevée (1,424 eV à 300K). Pour comparaison, les valeurs correspondantes dans le silicium et dans le germanium sont de 1,12 eV et 0,6 eV respectivement. A faible champ, la mobilité des électrons est plus importante dans le GaAs que dans le Silicium, même à fort niveau de dopage. Conjuguée à l'effet de survitesse dans le GaAs, ceci va permettre de réduire le temps de transit dans la base ainsi que les résistances de contact [3.21].

3.2.6 Composé ternaire GaInP

On peut obtenir le GaInP qui est un composé ternaire à partir des deux semiconducteurs binaires InP et le GaP, l'énergie de sa bande interdite est de 1,87 eV, Ce matériau est utilisé pour la fabrication de l'émetteur des cellules photovoltaïques. La masse effective des électrons est plus faible dans le GaInP, ce qui permet une plus forte mobilité électronique : 1,6 fois plus importante que dans le GaAs et 9 fois plus que dans le Silicium, d'où une résistance de base plus faible. La vitesse de recombinaison en surface est plus faible dans le GaInP que dans le GaAs ce qui permet d'augmenter le courant. Le GaInP présente une conductivité thermique de substrat plus grande que le GaAs [3.21].

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une notion générale sur les matériaux semi-conducteurs, ainsi que les propriétés générales des composés binaires (III-V) et ternaires destinés pour la conception des systèmes multijonctions à base des absorbeurs InGaP/GaAs/Ge. Nous avons aussi clarifié certains concepts sur les types de polarisation d'une jonction PN.

Dans le chapitre qui suit on va présenter clairement un outil très performant deux-dimensions de la simulation des cellules solaires en couches minces mono et multi-jonctions, qui s'appel : Atlas SILVACO-TCAD (2D).

3.4 Références du chapitre 3

- [3.1] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [3.2] B.Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas” , Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [3.3] L.Mohamed. Etude de caractérisation d’un MESFET-GaAs hyperfréquence et application en circuit amplificateur linéaire à faible bruit (LNA) en bande étroite autour de 10 GHZ en technologie MMIC pour les systèmes à communications rapides”, Mémoire magistère, Ecole normale supérieure d’enseignement technologique d’oran. 2009
- [3.4] G, Adam. R, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [3.5] M. AMARA, Propriétés Electroniques des Conducteurs et des Semi-Conducteurs”, rappels théoriques Plate-forme Matière Condensée et Cristallographie (MCC) C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble.
- [3.6] Luc LASNE, Physique et technologie des composants de puissance”, université de Bordeaux 1, 2003.
- [3.7] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [3.8] O. Bonnaud, Physique des solides, des Semiconducteurs et Dispositif”, Université de Rennes 1, 2003.
- [3.9] B. Benabdallah, Nadia, Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe”, These magister, Université Abou bekr belkaid-Telemcen. 2006.
- [3.10] P. Michalopoulos, A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2002.
- [3.11] Attia, John Okyere. Semiconductor Physics”, Electronics and Circuit Analysis using MATLAB. Ed. John Okyere Attia Boca Raton : CRC Press LLC, 1999.
- [3.12] M. Grundmann, The Physics of Semiconductors”, Book, Université Leipzig, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [3.13] A. Rockett, The Materials Science of Semiconductors”, Book, University of Illinois, Springer Science©Business Media, LLC2008.
- [3.14] D. Said, Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP) ”, Mémoire magistère, Université El- Hadj Lakhder-Batna. 2011.

- [3.15] P. Würfel, Physics of Solar Cells”, Book, Université Karlsruhe, ©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & CO, KGaA, Weinheim.
- [3.16] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction PN d’un semiconducteur à l’équilibre thermodynamique”, Journal of Electron Devices, Vol. 5, pp. 122-126 © JED [ISSN: 1682 -3427] 2007.
- [3.17] B. Vanderheyden, Diodes à jonction pn”, cour, l'Université de Liège.
- [3.18] S. Khlifi, Modélisation d’une Cellule Solaire Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)”, Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.
- [3.19] S. Alaa, Caractérisation en impulsions étroites et modélisation de transistors bipolaires à hétérojonction en technologie InP”, Thèse docteur, Université de Limoges. 2009.
- [3.20] A. Hamroun, Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) AlGa_N/Ga_N : Modélisation et simulation des performances”, Mémoire magistère, Université Abou bekr belkaid-Telemcen. 2011.
- [3.21] D. Khadidja, Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs”, Mémoire magistère, Université Abou bekr belkaid-Telemcen. 2011.

Chapitre 4 :

LOGICIEL DE SIMULATION SILVACO-ATLAS

4

Dans ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation **SILVACO- ATLAS**. Le logiciel **SILVACO** comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Nous, nous allons appliquer la partie **SILVACO-ATLAS** pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule solaire multi-jonction proposée.

4.1 Définitions

"**SILVACO International**" est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation de tous les domaines de l'électronique, y compris les circuits analogiques et numériques. Cette société dispose de logiciel allant de la simple modélisation Spice jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils d'extraction [4.1].

Le logiciel **SILVACO-ATLAS** est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et à trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques qui sont associés aux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à deux ou trois dimensions, comprenant un certain nombre de points de grille appelés nœuds. En appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell, sur cette grille, vous pouvez simuler le transport des porteurs à travers une structure. Cela signifie que le rendement électrique d'un dispositif peut maintenant être modélisé en courant continu, alternatif ou en modes de fonctionnement transitoires [4.2].

ATLAS est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de **VIRTUAL WAFER FAB (VWF)**. Il s'agit de **DECKBUILD**, **TONYPLOT**, **DEVEDIT**, **MASKVIEWS** et **OPTIMIZER** :

DECKBUILD: fournit un environnement d'exécution interactive.

TONYPLOT: fournit des capacités de visualisation scientifique.

DEVEDIT: est un outil interactif pour la spécification de la structure et du maillage ainsi que le raffinement.

MASKVIEWS: est un éditeur de masque pour le circuit intégré IC.

OPTIMIZER: supports d'optimisation à travers de multiples simulateurs.

Virtual Wafer Fabrication (**VWF**) aide à effectuer la simulation efficacement sans avoir recours à des logiciels tiers. De la Figure (4.1), on voit que Silvaco avec **VWF** propose des logiciels de simulation puissante.

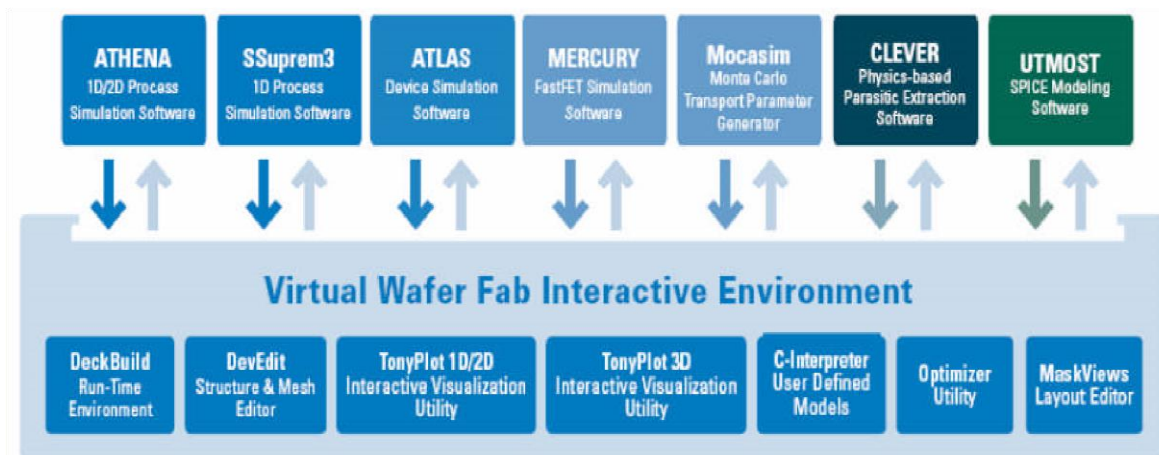


Figure (4.1) : Environnement virtual wafer fabrication [4.3].

4.2 Entrées et sorties dans SILVACO-ATLAS

La Figure (4.2) présente les types d'informations qui entrent et sortent d'ATLAS. La plupart des simulations sur ATLAS utilisent deux entrées : un fichier texte qui contient des commandes pour ATLAS à exécuter et un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée. ATLAS produit trois types de sortie. La sortie d'exécution (Runtime output) fournit un guide pour le progrès des simulations en cours d'exécution, et c'est là que les messages d'erreur et les messages d'avertissement apparaissent. Les fichiers Log (Log-files) stockent toutes les tensions et courants terminaux de l'analyse de dispositif, et les fichiers de solution (Solution files) stockent les données deux et tridimensionnelles relatives à la valeur des variables de solution à l'intérieur du dispositif pour un seul point de polarisation [4.4].

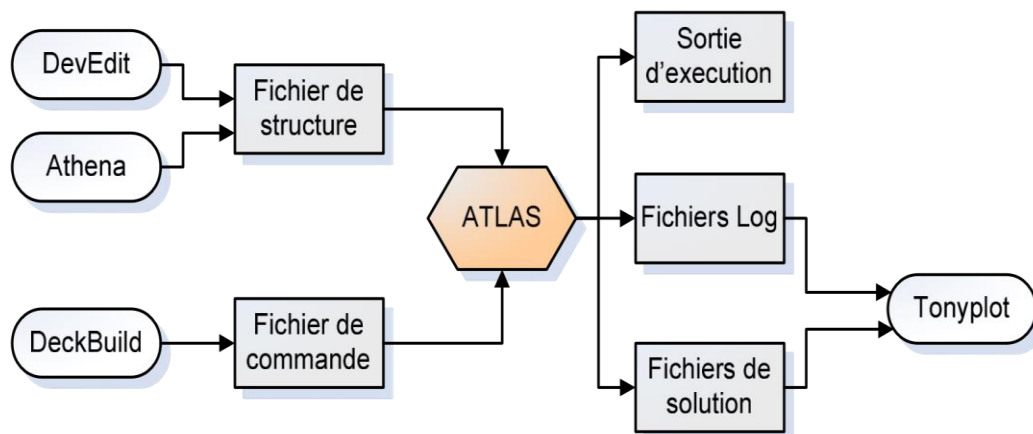
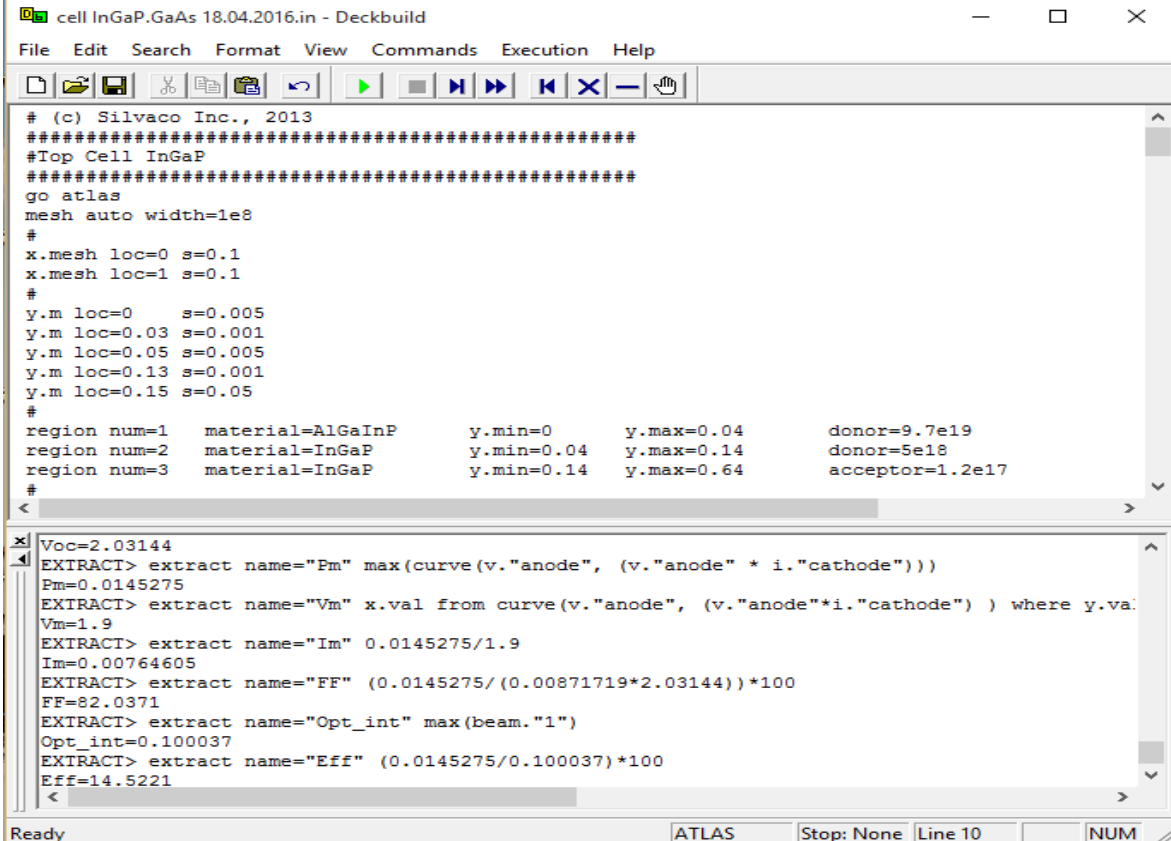


Figure (4.2) : Atlas entrées et sorties [4.2].

4.2.1 Deckbuild

DeckBuild est un environnement d'exécution graphique interactive, pour le développement de procédé et les dispositifs de simulation des entrées de plate-formes. Il se compose d'une fenêtre pour la création de la plate-forme d'entrée et une fenêtre pour la sortie du simulateur et le contrôle et un ensemble de fenêtres pop-up pour chaque simulateur qui fournissent le langage complet et le support d'exécution (voir la Figure (4.3)) [4.5].



```

cell InGaP.GaAs 18.04.2016.in - Deckbuild
File Edit Search Format View Commands Execution Help
# (c) Silvaco Inc., 2013
#####
#Top Cell InGaP
#####
go atlas
mesh auto width=1e8
#
x.mesh loc=0 s=0.1
x.mesh loc=1 s=0.1
#
y.m loc=0 s=0.005
y.m loc=0.03 s=0.001
y.m loc=0.05 s=0.005
y.m loc=0.13 s=0.001
y.m loc=0.15 s=0.05
#
region num=1 material=AlGaInP y.min=0 y.max=0.04 donor=9.7e19
region num=2 material=InGaP y.min=0.04 y.max=0.14 donor=5e18
region num=3 material=InGaP y.min=0.14 y.max=0.64 acceptor=1.2e17
#
Voc=2.03144
EXTRACT> extract name="Pm" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode")))
Pm=0.0145275
EXTRACT> extract name="Vm" x.val from curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode") ) where y.va:
Vm=1.9
EXTRACT> extract name="Im" 0.0145275/1.9
Im=0.00764605
EXTRACT> extract name="FF" (0.0145275/(0.00871719*2.03144))*100
FF=82.0371
EXTRACT> extract name="Opt_int" max(beam."1")
Opt_int=0.100037
EXTRACT> extract name="Eff" (0.0145275/0.100037)*100
Eff=14.5221
Ready ATLAS Stop: None Line 10 NUM

```

Figure (4.3) : Menu de commandes de deckbuild.

4.2.2 Tonyplot

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs **SILVACO** et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). **TONYPLOT** peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de **VWF**, comme **DECKBUILD**, **VWF** ou **SPDB** (voir le Figure (4.4)) [4.6].

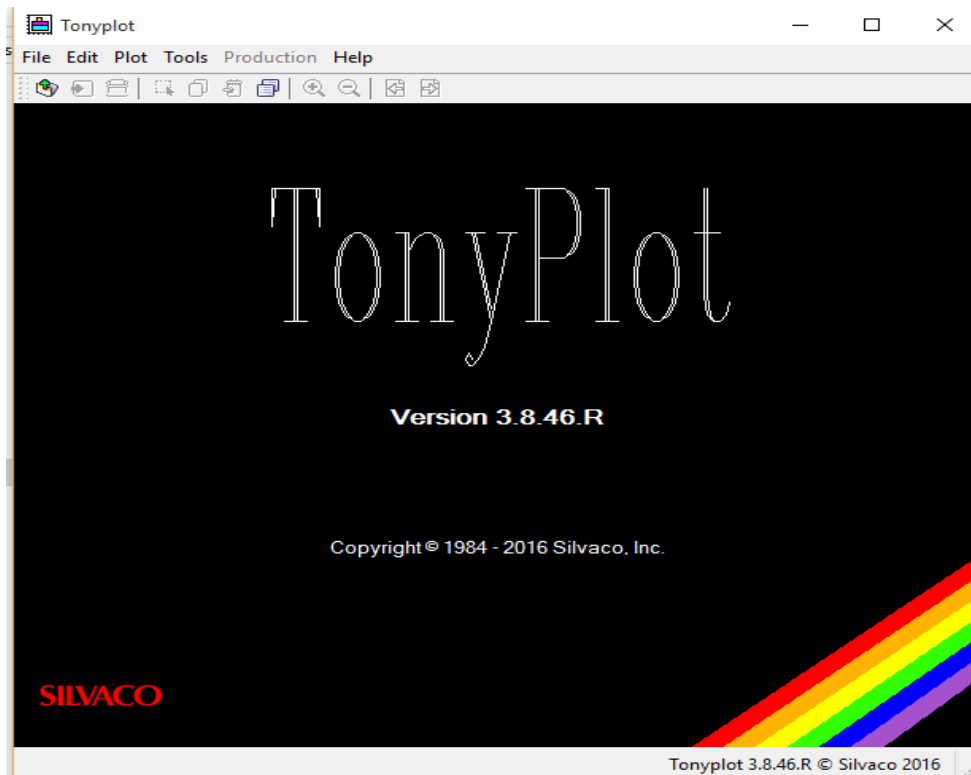


Figure (4.4) : Fenêtre de base de tonyplot.

4.3 Structure d'entrée dans SILVACO-ATLAS

Un fichier de commande **ATLAS** est une liste de commandes pour **ATLAS** à exécuter. Cette liste est stockée sous forme de fichier texte ASCII qui peut être préparé dans **DECKBUILD** ou en utilisant n'importe quel éditeur de texte. La préparation du fichier d'entrée en **DECKBUILD** est préférée, et peut être facilitée par l'utilisation appropriée du menu Commandes de **DECKBUILD**. Le fichier d'entrée contient une séquence d'instructions. Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Le format général est :

<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>

Quelques conseils sur la structure appropriée des déclarations sont énumérés ci-dessous :

1. La déclaration doit venir en premier, mais après cela, l'ordre des paramètres dans une instruction n'est pas important.
2. Il est seulement nécessaire d'utiliser suffisamment de lettres de n'importe quel paramètre pour le distinguer de tout autre paramètre sur la même déclaration. Ainsi, le paramètre Concentration peut être raccourci à Conc. Cependant, le paramètre Région ne peut pas être réduit à R car il ya également le paramètre RATIO associé à la déclaration du dopage.

3. Les Valeurs Logiques peuvent être explicitement défini comme faux (False) en les faisant précéder par le symbole \wedge .
4. Toute ligne commençant par # est ignorée. Ces lignes sont utilisées comme des commentaires.
5. ATLAS peut lire jusqu'à 256 caractères sur une ligne. Cependant, il est préférable de répartir les longues déclarations d'entrée sur plusieurs lignes pour rendre le fichier d'entrée plus lisible. Le caractère \ à la fin d'une ligne indique la continuation.

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans le Tableau (4.1).

Chaque fichier d'entrée doit contenir ces cinq groupes en ordre. Sinon, cela entraînera généralement un message d'erreur et la fin du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres matériels ou modèles figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs. L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important [4.7].

Group		Statements
1. Structure specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	_____	METHOD
4. Solution specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

Tableau (4.1) : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.

4.4 Contour général de construction d'ATLAS

Dans cette simulation, la cellule solaire à triple-jonctions à base de **InGaP/GaAs/Ge** est définie graphiquement dans **ATLAS** via l'interface **Deckbuild**. Afin de bien définir une cellule, il est nécessaire d'entrer non seulement les dimensions, mais aussi les propriétés des matériaux. L'organigramme suivant sur la Figure (4.5) peut clarifier les étapes pour construire chaque modèle.

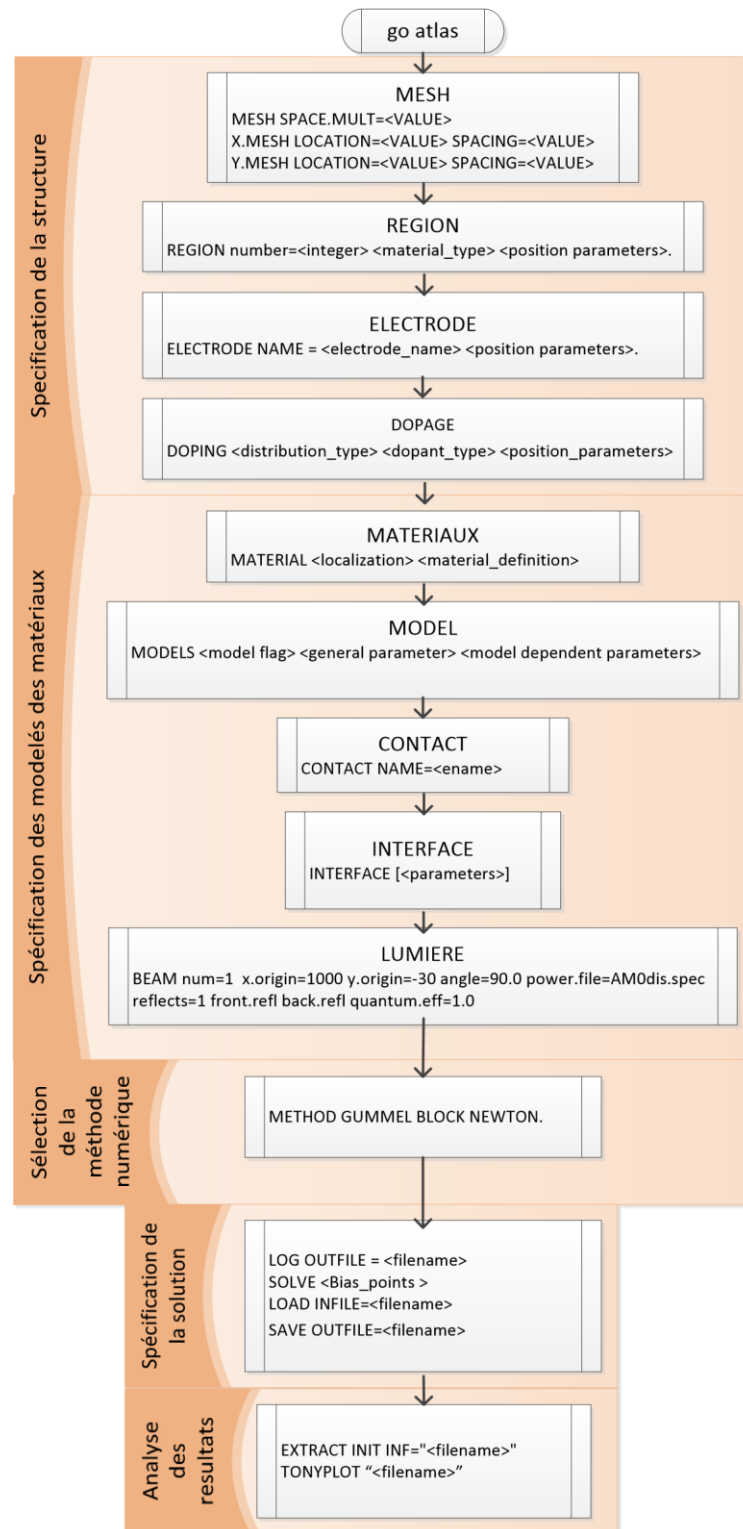


Figure (4.5) : Organigramme des étapes de construction d'un modèle sur **ATLAS**.

4.4.1 Mesh

La première étape dans la construction d'un dispositif après la déclaration go atlas, est de définir le maillage. Le maillage est une grille qui recouvre la zone physique dans lequel le dispositif est construit et simulé. Le maillage est simplement réalisé par une série de lignes horizontales et verticales définies par l'utilisateur avec un espacement entre eux [4.4].

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [4.8].

Un exemple de maillage créé dans **ATLAS** est illustré dans la Figure (4.6).

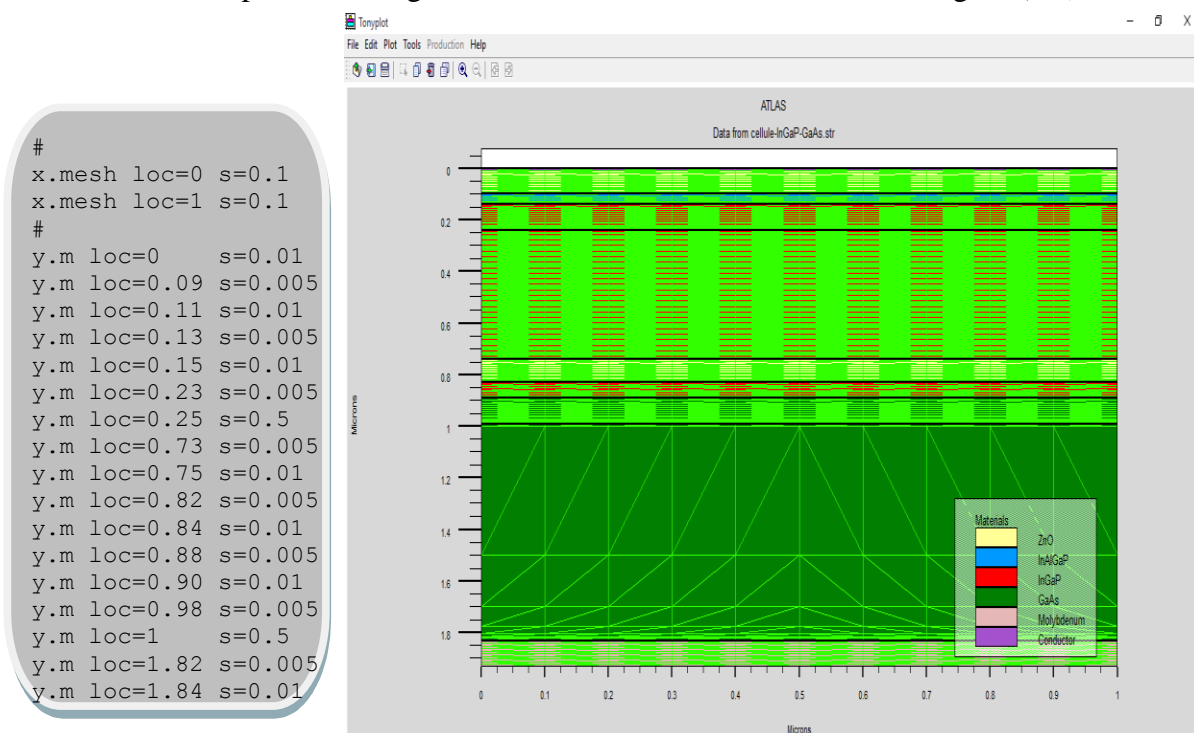


Figure (4.6) : Atlas mesh.

4.4.2 Régions

La déclaration de la région est utilisée pour séparer l'instruction du maillage initial en blocs distincts et définit les paramètres matériels initiaux qui peuvent être désignés plus tard par des numéros de région. Tous les domaines maillés d'une structure doivent être assignés à une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4 [4.9].

La cellule solaire à triple-jonctions à base de **InGaP/GaAs/Ge** est décrite par les commandes de **DeckBuild** ainsi que les lignes de la région comme il est illustré dans la Figure (4.7).

```

region num=1 material=ZnO y.min=0 y.max=0.1 conductor
region num=2 material=AlGaInP y.min=0.1 y.max=0.14 donor=9.7e19
region num=3 material=InGaP y.min=0.14 y.max=0.24 donor=5e17
region num=4 material=InGaP y.min=0.24 y.max=0.74 acceptor=1e17
region num=5 material=ZnO y.min=0.74 y.max=0.83 conductor
region num=6 material=InGaP y.min=0.83 y.max=0.89 donor=1e19
region num=7 material=GaAs y.min=0.89 y.max=0.99 donor=2e18
region num=8 material=GaAs y.min=0.99 y.max=1.83 acceptor=1e17
region num=9 material=Molybdenum y.min=1.83 y.max=1.93 conductor

```

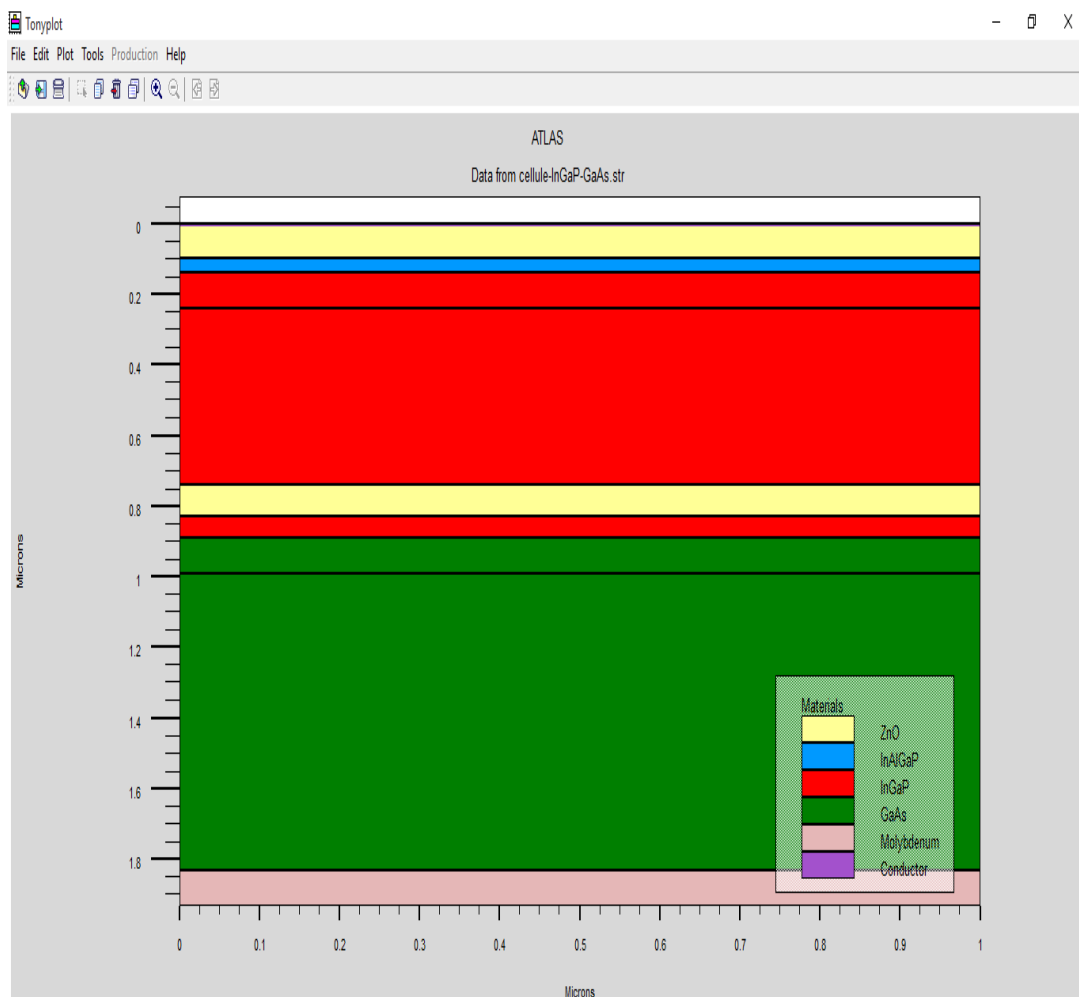


Figure (4.7) : Régions créées dans la cellule solaire à triple-jonctions à base de InGaP/GaAs/Ge.

4.4.3 Electrode

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode [4.10]. Cependant, **SILVACO ATLAS** a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définis [4.3].

D'après la figure (4.8), la déclaration des électrodes est définie pour l'anode et la cathode. A noter que la cathode est définie avec de l'argent en tant que matériau. La localisation par x et y correspond à la région 6 précédemment définie (figure (4.7)). L'anode est définie avec l'Aluminium comme matériau et définie dans la région 5 (figure (4.7)).

```
# Electrodes on top and bottom
elec num=1 name=cathode top
elec num=2 name=anode bottom
#
```

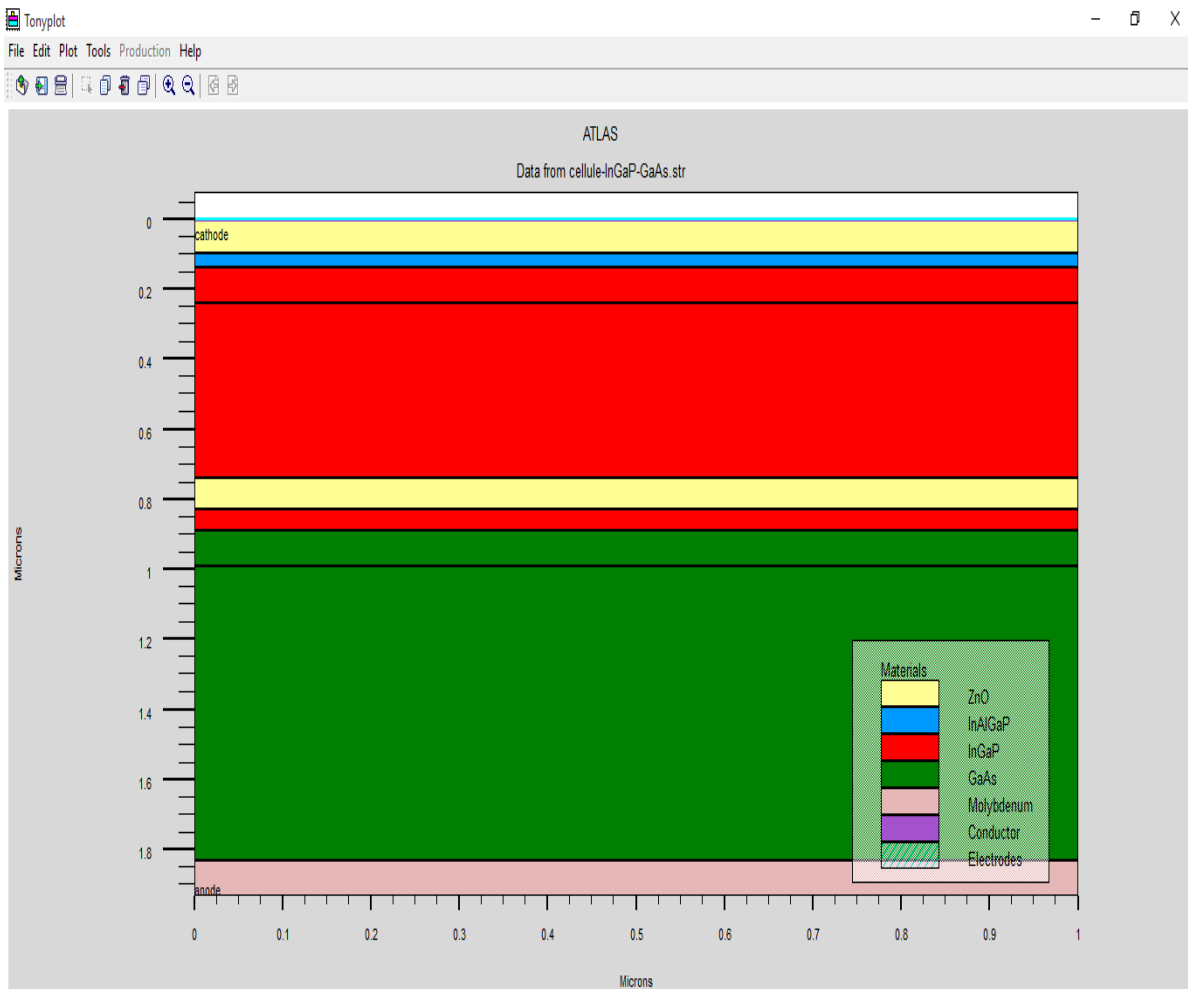


Figure (4.8) : Déclaration des électrodes dans ATLAS.

4.4.4 Dopage

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc... [4.10].

Dans la figure (4.9), les types et les niveaux de dopage sont définis.

```
doping uniform region=2 n.type concentration= 9.7e19
doping uniform region=3 n.type concentration= 5e17
doping uniform region=4 p.type concentration= 1e17
doping uniform region=6 n.type concentration= 1e19
doping uniform region=7 n.type concentration= 2e18
doping uniform region=8 p.type concentration= 1e17
```

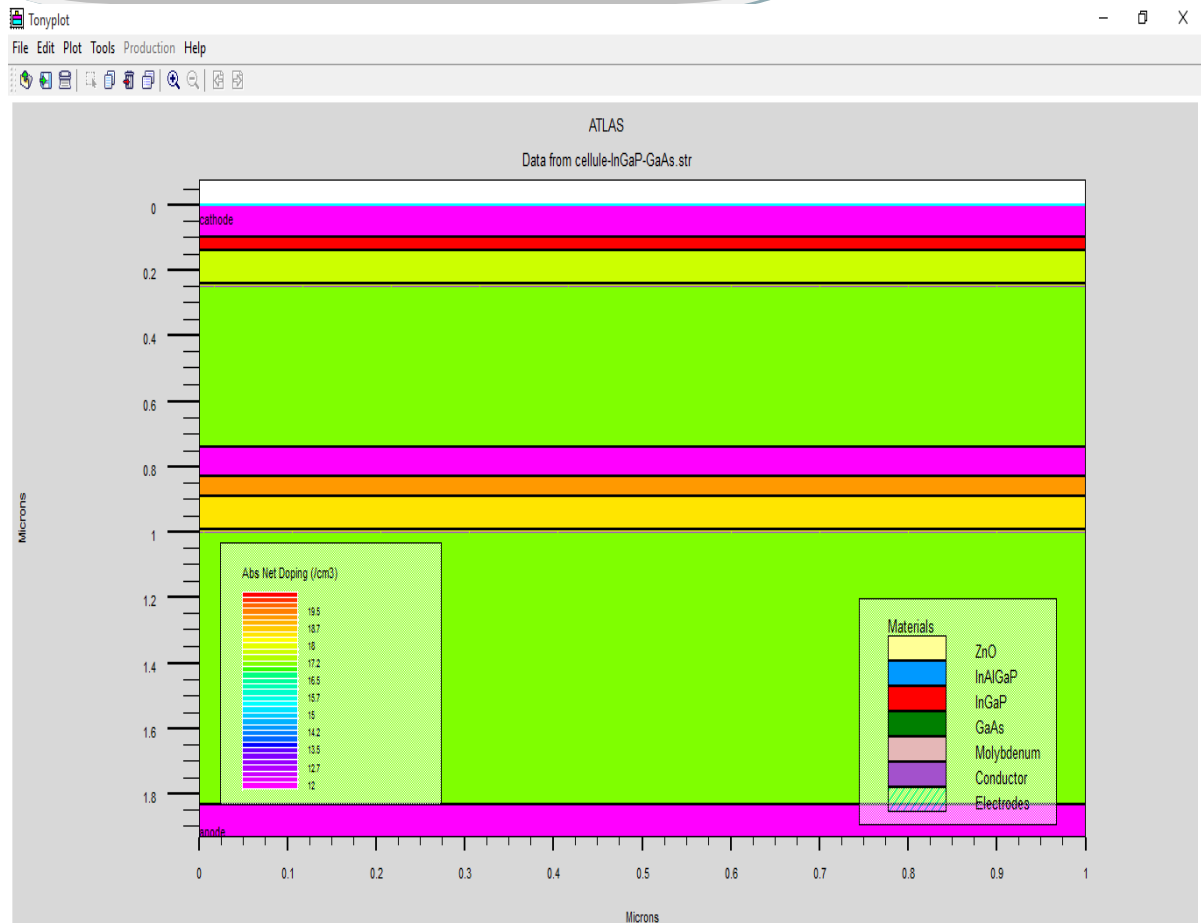


Figure (4.9) : ATLAS dopage.

4.4.5 Matériel

Une fois que la structure est complètement assemblée, les matériaux utilisés pour construire le dispositif doivent eux-mêmes être définis. La déclaration matérielle permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région [4.2].

La capacité la plus importante que les déclarations matérielles permettent est la création des matériaux définis par l'utilisateur. L'utilisateur peut utiliser arbitrairement n'importe quel matériau lors de la définition d'une structure, puis modifier l'ensemble de ses propriétés pour correspondre à celle d'un matériau désiré. Bien que le matériel porte le nom du matériau choisi, il agira fonctionnellement comme n'importe quel matériau l'utilisateur le désire [11].

4.4.6 Modèles physiques

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, l'ionisation par impact, et l'effet tunnel.

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB est le modèle de mobilité dépendant de la concentration du dopage. **FLDMOB** est le modèle de mobilité dépendant du champ électrique parallèle. **SRH** est le modèle ShockleyRead-Hall pour les statistiques des porteurs de charge [4.3].

4.4.7 Contacts

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie...) [4.10].

4.4.8 Interface

Indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués [4.10].

4.4.9 Lumière

Lorsque l'éclairage est important pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources lumineuses et d'ajuster leur emplacement, l'orientation et l'intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit avec tous les détails nécessaires [4.12].

4.4.10 Méthode de la solution

ATLAS contient plusieurs méthodes numériques pour calculer les solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur. Il existe trois principaux types de méthodes numériques. La première méthode est la méthode de **GUMMEL** qui est utile lorsque le système d'équations est faiblement couplé mais a seulement la convergence linéaire. La méthode suivante est méthode de **NEWTON**, qui est utile lorsque le système d'équations est fortement couplé et a convergence quadratique. Cette méthode prend plus de temps pour résoudre les quantités qui sont essentiellement constantes ou faiblement couplées et exige également une estimation initiale plus précise du problème pour obtenir la convergence. La dernière méthode est la méthode des blocs qui peut fournir des temps de simulation plus rapides [4.4].

4.4.11 Spécification de la solution

Cette section de la plate-forme d'entrée est où la simulation fait ses calculs à résoudre pour le dispositif spécifié. Elle est divisée en quatre parties : **Log**, **Solve**, **Load**, et **Save**.

L'instruction **Log** crée le fichier de sauvegarde de l'état d'équilibre, transitoires ou DC, données déterminées par une déclaration **Solve** après la déclaration **Log**.

La déclaration **Solve** suit une instruction **Log** et calcule les informations relatives à un ou plusieurs points de polarisation.

Les instructions **Load** et **Save** sont utilisés ensemble pour aider à créer de meilleures estimations initiales pour les points de polarisation. L'instruction **Save** sert d'abord à stocker toutes les informations sur les points de polarisation, et plus tard l'instruction **Load** est utilisée pour récupérer ces informations et l'aide dans la solution [4.4].

4.4.12 Extraction des données et traçage

Une fois qu'une solution est trouvée pour le problème du dispositif, l'information peut être visualisée graphiquement avec **TONYPLOT**. En plus, les paramètres des dispositifs peuvent être extraits par la déclaration **EXTRACT** [4.3].

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation **SILVACO-ATLAS**. Nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant – tension (**I-V**) et la réponse spectrale (**QE**); une étude qui fera en détail l'objet du prochain chapitre pour les cellules solaires à triple-jonctions à base de **InGaP/GaAs/Ge**.

4.6 Références du chapitre 4

- [4.1] D. Bradley P, Advanced ThermoPhotovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use in Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Space Missions”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2004.
- [4.2] ATLAS User’s Manuel, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2011.
- [4.3] B.Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [4.4] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [4.5] TonyPlot User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2012.
- [4.6] DeckBuild User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2013.
- [4.7] D. Vasileska, G. Stephen M, Computational Electronics”, Department of Electrical Engineering, Arizona State University. 2006.
- [4.8] S. MOSTEFA K, Etude et Simulation de Cellules Photovoltaïques a Couches Minces à Base de CIS et CIGS”, Mémoire magistère, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2012.
- [4.9] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [4.10] D. Wassila Née KAZI-TANI, Modelisation des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux et Appliqués”, Thèse Doctorat, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2011.
- [4.11] G, Adam. R, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [4.12] P. Michalopoulos, A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2002.

Chapitre 5 :

RÉSULTATS ET DISCUSSION

5 Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation et la fabrication des cellules solaires, les chercheurs se sont orientés vers la simulation numérique. L'utilisation des différents logiciels de simulation a permis de déterminer l'influence des paramètres physiques et géométriques des échantillons en couches minces avant de les fabriquer. Un très bon logiciel de simulation des cellules solaires, très sophistiqué, s'appelle : SILVACO-ATLAS permet de simuler les cellules solaires en couches minces et de déterminer les caractéristiques électriques courant-tension de ces structures, il permet aussi de calculer les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que : la densité du courant de court-circuit (J_{CC}), la tension en circuit-ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}), le rendement de conversion photovoltaïque (η) et la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde du spectre.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire multi-jonction (InGaP/GaAs/Ge) en utilisant le logiciel deux dimensions : Atlas SILVACO-TCAD, sous un éclairage AM1.5G avec $P = 0.1 \text{ W/cm}^2$.

Lors de la simulation, dans un premier temps, on commence par l'étude de la cellule solaire d'une seule jonction à base des absorbeurs (InGaP), (GaAs) et (Ge) séparément. En deuxième partie, nous présentons les résultats pour une cellule à double jonctions "Cellule Tandem" à base des absorbeurs (InGaP/GaAs). Dans la troisième partie de ce chapitre, on essaye d'ajouter une troisième cellule à base de Ge à notre structure, pour réaliser ce qu'on appelle une cellule multi-jonctions. Dans toutes les parties précédentes on détermine la caractéristique ($J-V$) et les paramètres photovoltaïques de la structure étudiée. L'influence de dopage des absorbeurs de la cellule triple-jonctions est présentée à la dernière partie de ce chapitre.

5.1 Cellule solaire à une seule jonction

5.1.1 Cellule solaire à base de l'absorbeur Ge

5.1.1.1 Présentation de la structure

La Figure (5.1) schématise la structure de la cellule étudiée à base de Ge ; la couche (InGaP) est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de (Ge) qui servent comme un émetteur (type n) et une base (type p). Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans la simulation sont donnés au Tableau (5.1).

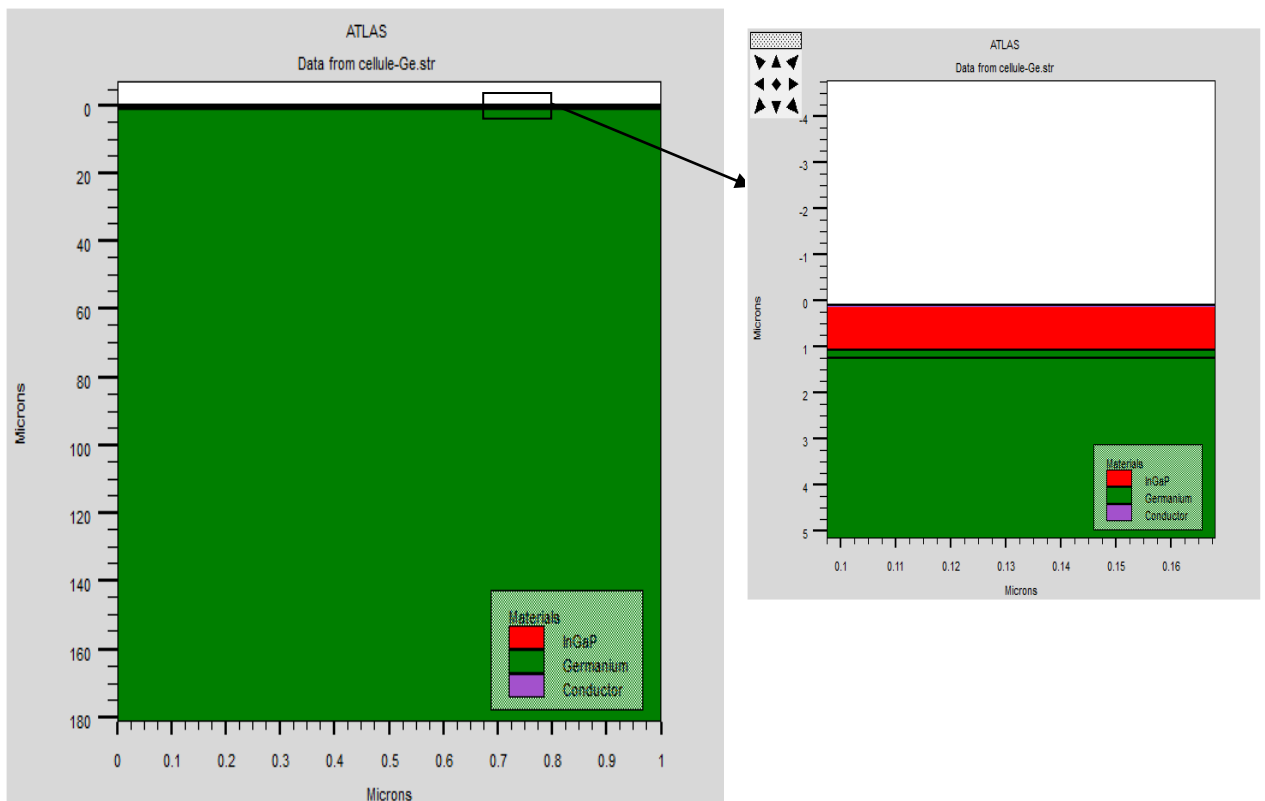


Figure (5.1) : Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur Ge.

	Fenêtre (InGaP) n	Émetteur (Ge) n	Base (Ge) p
Épaisseur (μm)	0.98	0.18	180
Dopage (cm^{-3})	$N_d : 3 \times 10^{18}$	$N_d : 8.5 \times 10^{18}$	$N_A : 1.5 \times 10^{17}$
E_g (eV)	1.82	0.664	0.664
Constante diélectrique ϵ	11.62	16.2	16.2
Mobilité d'électron ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	803	1000	2600
Mobilité du trou ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	40	200	700

Tableau (5.1) : Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base de Ge [5.1].

5.1.1.2 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la cellule solaire à base de (Ge) sont présentés dans le Tableau (5.2).

	Vco (mV)	Jcc (mA/cm ²)	Pm (W/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	250	29.08	0.005	68.73	5

Tableau (5.2) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (Ge) simulés sous éclairement AM1.5G.

La Figure (5.2) présente la caractéristique densité de courant-tension (J - V) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule (Ge). On remarque une valeur très grande du courant J_{cc} (**29.08 mA/cm²**) et une faible valeur de la tension V_{co} (**250 mV**).

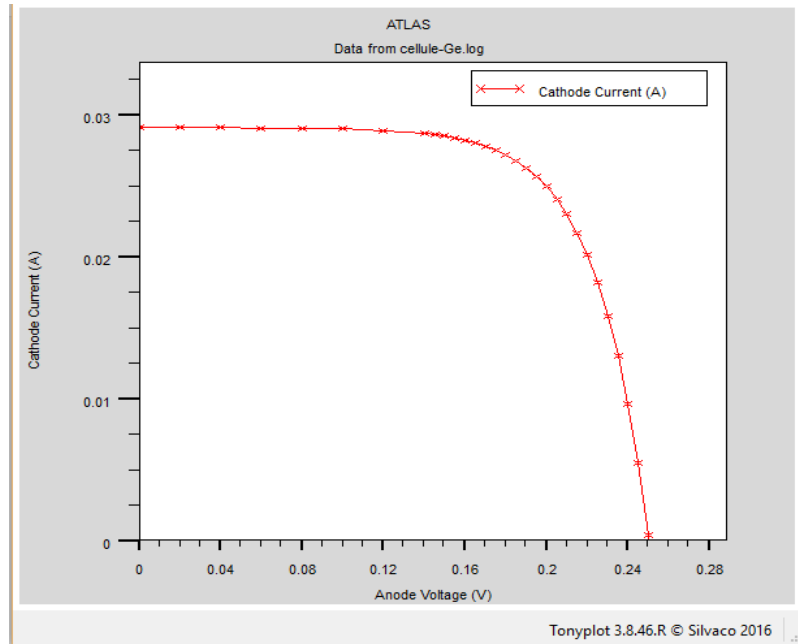


Figure (5.2) : Caractéristique (J - V) de la cellule (Ge) étudiée.

5.1.2 Cellule solaire à base de l'absorbeur GaAs

5.1.2.1 Présentation de la structure

La Figure (5.3) schématise la structure de la cellule étudiée à base de GaAs ; la couche (AlGaAs) est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de (GaAs) qui servent comme un émetteur (type n) et une base (type p). Les paramètres sont présentés au Tableau (5.3).

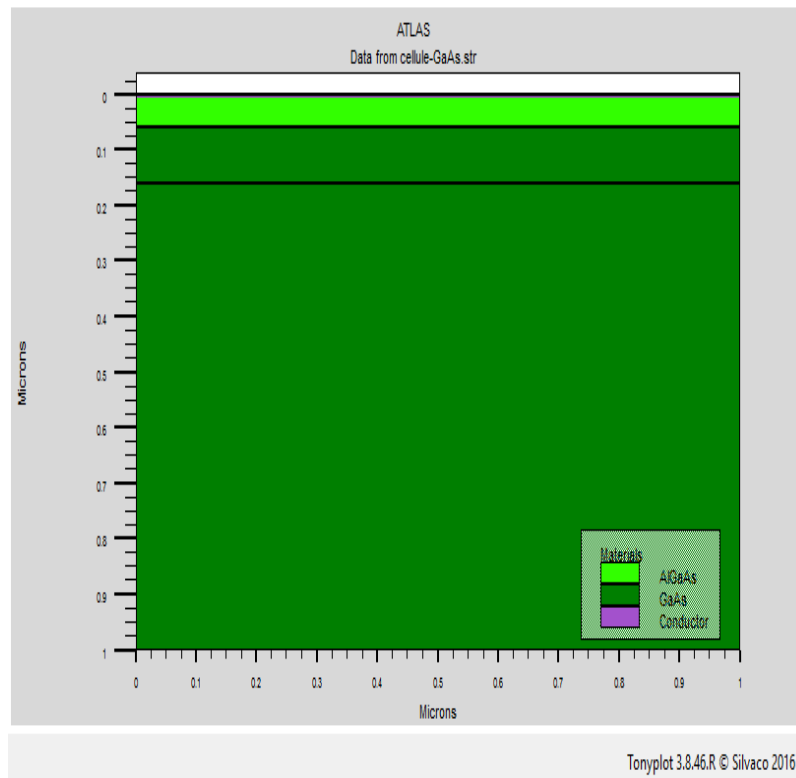


Figure (5.3) : Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur GaAs.

	Fenêtre (AlGaAs) n+	Émetteur (GaAs) n	Base (GaAs) p
Epaisseur(μm)	0.05	0.1	0.85
Dopage (cm⁻³)	N _d : 1×10 ¹⁹	N _d : 2×10 ¹⁸	N _A : 1×10 ¹⁷
Eg (eV)	1.82	1.424	1.424
Constante diélectrique ε	12.3	12.9	12.9
Mobilité d'électron (cm²/V.s)	2000	8000	8000
Mobilité du trou (cm²/V.s)	100	400	400
Nc (cm⁻³)	4.35×10 ¹⁷	4.7×10 ¹⁷	4.7×10 ¹⁷
Nv (cm⁻³)	8.16×10 ¹⁸	9×10 ¹⁸	9×10 ¹⁸
Affinité électronique (eV)	3.54	4.07	4.07

Tableau (5.3) : Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base de GaAs [5.2].

5.1.2.2 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la cellule solaire à base de (GaAs) sont présentés dans le Tableau (5.4).

	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	P _m (W/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	882	16.12	0.012	85.96	12.23

Tableau (5.4) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de GaAs simulées sous éclairement AM1.5G.

La Figure (5.4) présente la caractéristique densité de courant-tension (*J-V*) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule (GaAs). On remarque d'après cette caractéristique une tension *V_{co}* élevée (**882 mV**) et une faible valeur de courant *J_{cc}* (**16.12 mA/cm²**). L'augmentation de la tension *V_{CO}* dans cette cellule est due essentiellement au grand gap d'énergie de l'absorbeur GaAs (**1.42 eV**) par rapport à la faible énergie de gap de l'absorbeur Ge (**0.664 eV**). Une amélioration remarquable du rendement de conversion (**12.23%**) au lieu de (**5%**) dans le cas de la cellule Ge.

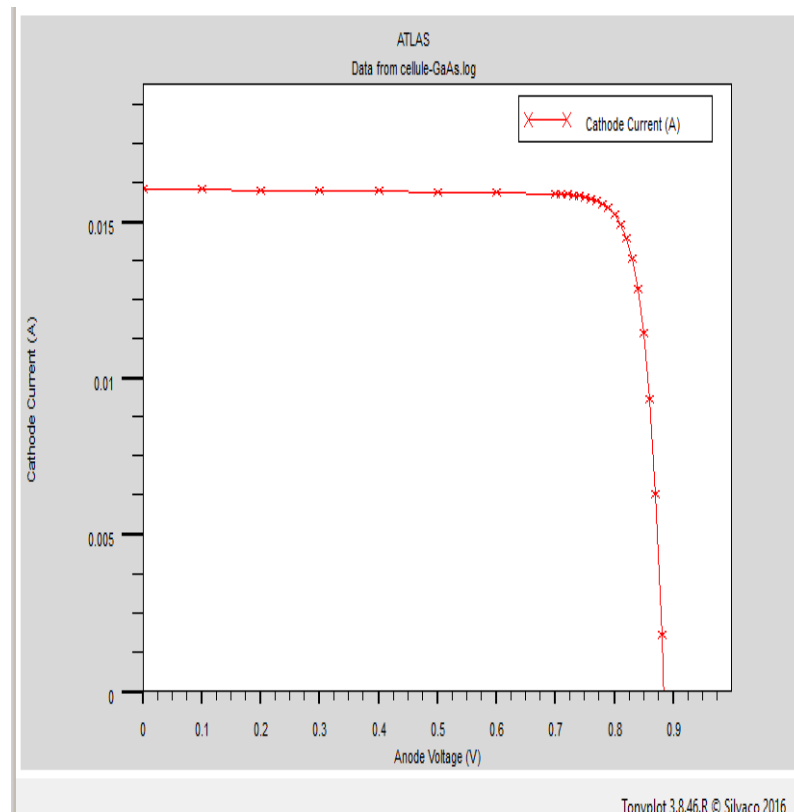


Figure (5.4) : Caractéristique (*J-V*) de la cellule GaAs étudiée.

5.1.3 Cellule solaire à base de l'absorbeur InGaP

5.1.3.1 Présentation de la structure

La Figure (5.5) schématise la structure de la cellule étudiée à base de InGaP ; la couche (AlInP) est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de (InGaP) qui servent comme un émetteur (type n) et une base (type p). Les paramètres sont présentés au Tableau (5.5).

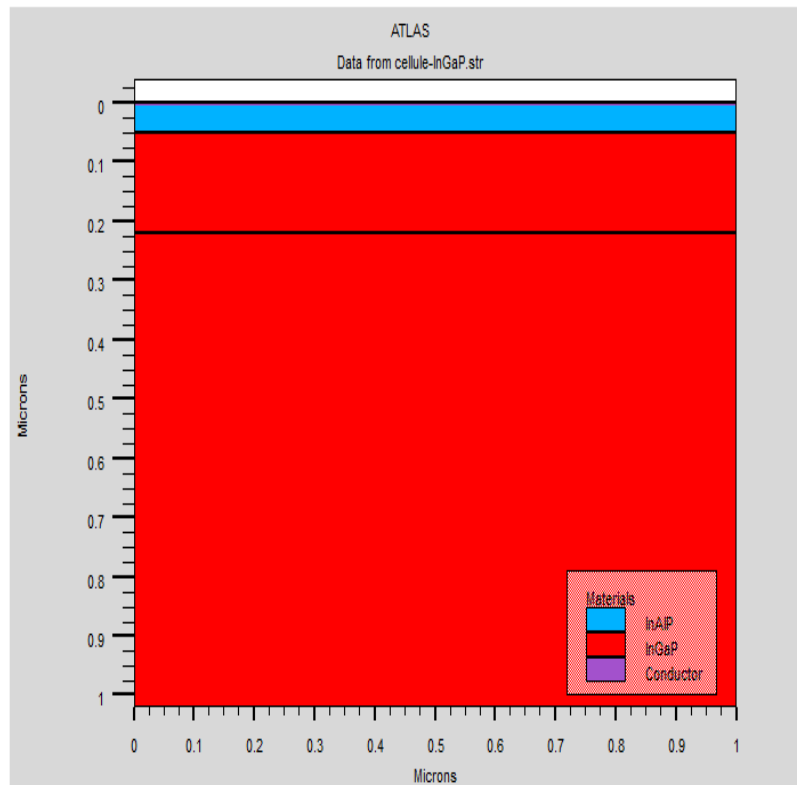


Figure (5.5) : Structure de la cellule solaire à base de l'absorbeur InGaP.

	Fenêtre (AlInP) n+	Émetteur (InGaP) n	Base (InGaP) p
Épaisseur (µm)	0.04	0.1	0.5
Dopage (cm⁻³)	$N_d : 9.7 \times 10^{19}$	$N_d : 5 \times 10^{17}$	$N_A : 1 \times 10^{17}$
Eg (eV)	2.4	1.9	1.9
Constante diélectrique ε	11.7	11.62	11.62
Mobilité d'électron (cm²/V.s)	2291	4000	4000
Mobilité du trou (cm²/V.s)	142	1000	1000
Nc (cm⁻³)	1.08×10^{20}	1.3×10^{20}	1.3×10^{20}
Nv (cm⁻³)	1.28×10^{19}	1.28×10^{19}	1.28×10^{19}
Affinité électronique (eV)	4.2	4.08	4.08

Tableau (5.5) : Paramètres des différentes couches de la cellule solaire à base de InGaP [5.3].

5.1.3.2 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la cellule solaire à base de (InGaP) sont présentés dans le Tableau (5.6).

	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	P _m (W/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	1190	7.88	0.008	87.54	8.21

Tableau (5.6) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (InGaP) simulées sous éclairement AM1.5G.

La Figure (5.6) présente la caractéristique densité de courant-tension (*J-V*) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule (InGaP). A cause de l'augmentation de l'énergie de gap de l'absorbeur InGaP (**1.9 eV**), on remarque clairement une forte augmentation de la tension *V_{CO}* (**1.19 V**) et une diminution du courant *J_{CC}* (**7.88 mA/cm²**) ce qui diminue le rendement à **8.21%** au lieu de **12.23%** dans le cas de la cellule GaAs. On peut remarquer ici que lorsque les deux absorbeurs GaAs et InGaP ont des coefficients d'absorption importants (>**10⁵ cm⁻¹**) on a obtenu deux rendements différents. La diminution du rendement dans le cas de la cellule InGaP est peut-être due à la diminution de la gamme d'absorption du spectre solaire de la cellule InGaP à cause de son grand gap.

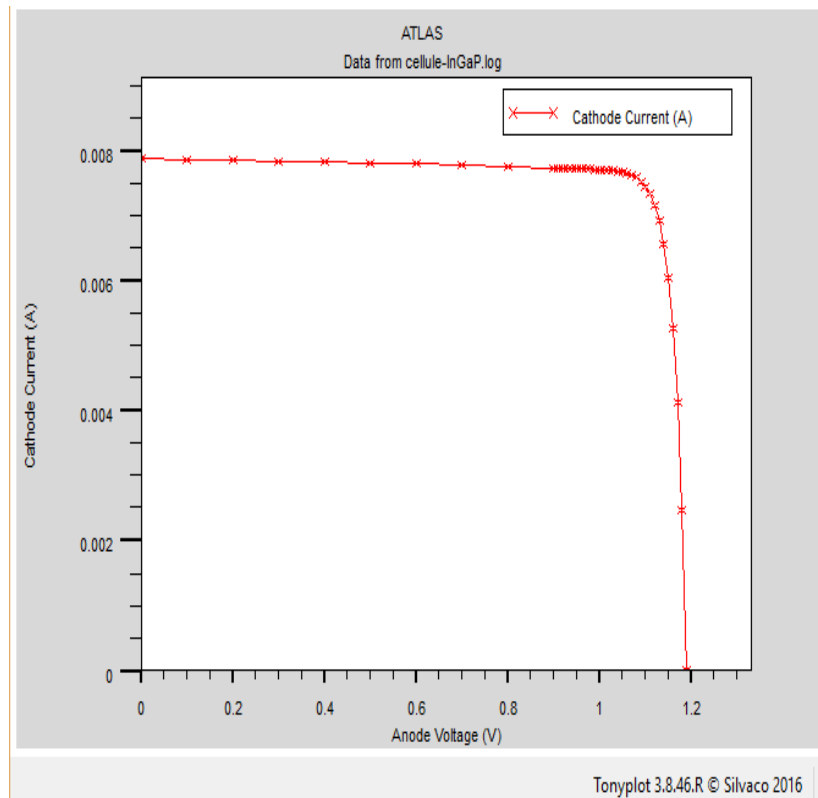


Figure (5.6) : Caractéristique (*J-V*) de la cellule InGaP étudiée.

5.2 Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (InGaP/GaAs)

5.2.1 Présentation de la structure

La Figure (5.7) schématise la structure de cellule étudiée, Tandem, à base de (InGaP/GaAs) ; Nous avons mis en place la cellule (InGaP) au-dessus de la cellule (GaAs).

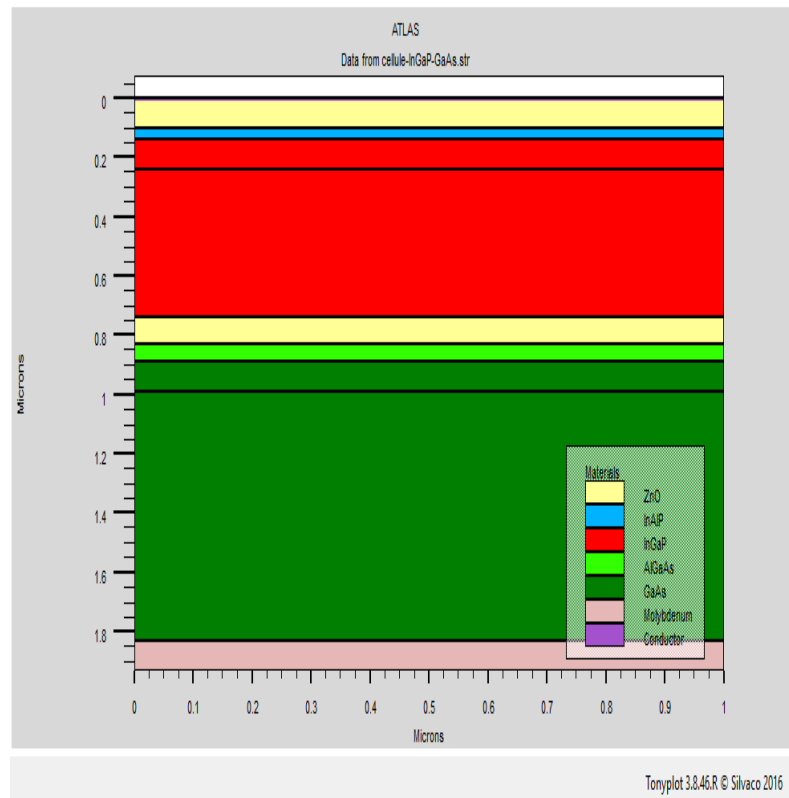


Figure (5.7) : Structure de la cellule solaire à double jonctions InGaP/GaAs.

5.2.2 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la cellule solaire Tandem (InGaP/GaAs) sont présentés dans le Tableau (5.7).

	Vco (V)	Jcc (mA/cm ²)	Pm (W/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	2.055	8.49	0.014	80.89	14.12

Tableau (5.7) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire Tandem (InGaP/GaAs) simulée sous éclairage AM1.5G.

La Figure (5.8) présente la caractéristique densité de courant-tension ($J-V$) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule Tandem (InGaP/GaAs). Une importante augmentation de la tension V_{CO} (**2.055 V**) conduit à une amélioration du rendement de conversion (**14.12%**) dans ce cas, avec une légère augmentation de la densité de courant J_{CC} (**8.49 mA/cm²**) par rapport à la cellule InGaP (voir le Tableau (5.7)).

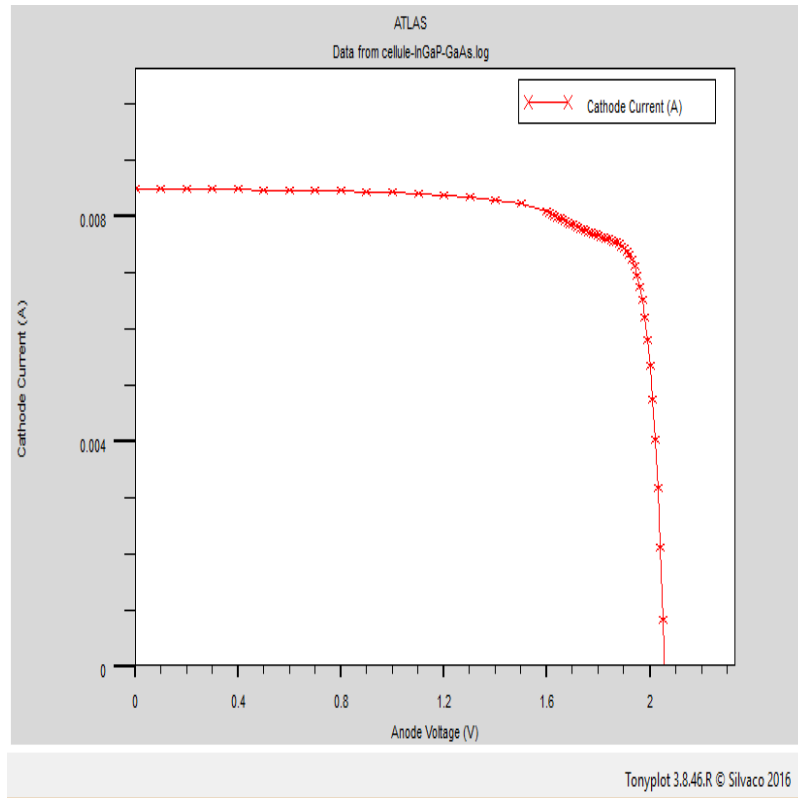


Figure (5.8) : Caractéristique ($J-V$) de la cellule InGaP/GaAs.

La Figure (5.9) présente les caractéristiques densités de courant-tension ($J - V$) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule Tandem (InGaP/GaAs) et pour les deux cellules individuelles à base de InGaP et GaAs.

Puisque la cellule Tandem (InGaP/GaAs) est constituée de deux photopiles connectées en série, le courant J_{cc} qui circule à travers les deux photopiles est considéré comme le minimum des deux courants J_{CC} relatives aux deux cellules de la structure Tandem. La tension de court-circuit V_{CO} de la cellule Tandem est considérée comme la somme des deux tensions V_{CO} des deux cellules. Dans la Figure (5.9) on a obtenu exactement les deux comportements remarqués précédemment.

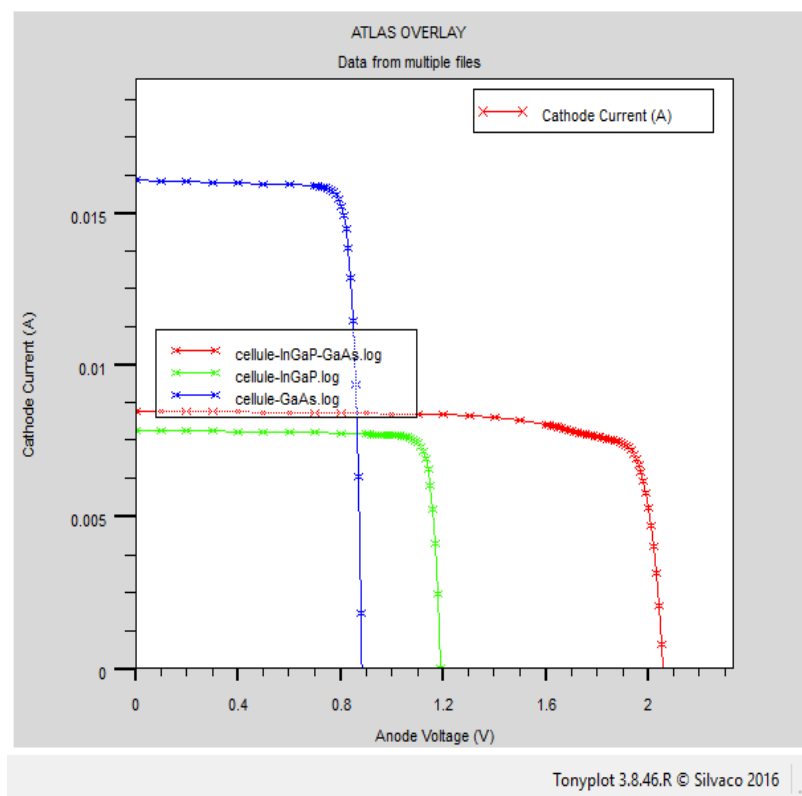


Figure (5.9) : Caractéristique (J - V) des trois cellules : Tandem (InGaP/GaAs), Top (InGaP), Bottom (GaAs).

La Figure (5.10) présente les rendements quantiques des deux cellules solaires (InGaP) et (GaAs).

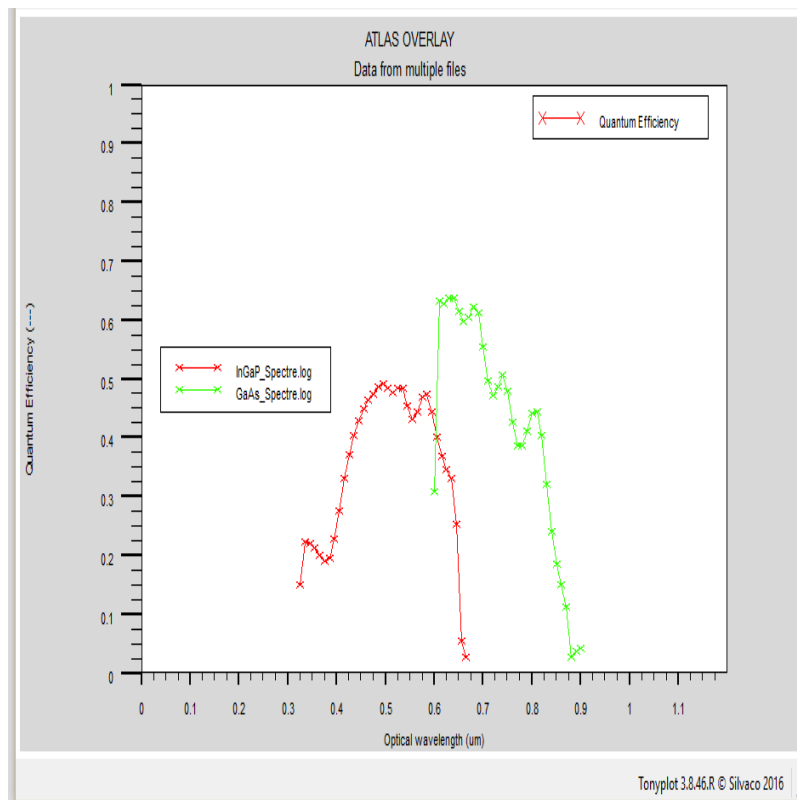


Figure (5.10) : Rendements quantiques de la cellule solaire InGaP/GaAs.

5.3 Etude de la cellule solaire triple-jonctions (InGaP/GaAs/Ge)

5.3.1 Présentation de la structure

La Figure (5.11) schématise la structure de cellule solaire triple-jonctions (InGaP/GaAs/Ge) simulée par Atlas SILVACO ; Nous avons mis en place la cellule (InGaP/GaAs) au-dessus de la cellule (Ge).

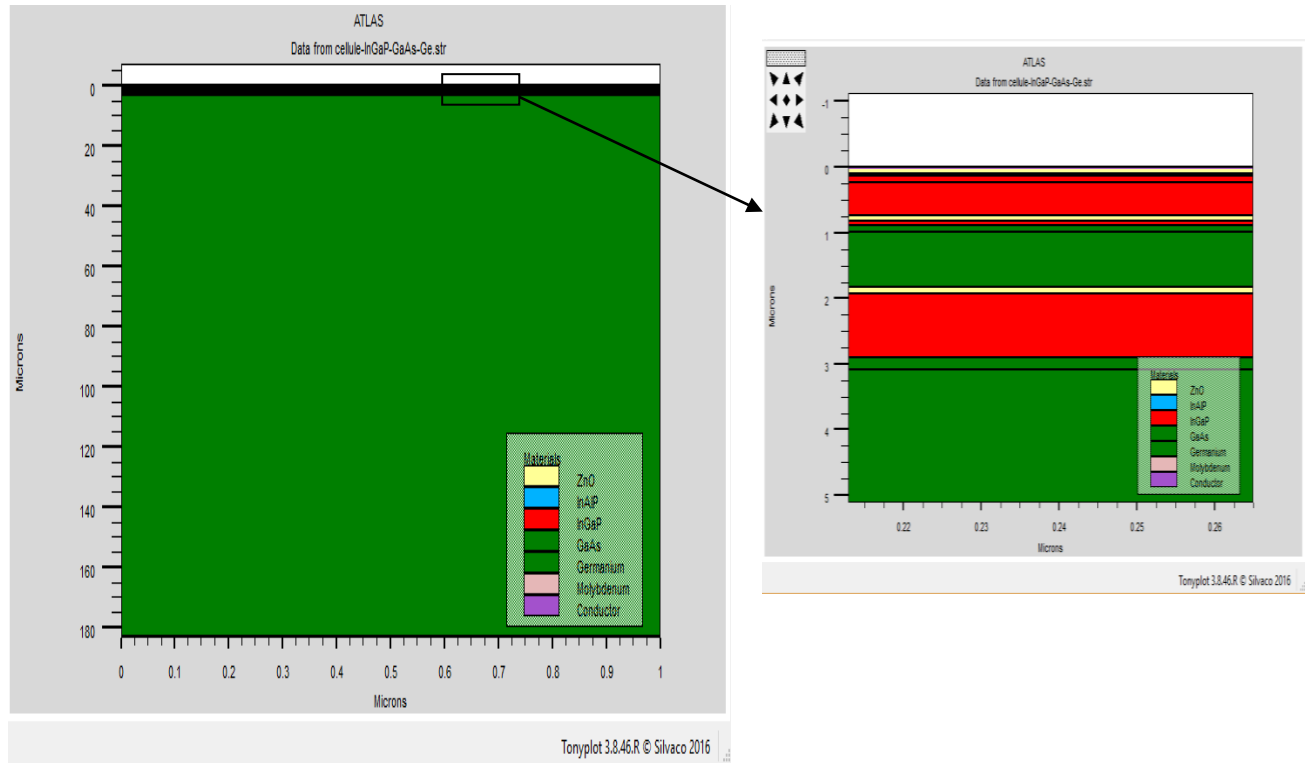


Figure (5.11) : Structure de la cellule solaire triple-jonctions InGaP/GaAs/Ge.

5.3.2 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation appliquée à la cellule (InGaP/GaAs/Ge) sont présentés dans le Tableau (5.8).

	Vco (mV)	Jcc (mA/cm²)	Pm (W/cm²)	FF (%)	η (%)
Résultats	2281	8.30	0.015	80.12	15.16

Tableau (5.8) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire triple-jonctions (InGaP/GaAs/Ge) simulées sous éclairement AM1.5G.

La Figure (5.12) présente la caractéristique densité de courant-tension ($J-V$) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule (InGaP/GaAs/Ge). La simulation donne une valeur élevée de la tension V_{co} (**2.28 V**) et une faible valeur de courant J_{cc} (**8.30 mA/cm²**).

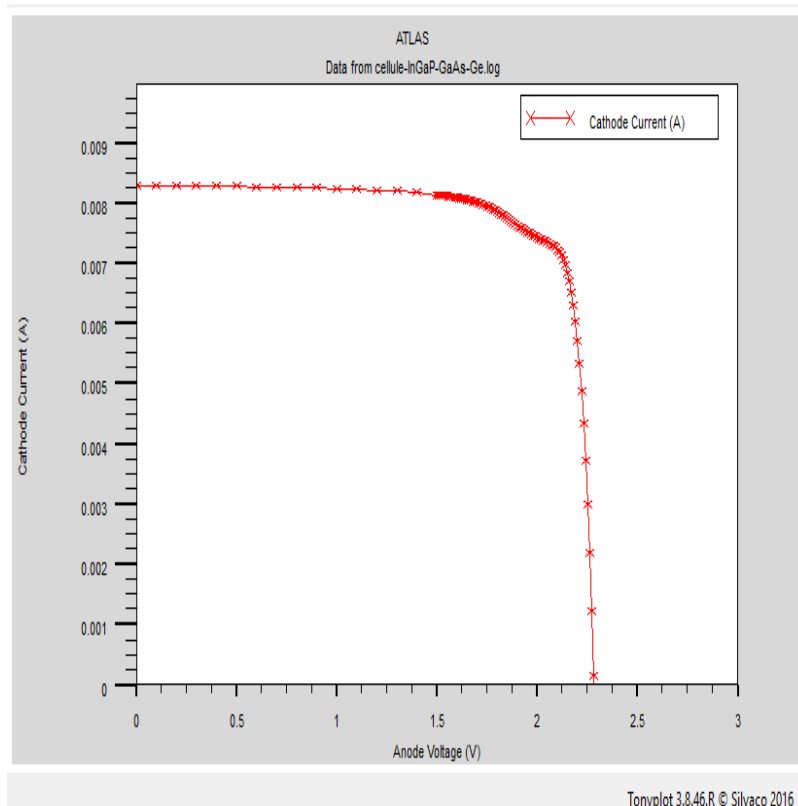


Figure (5.12) : Caractéristique ($J-V$) de la cellule InGaP/GaAs/Ge étudiée.

La Figure (5.13) présente les caractéristiques densités de courant-tension ($J-V$) des quatre cellules : la cellule triple-jonctions (InGaP/GaAs/Ge), les cellules individuelles à base des absorbeurs (InGaP), (GaAs) et (Ge). Puisque la cellule triple-jonctions (InGaP/GaAs/Ge) est constituée de trois photodiodes connectées en série, la densité de courant J_{cc} total délivré par la cellule triple-jonctions est limité à celle de la photopile qui produit le courant le plus faible et les tensions V_{co} s'additionnent. Ces valeurs font alors augmenter la puissance de la structure globale triple-jonctions (CSTJ) et le rendement de conversion (voir le tableau 5.8).

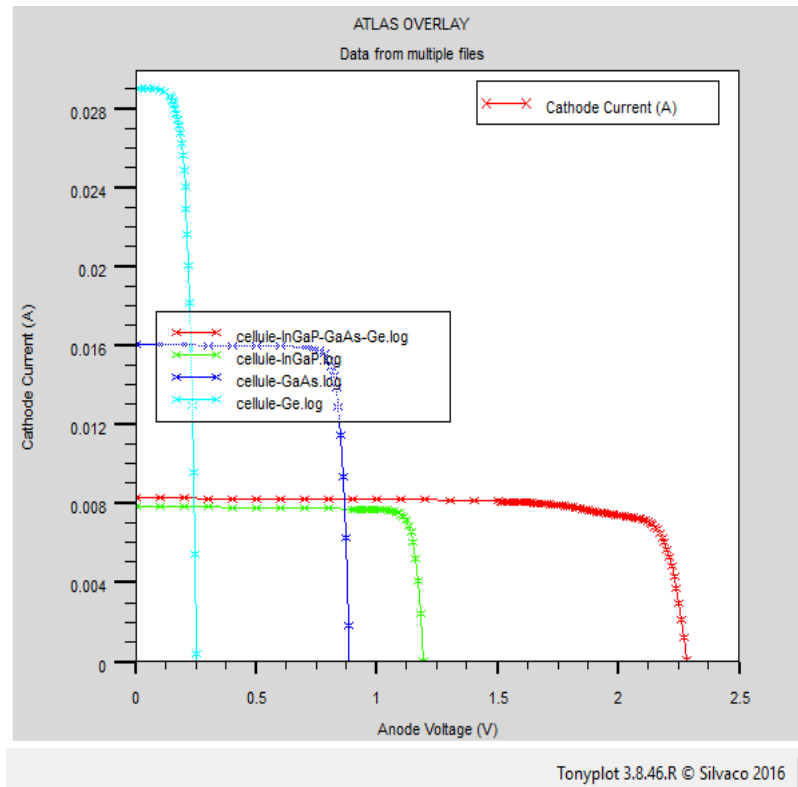


Figure (5.13) : Caractéristique (J - V) des cellules : Triple (InGaP/GaAs/Ge), Top (InGaP), Middle (GaAs), Bottom (Ge).

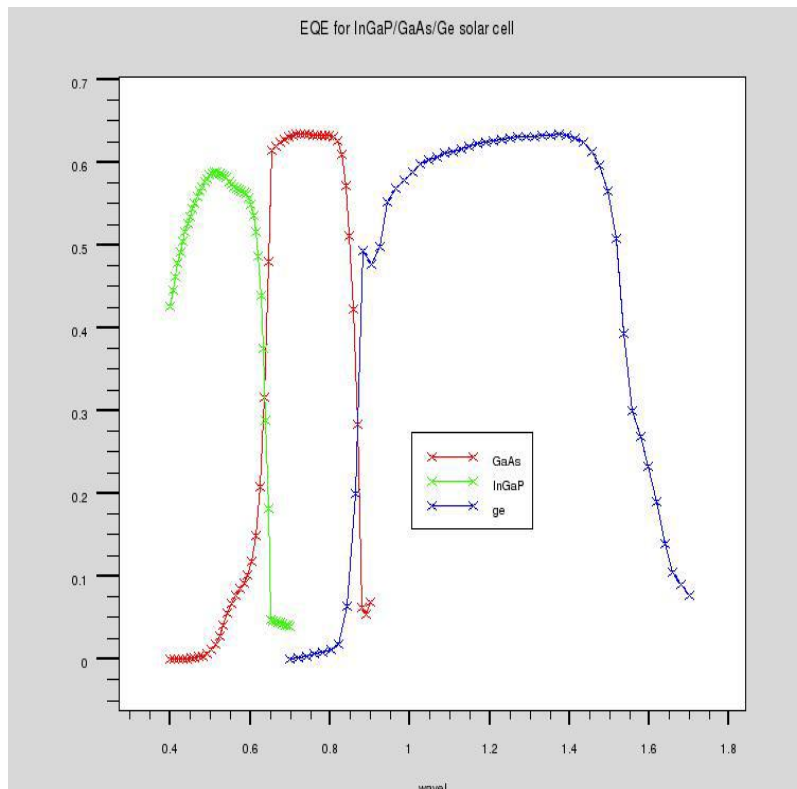


Figure (5.14) : Rendements quantiques des trois cellules InGaP, GaAs et Ge [5.4].

5.3 Influence de dopage des couches absorbantes de la cellule InGaP/GaAs/Ge

5.3.1 Influence de dopage de l'absorbeur GaAs

Pour étudier l'influence de dopage N_A (concentration des accepteurs) de la couche absorbante GaAs sur les paramètres photovoltaïques de la cellule triple-jonctions InGaP/GaAs/Ge, tous les paramètres des différentes couches constituant la cellule sont gardés constants, le seul paramètre varié est le dopage N_A de l'absorbeur GaAs. La gamme de variation est située entre la concentration 10^{12} à 10^{19} cm^{-3} .

La Figure (5.15) montre l'évaluation du courant de court-circuit J_{cc} , de la tension de circuit-ouvert V_{co} et du rendement de conversion η ainsi que le facteur de forme FF , en fonction du dopage N_A de la couche absorbante GaAs.

On remarque que la valeur optimale du dopage $N_A(\text{GaAs})$ qui donne le meilleur rendement de conversion est $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Le meilleur rendement obtenu est de **15.15%**.

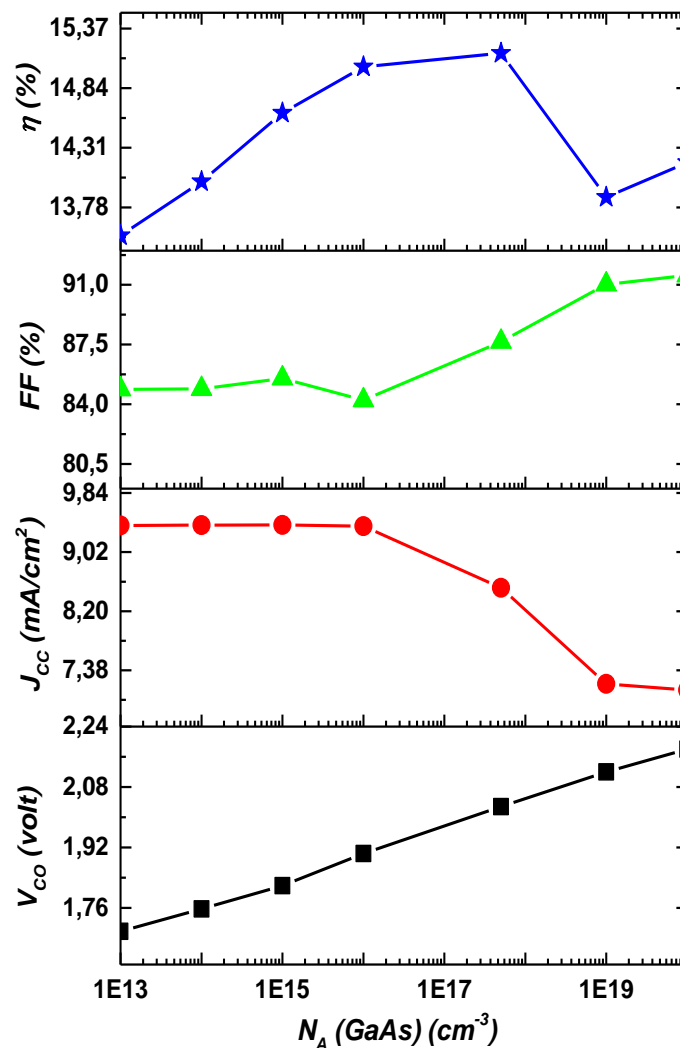


Figure (5.15) : Variations de J_{cc} , V_{co} , η et FF en fonction du dopage N_A de la couche absorbante GaAs.

5.3.2 Influence du dopage d'absorbeur InGaP

Pour étudier l'influence du dopage N_A de la couche absorbante InGaP sur les paramètres photovoltaïques de la cellule triple-jonctions InGaP/GaAs/Ge, tous les paramètres des différentes couches constituant la cellule solaire étudiée sont gardés constants, le seul paramètre varié dans ce cas est le dopage N_A de l'absorbeur InGaP. La gamme de variation est située entre la concentration 10^{12} à 10^{19} cm^{-3} .

La Figure (5.16) montre l'évaluation des paramètres photovoltaïques en fonction de dopage N_A de la couche absorbante InGaP. On remarque que le rendement de la cellule augmente de façon linéaire avec l'augmentation de $N_A(\text{InGaP})$. Pour un fort dopage de la couche absorbante InGaP, $N_A(\text{InGaP}) \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, le rendement obtenu est de **15%**.

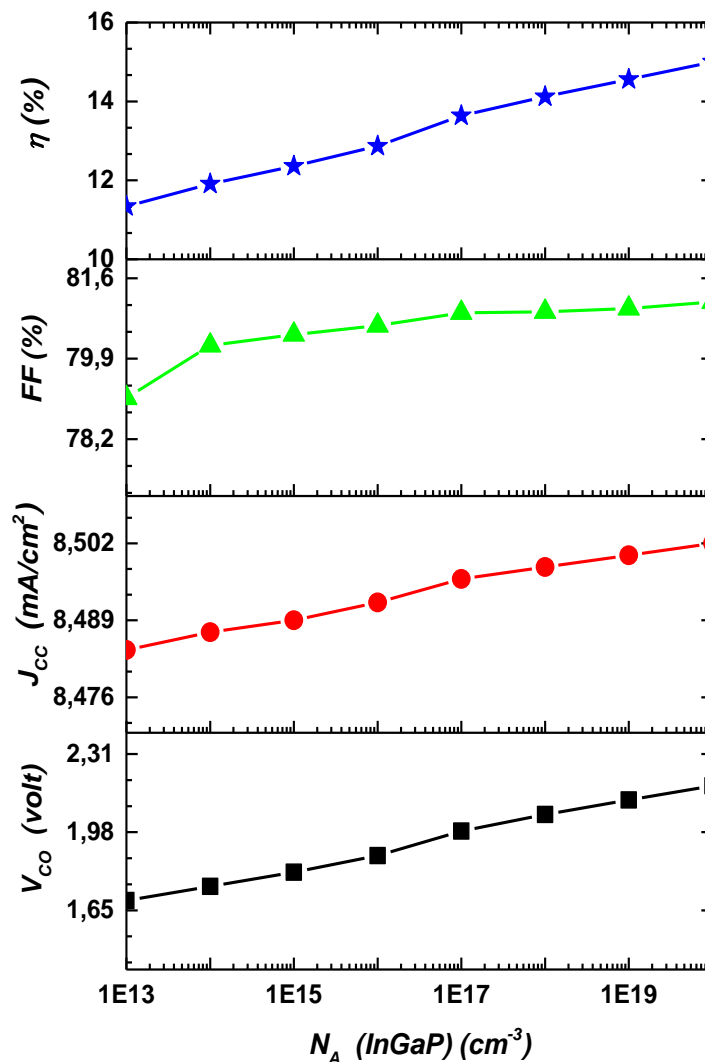


Figure (5.16) : Variations de paramètres photovoltaïques en fonction du dopage $N_A(\text{InGaP})$.

5.3.3 Influence du dopage de l'absorbeur Ge

Pour étudier l'influence du dopage N_A de la couche absorbante Ge ($N_A(\text{Ge})$) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule triple-jonctions InGaP/GaAs/Ge, tous les paramètres des différentes couches constituant la cellule solaire étudiée sont gardés constants, le seul paramètre varié dans ce cas est le dopage N_A de l'absorbeur Ge. La gamme de variation est située entre la concentration 10^{15} et 10^{19} cm^{-3} .

La Figure (5.17) montre clairement l'évaluation de tous les paramètres photovoltaïques en fonction du dopage $N_A(\text{Ge})$. On remarque une augmentation linéaire du rendement avec l'augmentation de $N_A(\text{Ge})$. Un fort dopage de la couche absorbante, $N_A(\text{Ge}) \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ avec $N_A(\text{GaAs}) = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A(\text{InGaP}) = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ donne un rendement meilleur de 17.78%.

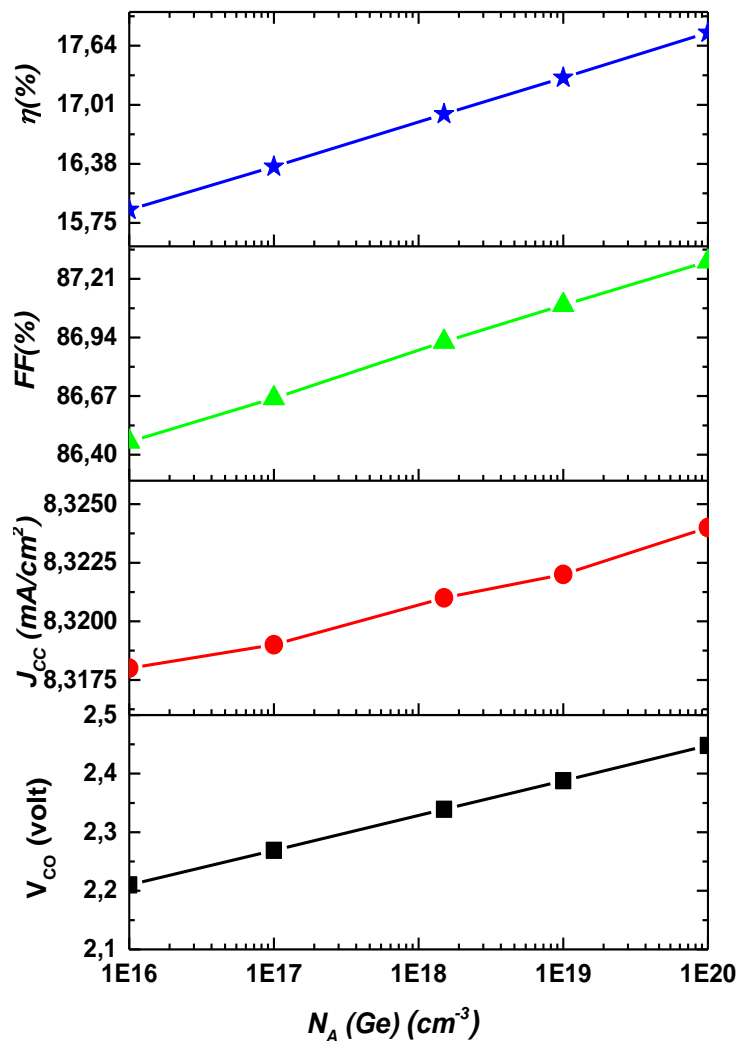


Figure (5.17) : Variations de paramètres photovoltaïques en fonction de $N_A(\text{Ge})$.

5.4 Conclusion

La simulation numérique de la cellule solaire dans ses trois formes (simple, double et triple-jonctions) utilisant l'outil de simulation Atlas SILVACO, nous a permis d'extraire les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée. La cellule solaire à triple-jonctions CSTJ à base des absorbeurs InGaP/GaAs/Ge permet une production maximale d'énergie comparativement aux cellules solaires à une seule et/ou double-jonctions. Suivant la courbe du rendement quantique EQE, cette structure permet d'absorber le maximum d'énergie dans une large bande du spectre solaire incluant toute la gamme de visible et une partie de l'Infrarouge.

Le dopage des absorbeurs a une influence remarquable sur le rendement de la cellule triple-jonctions. Des valeurs raisonnables de dopage, $N_A(\text{Ge}) \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_A(\text{GaAs}) = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A(\text{InGaP}) = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ donne un rendement de **16.38%**.

5.5 Références du Chapitre 5

- [5.1] Marcela Barrera, Francisco Rubinelli, Ignacio Rey-Stolle, JuanPla, Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code''ScienceDirect, Physica B 407 (2012) 3282–3284.
- [5.2] Sherif Michael_, Andrew Bates, The design and optimization of advanced multijunction solar cells using the Silvaco ATLAS software package, ScienceDirect,Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005) 785–794.
- [5.3] Veljko Nikolić, Nebojša Janković, A Simulation Study of Experimental GaInP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell, Proceedings of Small Systems Simulation Symposium 2012, Niš, Serbia, February 2012.
- [5.4] www.silvaco.com/content/kbase/Solar_Cell.pdf

Chapitre 6:

CONCLUSION GÉNÉRALE

6 Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Les cellules solaires triple-jonction (CSTJ) ont un grand potentiel pour être la technologie verte par excellence dans le futur. Cependant, leur coût de fabrication plus élevé doit être compensé par des rendements de conversion bien supérieurs.

L'objectif de notre travail était la simulation de la cellule CSTJ à base de InGaP/GaAs/Ge, qui présente le plus grand rendement de conversion. Cependant l'étude de l'influence des divers paramètres qui gouvernent les performances des cellules ont été effectuées. Le principe de la cellule CSTJ étant d'absorber plus de l'énergie dans une large gamme du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des photopiles supplémentaires pour augmenter encore plus le rendement quantique et de conversion.

La simulation électrique de la cellule solaire dans ses trois formes (simple, double et triple jonctions) donne des meilleures performances, on peut les résumer comme suit :

- Cellule solaire à une seule jonction :
 - ✓ à base de l'absorbeur Ge : le rendement $\eta = 5\%$.
 - ✓ à base de l'absorbeur GaAs : le rendement $\eta = 12.23\%$.
 - ✓ à base de l'absorbeur InGaP : le rendement $\eta = 8.21\%$.
- Cellule à double jonctions, Tandem (InGaP/GaAs) : le rendement $\eta = 14.12\%$.
- Cellule à triple jonctions (InGaP/GaAs/Ge) : le rendement $\eta = 15.16\%$.

Nous avons constaté que les cellules CSTJ permettent une production maximale d'énergie comparativement aux cellules solaires à une seule et/ou double jonctions. Ainsi que l'élargissement de la zone d'absorption du spectre de ces cellules conduit à une augmentation du rendement quantique. Il y a donc une augmentation d'absorption des photons incidents pour les longueurs d'ondes qui situées dans la gamme de UV/visible/NIR.

D'un autre côté, on a fait également une étude de l'effet du dopage (la concentration des accepteurs) des absorbeurs sur les paramètres photovoltaïques de la cellule InGaP/GaAs/Ge. Après la simulation, le meilleur rendement de conversion obtenu pour les cellules solaires CSTJ (InGaP/GaAs/Ge) est de l'ordre de **17.78%**.

Ce travail de simulation ouvre la voie à plusieurs perspectives. Nous suggérons de :

- a) Effectuer une étude de la cellule multi-jonctions par un simulateur 3D,
- b) Fabriquer des cellules solaires double et/ou triples jonctions et comparer les rendements expérimentaux avec ceux obtenus par simulation,
- c) Effectuer une étude plus approfondie sur la possibilité de développer des cellules solaires double ou multi-jonctions en se basant les composés quaternaires CIGS, CZTS, CdTe