

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA
Faculté des Sciences exactes, des Sciences de la Nature et de la vie
Département des Sciences de la matière



MEMOIRE

Présenté Pour l'Obtention du diplôme de Magister en physique
Option : PHYSIQUE DES MATERIAUX METALIQUE ET NOM
METALIQUE

THEME

**Etude comparative entre les cellules solaires de
type p^+ -AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de
type n^+ -AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs**

Par :

BALI AMINA

Soutenue le / /

Devant le Jury :

Pr. Sengouga Nouredine	Professeur à l'université de Biskra	Président
Pr. Meftah Amjad	Professeur à l'université de Biskra	Rapporteur
Pr. Attaf Abdallah	Professeur à l'université de Biskra	Examineur
Pr. Meftah Afak	Professeur à l'université de Biskra	Examineur

Introduction générale

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 [1].

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques est intimement lié aux propriétés des matériaux dont ils sont faits, et de nombreux problèmes de science des matériaux rencontrés dans la compréhension des cellules solaires existantes et le développement des cellules plus efficaces, moins coûteuses et plus stables.

Chaque matériau semi-conducteur dans un environnement électronique approprié est capable d'exposer des propriétés qui peuvent correctement être appelées « photovoltaïques », c'est-à-dire la production d'un courant électrique et une différence de potentielle sous l'illumination absorbé. Ce qui peut être considéré comme surprenant c'est que si peu de matériaux sont connus qui sont capables de former des dispositifs photovoltaïques avec un rendement suffisant pour les rendre d'un intérêt potentiel pour des applications pratiques. Il est encore à noter que seuls les matériaux suivants ont montré une efficacité solaire supérieure à dix pour cent: silicium, arséniure de gallium, le phosphure d'indium, le tellure de cadmium, de cuivre diséléniure d'indium et le sulfure cuivreux [2].

L'efficacité des cellules solaires s'est améliorée au fil du temps en augmentant le nombre de jonctions. Chaque jonction est capable d'extraire l'énergie d'une partie du spectre solaire [3]. Une nouvelle voie pour améliorer l'efficacité consiste à utiliser des matériaux photovoltaïques à base d'alliage tels que l'arséniure de gallium (GaAs).

Les cellules solaires à base de GaAs sont au centre des efforts de développement considérable en raison de leur efficacité de conversion élevée et le potentiel d'amélioration dans la performance. Les cellules solaires à base de GaAs ont la plus grande efficacité mesurée ($\sim 25.7\%$ au spectre $AM_{1.5}$) de n'importe quel dispositif photovoltaïque à seule jonction. Les cellules solaires à base de GaAs ont atteint des rendements élevés, en partie

parce que le gap d'énergie de GaAs est proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque en utilisant une cellule solaire à seule jonction. D'autres augmentations d'efficacité sont possibles en utilisant des jonctions superposées (tandem, triple, quadruple) et / ou un éclairage concentré.

Les cellules solaires à base de GaAs ont des avantages significatifs supplémentaires. En comparaison avec les cellules solaires en silicium, Le GaAs possède des propriétés électroniques qui sont supérieures à celles du silicium. La vitesse de saturation des électrons est plus élevée et leur mobilité est une plus grande. Relativement aux cellules de silicium, un autre avantage de GaAs est dans le fait qu'il présente un gap d'énergie direct, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour émettre de la lumière de façon efficace.

Un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, est celui de la vitesse de recombinaison en surface [4]. Ce problème a été réduit grâce à la croissance d'une couche de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sur la surface du GaAs. Cette couche a été utilisée pour passiver la surface avant des cellules. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison peuvent exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules à base de GaAs a dépassé pour la première fois 20% vers la fin des années 70 quand Woodall et Hovel ont fabriqué des cellules aux hétéro-structures avec un rendement de 22% [5].

Dans ce travail, nous allons étudier les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ($\text{AlGaAs} / \text{GaAs}$) de structure p+pn et n+np où la couche (AlGaAs) fortement dopée est utilisée comme une fenêtre, suivie des couches émetteur et base en (GaAs). Nous considérons les deux cas où la structure est avec un substrat épais en (GaAs) ou sans. Nous faisons aussi varier la fraction molaire ($x(\text{Al})$) de l'aluminium de la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) et voir son effet sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Dans le même contexte, nous étudions une cellule solaire à fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) graduelle où la fraction molaire ($x(\text{Al})$) varie dans l'espace. Les résultats de l'étude sont générés par le logiciel de simulation sophistiqué SILVACO-ATLAS en considérant les conditions de l'obscurité et de l'éclairement AM0 du fait que ces cellules sont généralement destinées aux applications spatiales. Le logiciel SILVACO comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Les chercheurs ont publié plusieurs travaux concernant l'application de SILVACO-ATLAS en vue de la modélisation des cellules solaires [3].

Le mémoire est structuré en quatre chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Le premier chapitre présente des notions générales sur les matériaux semi-conducteurs, les composés binaires (III-V) et ternaires, et l'hétérojonction AlGaAs/GaAs. Le deuxième chapitre présente les principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires et les caractéristiques des cellules solaires à hétérojonctions (AlGaAs/GaAs). Le troisième chapitre est consacré à la description et l'application du logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Le quatrième chapitre présente une description détaillée des conditions et des cellules étudiées et résultats essentiels aboutis de cette étude.

I.1 Introduction :

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. En effet, le GaAs est à gap direct ayant une largeur proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque assurée par une cellule solaire même à unique jonction. Des rendements de conversion autour de 25.7 % ont été atteints par de telle cellule au spectre AM_{1.5}.

Ce chapitre couvre des notions sur les matériaux semi-conducteurs en général, les composés binaires (III-V) et ternaires, et l'hétérojonction AlGaAs/GaAs.

I.2 Notion générale sur les matériaux semi-conducteurs :

I.2.1 Classification des matériaux :

Une manière commune de classer un matériel est par 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 I-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 I-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 phosphore en aluminium (AlP), nitrure de gallium (GaN), phosphore 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).

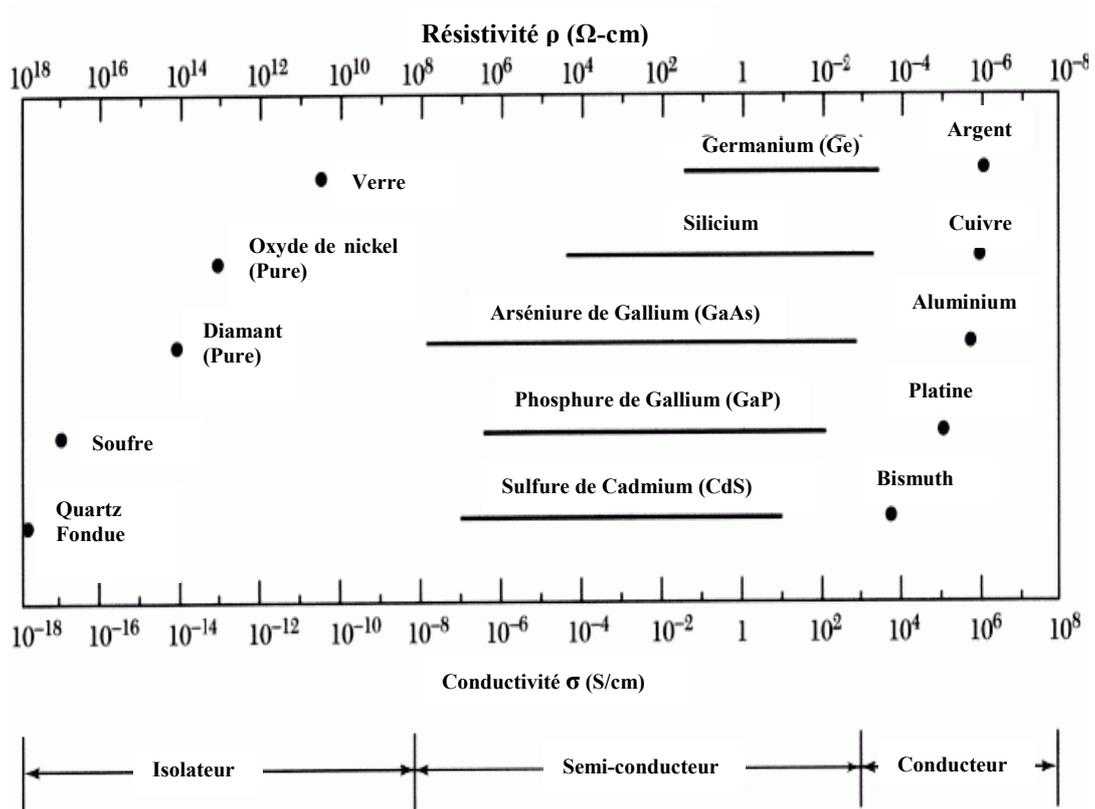


Figure I-1 : Résistivité pour différents types de matériaux [6].

	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 I-2 : Table périodique partiel [3].

Le sujet de ce mémoire est l'alliage aluminium arsénure de gallium (AlGaAs). L'aluminium et le gallium sont des éléments du groupe III, alors que l'arsénure est un élément du groupe V

I.2.2 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") [7].

Dans le diagramme de bande de la figure I-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 I-3.

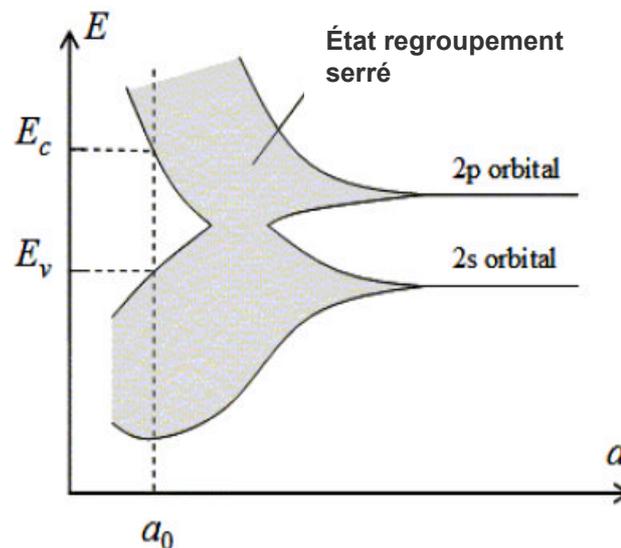


Figure I-3 : Distance inter atomique représentée graphiquement contre l'énergie, pour montrer la formation des bandes d'énergie dans un matériau [1].

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 [8].

On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'existe entre ces bandes, comme illustré à la figure I-4.

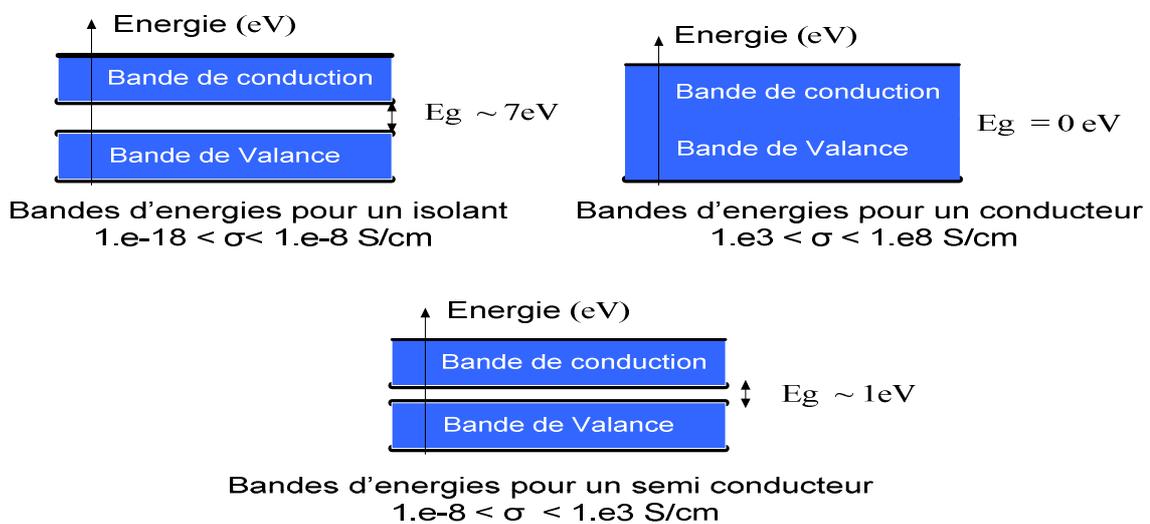


Figure I-4 : Bandes d'énergie dans différents types de matériaux [9].

I.2.3 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 [10].

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 [8]. La figure I-5 décrit très simplement ce phénomène.



Figure I-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 [11].

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 déféctuosité 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 [6]. Un nouveau électron de valence peut venir occuper ce trou et ainsi de suite.

La figure I-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 ».

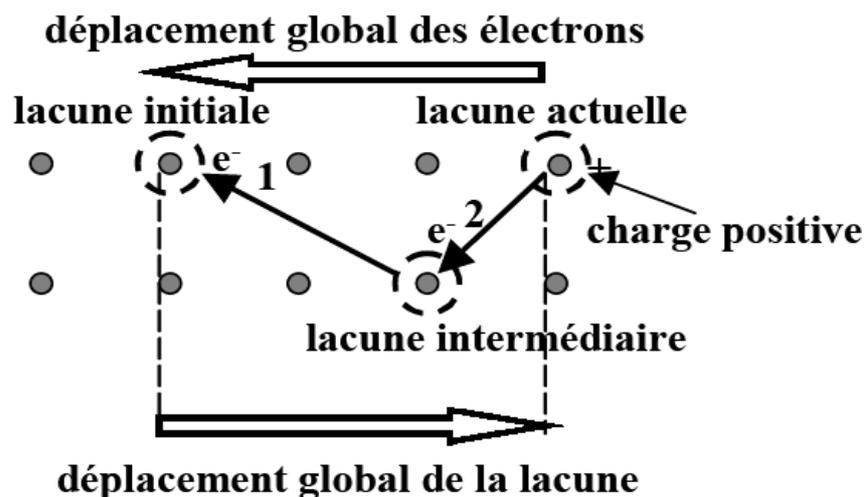


Figure I-6 : Représentation symbolique du mécanisme de déplacement des électrons dans la bande de valence [11].

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 [12] :

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_F - E_C}{kT}\right] = N_C \exp\left[\frac{E_F - E_C}{kT}\right] \quad (\text{I-1})$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_v - E_F}{kT}\right] = N_v \exp\left[\frac{E_v - E_F}{kT}\right] \quad (\text{I-2})$$

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 [12].

Les densités d'états énergétiques (densité d'électrons ou de trous) s'expriment par les relations suivantes [11] :

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

$$dN_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v^*}{\eta^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} dE \quad (\text{I-4})$$

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 [6]. 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 [1].

I.2.4 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 [10], 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 [8].

I.2.4.1 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 [10]. 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 [6]. On peut considérer que le trou s'est déplacé par combinaisons d'électrons. La structure cristalline du silicium pur est présentée dans la figure I-7 :

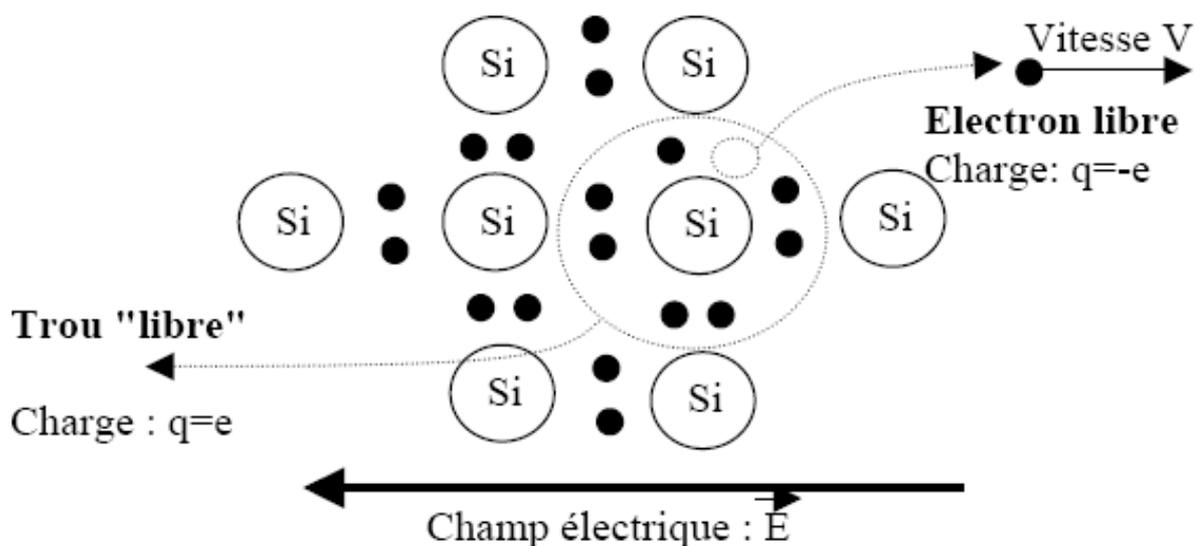


Figure I-7 : Structure cristalline du Silicium pur [9]

I.2.4.1.1 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 [6]. Ceci se résume à cette équation :

$$n = p = n_i \quad (\text{I-5})$$

Les concentrations des porteurs mobiles sont fonction de la largeur de bande interdite E_g (voir tableau I-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 [13] :

$$n_i = AT^{1.5} \exp\left[-\frac{E_g}{(kT)}\right] \quad (\text{I-6})$$

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

$$E_g = E_C - E_V \quad (\text{I-7})$$

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

$$A = \frac{2}{h^3} (2\pi m_o k)^{3/2} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_o m_o} \right)^{3/4} \quad (\text{I-8})$$

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 I-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 semi-conducteurs [14].

Les cristaux semi-conducteurs purs, qui ne contiennent pas d'atomes étrangers, sont appelées intrinsèque. Dans un semi-conducteur intrinsèque à 0 K° 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 I-8 pour Si, Ge et GaAs.

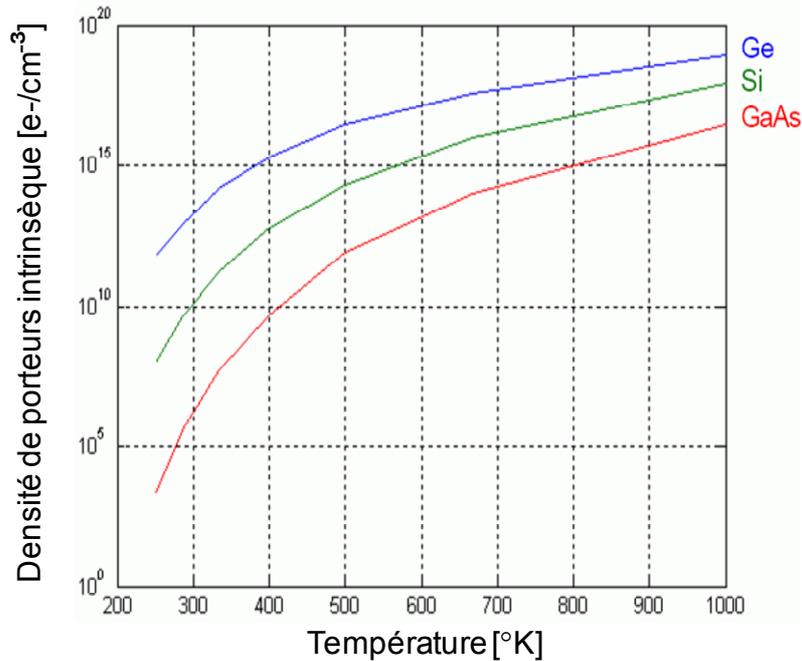


Figure I-8 : Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température [15].

I.2.4.2 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 [10], 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 [6].

I.2.4.2.1 Semi- conducteur dopé de type-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.

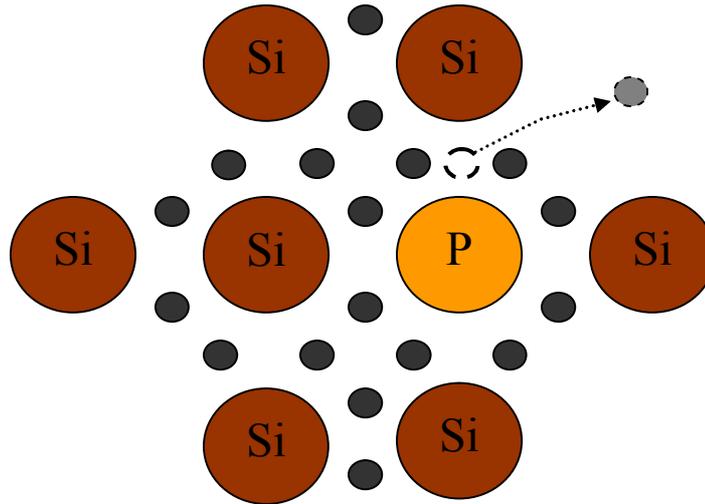


Figure I-9 : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore, dopage donneur de type-n [9], [11].

Dans le matériau de type-n, les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires [10]. 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 I-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.

I.2.4.2.2 Semi- conducteur dopé de type-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 [10].

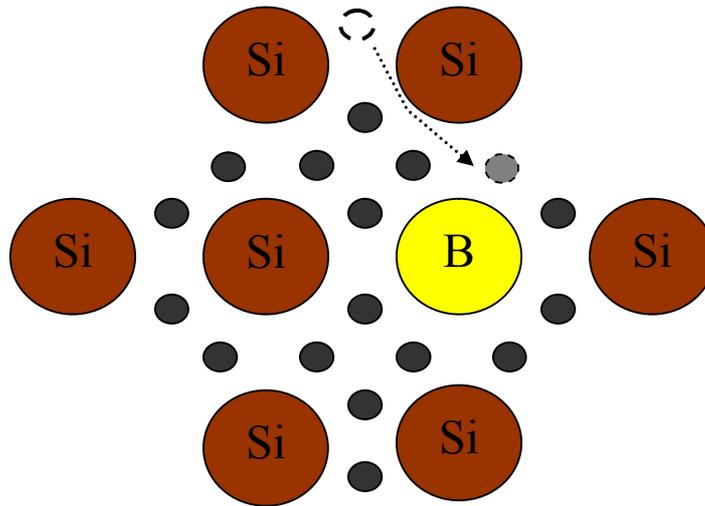


Figure I-10 : Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de Bore, dopage accepteur de type-P [9], [11].

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 I-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 insuffisante, 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 [15].

I.2.5 Semi-conducteurs directs et indirects :

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 I-11. L'énergie minimale de la bande de conduction dans les matières indirectes a 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 [16].

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].

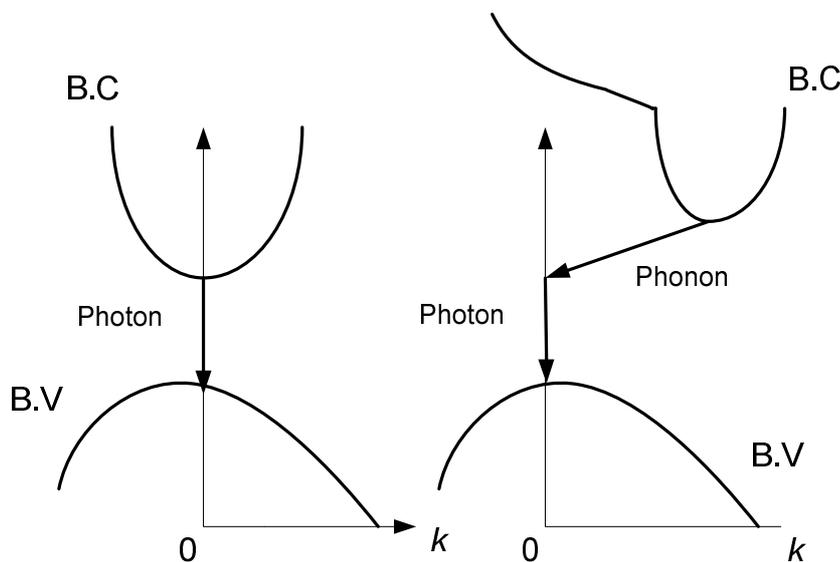


Figure I.11 : Différence entre une bande interdite directe et indirecte d'un semi-conducteur [12].

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 [12].

I.2.6 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 [17].

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 ;

$$\frac{\partial n_i(x)}{\partial t} = G_i(x) - R_i(x) - \text{div } j_i(x) \quad (\text{I-9})$$

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 $\text{div } j_i > 0$ [18].

I.2.6.1 Génération :

Les électrons et les trous sont produits par des procédés qui peuvent fournir au moins l'énergie minimum de génération \mathcal{E}_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 \mathcal{E}_G peut être fournie en portions plus petites par des phonons ou même des photons [18].

I.2.6.2 Recombinaison :

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 [15]. 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 [10].

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 I-12.

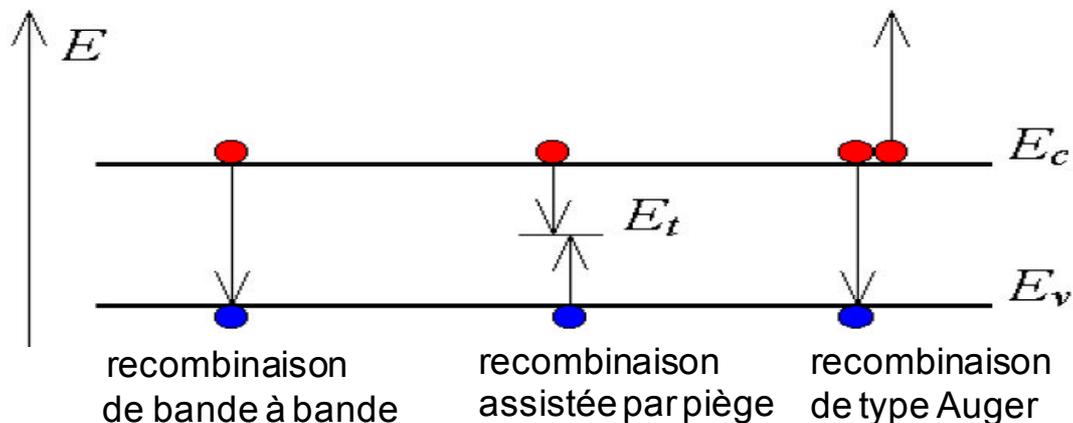


Figure I.12 : Types de recombinaison [10].

I.2.6.2.1 Recombinaison directe :

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs. Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire le taux de recombinaison est le plus élevé.

La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte [15].

I.2.6.2.2 Recombinaison indirecte :

La recombinaison assistée par piège se produit lorsqu'un électron tombe dans un «piège», ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impureté. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et le trou, qui se rencontrent dans le piège [19].

I.2.6.2.3 Recombinaison Auger :

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées [12]. Cette recombinaison nécessite trois particules: au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison [10].

I.2.6.2.4 Recombinaison de surface :

Recombinaison au niveau des surfaces et des interfaces peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs semi-conducteurs. C'est parce que les surfaces et interfaces contiennent généralement un grand nombre de centres de recombinaison en raison de l'interruption soudaine du cristal semi-conducteur, ce qui laisse un grand nombre d'états électriquement actifs. En outre, les surfaces et les interfaces sont plus susceptibles de contenir des impuretés car elles sont exposées pendant le processus de fabrication du dispositif [19].

Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante :

$$S = S_0 \left(\frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \quad (I-10)$$

S_0 , N_{set} et α dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type-n, α est de 1 et N_{set} est de 10^{18} cm^{-3} [12].

I.3 Hétérojonction AlGaAs/GaAs :

I.3.1 Jonction de base PN :

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 [6]. On sait qu'elle ne permet le passage du courant que dans un sens [9], et qu'elle est constituée de deux zones respectivement dopées P et N juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (figure I-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 [20].

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 [10]

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (I-11)$$

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 (I-12) [6].

$$W = \left\{ \frac{2 \varepsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{I-12})$$

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

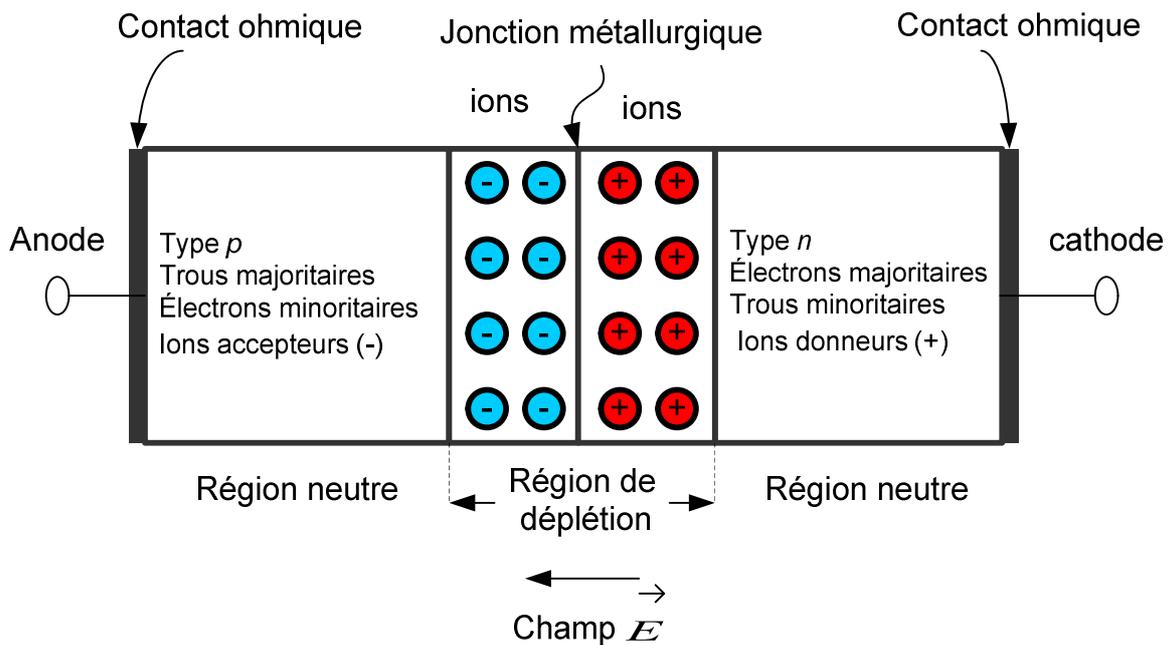


Figure I-13 : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre [21]

I.3.2 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 $(V_{bi} - V_{\text{direct}})$ entraînant une diminution de l'épaisseur W (dans l'équation (I-12) V_{bi} est remplacé par $(V_{bi} - V_{\text{direct}})$). 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 I-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 [20].

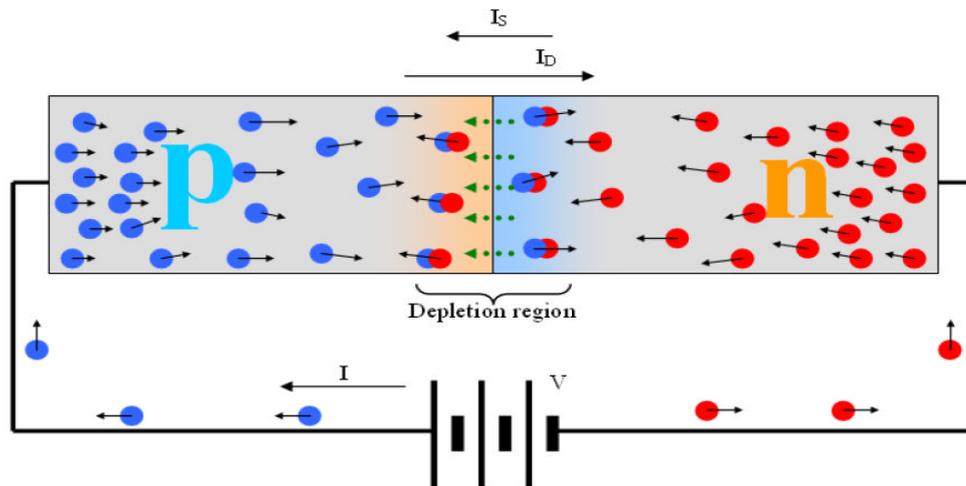


Figure I-14 : Jonction polarisée dans un sens direct [6].

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 (I-13)) en raison de la diminution de la région de déplétion. La figure I-15 montre la caractéristique courant –tension ($I-V$) d'une jonction PN dans l'état de polarisation directe.

$$I_{Total} = I_S + I_D \approx I_D \quad (1-13)$$

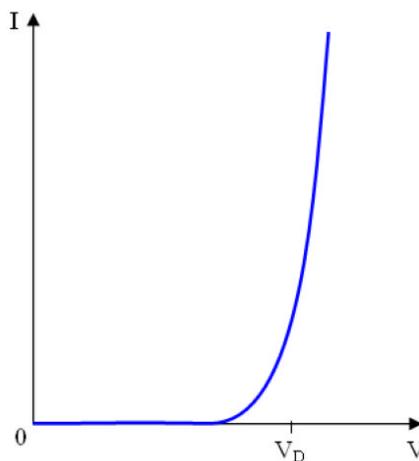


Figure I-15 : Caractéristique $I-V$ de la jonction PN en polarisation directe [6].

I.3.3 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 (I-12), 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 I-16) nous montre l'origine du courant inverse de saturation I_s de cette jonction [20].

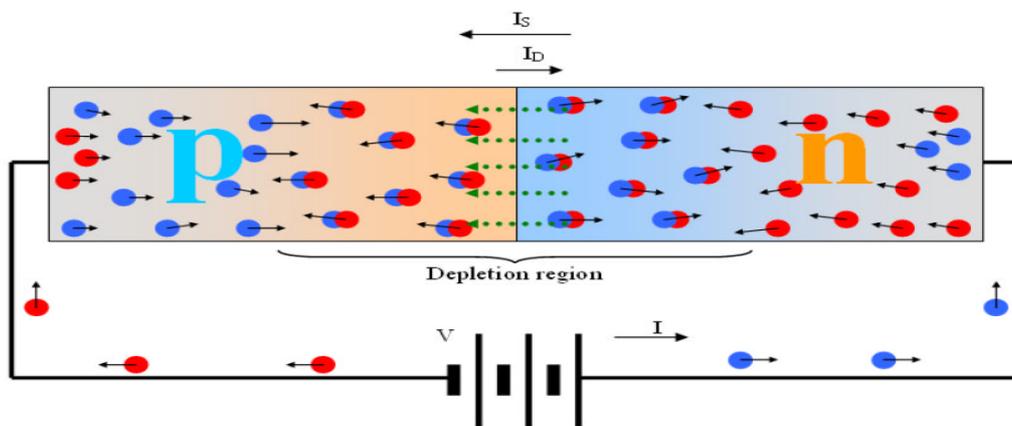


Figure I-16 : Jonction polarisée dans un sens inverse [6].

La largeur de région de déplétion est donnée par l'équation (I-14).

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{I-14})$$

$$I_{Total} = I_s + I_D \approx I_s \quad (\text{I-15})$$

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 (I-15)).

Idéalement, ce courant serait égal à zéro, mais en réalité, il ya une petite quantité de courant de saturation, comme illustré dans la figure I-17.

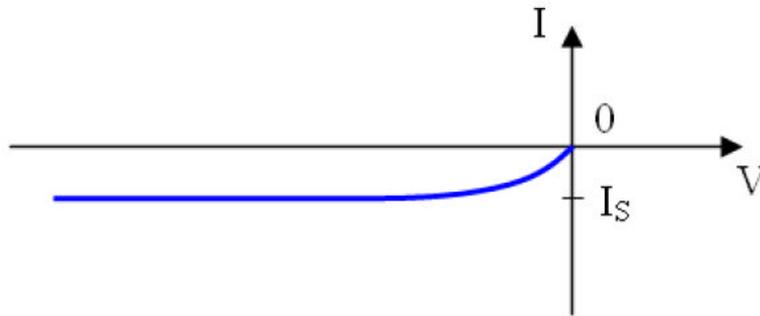


Figure I-17 : Caractéristique I - V de la jonction PN en polarisation inverse [6].

I.3.4 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 [5]. 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 semi-conducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions.

Le schéma de la figure I-18 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

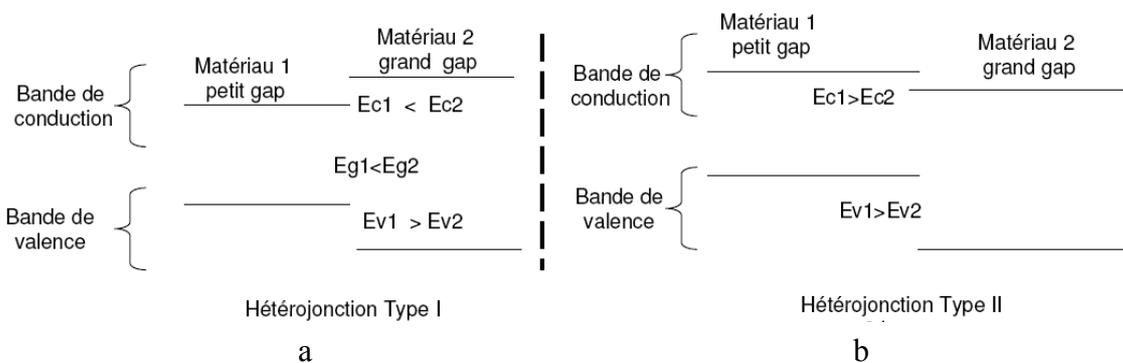


Figure I-18 : Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction [22].

Pour l'hétérojonction de type I (figure (I-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 (I-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 [23], les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires [5].
- L'hétérojonctions aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment [23], les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semi-conducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires [5].

I.3.5 L'hétérojonctions AlGaAs/GaAs :

L'hétérojonction constituée du matériau de grande bande interdite (dopé N), $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ et du matériau de faible bande interdite (non dopé) GaAs est la plus étudiée du fait de la facilité relative de réalisation des couches épitaxiales. La figure I-19 représente la structure de bandes de l'hétérojonction, avant et après contact.

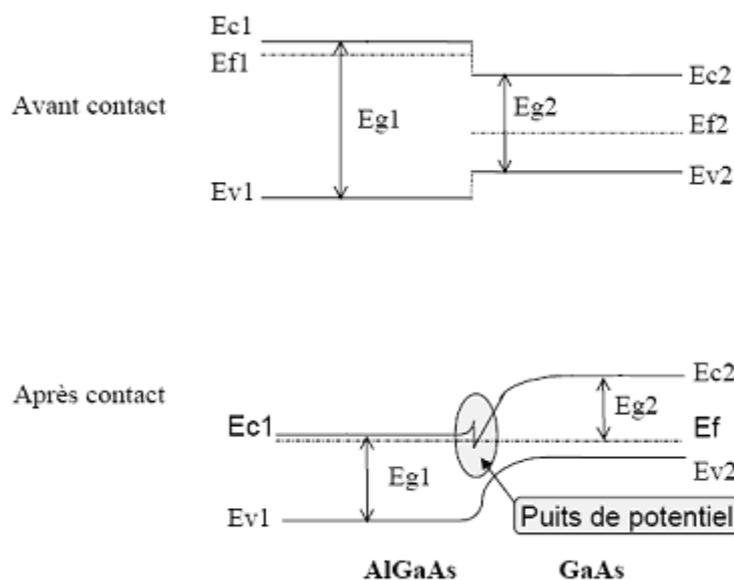


Figure I-19 : Diagramme de bandes d'énergie de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs [24].

De chaque côté de l'hétérojonction formée, infiniment loin de l'interface, le diagramme de bande doit tendre asymptotiquement vers chacun des diagrammes initiaux. Ceci implique la courbure des diagrammes de conduction et de valence au voisinage de l'hétérojonction. Ces courbures ont pour effet de créer un puits de potentiel qui permet le confinement des électrons issus des donneurs du matériau de grande bande interdite (AlGaAs) dans le matériau de faible bande interdite (GaAs).

L'étroitesse de ce puits (10 à 20 nm) induit la quantification des niveaux d'énergie dans la direction perpendiculaire à la jonction et le mouvement des électrons se fait dans un plan parallèle à l'hétérojonction.

I.3.6 Les composés binaires et ternaires :

I.3.6.1 Les composés binaires :

L'étude des propriétés des composés binaires, et en particulier celles de la structure des bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée.

Composé III-V	E_g (ev)	m^* / m^0	μ (cm ² /V.S)	a (A°)
BN	7,5	-	-	3,6150
AlP	2,45	-	-	5,4510
AlAs	2,16	-	-	5,6605
AlSb	1,58	0,12	200	6,1355
BP	2,0	-	-	4,5380
GaN	3,36	0,19	380	$a=3,189$ $b=5,185$
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8800	5,653
GaSp	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSp	0,17	0,0145	80000	6,4794

Tableau I-2 : Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K° [17].

Les composés contenant du Bore, de l'Aluminium ou de l'Azote entrent dans cette catégorie; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité des porteurs ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le Thallium ou le Bismuth donnent des composés à base de Gallium (GaAs, GaSb) ou d'Indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau (I-2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

I.3.6.2 Les composés ternaires :

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, qui sont identifiés de la façon suivante :

$A_x A'_{(1-x)} B$ exemple: $Al_x Ga_{1-x} As$, lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court AlGaAs [17].

I.3.7 Le composé GaAs :

Le faible coût, la grande disponibilité, la grande conductivité thermique et la bonne qualité de son oxyde ont fait du silicium le matériau clé de l'électronique. Toutefois, les semi-conducteurs III-V sont rapidement apparus comme des matériaux de choix pour des applications spécialisées. Notamment, l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphore d'indium (InP) se sont distingués par leur grande mobilité électronique et leur bande interdite directe. Leur grande mobilité électronique permet d'obtenir des dispositifs à haute rapidité de commutation en électronique, alors que leur bande interdite directe favorise les transitions optiques. Ces propriétés, communes à la plupart des matériaux III-V sont très prises dans l'élaboration des dispositifs optoélectroniques [25]. Le GaAs cristallise dans une structure de type zinc-blende (voir figure I-20). Il est formé de deux réseaux cubiques à faces centrées identiques qui s'interpénètrent, l'un contenant les atomes de gallium 'Ga', l'autre l'atome de l'arsenic 'As'. Le décalage entre les deux réseaux est d'un quart de la diagonale principale du cube. On a donc quatre paires d'atomes par cellule conventionnelle.

Les liaisons tétraédriques covalentes telles que les liaisons Si-Si par exemple ou partiellement ioniques et partiellement covalentes telles que les liaisons Ga-As dans le cas qui nous concerne sont la base de la structure zinc-blende. En effet, chaque atome est l'origine de quatre liaisons orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier, comme le montre (figure I-20) [26].

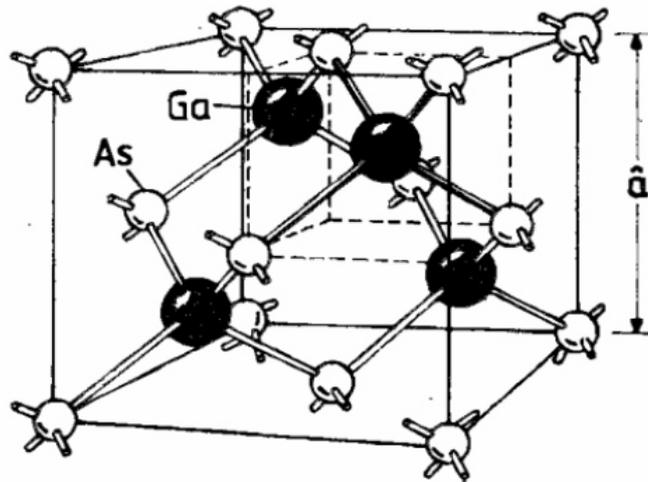


Figure I-20 : Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende [27].

Ces conditions sont bien satisfaites pour certains semi-conducteurs, tel que l'arséniure de gallium et le germanium, où le désaccord entre les paramètres cristallins est de l'ordre de 0.088% et les coefficients de dilatation ont des valeurs voisines, ainsi que pour le GaAs et le $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, comme il est montré dans le tableau I-3.

Propriété	Symbole	Ge	GaAs	$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x=0.3$)
Paramètre de maille (Å)	a	5.658	5.653	5.655
Densité ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	ρ	5.32	5.36	4.88
Structure de bande		indirecte	directe	Directe
Energie de bande interdite (gap) (eV)	E_g	0.67	1.424	1.798
Concentration intrinsèque (cm^{-3})	n_i	$2,4\cdot 10^{13}$	$2,2\cdot 10^6$	$2,4\cdot 10^3$
Mobilité électronique ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	μ_n	4000	8800	-
Mobilité des trous ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	μ_p	2000	400	-
Vitesse de saturation (cm/s)	v_s	-	10^7	10^7
Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	K	0.6	0.46	-
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6}\text{°C}^{-1}$)	α_{th}	5,5	6.4	6.04
Permittivité relative	ϵ_r	16.3	13.18	12.24

Tableau I-3 : Propriétés physiques de quelques matériaux à 300 K° [5].

I.3.8 L'alliage AlGaAs :

L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est une solution solide de GaAs et de AlAs (voir figure I-21). Les paramètres physiques relatifs à cet alliage peuvent être obtenus par combinaison des paramètres correspondants au GaAs et à l'AlAs. Les deux matériaux ont la même structure cristalline. Avec des paramètres physiques voisins et se rejoignent pour une température de 900 °C environ.

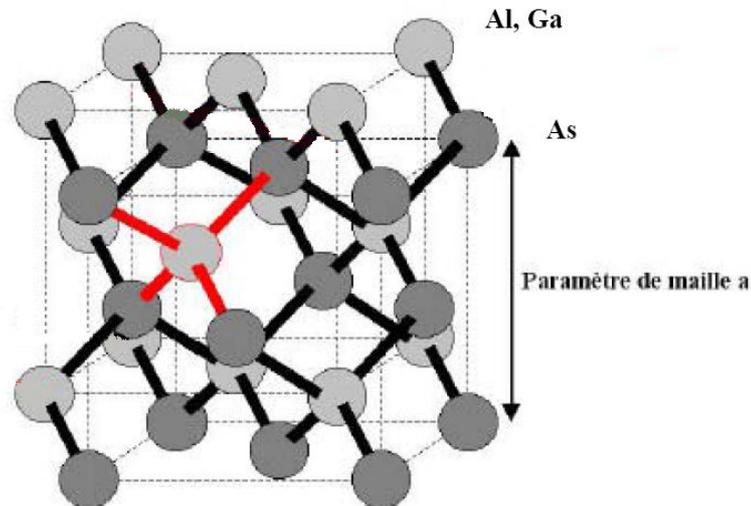


Figure I-21 : Structure du GaAs, elle se compose de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, décalés d'un quart de la grande diagonale du cube, et occupés l'un par l'anion (As), et l'autre par le cation (Al,Ga) [27].

La nature de la transition énergétique de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ change selon le taux d'aluminium x , avec $0 < x < 1$. Pour une fraction d'aluminium inférieure à 0,45, la transition de l'alliage est identique à celle du GaAs caractérisé par une transition directe. La transition devient indirecte quand le taux d'aluminium devient supérieur à 0,45. Les différents paramètres physiques du $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sont donnés en fonction de la fraction x de l'aluminium. À la température ambiante l'affinité électronique χ s'écrit [26] :

$$\chi = 4,07 - 1,1x \quad \text{pour} \quad x \leq 0,45 \quad (\text{I-16})$$

$$\text{et} \quad \chi = 3,64 - 0,14x \quad \text{pour} \quad 0,45 \leq x \leq 1$$

Pour que deux matériaux puissent former une bonne hétérojonction, il est d'abord nécessaire que les paramètres de maille soient aussi voisins que possible. A cet effet, le

matériau $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est très intéressant car, lorsque (x) varie de 0 à 1, c'est à dire lorsque l'on passe de GaAs à AlAs, la structure de bande passe d'une bande interdite à gap direct de valeur de 1.43 eV à une bande interdite à gap indirect de valeur de 2.16 eV, alors que la constante de maille passe de 5.653 \AA à 5.661 \AA , soit une variation $< 0.2\%$. Ainsi il est possible de faire croître toutes les compositions sur le GaAs avec un accord de maille convenable.

La constante de maille et les bandes d'énergies en fonction de la composition (x) de l'aluminium sont données par [17] :

$$\text{Constante de maille (en \AA)} \quad a = 5.6533 + 0.0078x \quad (\text{I-17})$$

$$\text{Bande interdite (en eV)} \quad E_g = 1.424 + 1.155x + 0.37x^2 \quad (\text{I-18})$$

$$\text{Discontinuité de } E_c \text{ (en eV)} \quad \Delta E_c = \begin{cases} 0.67x + 0.27x^2 & x \leq 0.45 \\ 0.475 - 0.31x & 0.45 < x \leq 1 \end{cases} \quad (\text{I-19})$$

$$\text{Discontinuité de } E_v \text{ (en eV)} \quad \Delta E_v = \begin{cases} 0.413x + 0.166x^2 & x \leq 0.45 \\ 0.413 - 0.166x^2 & 0.45 < x \leq 1 \end{cases} \quad (\text{I-20})$$

I.3.9 Propriété optique :

I.3.9.1 Indice de réfraction :

Dans un matériau l'indice de réfraction se trouve généralement dans sa forme réelle.

Toutefois, il peut être trouvé sous sa forme complexe

$$\tilde{n} = n + jk \quad (\text{I-21})$$

Avec

\tilde{n} : L'indice de réfraction complexe,

n : L'indice de réfraction réel,

k : Le coefficient d'extinction du matériau.

L'indice de réfraction caractérise la vitesse de propagation d'une radiation monochromatique dans le matériau et est directement relié à la valeur du diélectrique du matériau. Il est défini par:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon} \quad (\text{I-22})$$

Avec

c : la vitesse de la lumière dans le vide,

v : Vitesse de l'onde lumineuse dans un milieu ;

ε : Constante diélectrique.

I.3.9.2 Le coefficient d'extinction :

Le coefficient d'extinction d'un matériau, est une mesure qui caractérise la capacité du matériau à absorber une onde électromagnétique à une longueur d'onde particulière.

le coefficient d'extinction, relie au coefficient d'absorption α par l'expression :

$$k = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha \quad (\text{I-23})$$

Le coefficient de réflexion normale du matériau s'écrit [28]:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (\text{I-24})$$

Les spectres des indices de réfraction en fonction de l'énergie du photon E ; $n(E)$ et des coefficients d'extinction $k(E)$ pour l'AlGaAs sont présentés respectivement dans les graphes de la figure I-22 pour différentes valeurs de la composition x .

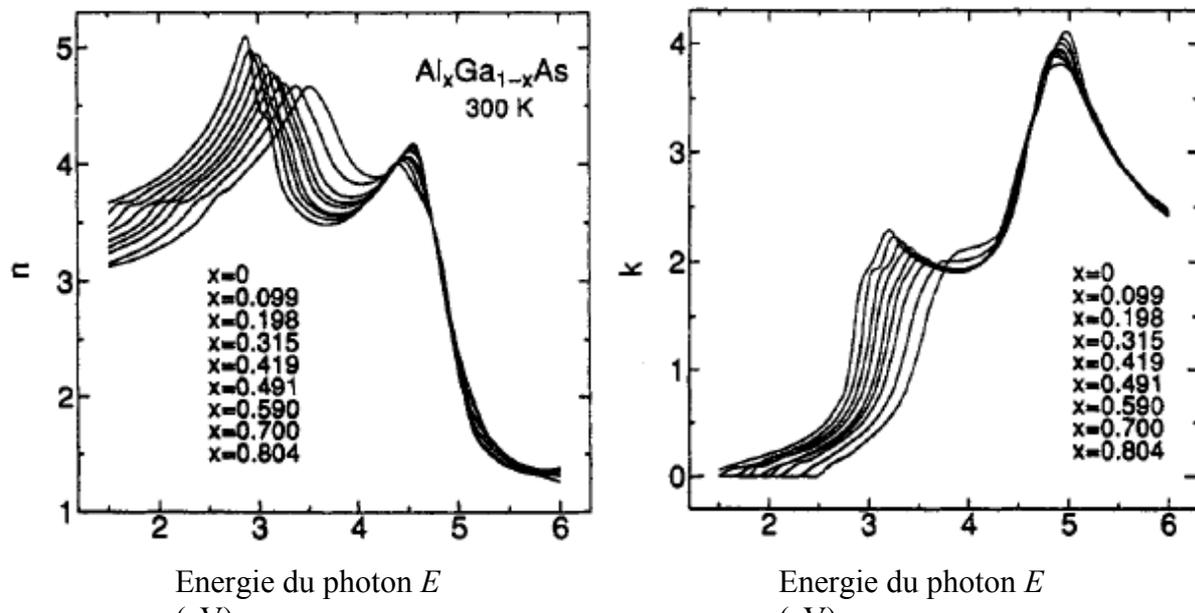


Figure I-22 : Spectres $n(E)$ et $k(E)$ pour AlGaAs avec les neuf compositions, de gauche à droite lorsque x augmente [29].

I.3.9.3 Le coefficient d'absorption:

L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de bande interdite du matériau, c'est la raison pour laquelle on détermine un coefficient d'absorption intrinsèque. Pour des photons d'énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle.

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence $(h\nu - E_g)$:

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^a \quad (\text{I-25})$$

L'indice a prend des valeurs différentes, selon que le matériau est à transition interbande directe ($a=1/2$), ou indirecte ($a=2$). Le facteur multiplicatif B dépend du matériau.

Dans le cas du composé ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, le coefficient d'absorption change avec la fraction molaire x . Une expression a été donnée dans la référence, peut être utilisé pour le calcul du coefficient d'absorption, qui est en fonction de l'énergie du minimum des bandes interdites :

$$\alpha = 4.10^4 (E - E_{g1})^{1/2} + 10^3 (E - E_{g2})^2 + 3,5.10^5 (E - E_{g3})^{1/2} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (\text{I-26})$$

Où

E_{g1} , E_{g2} et E_{g3} sont les énergies des bandes interdites minimums, données par :

$$E_{g1} = 1.44 + 1.04x + 0.47x^2 \quad (\text{eV}) \quad (\text{I-27})$$

$$E_{g2} = 1.92 + 0.17x + 0.07x^2 \quad (\text{eV}) \quad (\text{I-28})$$

$$E_{g3} = 2.90 + 0.36x + 0.52x^2 \quad (\text{eV}) \quad (\text{I-29})$$

Le coefficient d'absorption en fonction de la composition x est représenté sur la figure (I-23). L'influence des transitions interbandes indirectes sur le coefficient d'absorption est sensible à partir d'une composition en aluminium supérieure à $x=0.6$.

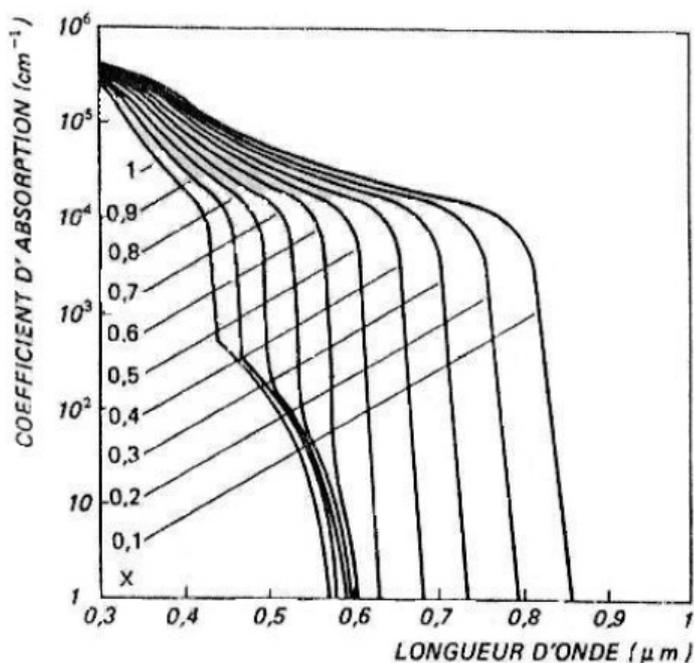


Figure I-23: Spectre d'absorption optique du composé Al_xGa_{1-x}As [5].

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction de l'étude des cellules solaires, qui sont des dispositifs pouvant être composés de différents matériaux semi-conducteurs. Des notions générales sur les matériaux semi-conducteurs ont été présentées ainsi que les propriétés générales des composés binaires (III-V) et ternaires destinés dans la conception des cellules solaires à hétérojonction AlGaAs / GaAs. Nous avons aussi clarifié certains concepts sur les types de polarisation d'une jonction PN et la physique de l'hétérojonction AlGaAs / GaAs .

II.1 Introduction :

Depuis l'antiquité le soleil été une source majeure d'énergie sur la surface de la terre, et son utilisation s'est développée avec le développement de la science et de la technologie, l'homme l'utilisait pour le chauffage et le séchage, et pour chauffer l'eau selon le principe de conversion "rayonnement - chaleur" en utilisant les détecteurs solaires, puis la production d'énergie électrique, selon le principe de conversion "rayonnement - électronique" par l'utilisation des cellules solaires photovoltaïques.

L'avantage de ces cellules solaires photovoltaïques consiste dans sa simplicité d'installation dans les lieux utilisés. Mais en dépit de ces avantages elles coûtent très cher par rapport à l'énergie électrique conventionnelle. De nombreux laboratoires mènent des recherches dans ce domaine afin d'améliorer le rapport coût-rendement de ces cellules.

Initialement le développement des cellules solaires été pour les applications spatiales, puisqu'elles fournissent l'énergie électrique aux satellites par la conversion photovoltaïques, puis la crise pétrolière (1973) a obligé les pays développés à appliquer la conversion photovoltaïques de l'énergie solaire pour l'utilisation terrestre, certains pays arabes ont suivi cette tendance comme la Tunisie , l'Arabie Saoudite, la Jordanie et l'Egypte...

II.2 Généralité sur les cellules solaires :

Les cellules photovoltaïques sont basées sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée par cette force électromotrice peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [30].

II.2.1 Principe de l'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui se demandait pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière, il a pu démontrer qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique.

En 1905 Albert Einstein a écrit sur l'effet photovoltaïque en postulant que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites permettant la création d'un courant électrique [31].

L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

De ce fait, un dispositif photovoltaïque doit être constitué :

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible que possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large que possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait du semi-conducteur le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium (AsGa) pour les applications spatiales, en silicium cristallin (c-Si) pour les applications terrestres et en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) pour des cellules bas coût.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison. Ce champ peut être généré de plusieurs manières : par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction PN) [32].

II.2.2 Description de la cellule solaire :

Un cristal semi-conducteur dopé de type P est recouvert d'une zone très mince dopée de type N et d'épaisseur e . Entre les deux zones se trouve la jonction PN. 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 μm . Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode [33].

Les photons incidents créent des porteurs dans les régions neutres N, P et dans la région de déplétion.

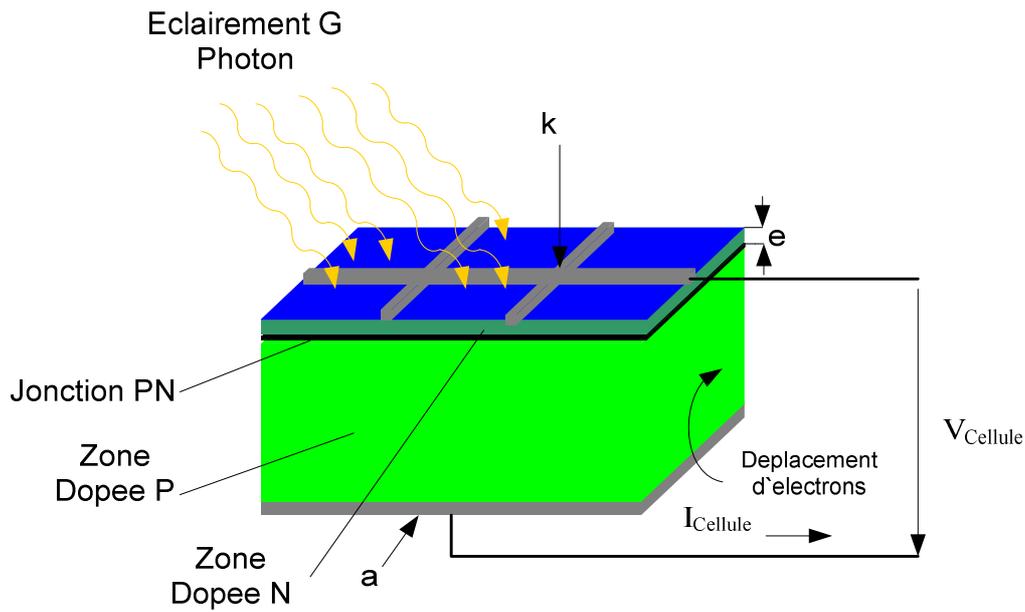


Figure II-1 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [31].

Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la région N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la région de déplétion sont "envoyés" par le champ électrique dans la région P (pour les trous) ou dans la région N (pour les électrons) où ils seront majoritaires ; on aura un photocourant de diffusion;
- Dans la région de déplétion, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P ; on aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [34]. Le courant débité par la cellule solaire est le photocourant diminué du courant direct [35].

$$I = I_{ph} - I_d \tag{II-1}$$

Avec :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{q.V}{kT}\right) - 1 \right) + I_R \tag{II-2}$$

Où :

q : charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19}$ C).

k : constante de Boltzmann ($k= 1.38.10^{-23}$ J.K⁻¹).

T : température (K°).

V : tension aux bornes de la jonction (Volt).

I_s : le courant de saturation.

I_R : le courant de recombinaison de la région de déplétion.

II.2.3 Le rayonnement solaire :

II.2.3.1 Les émissions du Soleil :

L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière c ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence f peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques [36].

II.2.3.2 Le spectre du rayonnement solaire

Le spectre solaire est la distribution spectrale du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde, l'énergie en (eV) de chaque photon est reliée à la longueur d'onde λ [30] par la formule suivante :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{(II-3)}$$

Où

λ est la longueur d'onde en micromètres .

h est la constante de Planck . ($h=6,62 \times 10^{-34}$ J.s) .

c est la vitesse de la lumière . ($c = 3 \times 10^8$ m.s⁻¹) .

Un eV est approximativement égal à 1.6×10^{-19} J d'énergie. Dans le cas de GaAs, la longueur d'onde qui correspond à son gap d'énergie 1.42 eV est $\sim 0.873 \mu\text{m}$.

La figure II-2 aide à visualiser le concept de l'absorption lumineuse. Quand la lumière a une énergie supérieure à 1.1 eV, la cellule solaire de silicium cristallin produit de l'électricité. La lumière d'énergie inférieure à 1.1 eV est inutilisée. De même, la lumière avec une valeur d'énergie supérieure à 1.43 eV excite les électrons de l'enveloppe extérieure de la cellule solaire d'arséniure de gallium. Et finalement, la lumière avec une énergie supérieure à 1.7 eV est utile pour le matériel photovoltaïque aluminium d'arséniure de gallium (AlGaAs).

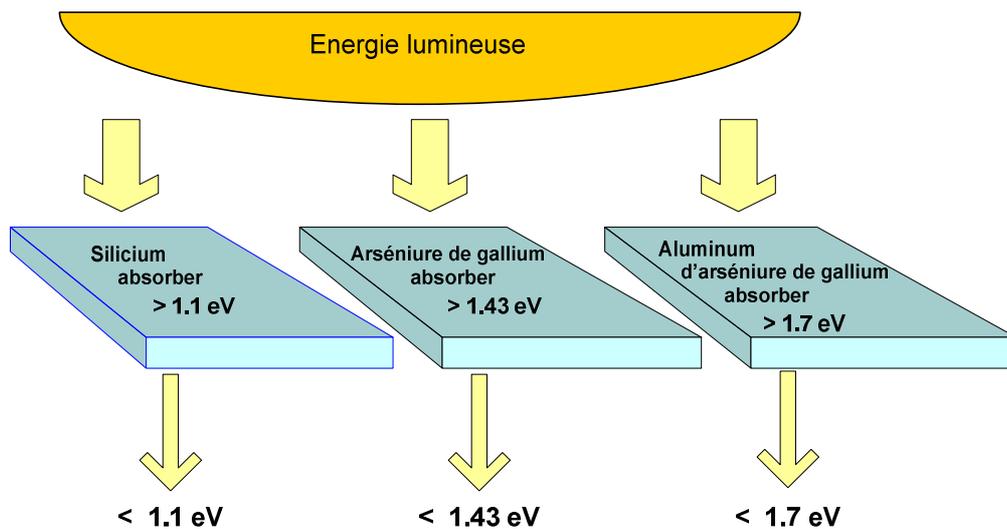


Figure II-2. Effet de l'énergie lumineuse sur les différentes bandes interdites [3].

Donc pour qu'il y ait création des paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons arrivant au dispositif soit supérieure ou égale à la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé ; c'est-à-dire $E \geq E_g$.

La figure II-3 représente la gamme du rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible et les longueurs d'ondes correspondantes.

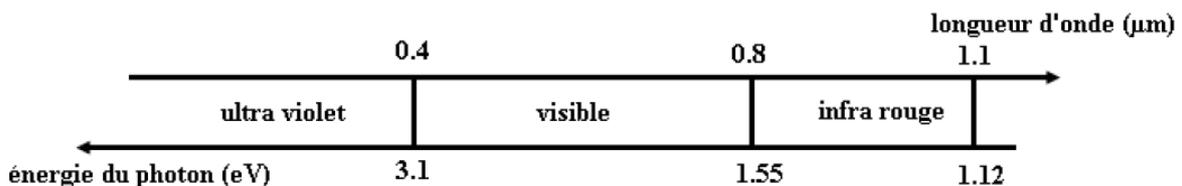


Figure II-3 : Spectre du rayonnement solaire [37].

II.2.3.3 Masse d'air :

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil [38], représenté sur la figure II-4.

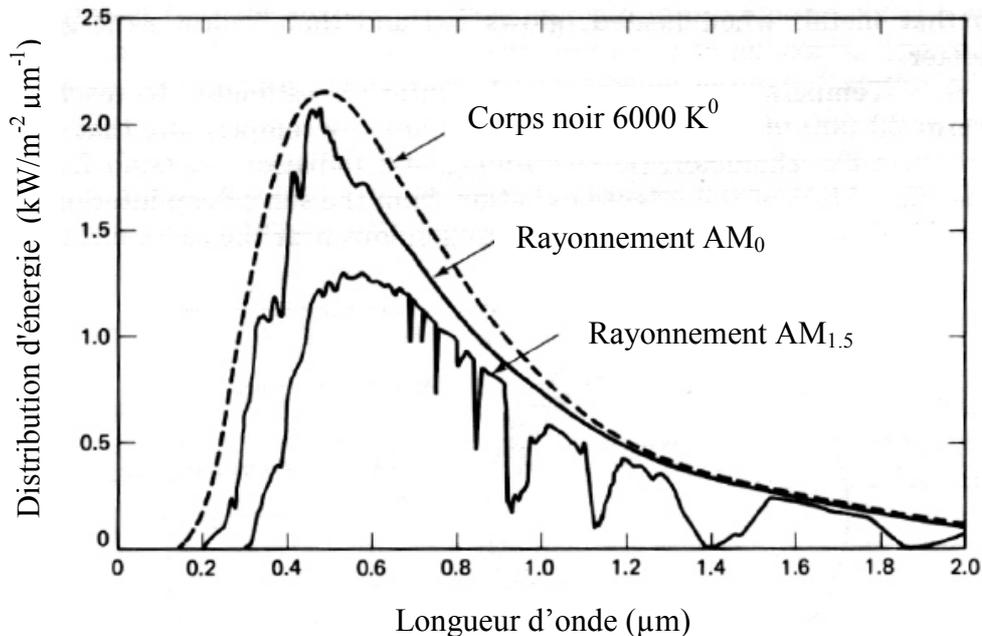


Figure II-4 : Le spectre solaire AM₀ et AM_{1.5} [39].

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de 1,4 kW/m² au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur la terre à 1 kW/m² par la réflexion et l'absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM_x) [40], qui est le rapport entre l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu,

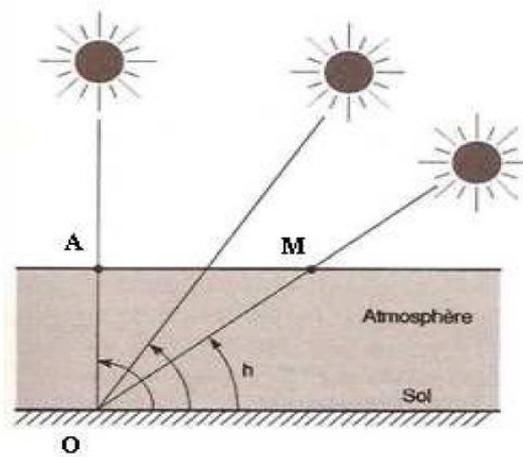


Figure II-5 : Définition de la masse d'air [37].

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II-4})$$

Donc la masse d'air:

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II-5})$$

Dans l'expression AM_x , x désigne le rapport $\frac{OM}{OA}$

La désignation AM_0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de l'atmosphère terrestre à l'incidence normale. AM_1 correspond à une même lumière (incidence normale) mais arrivant à la surface terrestre. L'appellation $AM_{1,5}$ désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface terrestre [38].

II.2.4 Grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire :

II.1.4.1 Courant de court circuit :

Le courant de court-circuit (short circuit) I_{sc} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il s'accroît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [38].

II.2.4.2 Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert (open circuit) V_{oc} est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température et change peu avec l'intensité lumineuse [30]. La tension en circuit ouvert peut être calculée à partir de :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II-6})$$

II.2.4.3 Facteur de forme :

Le facteur de forme (FF) représente l'efficacité de la cellule et peut également nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($V_{max} \cdot I_{max}$) et la puissance idéale ($V_{oc} \cdot I_{sc}$) [41] :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{II-7})$$

II.2.4.4 Rendement de conversion énergétique :

Le rendement de conversion énergétique est le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident P_0 . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 [12]:

$$\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_0} \quad (\text{II-8})$$

L'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement transformée en électricité. Une bonne partie du rayonnement est simplement réfléchi sur la surface de la cellule. Une autre partie de l'énergie apportée par la lumière pénètre parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule.

Les grilles et les barreaux métalliques déposés sur la surface supérieure de la cellule constituent une perte dans le rendement, car elles diminuent la surface de la cellule exposée à la lumière solaire.

La fraction qui compte est celle qui contribue à la création des paires électron-trou dans la jonction ; dans les meilleures conditions du laboratoire, cette fraction est de 23%, c'est donc à peine le quart de la lumière qui est converti en électricité.

Le tableau II-1 représente les grandeurs photovoltaïques mesurées pour certaines cellules solaires de laboratoire à base de GaAs.

Structure	Aire(cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	Centre de test
Hétérojonction -PPN	1	1.021	27.8	83.7	23.7	-
GaAs(AlGaAs)	3.91	1.022	28.2	87.1	25.1	NREL ^(a)
GaAs-Couche mince	4	1.011	27.6	83.8	23.3	NREL
PN-GaAs(AlGaAs)	1	1.036	27.5	85.1	24.2	ISE ^(b)
PN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	26.9	83.5	23.4	ISE
PIN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	27.1	82.9	23.3	ISE
GaAs(AlGaAs)	4	1.022	28.2	87.1	25.1	ISE

Tableau II-1: Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs [5].

^(a) National Renewable Energy Laboratory (USA).

^(b) Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).

II.2.4.5 Réponse spectrale :

La réponse spectrale (*RS*) permet d'évaluer le rendement quantique d'une cellule solaire en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette mesure consiste à illuminer la cellule solaire avec un spot monochromatique que l'on fait varier dans la plage d'absorption du matériau (entre 350 et 1150 nm pour le silicium cristallin). La mesure du courant débité par la cellule en fonction de la longueur d'onde permet alors de connaître la réponse spectrale de la cellule à l'aide de la relation suivante [33], [42]

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (II-9)$$

Où

$I(\lambda)$: l'intensité générée.

$P_{inc}(\lambda)$: la puissance incidente.

$\phi(\lambda)$: le flux lumineux incident (W.m⁻²).

S : la surface de la cellule (m^2).

La vitesse de recombinaison a un grand effet sur la réponse spectrale, surtout aux courtes longueurs d'onde. Généralement, pour augmenter la réponse spectrale, on doit augmenter la longueur de diffusion des électrons et trous L_n et L_p respectivement, et diminuer la vitesse de recombinaison en surface des électrons et trous S_n et S_p , respectivement.

Les cellules solaires absorbent différentes longueurs d'onde selon leurs compositions. Sur la figure (II-6), on a représenté la caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires ; cette caractéristique indique la gamme du spectre solaire qu'une cellule peut absorber, identifiant de ce fait ses propriétés. Les cellules constituées d'un semi-conducteur composé, à savoir le GaAs, CdTe et CIS absorbent des longueurs d'onde dans la gamme (500 nm - 900 nm) et sont connues en tant que cellules solaires à rendement élevé.

Les cellules solaires au a-Si :H et au c-Si montrent d'excellente absorption aux longueurs d'onde courtes et longues, respectivement. Les cellules solaires composées de combinaison de ces derniers sont capables de réaliser un rendement plus élevé [5].

La mesure de la réponse spectrale est très sensible aux conditions d'analyse et le résultat est fonction du point de mesure. La comparaison de deux courbes nécessite de cibler exactement la même zone [32].

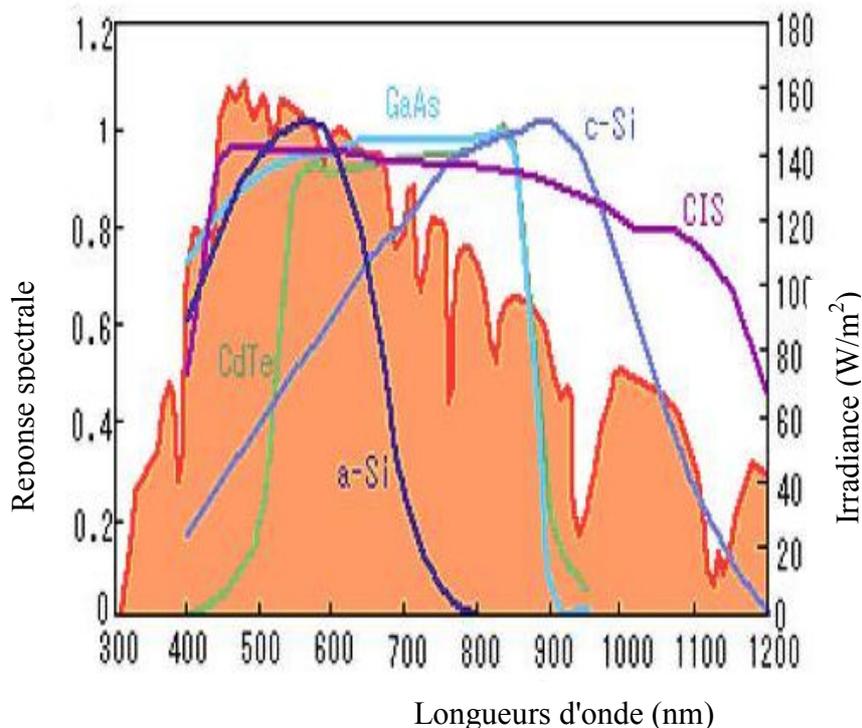


Figure II-6 : Caractéristique réponse spectrale pour différentes cellules solaires [5].

Selon la longueur d'onde du rayonnement incident, le courant mesuré sera plus ou moins élevé en fonction du Rendement Quantique Externe (*RQE*) de la cellule. Pour connaître celui-ci, il faut multiplier *RS* par un facteur:

$$RQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

RQE(λ): Rendement Quantique Externe (%)

RS(λ): Réponse spectrale ($A \cdot W^{-1}$)

h: Constante de Planck ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)

c: Vitesse de la lumière dans le vide ($m \cdot s^{-1}$)

q : Charge élémentaire (C)

λ : Longueur d'onde (m)

Pour étudier les mécanismes internes de la cellule, il est nécessaire de prendre en considération uniquement les photons absorbés dans le dispositif. On sépare alors du calcul de rendement quantique les photons réfléchis ou transmis, ainsi que ceux absorbés dans les couches non actives comme la couche anti-reflet. Le Rendement Quantique Interne (*RQI*) donne ainsi le pourcentage d'électrons participant du photocourant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule :

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1 - R(\lambda) - A(\lambda) - T(\lambda)} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

RQI(λ): Rendement Quantique Interne (%)

RQE(λ): Rendement Quantique Externe (%)

R(λ) : Réflectivité de la cellule (%)

A(λ) : Absorption dans les couches non actives (%)

T(λ) : fraction du rayonnement transmis à travers la cellule (%)

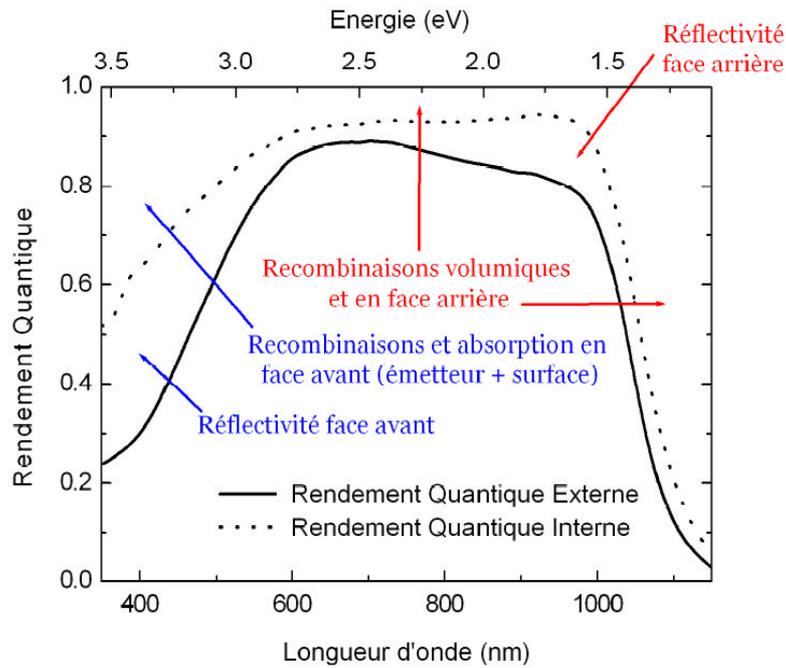


Figure II-7: Exemple de Rendement Quantique Externe et Interne d'une cellule solaire [43].

On considère généralement que les courtes longueurs d'ondes (Ultra-violet) sont absorbées majoritairement dans les premiers μm de la cellule, alors que les grandes longueurs d'ondes (Infrarouge) peuvent être absorbées au niveau de la face arrière. L'étude du *RQI* aux courtes longueurs d'ondes donne donc des indications sur la qualité de la face avant, tandis que celle aux grandes longueurs d'ondes concerne plus la face arrière (voir la figure II-7) [33].

II.2.5 Schéma équivalent et caractéristique courant-tension de la cellule solaire:

Pour tenir en compte les limitations de la cellule et de même calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comprenant une résistance série et une résistance parallèle [42]. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (Figure II-8) :

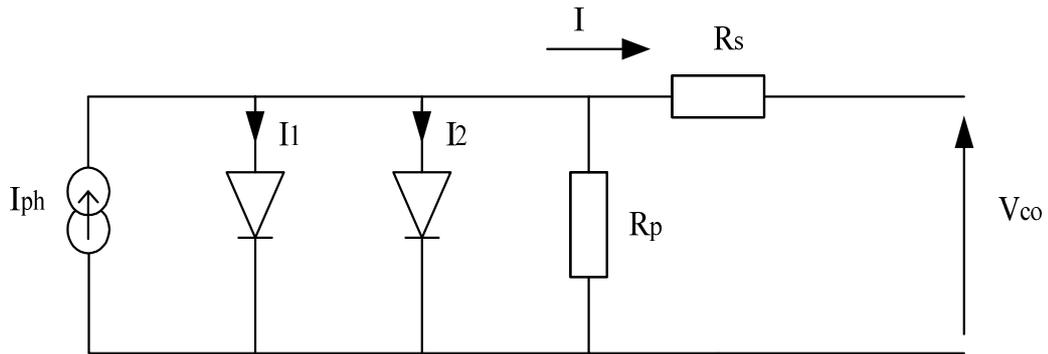


Figure II-8 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [33].

Les différents paramètres de ce modèle sont [37] :

- a. **Le générateur de courant** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- b. **La résistance série R_s** : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, et doit être la plus faible que possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- c. **La résistance parallèle R_p** : connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- d. **La diode** : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur.

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \tag{II-12}$$

$$I = I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph}$$

avec :

I_{01} : courant de saturation de la diode D1, I_{02} : courant de saturation de la diode D2,

q : charge élémentaire,

k : constante de Boltzmann,

T : température,

n_1 et n_2 : coefficients d'idéalité des diodes D1 et D2.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (II-13) peut être réécrite plus simplement sous la forme suivante

$$I(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{n_i kT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (\text{II-13})$$

La mesure de la caractéristique courant – tension ($I-V$) à l'obscurité est également utile pour analyser le fonctionnement d'une cellule solaire, cette caractéristique à l'obscurité est identique à celle d'une diode.

La caractéristique ($I-V$) d'une cellule solaire sous éclairage ou à l'obscurité est présentée dans la figure II-9.

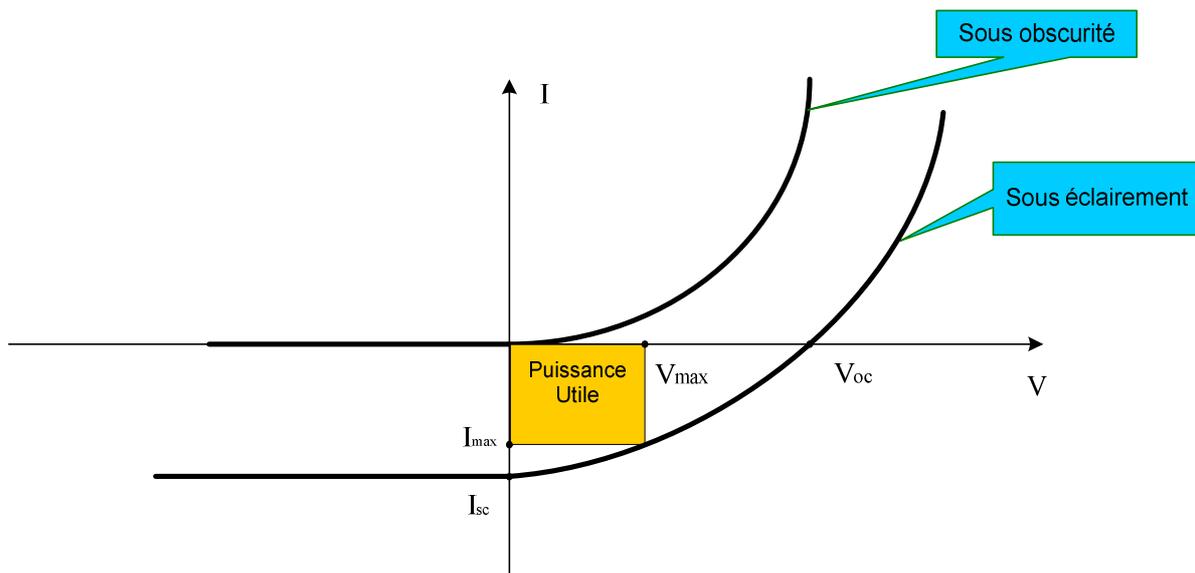


Figure II-9 : Caractéristique ($I-V$) d'une cellule solaire [33]

Les grandeurs caractéristiques de la cellule peuvent être extraites depuis ce graphe :

- * Le courant de court circuit I_{sc} .
- * La tension de circuit ouvert V_{oc} .
- * Le courant I_{max} et la tension V_{max} tels que le produit des deux soit maximal déterminant ainsi la puissance maximale ou utile fournie par la cellule (figures II-9, II-10).

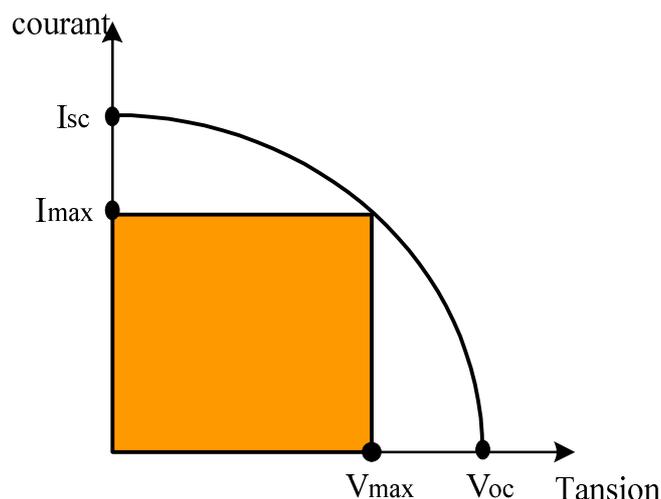


Figure II-10 : Puissance maximale sur la caractéristique ($I-V$) [37].

II.3 Cellules solaires à hétérojonctions (AlGaAs/GaAs) :

Les rendements les plus élevés en utilisant tous les matériaux ont été obtenus avec des cellules solaires à base de GaAs et de ses solutions solides. L'arséniure de gallium a la largeur de bande interdite optimale pour une cellule solaire à jonction unique, un coefficient d'absorption élevé, et la plus grande efficacité théorique (environ 39% pour les cellules à jonction unique de moins de 1000 suns). Il peut également être utilisé sous forme d'alliage avec d'autres matériaux tels que AlGaAs et InGaAs [2].

Lorsque deux matériaux, Métal - Semi-conducteur, semi-conducteur- semi-conducteur ou métal-isolant-semi-conducteur, sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique.

Dans les cellules solaires conventionnelles à homojonction PN, l'émetteur est formé par la zone fortement dopée, alors que dans les cellules solaires à hétérojonction cet émetteur est remplacé par le matériau à large bande interdite. Cependant, le problème de recombinaison en surface rencontré dans la cellule photovoltaïque à homojonction est remplacé par le problème des recombinaisons au niveau de l'interface. Il est à signaler que le taux de recombinaison au niveau de l'interface est considérablement inférieur au taux de recombinaison au niveau de la surface. Cette comparaison est valable dans le cas où le matériau à large bande interdite est passif, c'est-à-dire, présente une faible absorption et une recombinaison nulle [44]

Le GaAs est le semi-conducteur monocristallin le plus utilisé, ou souvent, les solutions solides (Al,Ga)As. C'est le matériau le plus performant du point de vue rendement de conversion, bien que sa densité soit 203 fois supérieure à celle du silicium [30].

Les cellules solaires à base de l'arséniure de gallium sont largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ceci à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations spatiales. Ce pendant, un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10%. Ce problème a été résolu partiellement grâce à la croissance d'une couche de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sur la surface du GaAs. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison pouvant exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules au GaAs a dépassé la première fois 20% [45].

La cellule supérieure étant une hétérostructure $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. L'état graduel de la bande interdite de la couche AlGaAs résulte en un champ interne qui réduit les pertes par recombinaison à la surface et en volume [46].

Il a été découvert que l'interface AlGaAs/GaAs est caractérisée par une faible densité de défauts étendus en raison des mêmes paramètres de réseau à la température de croissance des couches épitaxiales. Celle-ci a fournie dans les cellules solaires basées sur des structures AlGaAs/GaAs une faible vitesse de recombinaison surfacique (S) et deux côtés porteurs de collecte avec un rendement élevé $\eta = 25\text{-}27\%$.

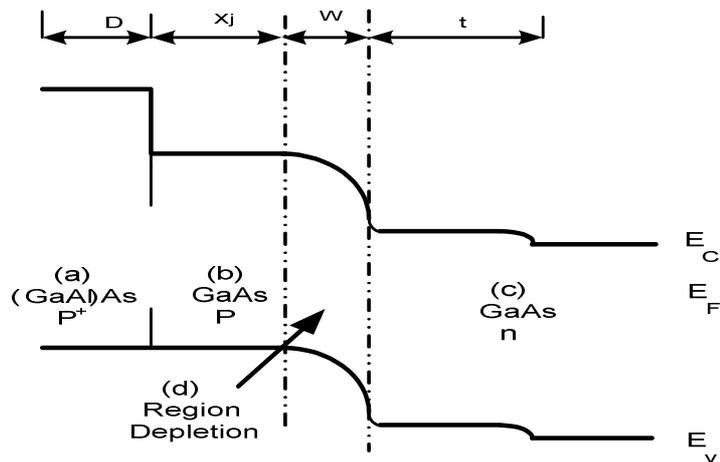


Figure II-11: Diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs [47].

Le diagramme de bande d'énergie typique à une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs est présenté dans la figure II-11 pour une structure (p^+ -AlGaAs / p- GaAs / n- GaAs).

Les principaux éléments dans la cellule sont :

- un contact ohmique supérieur (grille métallique) en: Ni-Al , Ag-Al
- un oxyde transparent conducteur (OTC) : ZnO, Si₃N₄
- une couche absorbante
- Un substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques. A ceci est parfois ajoutée une couche anti-reflet (MgF₂). Ces matériaux ne sont pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques particulières [33].

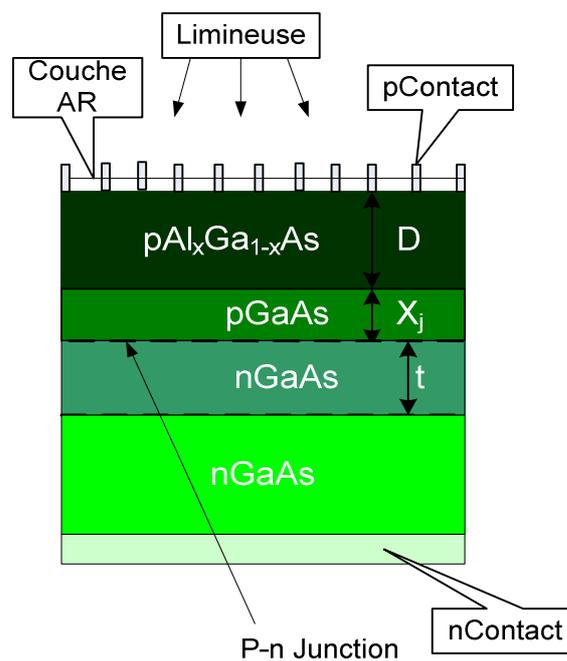


Figure II-12. Exemple de structure d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs [47].

Les laboratoires HRL (Hughes Research Laboratories) ont reproduit l'une des meilleures images réalisés à ce jour pour la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire (AlGaAs / GaAs) de surface ($2\text{cm} \times 2\text{cm}$) sous l'illumination AM_0 en l'absence de concentration solaire (voir figure II-13).

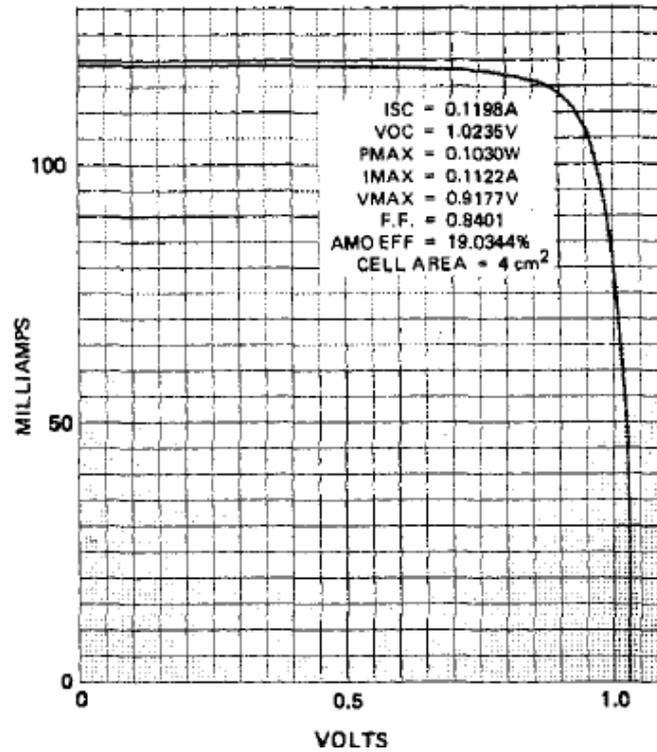


Figure II-13 : Caractéristique I - V mesurée pour une cellule solaire AlGaAs / GaAs [47]

II.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts et relations liés à l'étude des caractéristiques électriques des cellules solaires. A la fin nous avons concentré sur la spécificité des cellules solaires à hétérojonction AlGaAs/GaAs par rapport aux cellules solaires conventionnelles (homojonctions); notamment dans le rendement de conversion élevé, la faible dégradation face aux irradiations spatiales et la réduction des recombinaisons au niveau de l'interface AlGaAs/GaAs.

III.1 Introduction:

Dans ce travail nous allons étudier les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs / GaAs) de structure p+pn et n+np où la couche (AlGaAs) fortement dopée est utilisée comme une couche fenêtre, suivie des couches émetteur et base en (GaAs). Nous considérons les deux cas où la structure est avec un substrat épais en (GaAs) et sans substrat. L'étude est réalisée par l'application du logiciel de simulation numérique sophistiqué 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 à l'obscurité et sous l'éclairement AM_0 du fait que les cellules en (GaAs) sont généralement destinées aux applications spatiales. Dans ce chapitre nous présentons une description relativement détaillée sur SILVACO- ATLAS.

III.2 SILVACO ATLAS :

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 [48].

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 [49].

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 [50]:

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) aident à effectuer la simulation efficacement sans avoir recours à des logiciels tiers. De la figure III-1, on voit que Silvaco avec VWF propose des logiciels de simulation puissante.

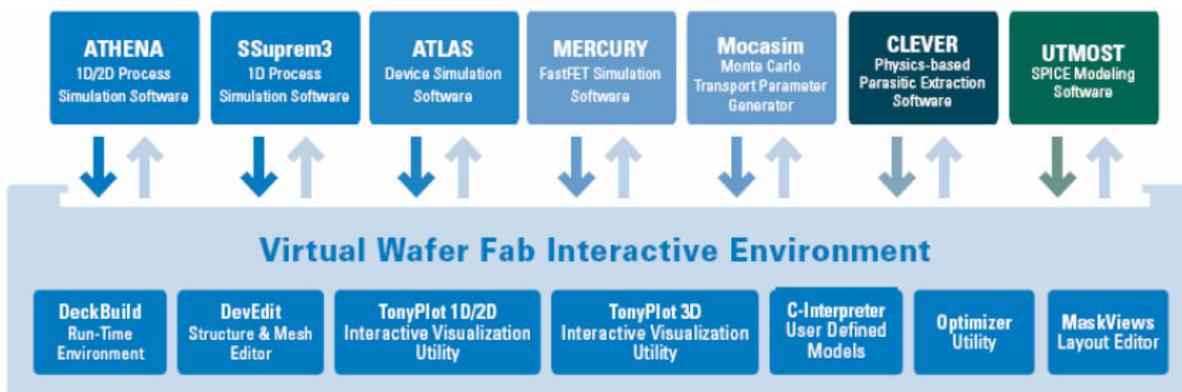


Figure III-1 : Environnement Virtual Wafer Fabrication [3].

III.3 Entrées et Sorties dans SILVACO ATLAS :

La figure III-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 [10].

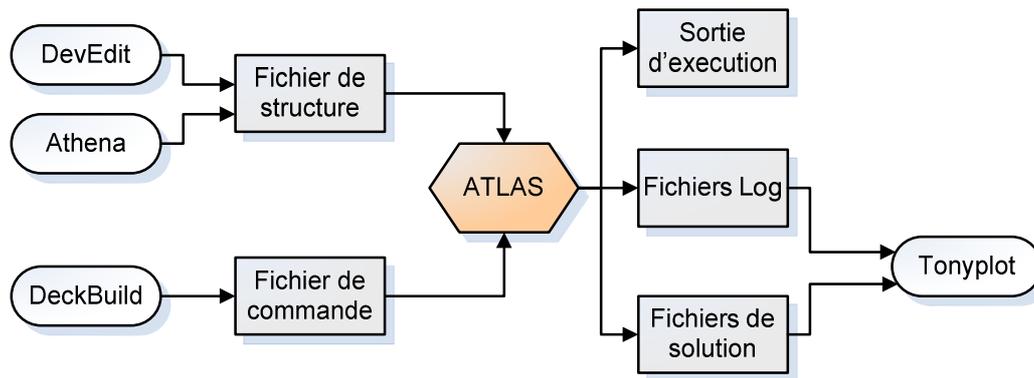


Figure III-2 : ATLAS entrées et sorties [49].

III.3.1 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 III-3) [51].

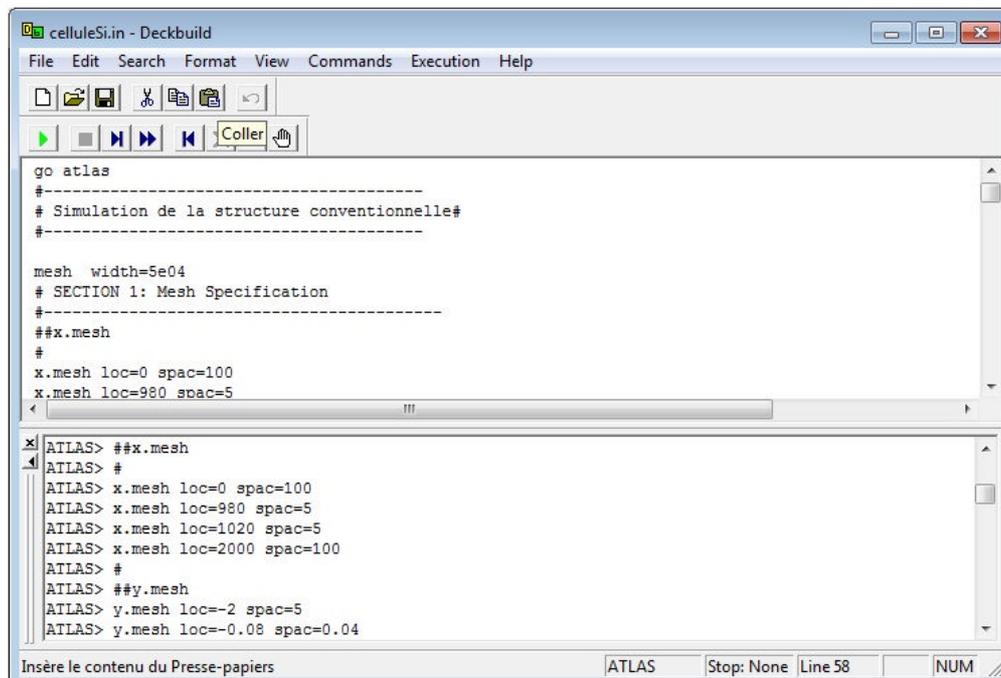


Figure III-3 : Menu de commandes de Deckbuild.

III.3.2 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 III-4) [52].



Figure III-4 : Fenêtre de Base de TonyPlot.

III.4 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 III-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 [50].

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 III-1 : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe

III.5 Contour général de construction d'ATLAS:

Dans cette simulation, la cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) 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 III-6 peut clarifier les étapes pour construire chaque modèle.

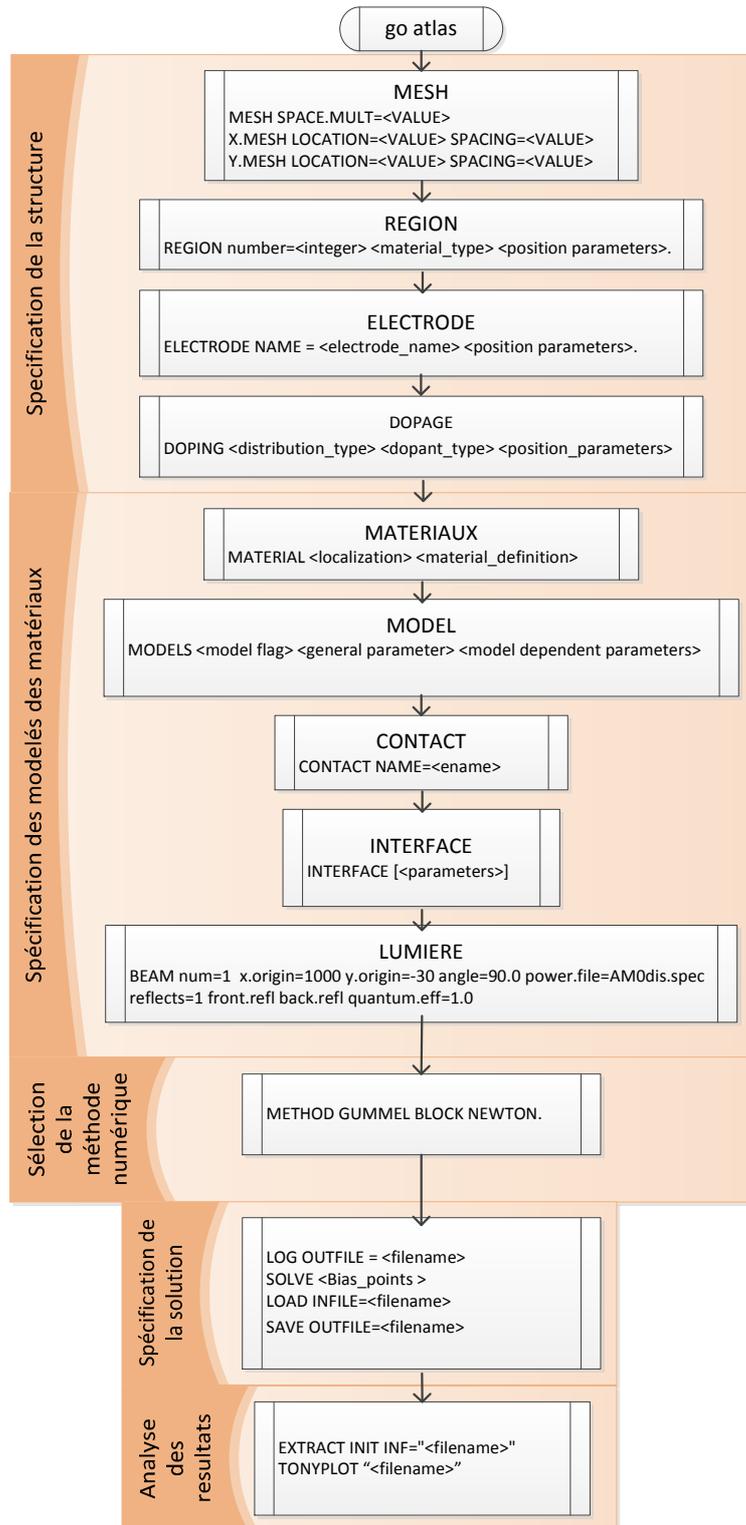


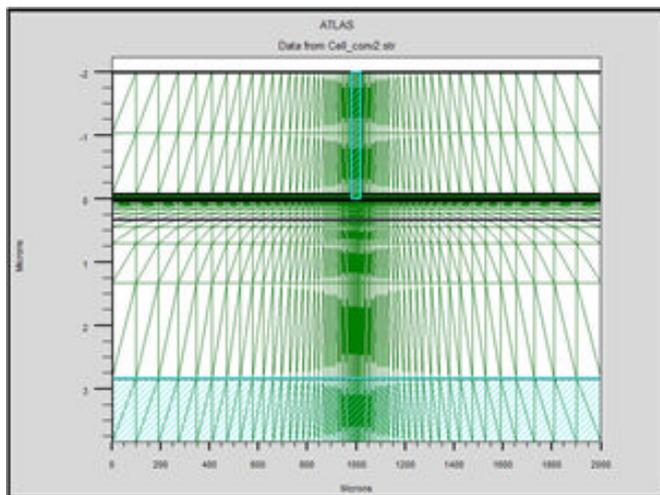
Figure III-5: Organigramme des étapes de construction d'un modèle sur ATLAS.

III.5.1 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 [10].

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 [53].

Un exemple de maillage créé dans ATLAS est illustré dans la figure III-6.



```
##x.mesh
x.mesh loc=0 spac=100
x.mesh loc=980 spac=5
x.mesh loc=1020 spac=5
x.mesh loc=2000 spac=100
#
##y.mesh
y.mesh loc=-2 spac=5
y.mesh loc=-0.08 spac=0.04
y.mesh loc=0 spac=0.0125
y.mesh loc=0.5 spac=1.25
y.mesh loc=10 spac=5
v.mesh loc=11 spac=5
```

Figure III-6: Atlas mesh.

III.5.2 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 [6].

La cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) est décrite par les commandes de DeckBuild ainsi que les lignes de la région comme il est illustré dans la figure III-7.

```

region num=1 material=AlGaAs x.comp=0.099 x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=0.03
region num=2 material=GaAs x.min=0 x.max=2000 y.min=0.03 y.max=0.33
region num=3 material=GaAs x.min=0 x.max=2000 y.min=0.33 y.max=2.83
region num=4 material=vacuum x.min=0 x.max=2000 y.min=-2 y.max=0
region num=5 material=aluminum x.min=980 x.max=1020 y.min=-2 y.max=0
region num=6 material=silver x.min=0 x.max=2000 y.min=2.83 y.max=3.83
region num=7 material=SiN x.min=0 x.max=980 y.min=-0.08 y.max=0
region num=8 material=SiN x.min=1020 x.max=2000 y.min=-0.08 y.max=0

```

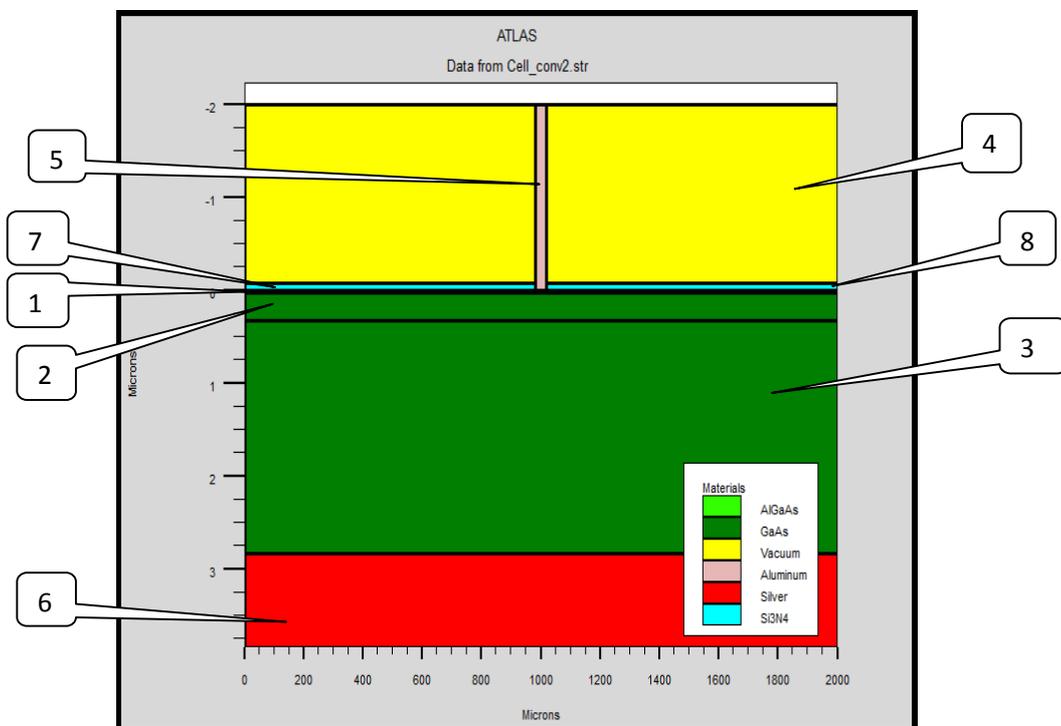


Figure III-7 : Régions créées dans la cellule à hétérojonction (AlGaAs/GaAs)

III.5.3 Electrode :

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode [54]. Cependant, SILVACO ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définis [3].

D'après la figure III-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 III-7). L'anode est définie avec l'Aluminium comme matériau et définie dans la région 5 (figure III-7).

```
#electrode
#cathode
electrode name=cathode material=silver x.min=0 x.max=2000 y.min=2.83 y.max=3.83
#anode
electrode name=anode material=aluminum x.min=980 x.max=1020 y.min=-2 y.max=0
```

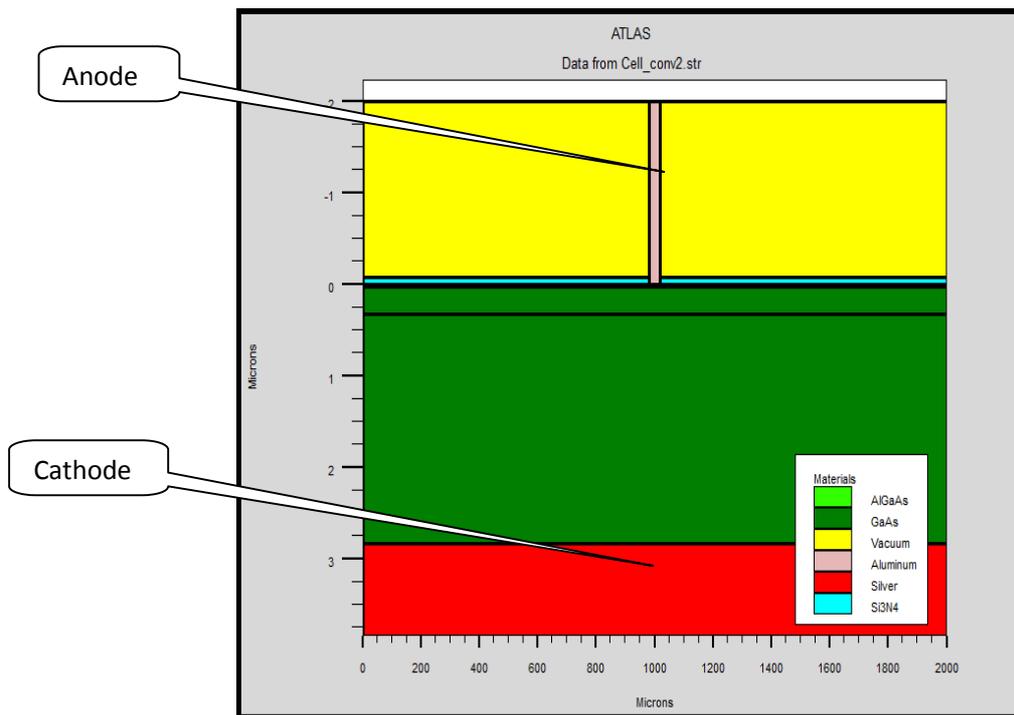


Figure III-8 : Déclaration des Électrodes dans ATLAS.

III.5.4 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... [54].

Dans la figure III-9, les types et les niveaux de dopage sont définis.

```
doping uniform region=1 p.type conc=2e18 x.min=0 x.max=2000
doping uniform region=2 p.type conc=2e18
doping uniform region=3 n.type conc=2e17
```

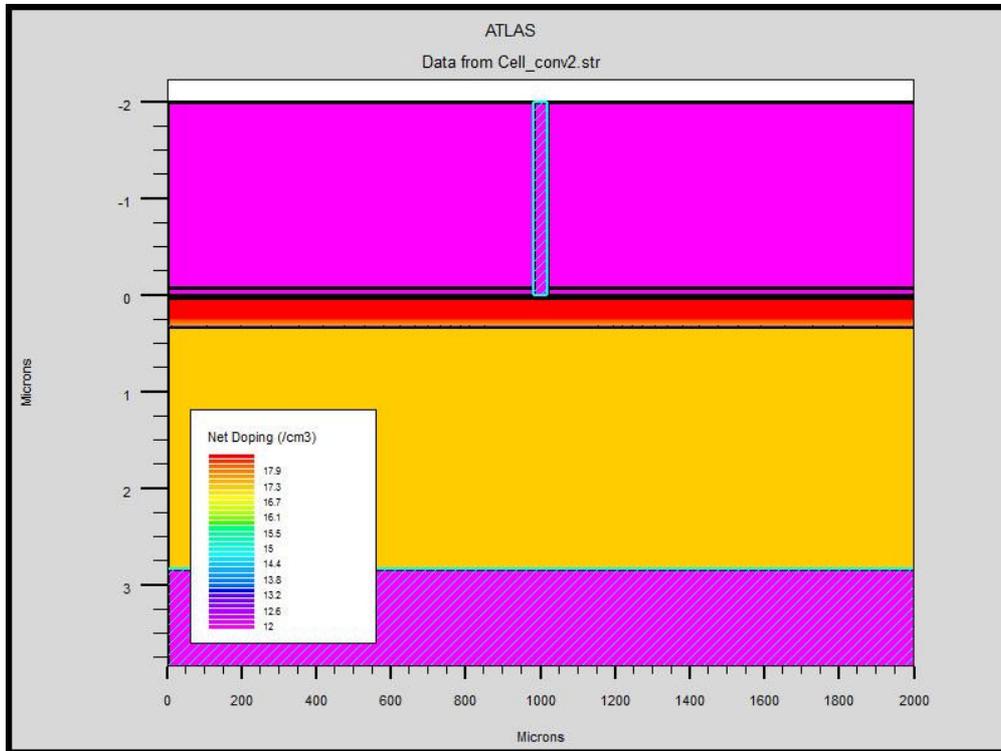


Figure III-9 : ATLAS DOPAGE.

III.5.5 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 [49].

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 [1].

III.5.6 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 Shockley-Read-Hall pour les statistiques des porteurs de charge [3].

III.5.7 Contacts :

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie,...) [54].

III.5.8 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 [54].

III.5.9 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 [13].

III.5.10 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 [10].

III.5.11 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, and 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 [10].

III.5.12 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 [3].

III.6 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 soit à l'obscurité ou sous éclairage comme la caractéristique densité de courant – tension ($J-V$) et la réponse spectrale ; une étude qui fera en détail l'objet du prochain chapitre pour les cellules solaires à hétérojonction (AlGaAs / GaAs).

IV.1 Introduction :

Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation par le logiciel SILVACO-ATLAS permet de déterminer les caractéristiques électriques des cellules solaires comme les caractéristiques densité de courant – tension (J - V) dans l'obscurité et sous éclairement AM_0 , et par la suite les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que la densité du courant de court circuit (J_{sc}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Une autre caractéristique essentielle qui peut être déterminée est la réponse spectrale de la cellule en fonction de la longueur d'onde du spectre AM_0 .

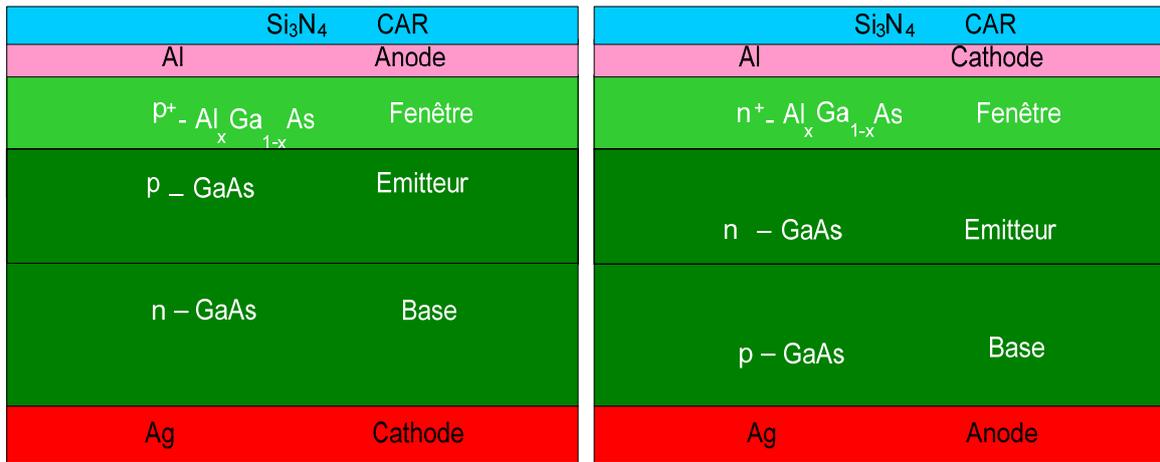
Dans ce chapitre nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs / GaAs) de structure p^+pn et n^+np par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Compte tenu de l'importance du rôle de l'hétérojonction (AlGaAs / GaAs) on peut voir son impact sur les caractéristiques de la cellule dans les conditions de l'obscurité et sous éclairement. Le fait que ces cellules sont destinées généralement aux applications spatiales, l'éclairement considéré est AM_0 .

Les résultats de la simulation sont présentés, en première partie, pour une cellule solaire ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs$) sans et avec substrat (GaAs), tout en faisant varier la fraction molaire ($x(Al)$) de l'aluminium de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$). En deuxième partie, nous présentons les résultats pour une cellule ($n^+ - Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs$) sans et avec substrat (GaAs) toujours pour différentes fractions molaires ($x(Al)$) de l'aluminium de la couche ($Al_xGa_{1-x}As$).

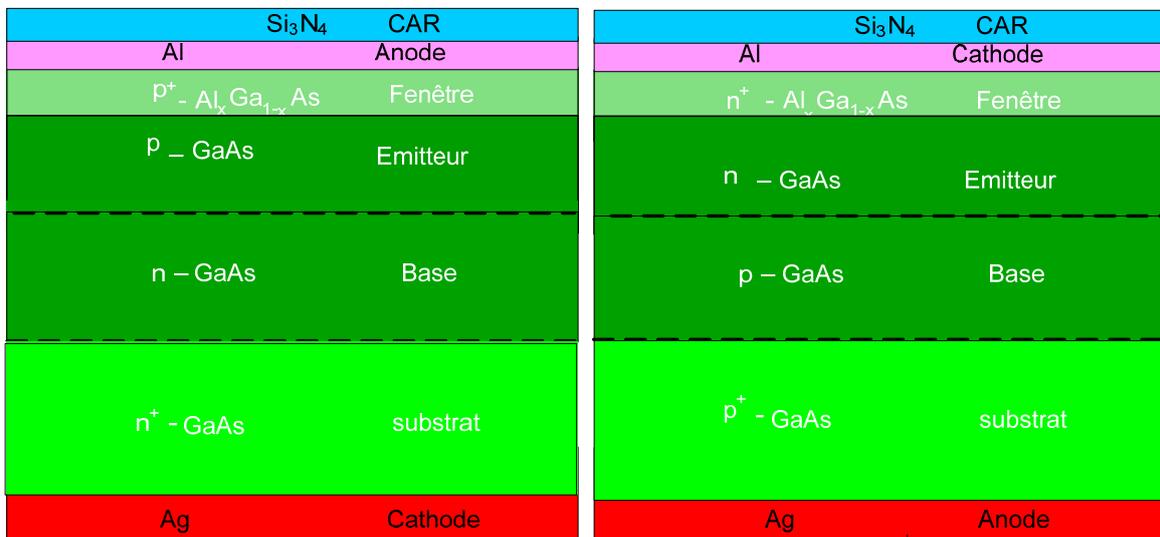
IV.2 Structures étudiées :

La figure IV-1 schématise la structure des cellules étudiées ; la couche (AlGaAs) utilisée comme une fenêtre suivie des couches émetteur et base en (GaAs) avec un substrat en (GaAs) (figure IV-1 (b)) et sans substrat (figure IV-1 (a)). Les schémas à gauche dans la figure correspondent à la structure p^+pn , ceux à droite à la structure n^+np . La couche antireflet (Si_3N_4) sert à améliorer le confinement de la lumière. Les contacts métalliques supérieurs sont en (Al), ceux inférieurs en (Ag).

Le tableau (IV-1) donne les épaisseurs des différentes couches de la structure ainsi que les concentrations du dopage dans chaque couche pour une meilleure approche à la réalité tout en tenant compte des différences dans les matériaux utilisés et les paramètres optiques.



(a)



(b)

Figure IV-1 : Schéma des cellules solaires à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées : a) sans substrat, b) avec substrat.

	Fenêtre (Al _x Ga _{1-x} As)	Émetteur (GaAs)	Base(GaAs)	Substrat(GaAs)
	p ⁺	p	n	n ⁺
Epaisseur(μm)	0.03	0.3	2.5	300
Dopage(cm ⁻³)	2×10 ¹⁸ cm ⁻³	2×10 ¹⁸ cm ⁻³	2×10 ¹⁷ cm ⁻³	2×10 ¹⁸ cm ⁻³

Tableau IV-1 : Epaisseur et dopage des différentes couches de la cellule à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) [56].

Les mobilités des électrons et des trous sont calculées selon le model de leur dépendance en concentration de dopage. Dans ce model, les mobilités sont interpolées depuis les valeurs du tableau IV-2 [49].

Concentration (cm ⁻³)	Mobility in GaAs (cm ² /V-s)	
	Electrons	Holes
1.0×10 ¹⁴	8000.0	390.0
2.0×10 ¹⁴	7718.0	380.0
4.0×10 ¹⁴	7445.0	375.0
6.0×10 ¹⁴	7290.0	360.0
8.0×10 ¹⁴	7182.0	350.0
1.0×10 ¹⁵	7300.0	340.0
2.0×10 ¹⁵	6847.0	335.0
4.0×10 ¹⁵	6422.0	320.0
6.0×10 ¹⁵	6185.0	315.0
8.0×10 ¹⁵	6023.0	305.0
1.0×10 ¹⁶	5900.0	302.0
2.0×10 ¹⁶	5474.0	300.0
4.0×10 ¹⁶	5079.0	295.0
6.0×10 ¹⁶	4861.0	270.0
8.0×10 ¹⁶	4712.0	245.0
1.0×10 ¹⁷	4600.0	240.0
2.0×10 ¹⁷	3874.0	210.0
4.0×10 ¹⁷	3263.0	205.0
6.0×10 ¹⁷	2950.0	200.0
8.0×10 ¹⁷	2747.0	186.9
1.0×10 ¹⁸	2600.0	170.0
2.0×10 ¹⁸	2060.0	130.0
4.0×10 ¹⁸	1632.0	90.0

Tableau IV-2 : Dépendance des mobilités dans le GaAs avec la concentration du dopage.

La présentation par SILVACO-ATLAS de la structure des cellules étudiées (qu'elle soit p^+pn ou n^+np) est illustrée dans la figure IV-2 pour le cas (a) sans substrat et (b) avec substrat.

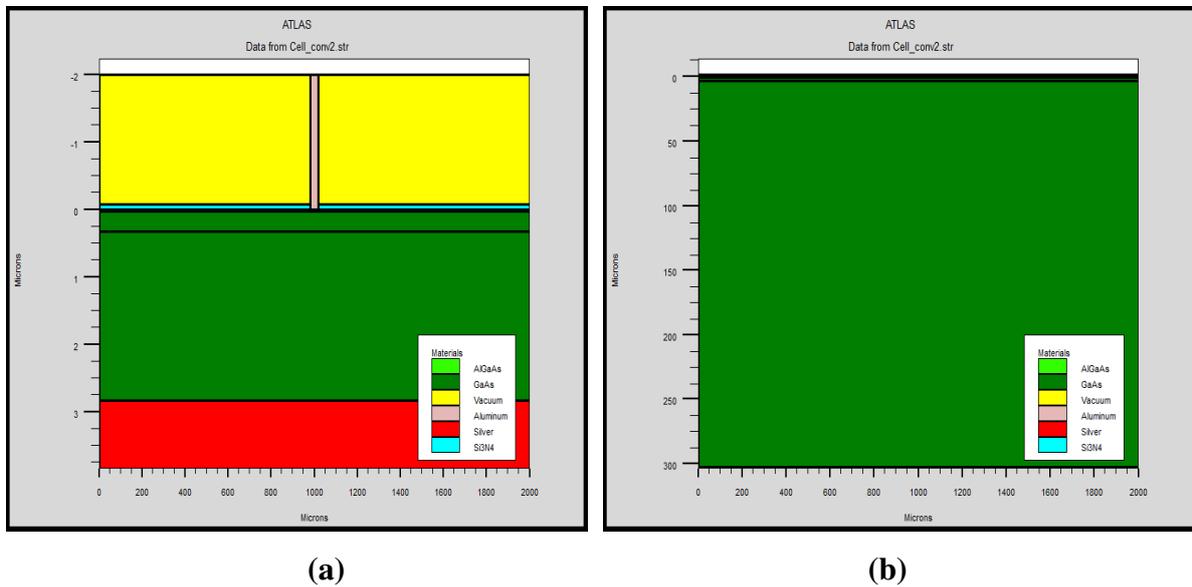


Figure IV-2 : Présentation de SILVACO-ATLAS de la structure des cellules à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées ; (a) sans substrat et (b) avec substrat.

Le maillage appliqué selon SILVACO-ATLAS à ces structures pour les deux cas ; (a) sans substrat et (b) avec substrat, est présenté dans la figure IV-3.

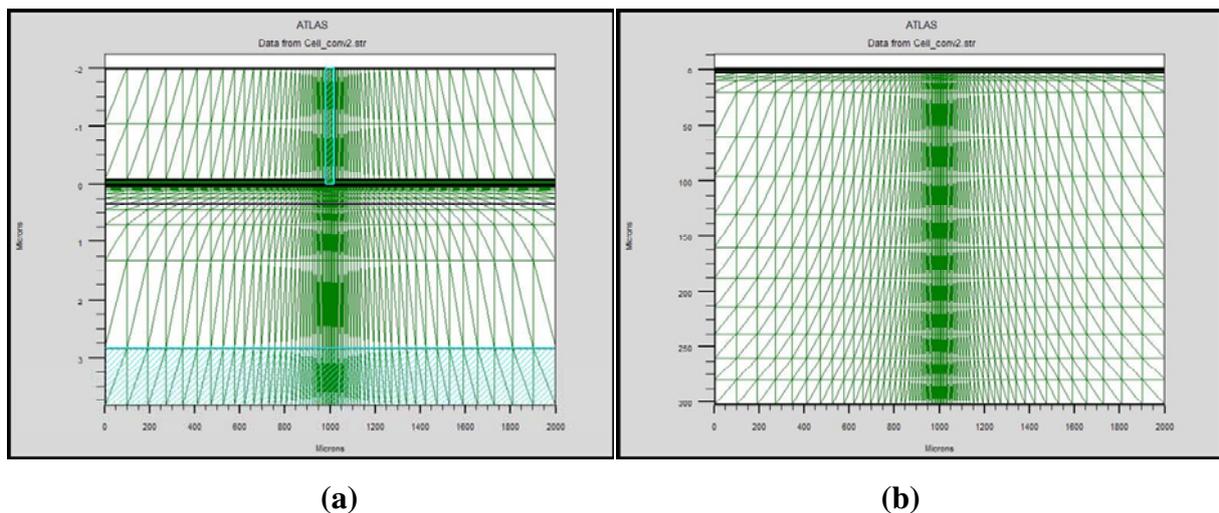


Figure IV-3 : Maillage appliqué selon SILVACO-ATLAS à la structure des cellules à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) étudiées ; (a) sans substrat et (b) avec substrat.

Pour les paramètres optiques (indice de réfraction n et coefficient d'extinction k) de la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), nous avons utilisé leurs spectres pour différentes fraction molaire x de l'aluminium (Al) calculés depuis la littérature, ces données sont présentées dans la figure IV- 4.

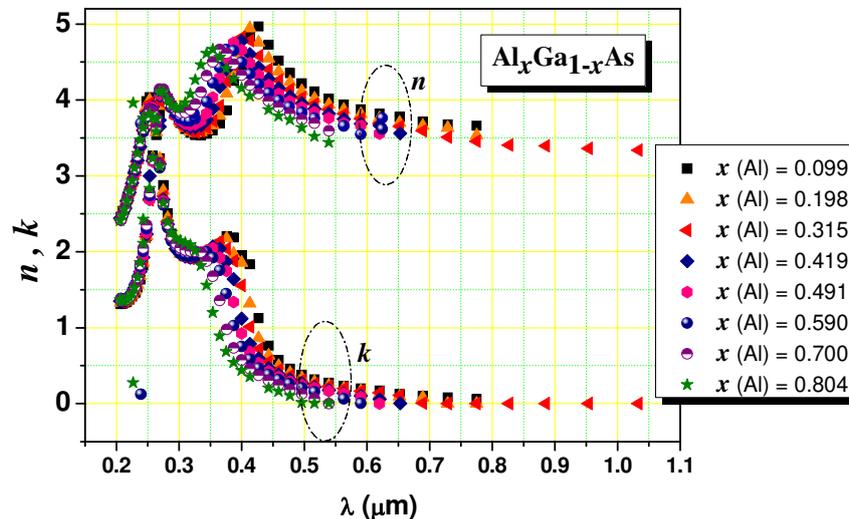


Figure IV-4 : Données des paramètres optiques (n, k) de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) pour différentes fraction molaire x de l'aluminium (Al) calculées depuis la littérature [55].

En faisant varier la fraction molaire x de l'aluminium, la largeur du gap d'énergie E_g de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) varie comme il est illustré sur la figure IV-5.

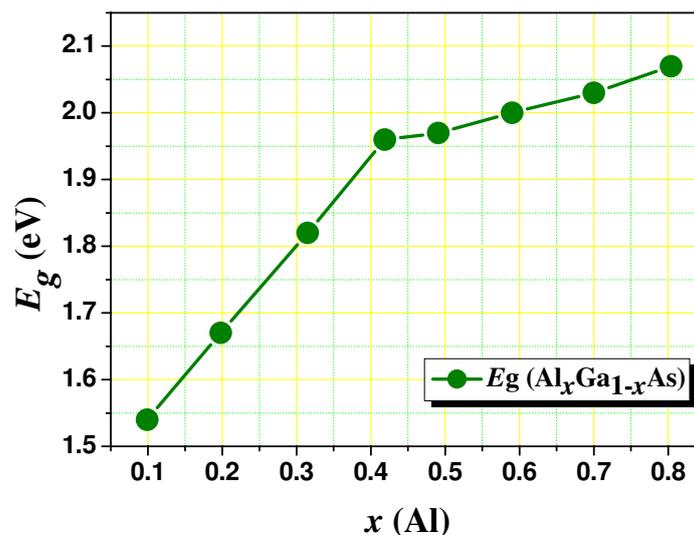


Figure IV-5 : Largeur du gap d'énergie E_g de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) en fonction de la fraction molaire x de l'aluminium [55].

Les paramètres optiques de la couche (GaAs) sont présentés dans la figure IV-6.

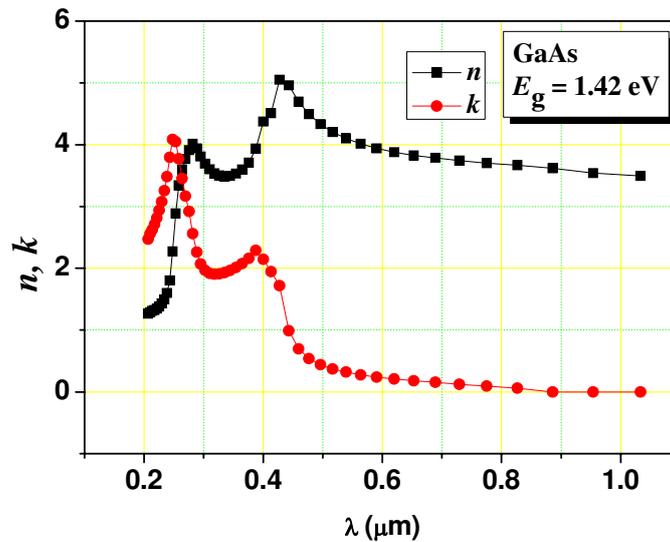


Figure IV-6 : Paramètres optiques de la couche (GaAs) [55].

Les paramètres optiques du contact métallique supérieur en (Al) sont présentés dans la figure IV-7.

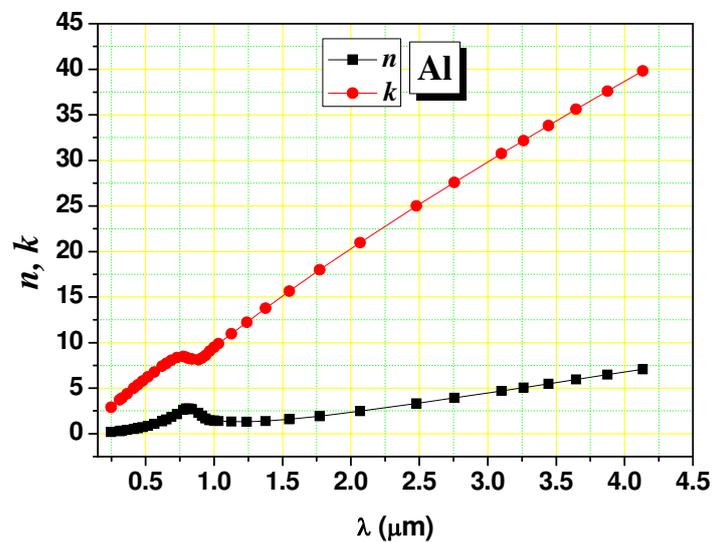


Figure IV-7 : Paramètres optiques du contact métallique supérieur en (Al) [55].

Les paramètres optiques du contact métallique inférieur en (Ag) sont présentés dans la figure IV-8.

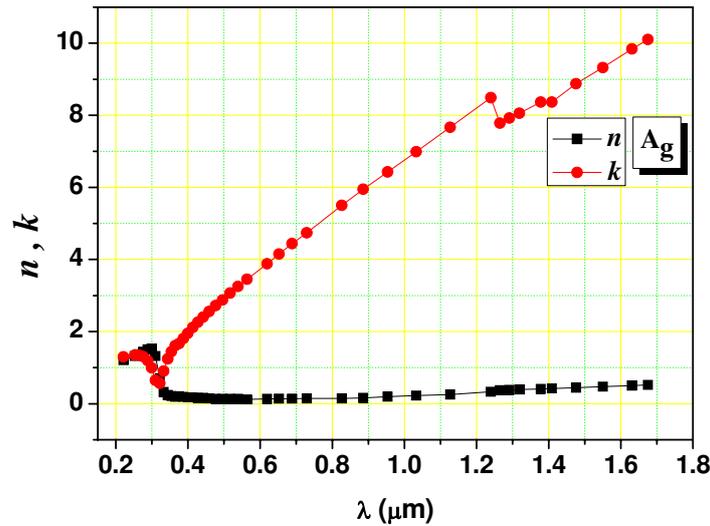


Figure IV-8 : Paramètres optiques du contact métallique inférieur en (Ag) [55].

Pour la couche (Si_3N_4), l'indice de réfraction $n = 2.05$.

Les épaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) et leur positionnement (en μm) sont illustrées dans la figure IV-9 pour le cas de la structure sans substrat.

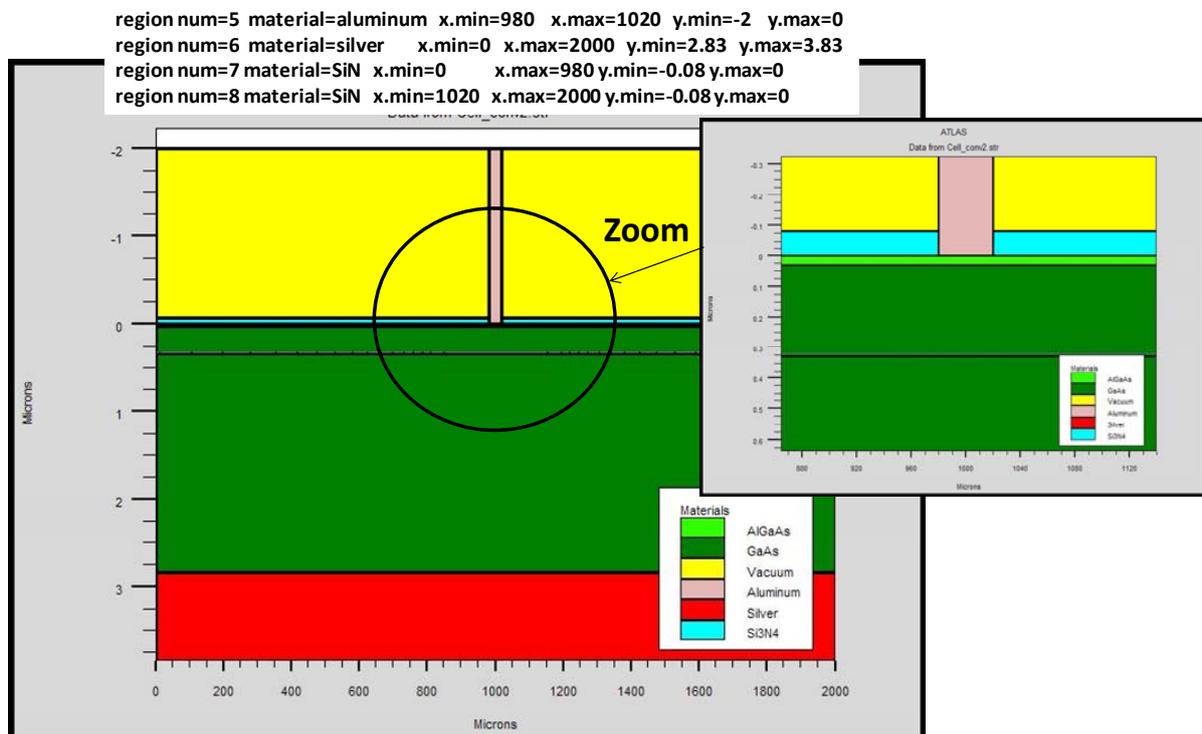


Figure IV-9 : Epaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) et leur positionnement (en μm) pour le cas de la structure sans substrat.

y désigne les variations de la position en profondeur de la structure, tandis que x désigne les variations horizontales de la position. A l'interface $y = 0 \mu\text{m}$ qui présente la limite supérieure de la couche fenêtre (AlGaAs), les conditions aux limites imposées sont ceux des vitesses de recombinaisons des électrons et des trous respectivement $S_n=10^3 \text{ cm/s}$ et $S_p=10^3 \text{ cm/s}$. A la limite inférieure de la base (GaAs) (l'interface GaAs/Ag), où $y = 2.83 \mu\text{m}$, est aussi imposée la condition des vitesses de recombinaison $S_n=10^5 \text{ cm/s}$ $S_p=10^5 \text{ cm/s}$.

On utilise ces mêmes valeurs des vitesses de recombinaison pour le cas de présence de substrat, seulement la position de la limite inférieure (GaAs/Ag) où est imposé les conditions des vitesses de recombinaison décale vers le bas en présence de substrat (GaAs) d'épaisseur $300 \mu\text{m}$, $y=302.83 \mu\text{m}$. Les épaisseurs des contacts métalliques et de la couche (Si_3N_4) sont identiques à ceux illustrées dans la figure IV-8.

L'éclairement solaire au quel sont soumises les cellules est celui hors atmosphère (AM_0) dont le spectre est illustré sur la figure IV- 10.

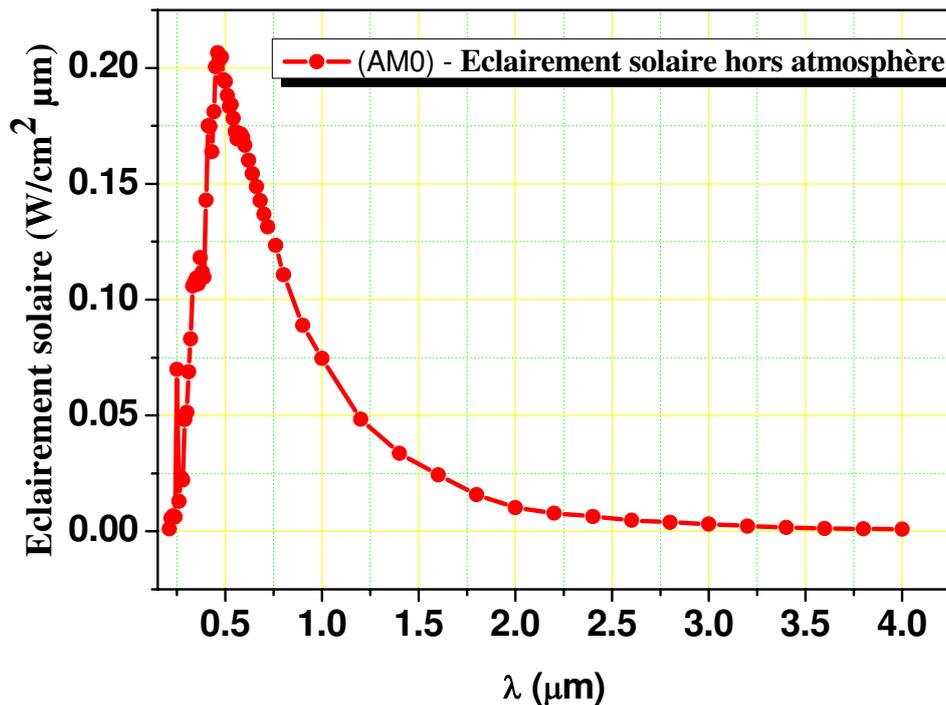


Figure IV-10 : Spectre de l'éclairement solaire hors atmosphère AM_0 .

IV.3 Résultats et discussions :

IV.3.1 Cellule solaire p+-Al_xGa_{1-x}As /p- GaAs /n-GaAs

Nous présentons les résultats de l'étude appliquée à la cellule (p+-Al_xGa_{1-x}As /p- GaAs /n-GaAs) dans les deux cas de non addition et addition de substrat.

La figure IV-11 présente la caractéristique densité de courant – tension ($J-V$) à l’obscurité et sous l’éclairement AM_0 pour la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) avec la fraction molaire de l’aluminium $x = 0.491$ ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs$).

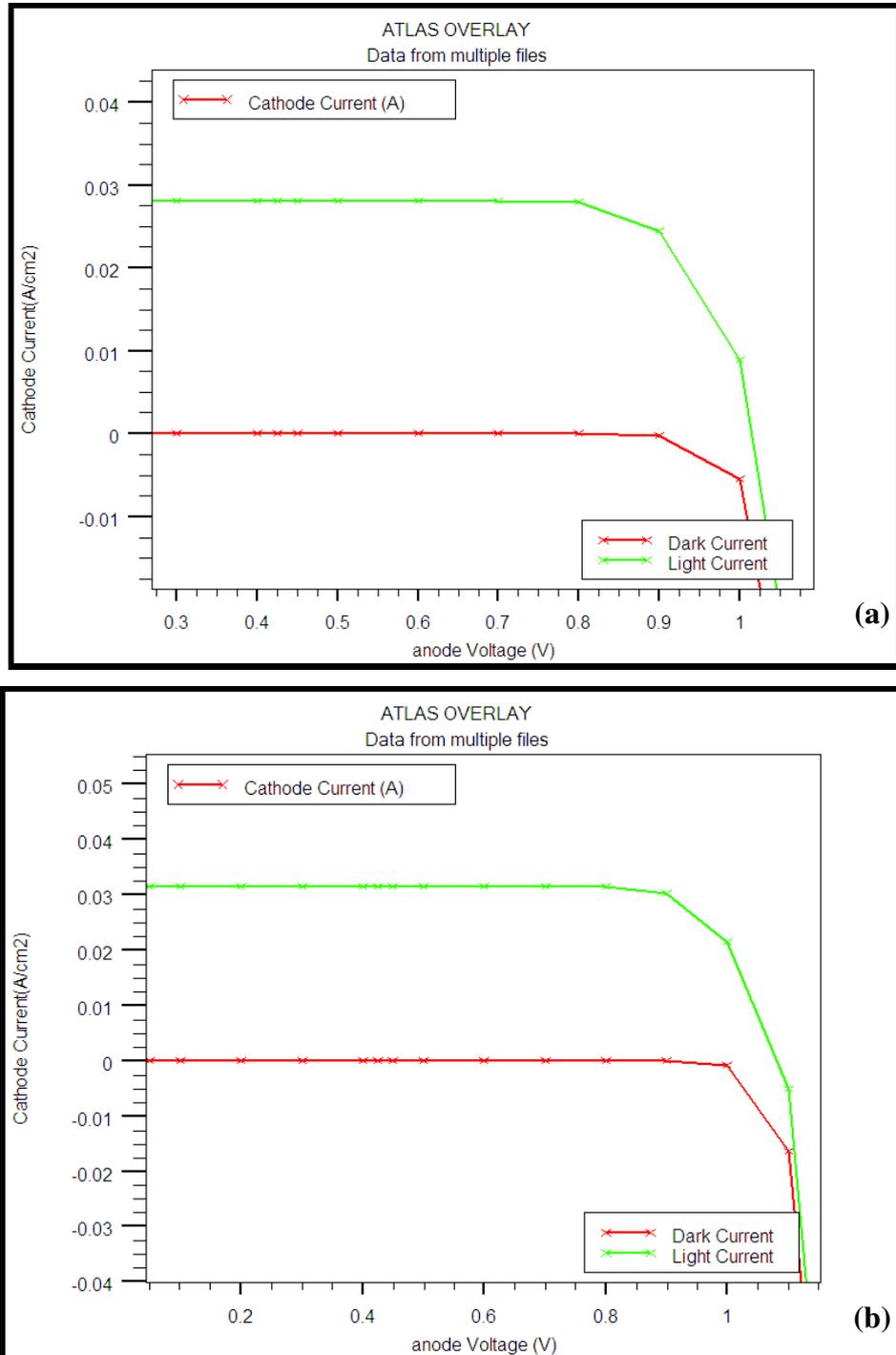


Figure IV-11 : Caractéristique ($J-V$) de la cellule ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs$) à l’obscurité et sous éclairement AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les rendements quantiques externe et interne (external , internal quantum efficiency) sont présentés dans la figure IV-12 toujours pour la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ / p - GaAs / n -GaAs).

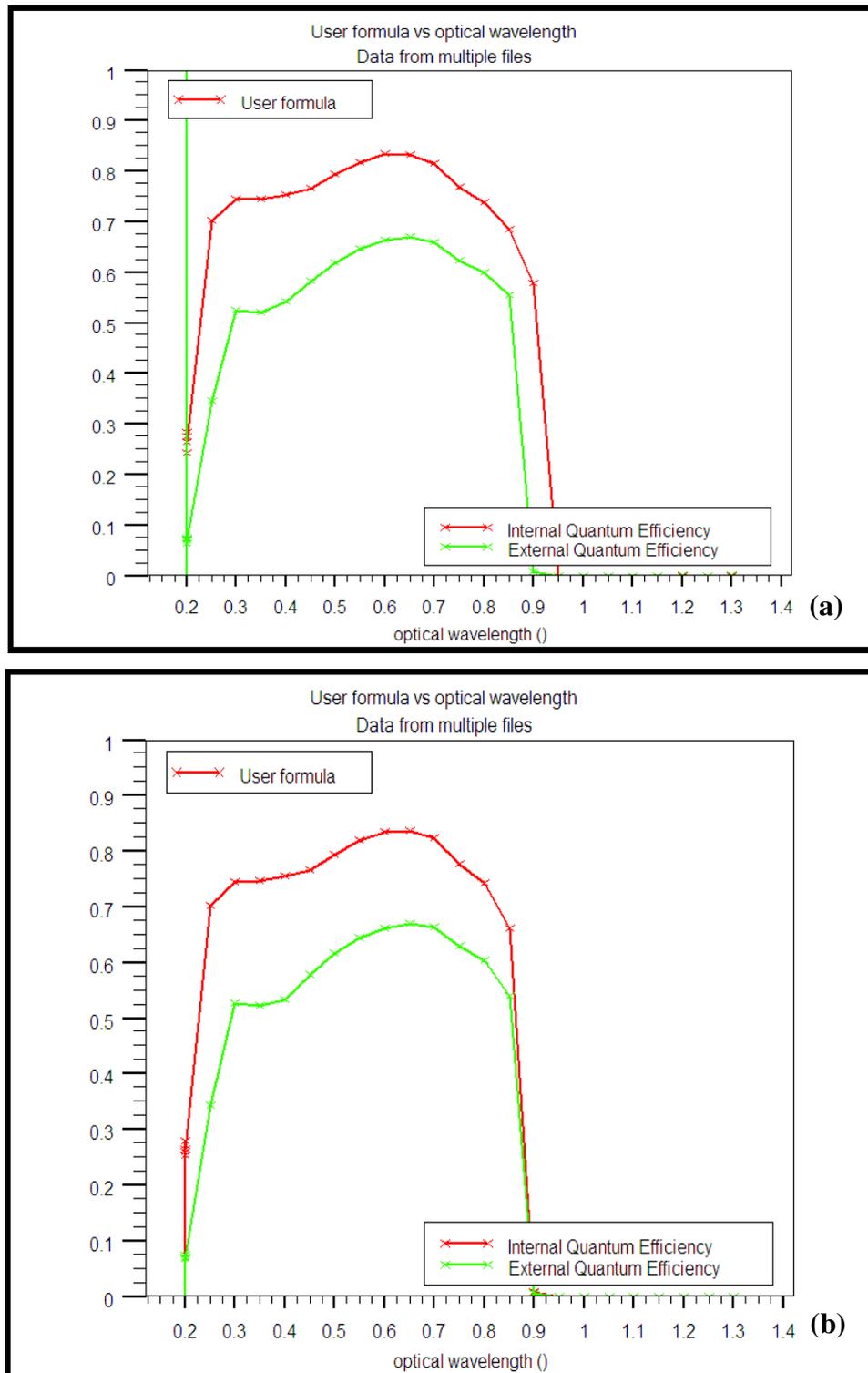


Figure IV-12 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule ($p^+- Al_{0.491}Ga_{0.509}As$ / p - GaAs / n -GaAs) sous éclaircment AM₀: (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les paramètres photovoltaïques calculés d'après les caractéristiques J - V de la cellule $p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p - GaAs / n - GaAs$ sont présentés dans le tableau IV-3. Rappelons que la puissance optique fournie par l'éclairment AM_0 est ~ 0.136 (W/cm^2).

	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W/cm^2)	η (%)
Sans substrat	28.09	1.014	78.20	0.02230	16.40
Avec substrat (GaAs)	31.40	1.080	80.41	0.02729	20.06

Tableau IV-3: Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p - GaAs / n - GaAs$).

Nous remarquons une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout de substrat (GaAs), notamment dans la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF , la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion η .

Les tableaux IV-4 et IV-5 présentent les paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p - GaAs / n - GaAs$) calculés à différentes fractions molaires de l'aluminium ($x(Al)$) pour le cas sans et avec substrat respectivement.

$x(Al)$	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W/cm^2)	η (%)
0.099	28.91	1.013	78.3	0.0229	16.83
0.198	27.77	1.014	78.2	0.0220	16.17
0.315	27.92	1.014	78.2	0.0221	16.25
0.419	28.05	1.014	78.2	0.0222	16.32
0.491	28.09	1.014	78.2	0.0223	16.39
0.590	28.24	1.014	78.2	0.0224	16.47
0.700	26.88	1.014	78.3	0.0213	15.66
0.804	26.71	1.015	78.1	0.0212	15.58

Tableau IV-4 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p - GaAs / n - GaAs$) à différentes fractions molaires $x(Al)$ pour le cas sans substrat.

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	$\eta\%$
0.099	32.0018	1.061	81.69	0.02775	20.40
0.198	31.064	1.080	80.54	0.027028	19.87
0.315	31.26	1.080	80.46	0.02718	19.98
0.419	31.36	1.080	80.42	0.02726	20.04
0.491	31.40	1.080	80.41	0.02729	20.06
0.590	31.53	1.080	80.37	0.02739	20.13
0.700	30.18	1.078	80.81	0.02631	19.34
0.804	30.053	1.078	80.48	0.026094	19.18

Tableau IV-5 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas avec substrat (GaAs).

Même remarque est observée d'après les résultats des tableaux IV-4 et IV-5. Dans l'ensemble de variation de $x(\text{Al})$, la cellule avec substrat (GaAs) présente plus d'améliorations dans ses caractéristiques photovoltaïques (tableau IV-5). Ces derniers résultats sont dans la gamme de ce que a été trouvée par d'autre travaux [56]. Nous remarquons aussi que la variation de la fraction molaire $x(\text{Al})$ révèle, dans l'ensemble, une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule, notamment la densité de courant de court circuit J_{sc} qui augmente de $30.053 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $32 \text{ mA}/\text{cm}^2$ lorsque $x(\text{Al})$ varie de 0.804 à 0.099, le rendement de conversion photovoltaïque η qui s'améliore de 19.18% à 20.40%. Donc on peut s'attendre à ce que la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) avec la fraction molaire $x(\text{Al})$ graduelle de 0.099 à 0.804 dans l'espace performe plus les caractéristiques photovoltaïques de la cellule en comparant à celle à fraction molaire $x(\text{Al})$ fixe (0.804) de la couche ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

A titre d'exemple nous présentons les résultats obtenus par Morteza Fathipour et al dans ce domaine [56] (voir tableau IV-6 et figures IV-13, IV-14).

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	$\eta (\%)$
$x(\text{Al}) = 0.85$	31.7212	1.00076	84.39	26.7909	19.62
$0 < x(\text{Al}) < 0.85$	33.7314	1.00229	85.39	28.8694	21.14

Tableau IV-6 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) pour $x(\text{Al}) = 0.85$ et $0 < x(\text{Al}) < 0.85$ sous éclaircissement AM_0 [56].

Nous indiquons ici que l'auteur Morteza Fathipour s'est basé sur des formules analytiques pour le calcul du coefficient d'absorption ($\alpha(\lambda)$) en fonction de la longueur d'onde. Alors que nous, nous avons injectés des valeurs mesurées des paramètres optiques ($n(\lambda)$, $k(\lambda)$) dans le logiciel Silvaco.

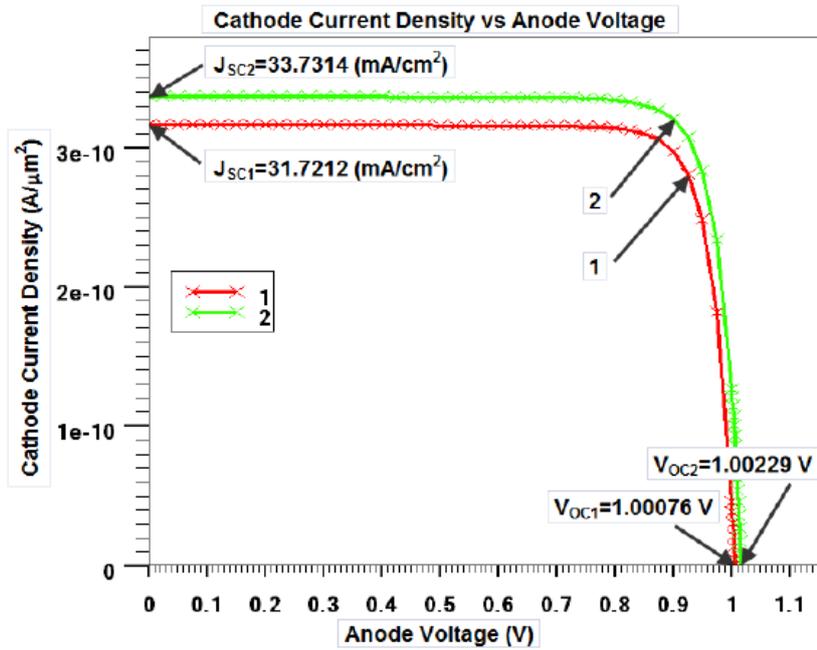


Figure IV-13 : Caractéristique $J-V$ de la cellule solaire ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ / p - GaAs / n -GaAs) sous éclaircment AM_0 : (1) $x(Al) = 0.85$, (2) $0 < x(Al) < 0.85$ [56].

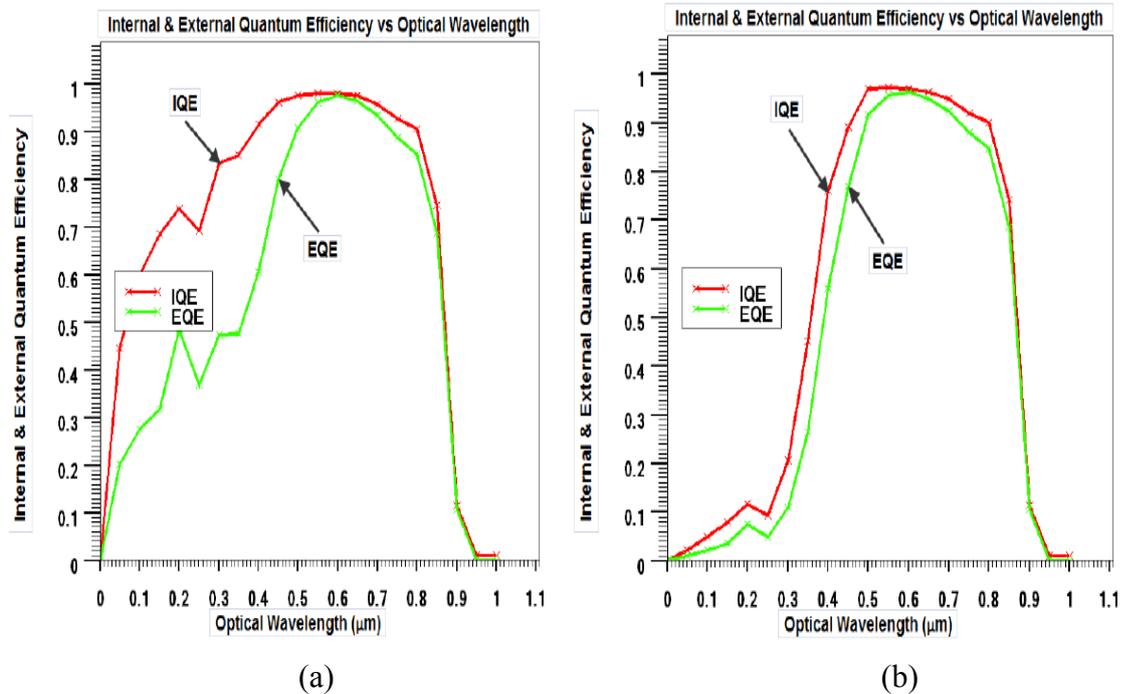


Figure IV-14 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule solaire ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ / p - GaAs / n -GaAs) sous éclaircment AM_0 : (a) $0 < x(Al) < 0.85$. (b) $x(Al) = 0.85$ [56].

Le spectre du rendement quantique présente un maximum autour de $\lambda \sim 650$ nm .

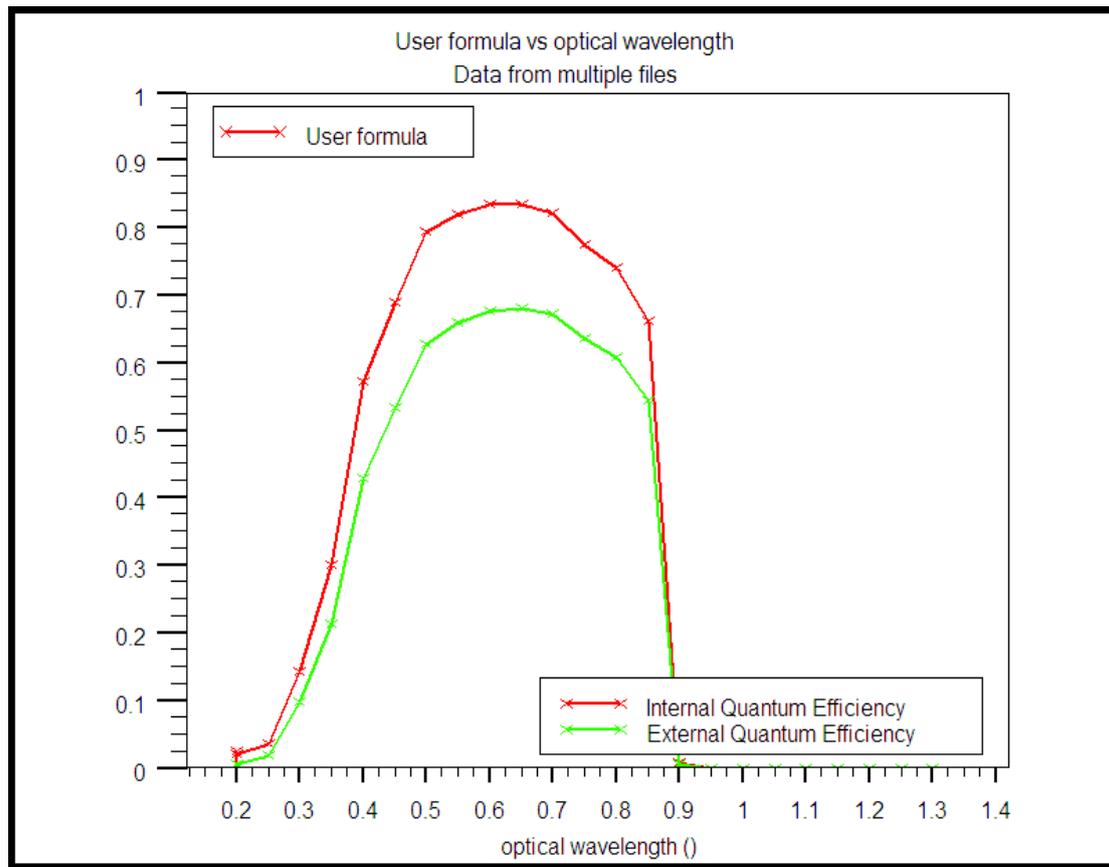


Figure IV-15: Rendements quantiques externe et interne de la cellule ($p^+-Al_{0.804}Ga_{0.196}As / p - GaAs / n-GaAs$) avec substrat.

En utilisant une couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$), nous pouvons constater une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p - GaAs / n-GaAs$) comme nous l'avons prévu d'après les résultats du tableau IV-5. Effectivement la figure IV-16 illustre la caractéristique ($J-V$) de la cellule à l'obscurité et sous éclaircissement AM_0 . Le tableau IV-7 présente les paramètres photovoltaïques de la cellule calculés d'après la caractéristique ($J-V$) (figure IV-16). Nous pouvons remarquer d'après ces résultats l'amélioration de la densité de courant de court circuit J_{sc} qui augmente de 30.053 mA/cm^2 à 32.33 mA/cm^2 et le rendement de conversion photovoltaïque η qui augmente de 19.18% à 20.60% (tableau IV-7).

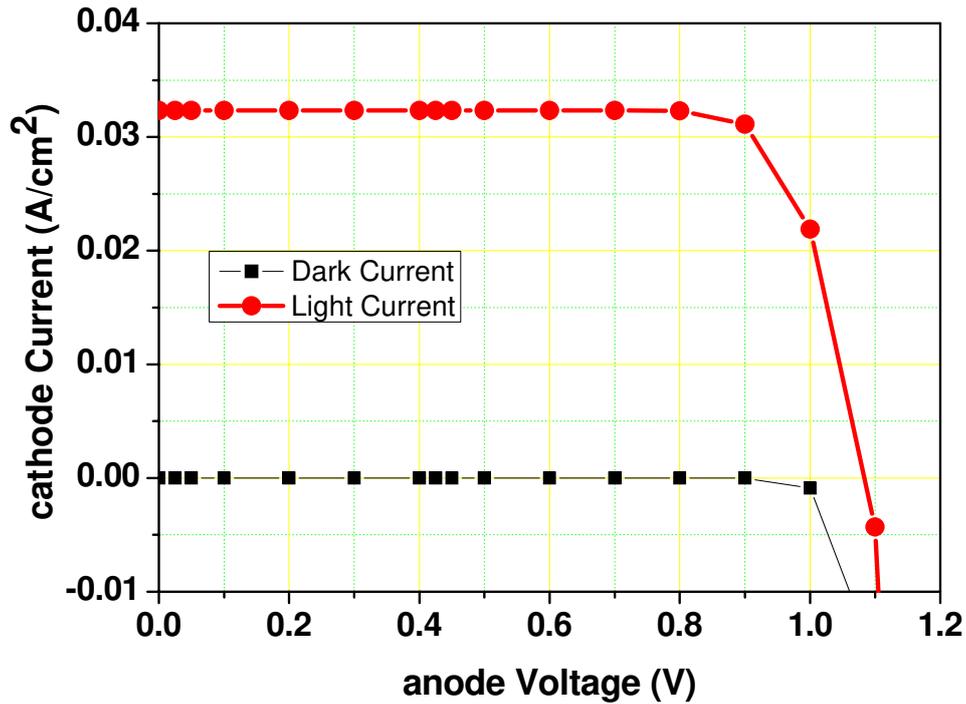


Figure IV-16 : Caractéristique $J-V$ à l’obscurité et sous éclaircment AM_0 de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) où la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) est à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$).

$x(Al)$	$J_{sc} (mA / cm^2)$	$V_{oc} (V)$	$FF(\%)$	$P_{max} (W / cm^2)$	$\eta \%$
$0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$	32.3354	1.0835	79.96	0.02801	20.60
$x(Al) = 0.804$	30.053	1.078	80.48	0.026094	19.18

Tableau IV-7 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) où la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) est à fraction molaire graduelle ; $x(Al) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu m$), $x(Al) = 0.491$ pour ($0.01 \mu m < x < 0.02 \mu m$), $x(Al) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu m$) et comparaison avec le cas où $x(Al)$ est fixe (0.804).

IV.3.2 Cellule solaire $n^+-Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs$

La même étude menée sur la cellule ($p^+- Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) est effectuée sur la cellule ($n^+- Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs$) sans et avec substrat pour différentes fractions molaires $x(Al)$ de la couche ($Al_xGa_{1-x}As$). Nous conservons les mêmes valeurs des épaisseurs et du dopage dans les différentes couches de la cellule tel que définit dans la cellule ($p^+- Al_xGa_{1-x}As / p- GaAs / n-GaAs$) (voir figure IV-1 et tableau IV-1).

La figure IV-17 présente la caractéristique $J-V$ de la cellule à l’obscurité et sous éclaircment AM_0 pour $x(Al) = 0.491$. Les rendements quantiques externe et interne de la cellule ($n^+- Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n- GaAs / p-GaAs$) sont présentés dans la figure IV-18.

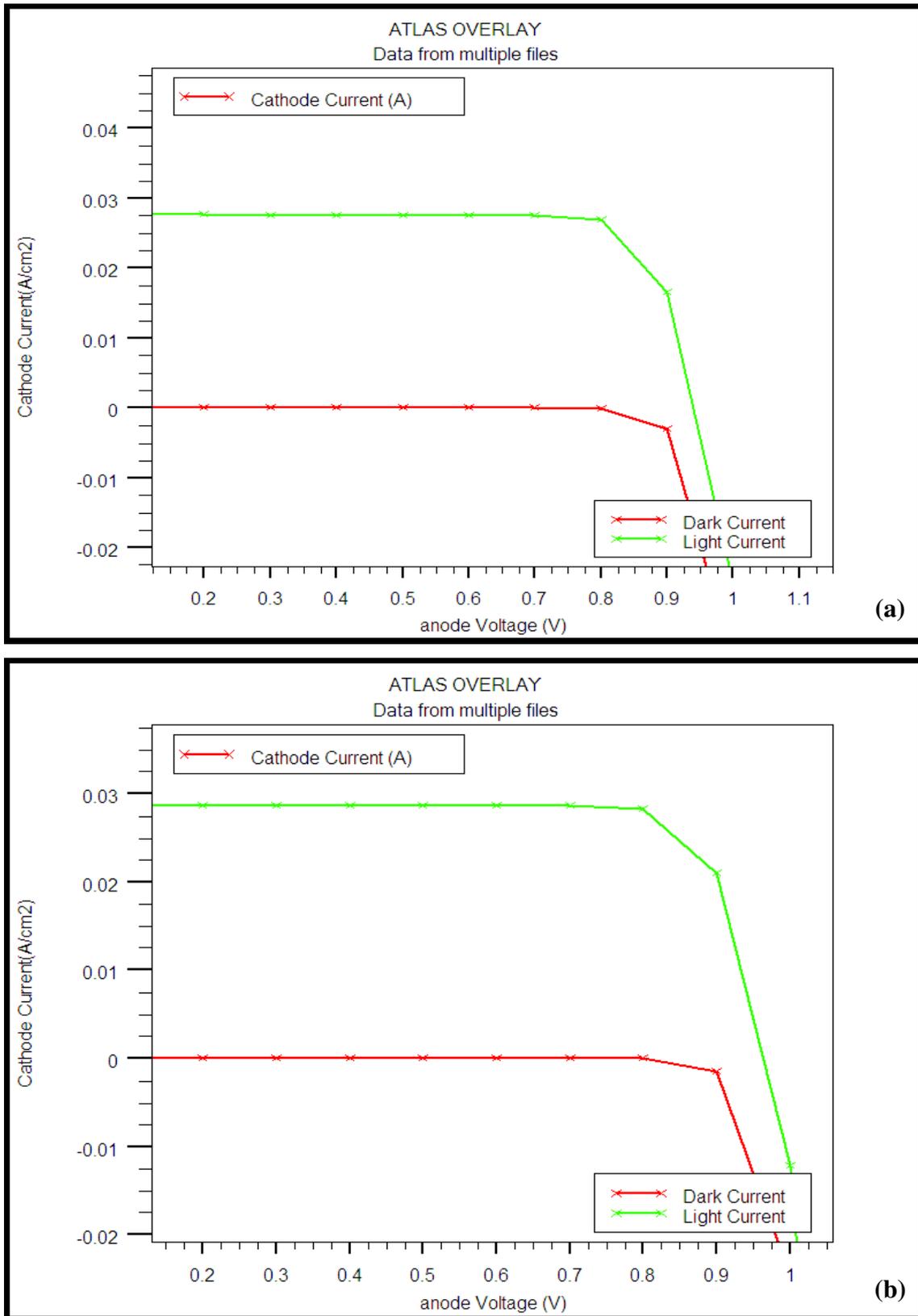


Figure IV-17 : Caractéristique ($J-V$) de la cellule ($n^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n - GaAs / p - GaAs$) à l'obscurité et sous éclairement AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

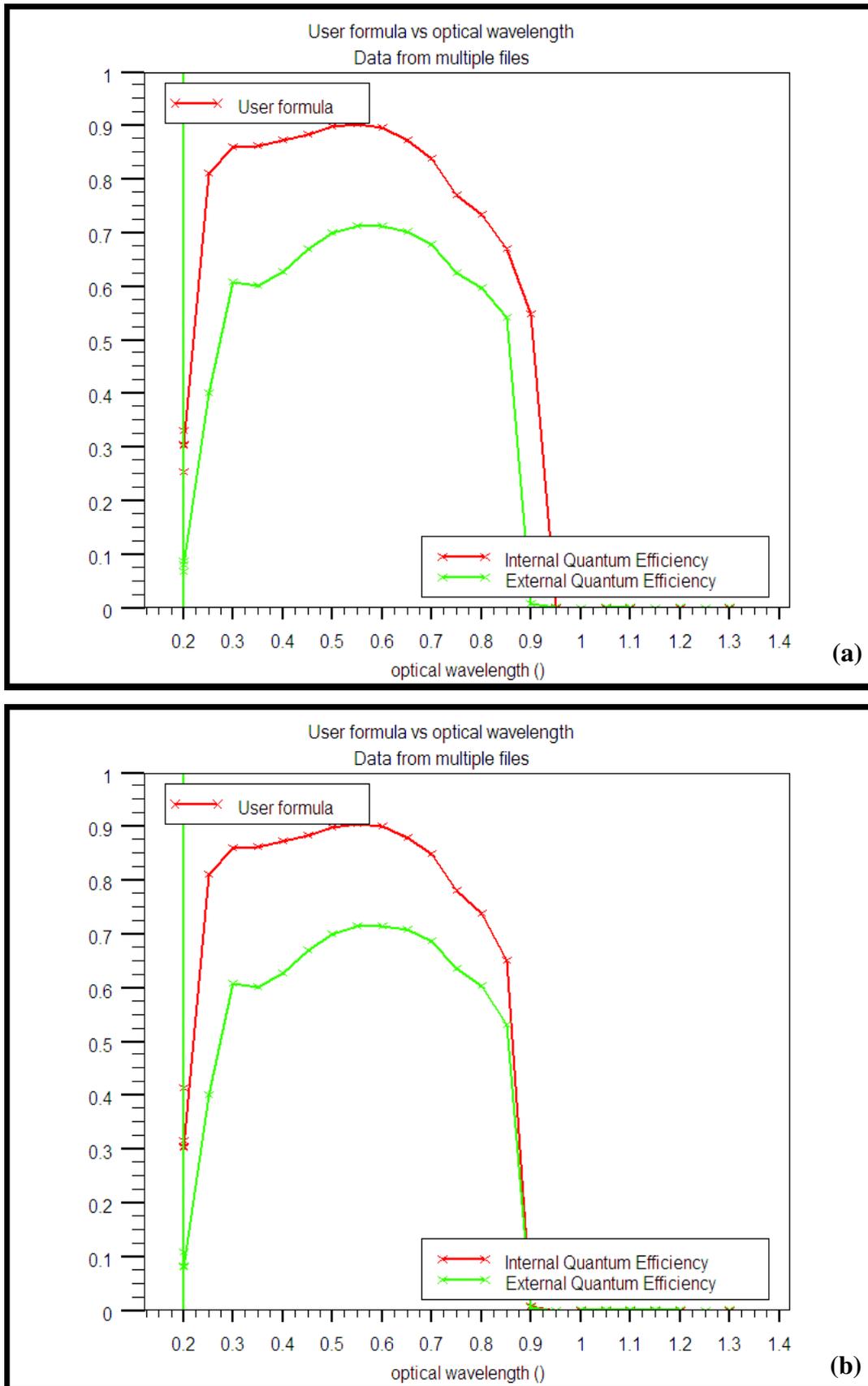


Figure IV-18 : Rendements quantiques externe et interne de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p - GaAs) sous éclaircment AM_0 : (a) sans substrat, (b) avec substrat (GaAs).

Les paramètres photovoltaïques calculés d'après les caractéristiques J - V de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) sont présentés dans le tableau IV-8.

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	P_{max} (W / cm ²)	η (%)
Sans substrat	27.66	0.93	82.71	0.02150	15.80
Avec substrat (GaAs)	28.712	0.9631	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-8: Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_{0.491}\text{Ga}_{0.509}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs).

Dans les tableaux IV-9 et IV-10 sont présentés les paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) calculés à différentes fractions molaires de l'aluminium ($x(\text{Al})$) pour le cas sans et avec substrat respectivement.

$x(\text{Al})$	J_{sc} (mA / cm ²)	V_{oc} (V)	FF(%)	P_{max} (W / cm ²)	$\eta\%$
0.099	28.52	0.9229	85.99	0.02264	16.64
0.198	27.36	0.92	86.04	0.0217	15.95
0.315	27.51	0.92	85.77	0.02182	16.04
0.419	27.63	0.93	83.69	0.0217	15.95
0.491	27.66	0.93	82.71	0.02150	15.80

Tableau IV-9 : Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas sans substrat.

$x(\text{Al})$	J_{sc} (mA / cm ²)	V_{oc} (V)	FF(%)	P_{max} (W / cm ²)	$\eta\%$
0.099	29.42	0.94	88.57	0.02461	18.09
0.198	28.38	0.9429	88.49	0.02368	17.41
0.315	28.55	0.94	88.10	0.02376	17.47
0.419	28.67	0.96	82.46	0.02273	16.71
0.491	28.71	0.96	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-10 : Paramètres photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) à différentes fractions molaires $x(\text{Al})$ pour le cas avec substrat (GaAs).

D'après ces résultats, nous constatons aussi une certaine amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) avec substrat (GaAs) relativement au cas sans substrat. On notifie aussi, d'après le tableau IV-10, une certaine amélioration de la densité de courant de court de circuit J_{sc} qui augmente de 28.71 mA/cm^2 à 29.42 mA/cm^2 lorsque $x(\text{Al})$ varie de 0.491 à 0.099 et le rendement de conversion photovoltaïque η qui s'améliore de 16.63% à 18.09%. Donc une cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) à fraction molaire $x(\text{Al})$ graduelle dans l'espace fournie des caractéristiques photovoltaïques encore plus performées que celles obtenues d'une cellule dont la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire fixe (par exemple $x(\text{Al}) = 0.491$). Cela est démontré par le calcul des caractéristiques électrique de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) avec la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$). La figure IV-19 présente la caractéristique (J - V) de cette cellule à l'obscurité et sous éclairément AM_0 . Le tableau IV-11 présente les paramètres photovoltaïques de cette cellule calculés d'après sa caractéristique (J - V) (figure IV-19).

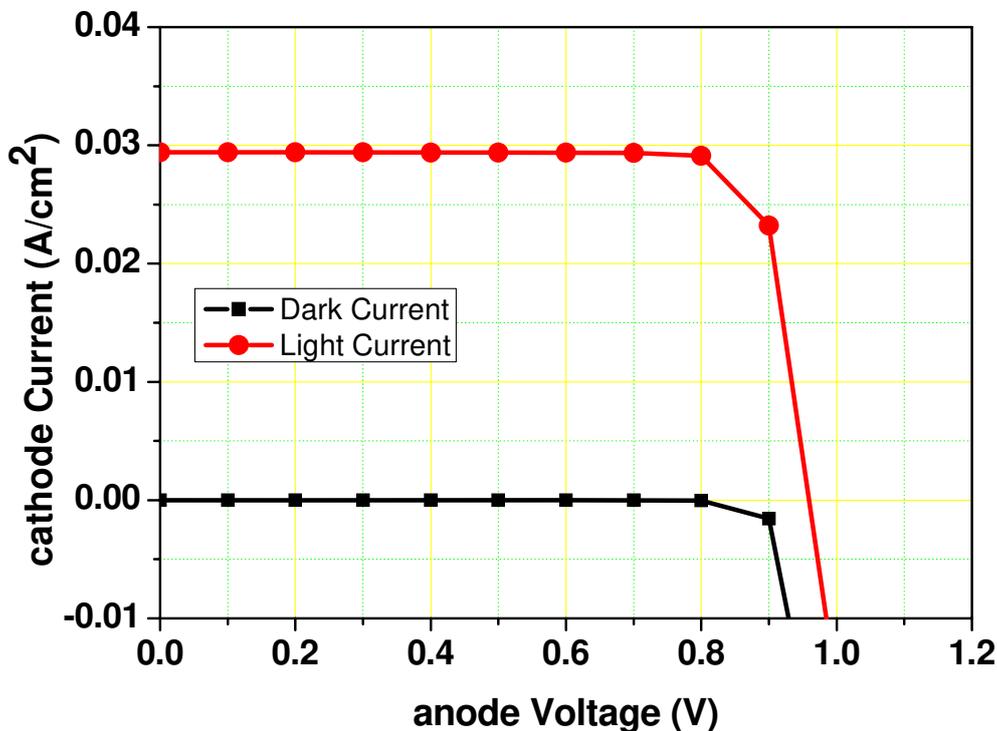


Figure IV-19 : Caractéristique J - V à l'obscurité et sous éclairément AM_0 de la cellule (n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / n - GaAs / p -GaAs) où la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$).

$x(\text{Al})$	$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (\text{V})$	$FF(\%)$	$P_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	$\eta\%$
$0.099 \leq x(\text{Al}) \leq 0.804$	29.43	0.9591	82.54	0.02330	17.13
$x(\text{Al}) = 0.491$	28.71	0.96	81.83	0.02263	16.63

Tableau IV-11 : Paramètres photovoltaïques de la cellule ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$) où la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire graduelle ; $x(\text{Al}) = 0.804$ pour ($0 < x < 0.01 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.491$ pour ($0.01 \mu\text{m} < x < 0.02 \mu\text{m}$), $x(\text{Al}) = 0.099$ pour ($0.02 < x < 0.03 \mu\text{m}$) et comparaison avec le cas où $x(\text{Al})$ est fixe (0.491).

Nous pouvons remarquer d'après ces résultats l'amélioration de la densité de courant de court circuit J_{sc} qui atteint $29.43 \text{ mA}/\text{cm}^2$ et le rendement de conversion photovoltaïque η qui augmente de 16.63% à 17.13% (tableau IV-11). Cette amélioration est due à l'augmentation de l'absorption optique par la succession de couches fenêtres ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) de différentes fractions molaires et ainsi de différents gap énergétique du plus large ($E_g \sim 2.07 \text{ eV}$ pour $x(\text{Al}) = 0.804$) au plus étroit ($E_g \sim 1.54 \text{ eV}$ pour $x(\text{Al}) = 0.099$).

Il reste à indiquer que les caractéristiques photovoltaïques fournies par la cellule ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) sont encore plus meilleures que celles fournies par la cellule ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$). On explique cela par le fait que la mobilité des électrons (porteurs essentiellement entraînés dans la structure p^+pn à travers la base vers le contact arrière) est supérieure à la mobilité des trous (porteurs essentiellement entraînés dans la structure n^+np à travers la base vers le contact arrière). Ceci entraîne une certaine réduction du photo-courant (J_{pn}) généré par la cellule n^+np (relativement à celui généré dans la cellule p^+pn) et par la suite la réduction de la tension du circuit ouvert V_{oc}

$$(V_{oc} \cong \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{pn}}{J_s} + 1 \right)).$$

IV.4 Conclusion :

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ($\text{AlGaAs} / \text{GaAs}$) de structure p^+pn et n^+np par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Nous avons présenté les résultats de la simulation aux conditions de l'obscurité et sous éclairage AM_0 pour la cellule solaire ($p^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p\text{-GaAs} / n\text{-GaAs}$) et ($n^+ \text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n\text{-GaAs} / p\text{-GaAs}$) sans et avec substrat (GaAs), tout en faisant varier la fraction molaire $x(\text{Al})$ de l'aluminium de la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). D'après les résultats,

nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout de substrat (GaAs), notamment dans la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF , la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion photovoltaïque η . Pour la cellule (p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p- GaAs / n-GaAs) par exemple, la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 28.09 mA/cm² à 31.40 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.40% à 20.06%. Pour la cellule (n^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n- GaAs / p-GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 27.66 mA/cm² à 28.712 mA/cm², et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 15.80% à 16.63%.

La variation de la fraction molaire $x(Al)$ de la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) révèle dans l'ensemble une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Pour la cellule (p^+ -Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente de 30.053 mA/cm² à 32 mA/cm² lorsque $x(Al)$ varie de 0.804 à 0.099, le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 19.18% à 20.40%. En utilisant une couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 32.33 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 20.60%. Pour la cellule (n^+ -Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente de 28.71 mA/cm² à 29.42 mA/cm² lorsque $x(Al)$ varie de 0.491 à 0.099 et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.63% à 18.09%. En utilisant une couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 29.43 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 17.13%. Donc une cellule (p^+ -Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs) ou (n^+ -Al_xGa_{1-x}As / n- GaAs / p-GaAs) dont la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) est à fraction molaire $x(Al)$ graduelle dans l'espace fournit des caractéristiques photovoltaïques encore plus performées que celles obtenues d'une cellule avec la couche fenêtre (Al_xGa_{1-x}As) à fraction molaire fixe. Cette amélioration est due à l'augmentation de l'absorption optique par la succession de couches fenêtres (Al_xGa_{1-x}As) de différentes fractions molaires et ainsi de différents gap énergétique du plus large ($E_g \sim 2.07$ eV pour $x(Al) = 0.804$) au plus étroit ($E_g \sim 1.54$ eV pour $x(Al) = 0.099$).

Nous constatons finalement que les caractéristiques photovoltaïques fournies par la cellule ($p^+-Al_xGa_{1-x}As$ /p- GaAs /n-GaAs) sont encore plus meilleures que celles fournies par la cellule ($n^+-Al_xGa_{1-x}As$ /n- GaAs /p-GaAs) du fait que la mobilité des électrons (porteurs essentiellement entraînés dans la structure p^+pn vers le contact arrière) est supérieure à la mobilité des trous (porteurs essentiellement entraînés dans la structure n^+np vers le contact arrière). Ceci entraîne une certaine réduction du photo-courant (I_{ph}) généré par la cellule n^+np (relativement à celui généré dans la cellule p^+pn) et par la suite la réduction de la tension du circuit ouvert V_{oc} .

Conclusion générale

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs / GaAs) de structure p^+pn et n^+np à l'obscurité et sous éclairage AM0 par le logiciel de simulation sophistiqué SILVACO-ATLAS. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction, l'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel SILVACO compte parmi les outils de simulation les plus développés dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Nous avons présenté les résultats de l'étude pour la cellule solaire ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs$) et ($n^+ - Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs$) sans et avec substrat (GaAs), tout en faisant varier la fraction molaire $x(Al)$ de l'aluminium de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$). D'après les résultats, nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout de substrat (GaAs), notamment dans la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF , la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion photovoltaïque η . Pour la cellule ($p^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / p-GaAs / n-GaAs$) par exemple, la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 28.09 mA/cm^2 à 31.40 mA/cm^2 et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.40% à 20.06% . Pour la cellule ($n^+ - Al_{0.491}Ga_{0.509}As / n-GaAs / p-GaAs$), la densité de courant de court circuit J_{sc} s'améliore de 27.66 mA/cm^2 à 28.712 mA/cm^2 , et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 15.80% à 16.63% .

La variation de la fraction molaire $x(Al)$ de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) révèle dans l'ensemble une amélioration des caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Pour la cellule ($p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n-GaAs$) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente de 30.053 mA/cm^2 à 32 mA/cm^2 lorsque $x(Al)$ varie de 0.804 à 0.099 , le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 19.18% à 20.40% . En utilisant une couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(Al) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 32.33 mA/cm^2 et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 20.60% . Pour la cellule ($n^+ - Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / p-GaAs$) avec substrat (GaAs), la densité de courant de court de circuit J_{sc} augmente de 28.71

mA/cm² à 29.42 mA/cm² lorsque $x(\text{Al})$ varie de 0.491 à 0.099 et le rendement de conversion photovoltaïque η s'améliore de 16.63% à 18.09%. En utilisant une couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) à fraction molaire graduelle ($0.099 \leq x(\text{Al}) \leq 0.804$) dans l'espace, la densité de courant de court circuit J_{sc} augmente à 29.43 mA/cm² et le rendement de conversion photovoltaïque η atteint 17.13%. Donc une cellule ($\text{p}^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{p-GaAs} / \text{n-GaAs}$) ou ($\text{n}^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{n-GaAs} / \text{p-GaAs}$) dont la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire $x(\text{Al})$ graduelle dans l'espace fournit des caractéristiques photovoltaïques encore plus performées que celles obtenues d'une cellule dont la couche fenêtre ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) est à fraction molaire fixe.

Nous constatons finalement que les caractéristiques photovoltaïques fournies par la cellule ($\text{p}^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{p-GaAs} / \text{n-GaAs}$) sont encore plus meilleures que celles fournies par la cellule ($\text{n}^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{n-GaAs} / \text{p-GaAs}$) du fait que la mobilité des électrons (porteurs essentiellement entraînés dans la structure $\text{p}^+ \text{pn}$ vers le contact arrière) est supérieure à la mobilité des trous (porteurs essentiellement entraînés dans la structure $\text{n}^+ \text{np}$ vers le contact arrière). Ceci entraîne une certaine réduction du photo-courant (J_{ph}) généré par la cellule $\text{n}^+ \text{np}$ (relativement à celui généré dans la cellule $\text{p}^+ \text{pn}$) et par la suite la réduction de la tension du circuit ouvert V_{oc} .