



Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem  
Faculté des Sciences Exactes et Informatique  
Domaine Sciences de la Matière  
Département de Physique



Pour l'obtention du diplôme de :

**Master**

Option : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Présenté Par :

BOUDEHEDJ Mohammed Abdelwahid

Thème :

**Etude des propriétés structurales et électriques  
des cellules Tandem III-V (multicouches : InGaP/GaAs)  
par simulation TCAD\_SILVACO**

Soutenue le : 03 Juin 2015

Devant le jury composé de :

M. BOURAHLA Ahmed	Encadreur	M C A	Université de Mostaganem
M. HADRI Baghdâd	Co-encadreur	Prof	Université de Mostaganem
Mme. HENTIT Hafida	Examinatrice	M C A	Université de Mostaganem

**Etude des propriétés structurales et électriques  
des cellules Tandem III-V (multicouches : InGaP/GaAs)  
par simulation TCAD\_SILVACO**

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## **Chapitre I : Notions fondamentales sur les semi-conducteurs III-V**

1. Semi-conducteurs .....	4
1.1. Semi-conducteurs intrinsèques .....	5
1.2. Semi-conducteurs extrinsèques .....	5
2. Semi-conducteurs III-V .....	7
2.1. Définition de Semi-conducteurs III-V .....	7
2.2. Composés binaires, ternaires et quaternaires des semi-conducteurs III/V ...	8
2.3. Propriétés Physiques des semi-conducteurs III-V .....	10
3. Jonction PN .....	14
3.1. Définition .....	14
3.2. Jonction PN à l'équilibre.....	15
3.3. Jonction polarisée par une tension continue .....	17
4. Conclusion.....	17

## **Chapitre II : Généralité sur les cellules photovoltaïques**

1. Introduction .....	19
2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	20
2.1. Historique de l'effet photovoltaïque .....	20
2.2. Interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux .....	21
2.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	22
3. Spectre solaire .....	24
4. Masse d'air .....	25
5. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .....	28
6. Circuit électrique équivalent .....	28
7. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	30
7.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	30
7.2. Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	31
7.3. Point du fonctionnement $P_{max} (V_{max}, I_{max})$ .....	31
7.4. Facteur de forme FF .....	32
7.5. Rendement $\eta$ .....	32

8. Différentes structures des cellules photovoltaïques .....	33
8.1. Cellules à base de silicium cristallin .....	33
8.2. Cellules photovoltaïques en couches minces.....	33
8.3. Hétérostructures .....	34
8.4. Cellules photovoltaïques organiques .....	35
8.5. Cellules hybrides .....	36
8.6. Cellules multijonctions .....	36
9. Conclusion .....	37

### **Chapitre III : Simulation numérique sous TCAD\_Silvaco**

1. Modèles utilisés pour la simulation sous TCAD_Silvaco .....	39
1.1. Simulation électrique sous TCAD_Silvaco .....	39
1.2. Recombinaison .....	41
2. Structure simulée : paramètres et maillage .....	43
2.1. Structure simulée .....	43
2.2. Paramètres .....	44
2.3. Maillage.....	45
3. Résultats de la simulation .....	46
3.1. Caractéristique courant- tension, puissance – tension .....	46
3.2. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V).....	47
3.2.1. Influence de l'éclairement et de la température .....	47
3.3. Effet de l'empilement des cellules sur la caractéristique I (V) .....	53
3.4. Effet de dopage.....	54
3.4.1. Haut cellule (InGaP) .....	54
3.4.2. Bas cellule (GaAs) .....	56
3.5. Rendement quantique externe de la cellule tandem (InGaP/GaAs) .....	57
4. Conclusion .....	58
Conclusion générale .....	60
Bibliographie.....	61
Annexe I.....	65
Annexe II .....	66

### Introduction générale

Faces aux problèmes inhérents à l'utilisation des combustibles fossiles tel que les effets nuisibles sur le plan environnemental, ainsi que l'épuisement de ces sources d'énergie, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire l'énergie dont il s'est rendu dépendant. Plusieurs types de sources d'énergies renouvelables sont actuellement connus, l'énergie solaire est l'une des technologies les plus prometteuses et qui offre la solution pour répondre aux exigences énergétiques modernes, car le soleil est considéré comme une ressource non limitée à l'échelle humaine, non polluante et les matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïques sont réutilisables.

Le grand obstacle est cependant d'une part le coût élevé de ces technologies et d'autre part leurs rendements limités les rendant ainsi de loin moins compétitives par rapport aux énergies fossiles. C'est pour cette raison qu'un grand effort est concentré sur la recherche d'autres solutions profitant des avancées technologiques contemporaines, notamment de l'industrie de la microélectronique, pour à la fois augmenter les rendements énergétiques mais aussi réduire les coûts de production.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication en faisant un bon choix pour la structure de la cellule.

Les cellules solaires Tandem, constituées essentiellement de plusieurs types de couches épitaxiales les unes après les autres, promettent de répondre à ces pétitions. En effet, elles sont généralement conçues à partir des matériaux III-V, et détiennent actuellement tous les records de rendement énergétique.

L'objectif de notre travail est l'étude par simulation numérique des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V (InGaP/GaAs).

Nous avons utilisé le logiciel de simulation TCAD\_SILVACO pour simuler la caractéristique courant tension  $I(V)$  et sa réponse spectrale (SR).

Cette étude comporte trois chapitres :

- ✚ Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux semi-conducteurs III-V et les jonctions PN.
- ✚ le deuxième chapitre est consacré à des notions fondamentales sur le rayonnement solaire et au principe de la conversion photovoltaïque et les paramètres de sortie caractérisant une cellule photovoltaïque, de plus, nous allons citer les différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques.
- ✚ Dans le troisième chapitre, nous présenterons le modèle de la cellule Tandem considérée et les résultats obtenus de la simulation numérique à deux dimensions, sous TCAD\_SILVACO.

# Liste des figures

## Chapitre I :

**Figure 1 :** Représentation des bandes d'énergie.

**Figure 2 :** Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé n par de l'arsenic (As).

**Figure 3 :** Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B).

**Figure 4 :** Position du niveau de Fermi dans différents types de semi-conducteurs.

**Figure 5 :** Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

**Figure 6 :** Première zone de Brillouin de la structure zinc blende

**Figure 7 :** Energie de la bande interdite de plusieurs familles de semi-conducteurs en fonction de la constante de maille

**Figure 8 :** Structure de bande d'énergie du : A-gap indirect et B-gap direct

**Figure 9 :** Bandes d'énergies pour : a et b) Matériaux, c) Semi-conducteur, d) Isolateur.

**Figure 10 :** Transitions optiques directes et indirectes.

**Figure 11 :** Jonction PN.

**Figure 12:** Etat d'équilibre d'une jonction PN.

**Figure 13:** Etat d'équilibre d'une jonction PN : a) Densité de charge, b) Champ électrique et c) Potentiel électrostatique.

**Figure 14 :** Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre.

**Figure 15 :** Jonction PN : a) polarisée en sens inverse, b) polarisée en directe.

## Chapitre II :

**Figure 16 :** Effet photovoltaïque

**Figure 17 :** Transitions bande à bande dans un semi-conducteur (a) à bande interdite directe et (b) à bande interdite indirecte

**Figure 18 :** Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

**Figure 19 :** Spectre électromagnétique du visible.

**Figure 20 :** Spectre de rayonnement solaire.

**Figure 21 :** Différentes constantes d'illumination.

**Figure 22 :** Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge).

**Figure 23 :** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque; à l'obscurité et sous éclairage.

**Figure 24 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction PN.

**Figure 25** : Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

**Figure 26** : Caractéristique courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une cellule au silicium cristallin amorphe simple jonction.

**Figure 27** : Cellule solaire à structure MIS.

**Figure 28** : Cellule solaire à hétérojonction de type Schottky.

**Figure 29** : Cellule solaire organique.

**Figure 30** : Image d'une cellule Grätzel.

**Figure 31** : Structure de cellule Tandem.

### **Chapitre III :**

**Figure 32** : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

**Figure 33** : Mécanisme de recombinaison en surface.

**Figure 34** : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger

**Figure 35** : Structure de la cellule simulée.

**Figure 36** : Géométrie de la structure de référence.

**Figure 37** : Maillage utilisés pour les simulations.

**Figure 38** : Caractéristiques courant- tension.

**Figure 39** : Caractéristique puissance-tension.

**Figure 40** : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule Tandem

**Figure 41** : Influence de la température sur la caractéristique courant- tension.

**Figure 42** : Variation de  $P_{max}$  en fonction de la température (K).

**Figure 43** : Variation de facteur de forme en fonction de la température (K).

**Figure 44** : Variation de rendement en fonction de la température (K).

**Figure 45** : Influence de l'éclairement et de la température sur I-V.

**Figure 46** : Courbe I-V de la cellule tandem (InGaP/GaAs).

**Figure 47** : Effet du dopage à haut de la cellule sur la caractéristique I-V.

**Figure 48** : Effet du dopage à bas cellule sur la caractéristique courant- tension.

**Figure 49** : Variation de rendement en fonction de la concentration de dopage

**Figure 50** : Rendement quantique externe de la cellule tandem (InGaP/GaAs).

**Figure 51**: Organigramme de la structure VWF.

**Figure 52** : Entrées et sorties d'ATLAS.

**Figure 53** : Ordre des groupes des commandes d'Atlas.

**Figure 54** : Organigramme du programme de simulation (TCAD\_ SILVACO).

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

**Tableau 1 :** la densité de porteurs intrinsèque de quelque semi-conducteur.

**Tableau 2 :** Extrait de la classification périodique des éléments.

**Tableau 3 :** Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300 K.

### Chapitre II :

**Tableau 4 :** Plage des longueurs d'onde du spectre visible.

**Tableau 5 :** Résumé des différentes distributions spectrales.

### Chapitre III :

**Tableau 6 :** Paramètres de la cellule de référence.

**Tableau 7 :** Différents paramètres de la cellule Tandem pour différentes valeurs de l'éclairement.

**Tableau 8 :** Evolution avec la température de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale extraite de la cellule ( $P_{max}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de la conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

**Tableau 9 :** Différents paramètres de la cellule Tandem pour différentes valeurs la température et de l'éclairement en même temps

**Tableau 10 :** Différents paramètres de la cellule Tandem ( InGaP/GaAs).

**Tableau 11 :** Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage à haut de la cellule

**Tableau 12 :** Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage à bas de la cellule.

**Tableau 13 :** Paramètres caractéristique de la cellule avec l'influence de la concentration de dopage de la cellule

## Introduction

La cellule solaire est l'élément essentiel assurant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur constituant la cellule solaire s'accompagne par différents phénomènes physiques tel que la génération et la recombinaison. Cette dernière dépend fortement du matériau semi-conducteur choisi.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux semi-conducteurs III-V et les jonctions PN

### 1. Semi-conducteurs :

Ce sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, ils sont caractérisés par une bande interdite entre la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC) et une conductivité électrique moyenne :

- Ils se comportent comme des métaux à haute température, comme des isolants à basse température.
- à  $T=0$  K la bande de valence est complètement pleine et la bande de conduction est complètement vide.
- Quand la température augmente, certains électrons de la bande de valence sautent dans la bande de conduction et laisse des trous dans la bande de valence alors les électrons et les trous établissent une conductivité électrique  $\neq 0$  [1] (Voir figure 1).

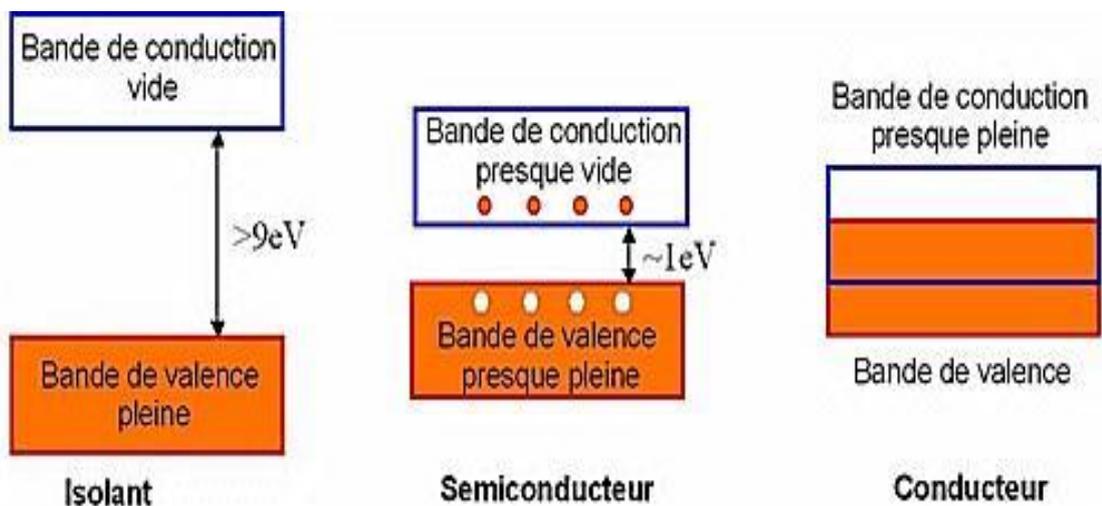


Figure 1 : Représentation des bandes d'énergie

Il existe deux types de semi-conducteur :

- Semi-conducteur intrinsèque (pur).
- Semi-conducteur extrinsèque (dopé par une impureté).

### 1.1. Semi-conducteurs intrinsèques :

Ce sont des semi-conducteurs très purs et bien cristallisés, ayant un taux d'impuretés très faibles et leur conductivité augmente avec la température. Le nombre de trous et d'électrons est égal.

$$n = p = n_i \quad (I.1)$$

$n_i$  : est appelé densité de porteurs intrinsèque, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

Cette densité de porteurs intrinsèque est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température. Le tableau 1, regroupe les valeurs des densités de porteurs de quelques semi-conducteurs à la température ambiante [2].

	Si	Ge	GaAs	InP	InN	GaN
$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	<b>10<sup>10</sup></b>	<b>2 10<sup>13</sup></b>	<b>3 10<sup>6</sup></b>	<b>3 10<sup>7</sup></b>	<b>6.2 10<sup>22</sup></b>	<b>8.9 10<sup>22</sup></b>

**Tableau 1** : Densité de porteurs intrinsèque de quelque semi-conducteur [2].

Le niveau de Fermi délimite dans le système les états occupés et les états vides [2].

Le niveau de Fermi dans un semi-conducteur intrinsèque est très voisin du milieu du gap à la température ambiante (Figure 4.a).

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (I.2)$$

Avec :

$E_c$  : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur.

$E_v$  : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur.

### 1.2. Semi-conducteurs extrinsèques :

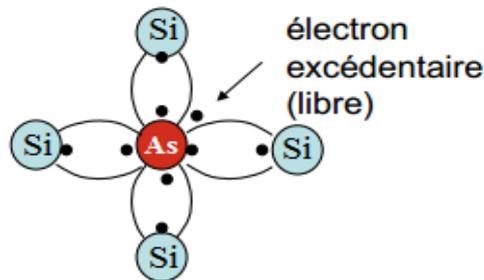
Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé « *dopage* » et il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques, de type N et de type P.

### a. Semi-conducteur de type N :

Un semi-conducteur dopé  $N$  possède un grand nombre d'électrons libres, la plupart de ces électrons libres étant données en cristal par les impuretés dopantes. Cela correspond aux températures usuelles, à un grand nombre de place occupées dans la bande de conduction.

#### Exemple :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (Arsenic). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de  $Si$  et le cinquième reste libre dans la bande de valence, ce qui va fortement augmenter le nombre des électrons libres :  $n \gg p$  (Figure 2)



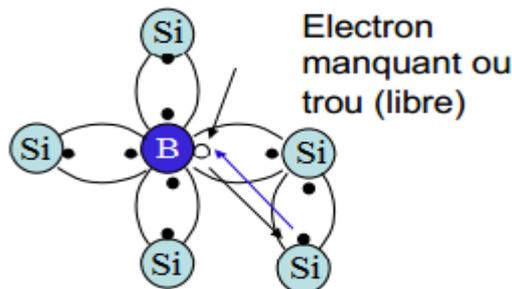
**Figure 2 :** Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium ( $Si$ ) dopé  $n$  par de l'arsenic ( $As$ ).

### b. Semi-conducteur de type P :

Un semi-conducteur de type P possède un grand nombre de trous, la plupart de ces trous résultent de l'introduction d'atomes accepteurs dans le cristal. Cela correspond, aux températures usuelles, à un grand nombre de place vides d'électron dans la bande de valence.

#### Exemple :

On introduit des atomes trivalents (Bore) à la place des atomes de  $Si$ , ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres. (Figure 3)



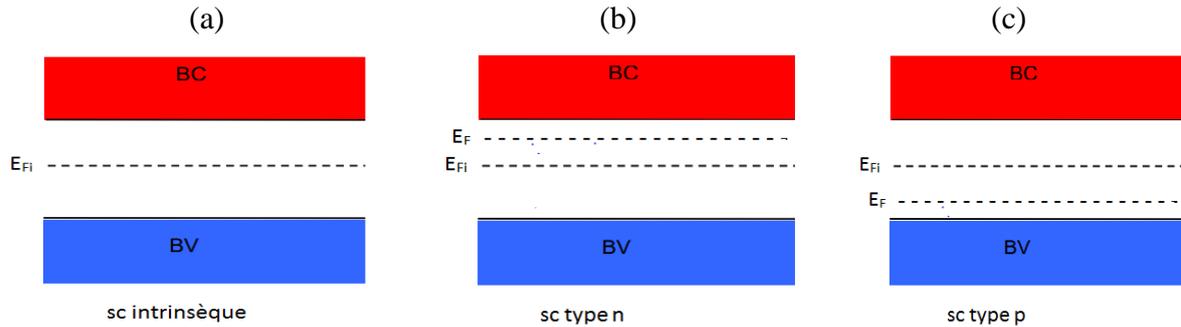
**Figure 3:** Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium ( $Si$ ) dopé P par du Bohr ( $B$ ).

Les expressions du niveau de Fermi dans chaque type ( $N$  et  $P$ ) sont :

$$E_{Fn} = E_c - kT \log \frac{N_c}{N_a - N_d} \quad (\text{I.3})$$

$$E_{Fp} = E_v - kT \log \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad (\text{I.4})$$

Dans chaque type de semi-conducteur le niveau de Fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important (figure 4) [2].



**Figure 4** : Position du niveau de Fermi dans différents types de semi-conducteurs [2].

## 2. Semi-conducteurs III-V :

Après les spectaculaires résultats enregistrés dans la technologie Silicium dans le domaine de la microélectronique, la recherche de composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles du Silicium, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à des nouveaux matériaux et en particulier les composés semi-conducteurs III-V.

### 2.1. Définition de semi-conducteurs III-V :

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne III (bore, aluminium, gallium, indium, etc.) et d'un élément de la colonne V (arsenic, antimoine, phosphore, etc.) du tableau de la classification périodique de Mendeleïev (voir Annexe I). Le tableau 2, regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés. [3]

III	IV	V
$^{10,81}_5B$	$^{12,01}_6C$	$^{14,01}_7N$
$^{26,98}_{13}Al$	$^{28,09}_{14}Si$	$^{30,97}_{15}P$
$^{69,74}_{31}Ga$	$^{72,59}_{32}Ge$	$^{74,92}_{33}As$
$^{114,82}_{49}In$	$^{118,69}_{50}Sn$	$^{121,75}_{51}Sb$

**Tableau 2 :** Extrait de la classification périodique des éléments [3].

## 2.2. Composés binaires, ternaires et quaternaires des semi-conducteurs III-V:

### 2.2.1. Composés binaires :

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de 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. 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 [4], qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces [5]. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le Thallium ou le Bismuth donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'Indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau 3, résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

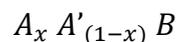
Composé III-V	Eg (ev)	m*/m <sup>0</sup>	μ (cm <sup>2</sup> /VS)	a (A°)
BN	7.5	-	-	3.6150
AIP	2.45	-	-	5.4510
AlAs	2.16	-	-	5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
BP	2.0	-	-	4.5380
GaN	3.36	0.19	380	a = 3.189 b = 5.185
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSp	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSp	0.17	0.0145	80000	6.4797

**Tableau 3 :** Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300 K [6,7].

### 2.2.2. Composés ternaires et quaternaires :

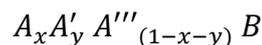
L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifiés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

- **Ternaires :** S'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux, soit :



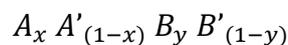
Exemple:  $Ga_x In_{(1-x)} P$ , lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court  $GaInP$ .

- **Quaternaires 1+3 :** S'il y a substitution de 3 atomes sur des sous réseaux soit :



Exemple :  $Ga_x In_y Al_{(1-x-y)} As$ .

- **Quaternaires 2+2 :** S'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux, soit :



Exemple:  $Ga_x In_{(1-x)} P_y As_{(1-y)}$ .

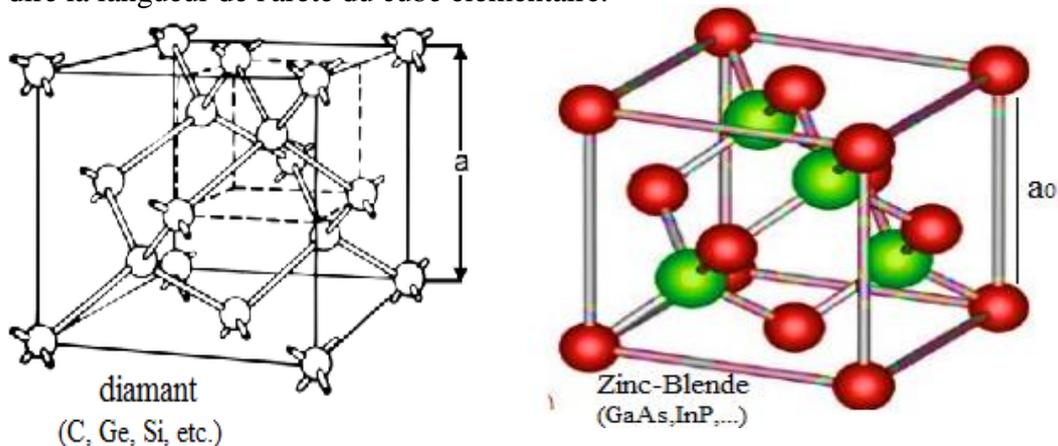
La plupart des solutions solides ainsi réalisées sont complètes, la loi de Vegard (relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition) est approximativement suivie, et on observe une évolution progressive et régulière des propriétés (dont la bande interdite et les paramètres cristallins) en fonction du taux de substitution [3].

### 2.3. Propriétés Physiques des semi-conducteurs III-V :

#### 2.3.1. Propriétés structurales : Structure cristalline :

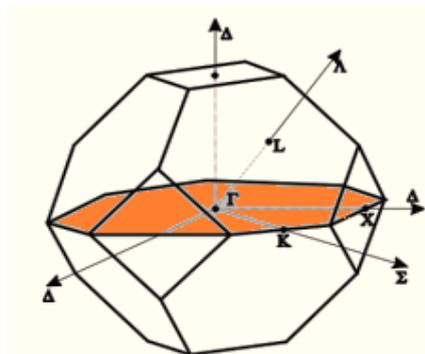
La plupart des matériaux III-V se cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure 5. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées C. F.C, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V [8].

Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité  $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$ ,  $a_0$  étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire.



**Figure 5 :** Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

La première zone de Brillouin pour la structure zinc-blende à la forme d'un octaèdre tronqué [9]. (Figure 6).



**Figure 6 :** Première zone de Brillouin de la structure zinc blende [9].



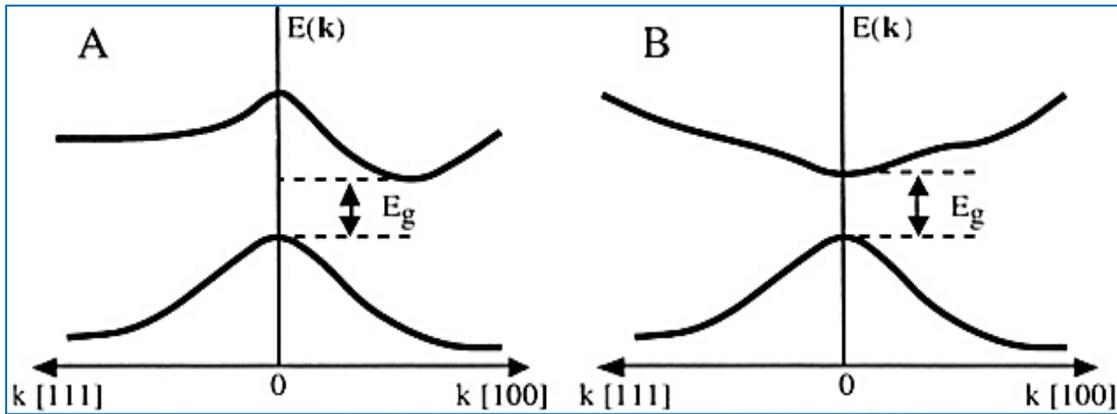


Figure 8 : Structure de bande d'énergie du : A-gap indirect et B-gap direct [13].

La plupart des matériaux III-V possèdent un gap direct. Dans ce cas le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont pour un même point  $k$  de la zone de Brillouin.

La largeur du gap varie en fonction de la température, généralement, cette variation est donnée par l'équation de Varshni [14]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \tag{I.5}$$

Où  $E_g(0)$  est l'énergie de bande interdite pour  $T = 0 K$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres servant à décrire la variation de la bande interdite en fonction de la température. En générale, les semi-conducteurs ont une bande énergétique entre zéro et 4 eV. (Figure 9)

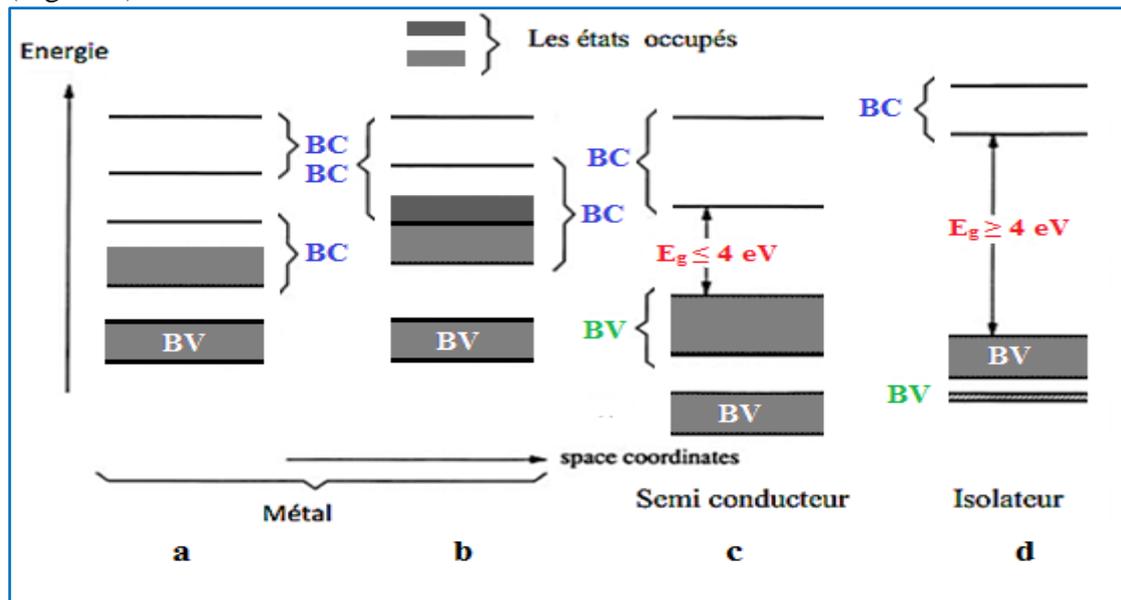


Figure 9 : Bandes d'énergies pour : a et b) Matériaux, c) Semi-conducteur d) Isolateur.

### 2.3.4. Propriétés optiques :

L'interaction d'un électron avec un photon se fait, comme toute interaction, avec conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. Les transitions optiques directes entre les extrémités des bandes de valence et de conduction apparaissent verticales radiatives dans le diagramme de bande des électrons. Dans le cas d'un semi-conducteur à bande interdite indirecte, les transitions optiques à travers le gap ne peuvent avoir lieu que grâce à une interaction supplémentaire : transitions obliques (non radiatives). (Figure8)

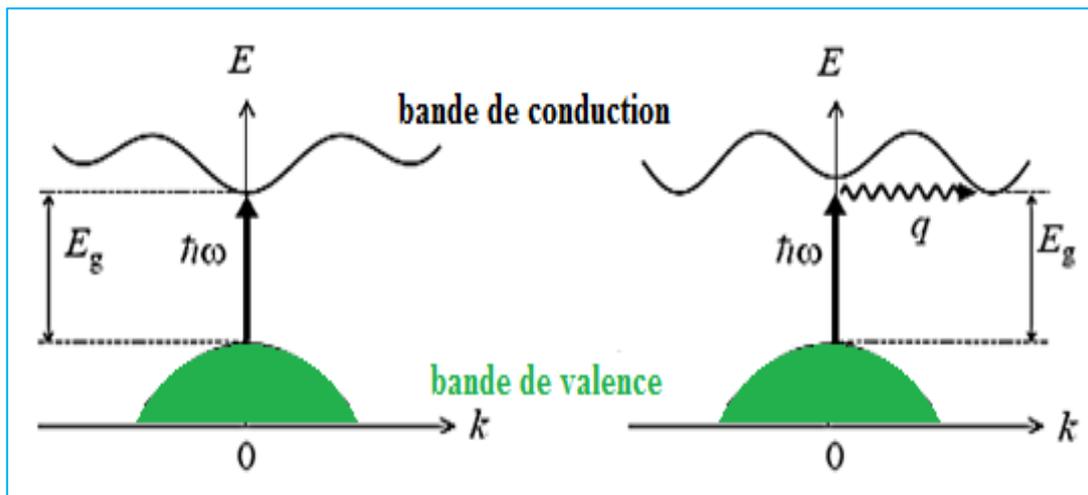


Figure 10 : Transitions optiques directes et indirectes [15].

#### Les caractéristiques optiques des matériaux sont :

- Le coefficient de réflexion R : 
$$R = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2} \quad (I.6)$$
- Le coefficient de transmission T : 
$$T = \frac{4n}{(n+1)^2 + \chi^2} \quad (I.7)$$

Où :

$\chi$  est le coefficient d'extinction.

$n$  est : l'indice de réfraction

En générale, l'indice de réfraction est lié à la constante diélectrique par la relation :

$$(n \approx \sqrt{\epsilon_r}).$$

### 3. Jonction PN :

#### 3.1. Définition :

Dans le cas des semi-conducteurs extrinsèques, il existe selon les atomes de dopage utilisés, le type N et le type P.

Dans les semi-conducteurs de type P c'est les trous qui sont majoritaires et les électrons qui sont minoritaires soit :  $p_p \gg n_p$ .

Dans les semi-conducteurs de type N les électrons sont majoritaires et les trous sont minoritaires soit :  $n_n \gg p_n$ .

Si avec de tels semi-conducteurs on réalise un contact « intime » entre un semi-conducteur de type N et un semi-conducteur de type P, on obtient ce qu'on appelle une JONCTION PN. [16]. (figure 11)

Afin de former une jonction PN, plaçons-nous à la température ordinaire de  $300^\circ\text{K}$ , et supposons qu'à cette température toutes les impuretés de dopage, aussi bien du côté P que du côté N, sont ionisées.

Dans ce cas il y aura autant des trous libres que d'ions négatifs accepteurs dans les semi-conducteurs de type P et il y aura autant les électrons libres que d'ions positifs donneurs dans les semi-conducteurs de type N. Cette égalité de charge est due au fait que le semi-conducteur de type P ou N est électriquement neutre.

Mais lorsque le contact est établi un gradient de concentration en électrons et en trous apparaît de part et d'autre de la surface de contact. Un tel gradient de concentration existe parce que d'un côté les électrons sont majoritaires (côté N) et à l'autre côté ils sont minoritaires (côté P); la même chose pour les trous. Il y aura donc :

- Diffusion des électrons vers la région P et des trous vers la région N.
- Recombinaison avec les porteurs majoritaires dans ces régions [16].

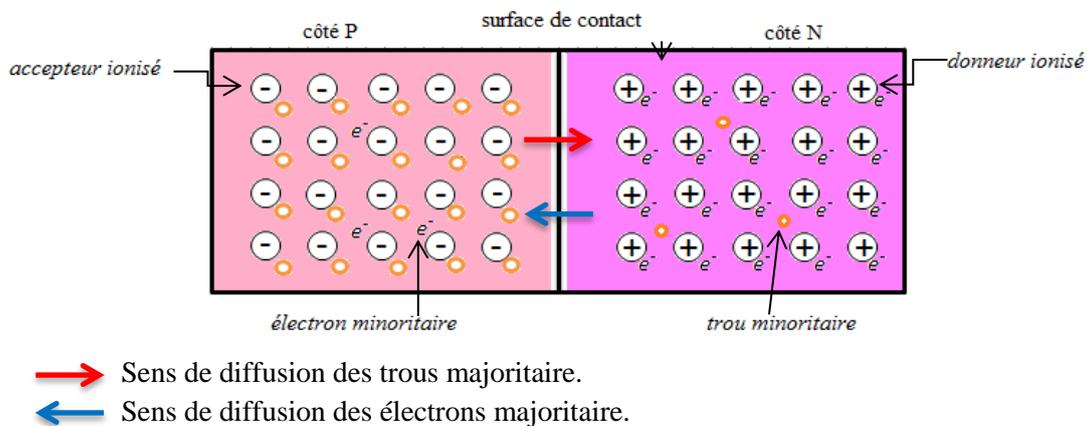


Figure 11 : Jonction PN [16].

### 3.2. Jonction PN à l'équilibre :

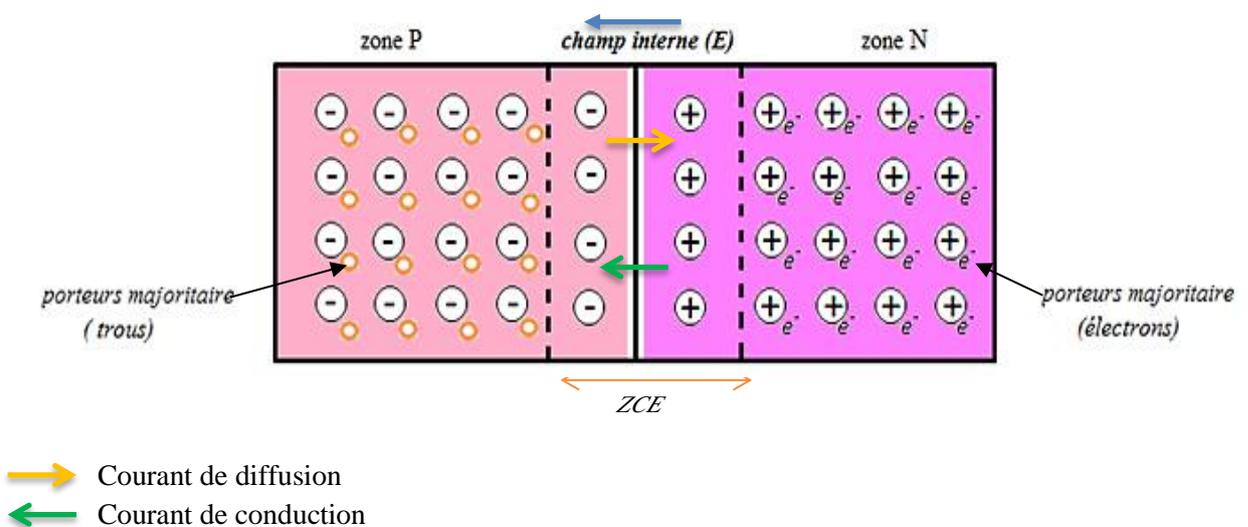
Les porteurs majoritaires du côté P sont les trous, du côté N les électrons. Il existe donc de part et d'autre de la jonction de fortes différences de concentration en trous et électrons. Sous l'effet des gradients qui en résultent, les trous ont tendance à diffuser de la zone P vers la zone N, et les électrons de la zone N vers la zone P, donnant ainsi naissance à un courant de diffusion dû aux porteurs majoritaires (figure 12).

Les recombinaisons entre charges mobiles de signes opposés sont très nombreuses à proximité immédiate de la jonction: il ne reste dans les régions que les charges fixes, ions négatifs du côté P, ions positifs du côté N, qui font disparaître localement la neutralité électrique. Dans cette zone dite : la zone de déplétion ou la zone de charge d'espace (ZCE), apparaît un champ électrique ( $E$ ) dirigé de la zone N vers la zone P. Ce champ crée un courant de conduction dû aux porteurs minoritaires.

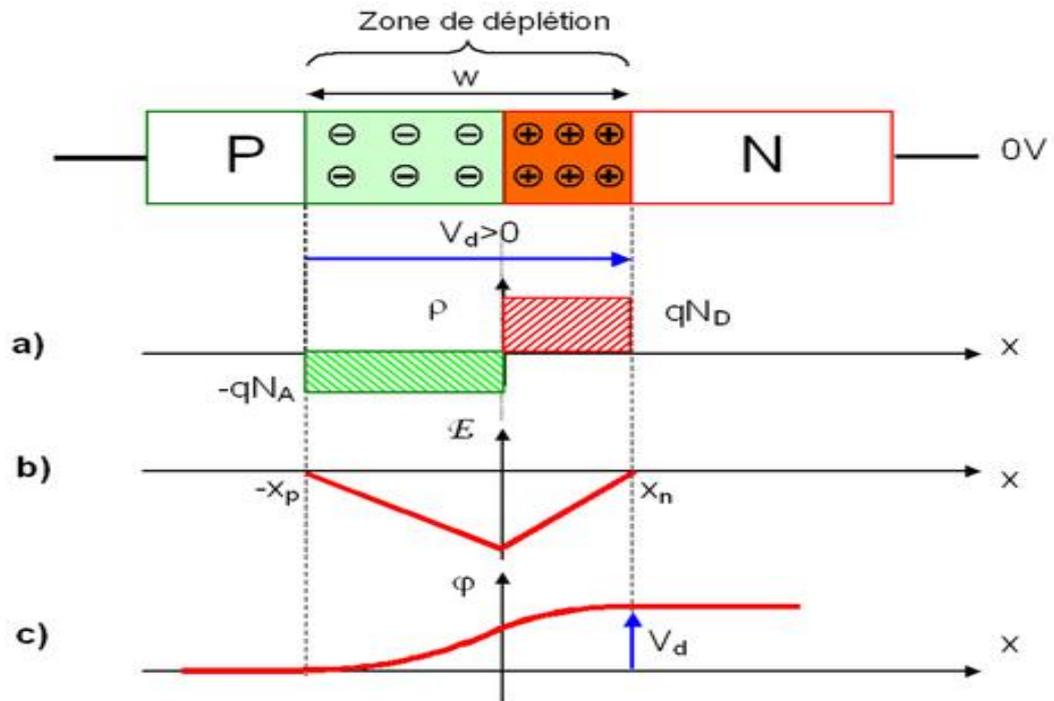
A l'équilibre, aucun courant ne pouvant traverser la jonction isolée, ce courant de conduction compense le courant de diffusion dirigé en sens inverse.

Puisque les charges mobiles disparaissent deux à deux lors des recombinaisons, la charge positive localisée du côté N de la jonction est égale à la charge négative localisée du côté P. En dehors de la zone de déplétion, le champ électrique est nul, comme le sont les gradients de concentration en porteurs [17].

Le potentiel électrostatique varie dans la zone de la jonction PN et la d.d.p.  $V_d$ , appelée **tension de diffusion**, atteint des valeurs non négligeables (exp : 0,8V pour le silicium) [18]. (Figure 13)



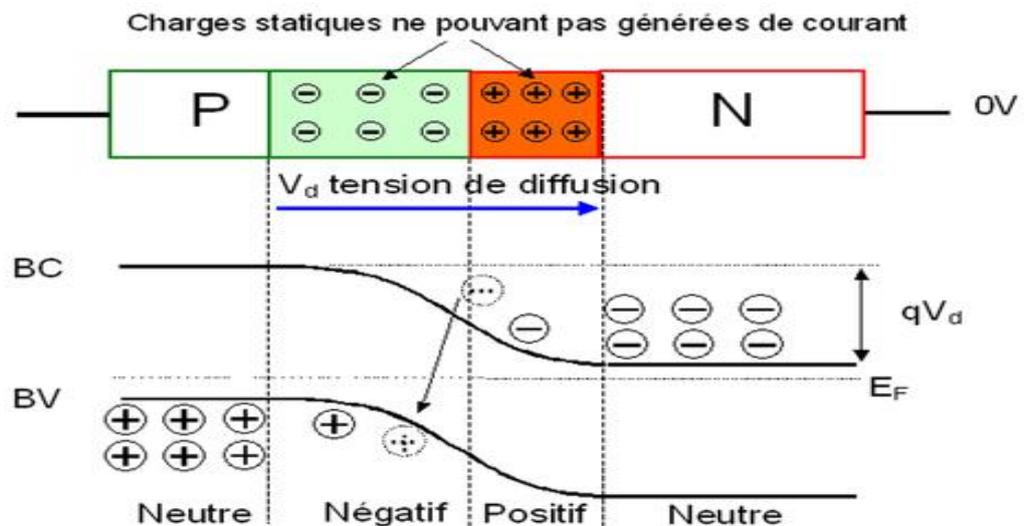
**Figure 12 :** Etat d'équilibre d'une jonction PN.



**Figure 13:** Etat d'équilibre d'une jonction PN :

a) Densité de charge. b) Champ électrique. c) Potentiel électrostatique.

Pour la jonction à l'équilibre, le niveau de Fermi du côté P et du côté N est identique. Le diagramme d'énergie de la jonction PN comporte donc une courbure des bandes de conduction et de valence. Cette courbure fait apparaître une différence d'énergie potentielle électrostatique de  $V_d$  (figure 14) [18].



**Figure 14 :** Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre.

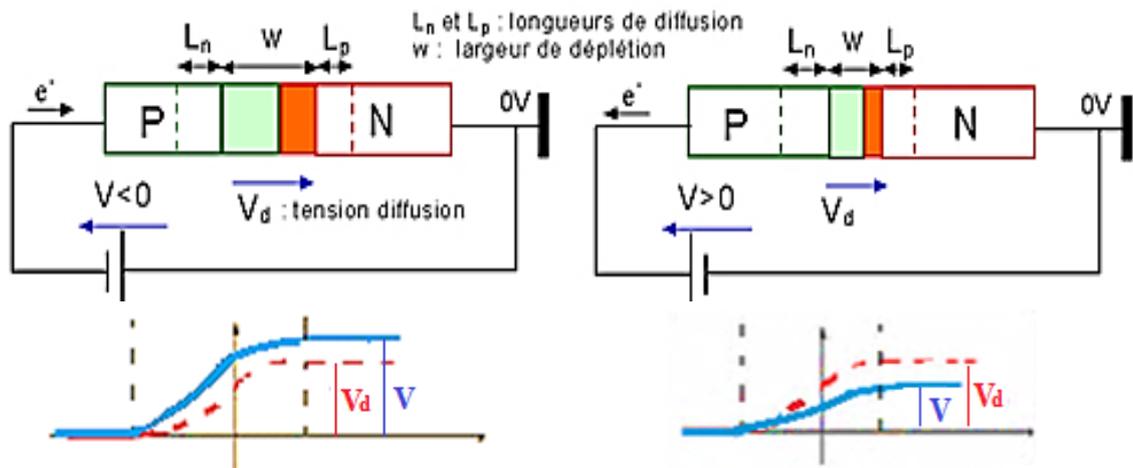
### 3.3. Jonction polarisée par une tension continue :

Polarisation d'une jonction PN consiste à imposer une différence de potentiel entre les régions N et P. On distingue alors deux types de polarisation :

- Polarisation directe.
- Polarisation inverse.

**a. Polarisation directe ( $V_n - V_p < 0$ ):** On parle de polarisation directe lorsque le potentiel du côté P est supérieur à celui du côté N une polarisation directe abaisse la barrière de potentiel (figure 15.a), ce qui favorise la diffusion des porteurs majoritaires de chaque région vers l'autre et donc donner naissance à un courant direct (de diffusion).

**b. Polarisation inverse ( $V_n - V_p > 0$ ):** le potentiel est plus faible du côté P que du côté N. Il y a dans ce cas injection de porteurs minoritaires de chaque côté (injection de trous côté N et d'électrons côté P). Elle élève la barrière de potentiel (figure 15.b) et peut annuler le courant de diffusion, il reste alors le seul courant inverse (ou courant de saturation  $I_s$ ) [19].



**Figure 15 :** Jonction PN : a) polarisée en sens inverse. b) polarisée en directe.

### 4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce premier chapitre les caractéristiques et les propriétés physique des matériaux III-V tant sur le plan structurel, qu'électronique et optique.

De plus, nous avons aussi étudié la jonction PN à l'équilibre thermodynamique et la jonction avec polarisation directe ou indirecte.

## 1. Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Il est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction **PN** au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque (figure 16):

- L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

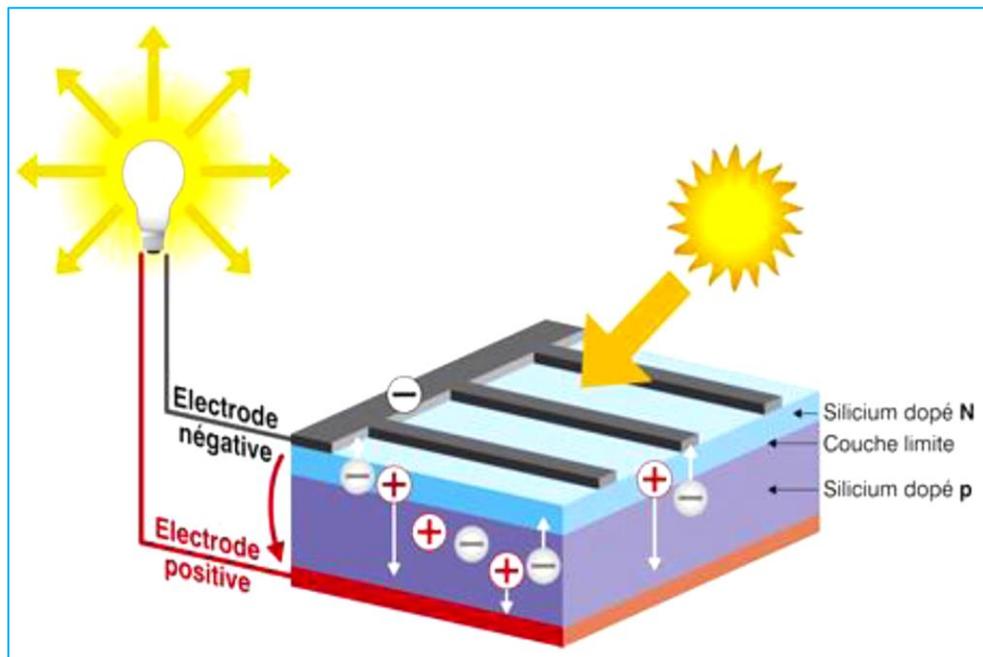


Figure 16 : Effet photovoltaïque [20].

## 2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Avant décrire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de présenter le rayonnement solaire qui est la source d'énergie incidente. Mais commençons d'abord par un rappel historique des dates importantes de la découverte de l'effet photovoltaïque à la réalisation de cellules photovoltaïques.

### 2.1. Historique de l'effet photovoltaïque :

L'effet photoélectrique (ou photovoltaïque) consiste à transformer directement la lumière en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules ou panneaux photovoltaïques composés de cellules solaires ou photopiles qui réalisent cette conversion.

Le mot « **photovoltaïque** » vient du grec « photos » qui signifie lumière « Volta » du nom du physicien italien Alessandro Volta qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Donc le photovoltaïque signifie électricité lumineuse.

Quelques dates importantes :

- 1839 : Le Physicien français ANTOINEBECQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet photovoltaïque.
- 1873 : Découverte de la photoconductivité du sélénium par Willoughby Smith.
- 1875 : WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- 1954 : Trois chercheurs américains : Gerald Pearson, Daryl Chaplin et Calvin Fuller.

Mettent au point une cellule photovoltaïque à base de silicium au Bell-Labos.

- 25 avril 1954 : Présentation de la première cellule photovoltaïque.
- 1958 : Une cellule est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïque est construite à l'Université de Delaware.
- 1985 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.

L'énergie photovoltaïque eut regain d'intérêt dans les années 1950 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires. Les crises économiques des années 1970 (flambée des prix du pétrole, 1973) puis les accidents de centrales nucléaires tels ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986) jetèrent un discrédit sur les énergies fossiles et atomiques et renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables. [21]

Actuellement, l'énergie photovoltaïque s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.

## 2.2. Interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux :

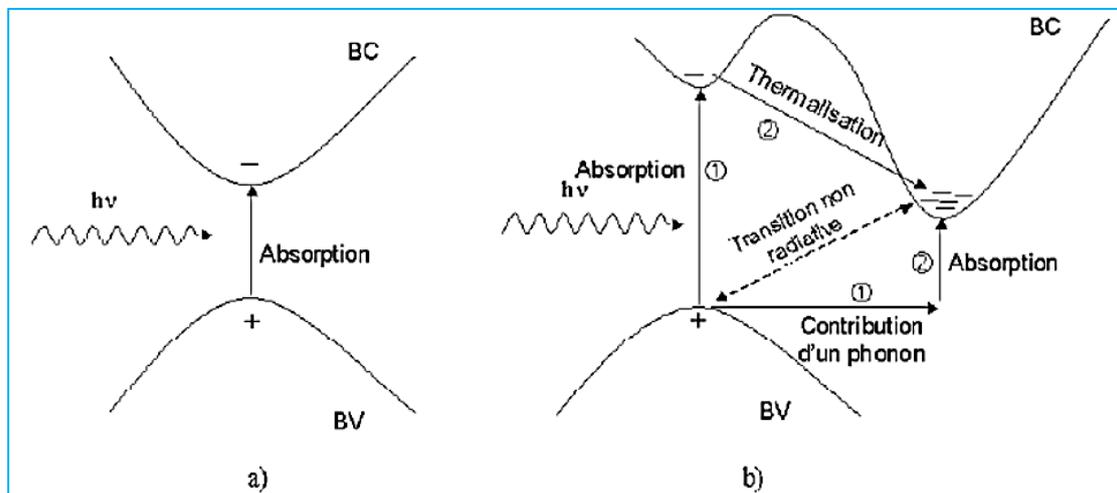
Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est important de décrire les phénomènes qui régissent l'interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux.

L'interaction rayonnement/semi-conducteur Les trois processus qui peuvent se produire lors de l'interaction rayonnement/semi-conducteur sont :

- l'absorption fondamentale qui représente le passage d'un électron d'un état occupé de la bande de valence à un état vide de la bande de conduction après l'absorption d'un photon,
- l'émission spontanée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence avec émission d'un photon,
- l'émission stimulée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence suite à l'absorption d'un photon avec l'émission d'un deuxième photon [22].

Ces différents processus sont fonction du type de semi-conducteur. Nous devons distinguer les semi-conducteurs à bande interdite directe et ceux à bande interdite indirecte. Un semi-conducteur est à bande interdite directe quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont obtenus pour une même valeur du vecteur d'onde  $k$  (voir figure 17 (a)). Les transitions bande à bande (de la bande de conduction vers la bande de valence) sont radiatives (émission spontanée) et sont favorisées avec ce type de semi-conducteur utilisé en optoélectronique (matériau III-V en général comme le GaAs).

Un semi-conducteur est à bande interdite indirecte quand le minimum de la bande de conduction est décalé par rapport au maximum de la bande de valence dans l'espace des  $k$ . Les transitions bande à bande impliquent un changement de vecteur d'onde  $k$  et sont donc non-radiatives (voir figure 17 (b)). Ceci est le cas même si avec un photon de plus grande énergie, un électron peut être directement excité vers un minimum relatif de la bande de conduction et se thermalise dans le minimum absolu de la bande de conduction. La transition d'un électron dans un matériau à bande interdite indirecte est assistée par un phonon absorbé ou émis par l'électron afin que son vecteur d'onde corresponde au maximum de la bande de valence pour absorber un photon [22].



**Figure 17 :** Transitions bande à bande dans un semi-conducteur (a) à bande interdite directe et (b) à bande interdite indirecte [22].

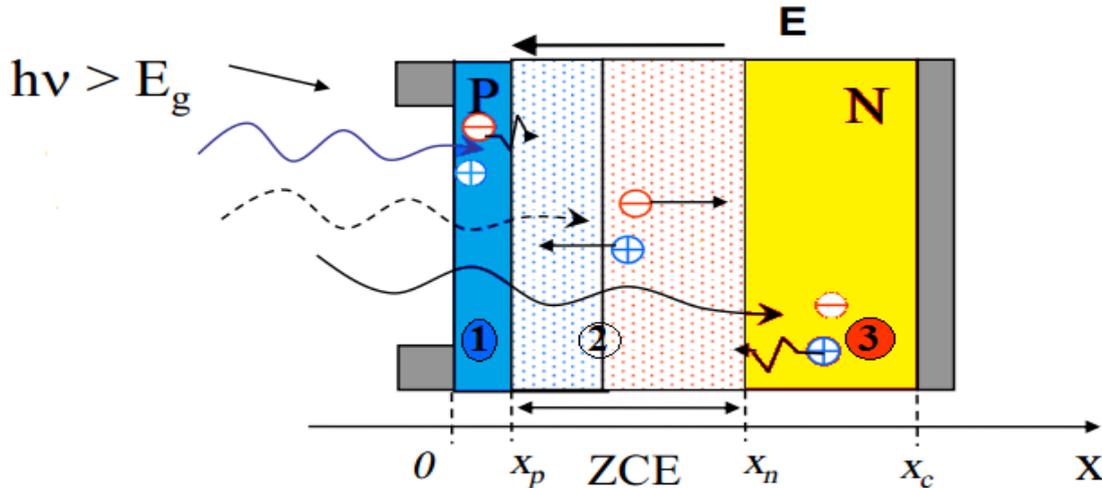
### 2.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [23]:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires (électron/trou) dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires (électron/trou) créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. d'autres structures, comme hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 18, ci-dessous :



**Figure 18:** Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires.
- On aura un photocourant de diffusion ;
- Dans la zone de charge d'espace, les paires (électron / 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.

3. Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique figure 19. Il est en effet composé de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\vartheta = h \frac{c}{\lambda}$$

Où :

$h$  : La constante de Planck.

$c$  : la vitesse de la lumière

$\vartheta$  : La fréquence

$\lambda$  : La longueur d'onde.

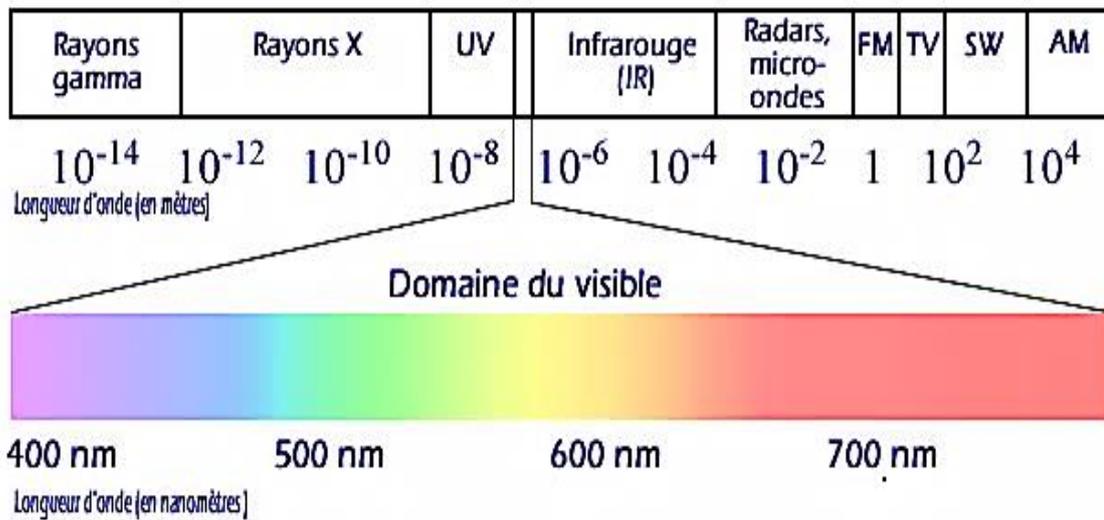
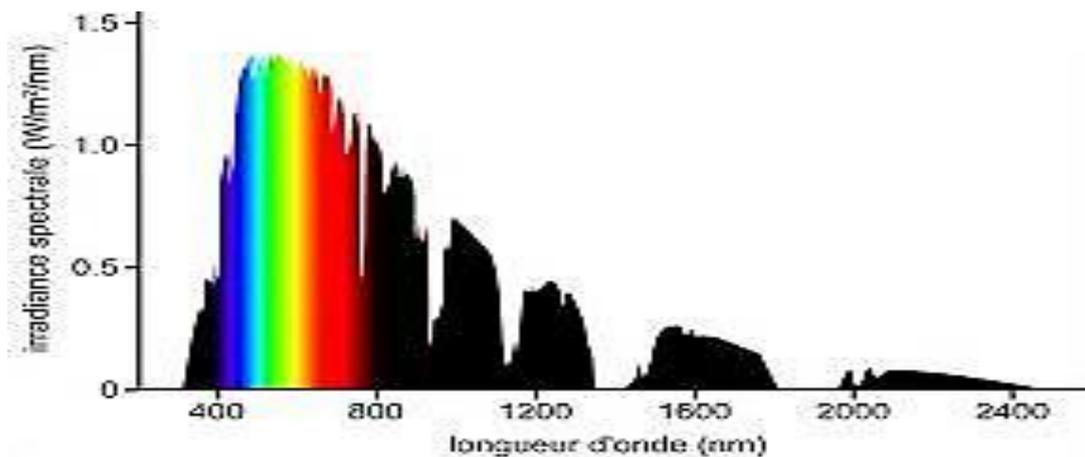


Figure 19 : Spectre électromagnétique du visible [24].

<i>Le spectre de lumière visible</i>	
<i>Couleur</i>	<i>Longueur d'ondes (nm)</i>
<i>Rouge</i>	<i>622-780</i>
<i>Orange</i>	<i>597-622</i>
<i>Jaune</i>	<i>577-597</i>
<i>Vert</i>	<i>492-577</i>
<i>Bleu</i>	<i>455-492</i>
<i>Violet</i>	<i>390-455</i>

**Tableau 4 :** Plage des longueurs d'onde du spectre visible [25].

Le soleil émet de la lumière de l'ultraviolet aux infrarouges en passant par le visible du spectre électromagnétique. L'irradiante solaire a la plus grande ampleur aux longueurs d'onde visibles et un pic dans le bleu-vert.



**Figure 20 :** Spectre de rayonnement solaire.

En règle générale, les cellules solaires sont produites pour être exposées à la lumière du soleil. L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base donc sur le spectre solaire.

Les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération des paires électrons-trous.

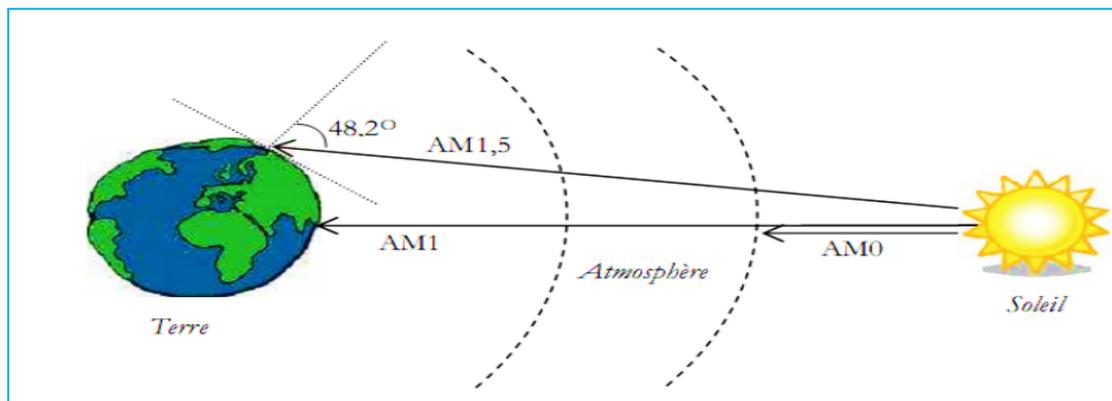
- ✓ Si  $h\nu < E_g$  le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur qui est donc transparent pour cette longueur d'onde.
- ✓ Si par contre  $h\nu > E_g$  les photons seront absorbés.

#### 4. Masse d'air :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 *microns* ( $\mu m$ ). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu m$ )
- 47% dans la bande visible ( $0.4 \text{ à } 0.8 \mu m$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu m$ )

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1.37 \text{ KW}/m^2$  avec un spectre centré au voisinage de  $\lambda = 0.48 \mu m$



**Figure 21 :** Différentes constantes d'illumination [26].

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre n'est plus que de  $0.9 \text{ KW}/m^2$ . Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise la masse d'air ou *Air Mass* en anglais (figure 21), défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos \alpha}$$

Où  $\alpha$  représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale

AM 0 : représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère, sa puissance est de  $1365 \text{ W}/m^2$

AM 1 : correspond au soleil à la verticale ( $\alpha = 0^\circ$ ) avec une puissance d'incidence de  $925 \text{ W}/m^2$

AM 1.5 : défini par l'angle ( $\alpha = 48.2^\circ$ ) au-dessus de l'horizon, d'une intensité de  $844 \text{ W}/m^2$  est approprié pour les applications terrestres.

AM 2 : est obtenu pour un angle de ( $\alpha = 60^\circ$ ) et à une puissance d'environ  $691 \frac{W}{m^2}$ .

Le spectre solaire est représenté sur la figure 22, le tableau 5 montre un résumé des différentes distributions spectrales.

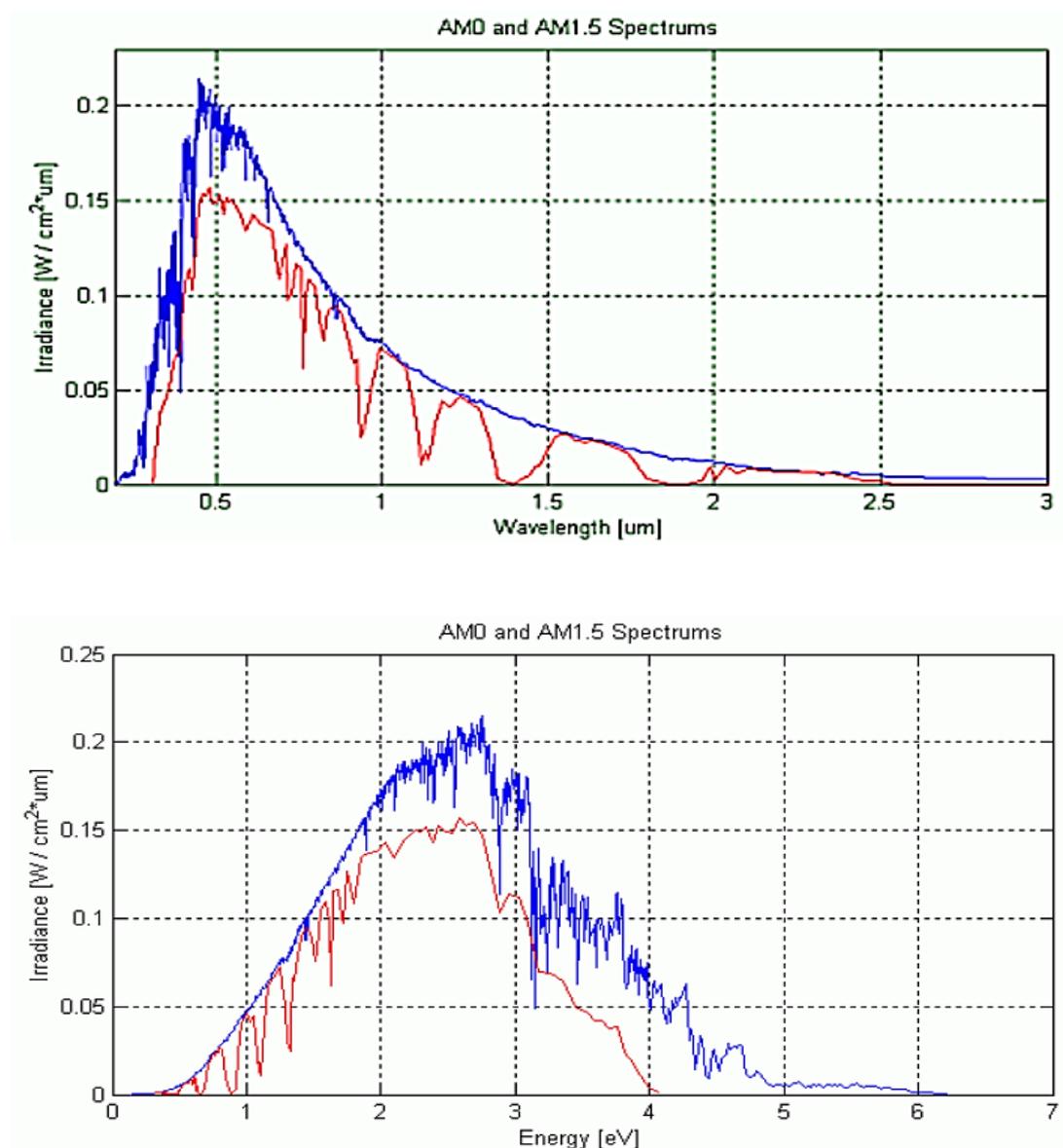


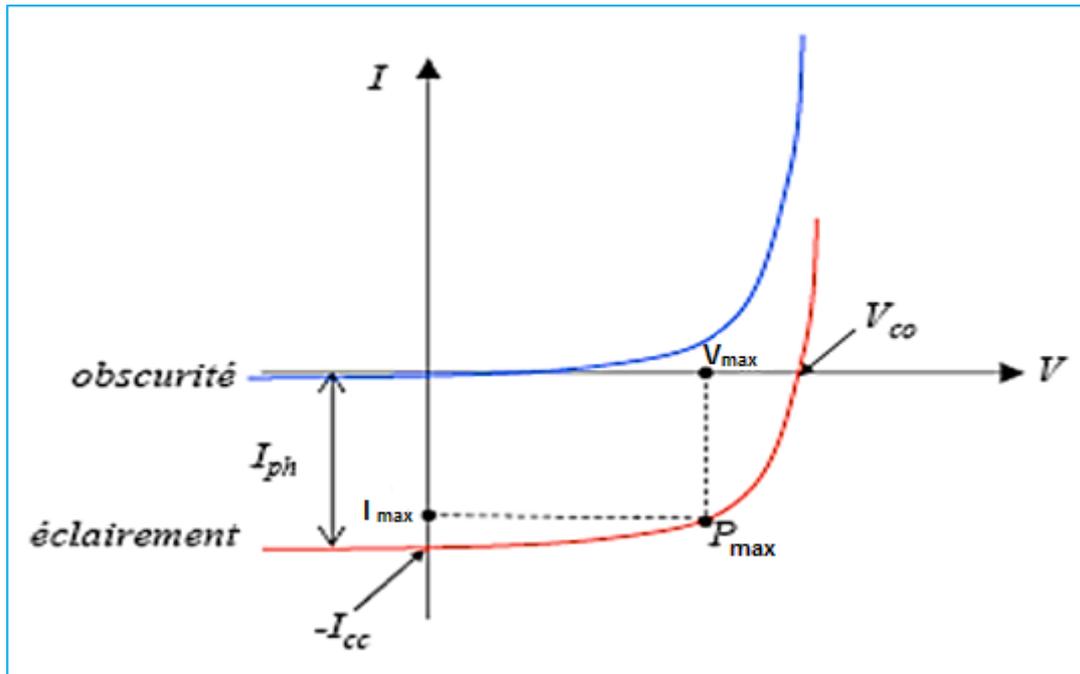
Figure 22 : Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge) [27].

Hauteur	Position du soleil	Irradiance (intensité, puissance) (W/m <sup>2</sup> )	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère	-	1365	AM0
Surface	$\alpha = 90^\circ$	925	AM1
Surface	$\alpha = 48.2^\circ$	844	AM1.5
Surface	$\alpha = 60^\circ$	691	AM2

Tableau 5 : Résumé des différentes distributions spectrales [27].

### 5. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque :

La variation du courant « A » (ou densité du courant « A/cm<sup>2</sup>») en fonction de la tension « V », à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule photovoltaïque la figure 23, montre deux exemples de caractéristiques I(V) de cellule photovoltaïque sans et avec éclairage.



**Figure 23 :** Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque; à l'obscurité et sous éclairage [28].

### 6. Circuit électrique équivalent :

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.). L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$ . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I(V) peut être représenté par la relation suivante [29] :

$$I_{obs} = I_s \left( \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Où :

$I_s$  : le courant de saturation en Ampère (A).

$n$  : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

$V_{th}$  : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.2})$$

Où :

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ).

$T$  : la température absolue en Kelvin (K).

$q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

Sous éclairage, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante [29] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

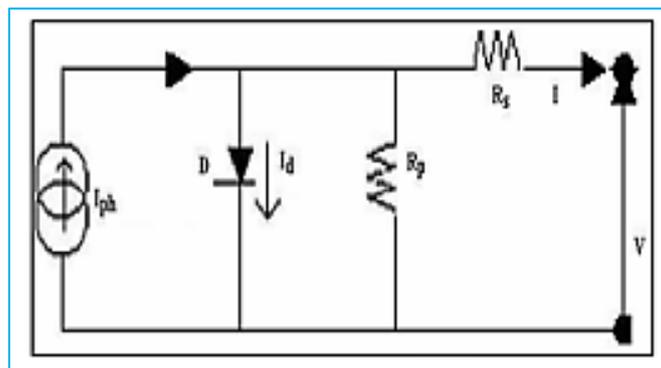
Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors [28].

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ( $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$ ) pour écrire l'équation (II.4) sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (\text{II.5})$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure 24, par un générateur de courant ( $I_{ph}$ ), une diode et deux résistances parasites ( $R_s$ ) et ( $R_{sh}$ ).



**Figure 24 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction PN [29].

- Le générateur du courant ( $I_{ph}$ ) : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénéré.
- La diode (D) : modélise la jonction PN
- La résistance série  $R_s$  : modélise [30] les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau; il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension  $V_j$  aux bornes de la jonction PN. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La résistance parallèle  $R_p$  (résistance shunt  $R_{sh}$ ) : correspond [30] à une résistance de fuite entre les deux zones P et N de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

## 7. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

À partir de la caractéristique  $I(V)$  sous éclairage illustrée au-dessus dans la figure 23, on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [31];  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{max}$  et  $V_{max}$  :

### 7.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ( $V = 0$ ). D'où, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (II.4), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme  $I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}} \right) - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.7})$$

Dans le cas idéal [32] ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_{sh} \rightarrow \infty$ ) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (\text{II.8})$$

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  se confond avec le photo courant  $I_{ph}$  :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{II.9})$$

### 7.2. Tension en circuit ouvert $V_{co}$ :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

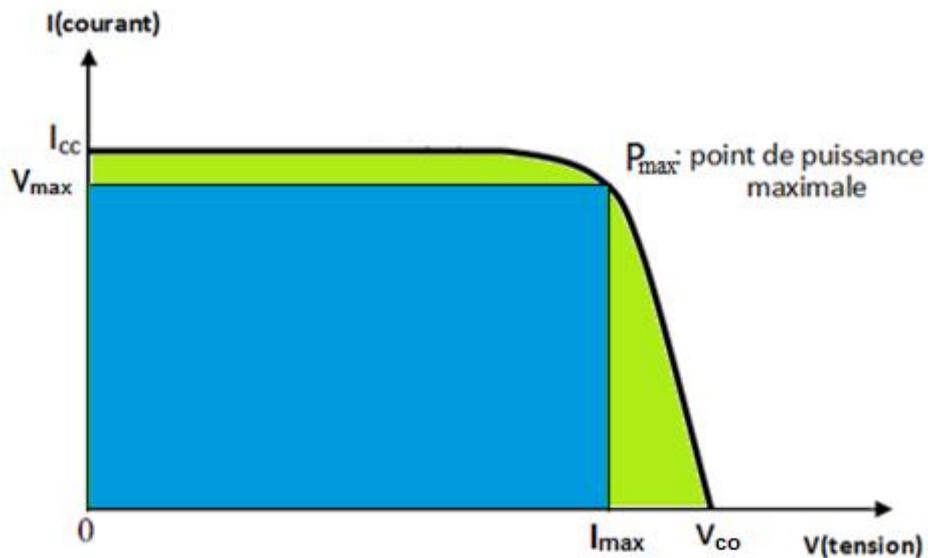
$$V_{co} = nV \log \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.10})$$

### 7.3. Point du fonctionnement $P_{max}$ ( $V_{max}$ , $I_{max}$ ) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (\text{II.11})$$

Elle traduit sur la caractéristique I(V) le point du fonctionnement  $P_{max}$  ( $V_{max}$  ,  $I_{max}$ ) qui est situé au coude de la caractéristique I(V) et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension  $V_{max}$  et du courant  $I_{max}$  appelées également tension et courant maximums respectivement. (Figure 25)



**Figure 25:** Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

#### 7.4. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini [30] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ); d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (II.12)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance  $P_{max}$  sera égale à ( $I_{cc} \times V_{co}$ ). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, s'appelle le rendement  $\eta$  :

#### 7.5. Rendement $\eta$ :

Il est défini [30] comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si : « S » est la surface de la cellule (en  $m^2$ ) et « E » est l'éclairement -irradiante (en  $W/m^2$ ) le rendement énergétique s'écrit :

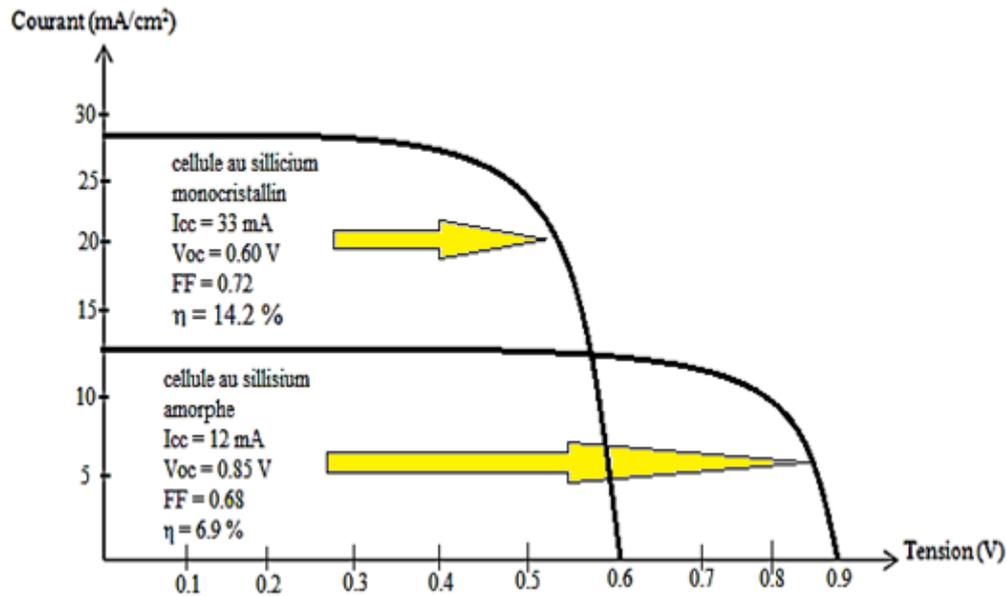
$$\eta = \frac{P_{max}}{S \times E} \quad (II.13)$$

Ou d'après (II.12) :  $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (II.14)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conceptions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1kW.m^{-2}$ , à une température de  $25^\circ C$  et sous un spectre AM1.5, Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Condition.

Sous ces conditions on compare sur la figure 26, les performances typiques d'une cellule au silicium cristallin et d'une cellule au silicium amorphe simple jonction [33].



**Figure 26:** Caractéristique courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une cellule au silicium cristallin amorphe simple jonction.

## 8. Différentes structures des cellules photovoltaïques :

On utilise différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement.

On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures.

### 8.1. Cellules à base de silicium cristallin :

Les premiers panneaux photovoltaïques ont été fabriqués avec du silicium cristallin. Ces cellules utilisent des jonctions PN.

### 8.2. Cellules photovoltaïques en couches minces :

Ces cellules sont composées d'une couche mince de semi-conducteur entre 10  $\mu\text{m}$  à 100-200  $\mu\text{m}$  déposée sur un substrat tel que le verre, plastique, céramique, métal ou graphite.

Les couches fines de silicium Si, d'arsenic de Gallium GaAs, de tellure de cadmium CdTe et de CIGS sont déposées sur le substrat par épitaxie en phase vapeur.

L'inconvénient des cellules CIGS est que le sélénium, l'indium et le gallium sont des cellules à base de tellure de cadmium CdTe est la forte absorption du tellure de cadmium mais le cadmium est toxique s'il est libéré.

Les cellules à base de ces matériaux ont un rendement de conversion entre 16% et 32%. [34].

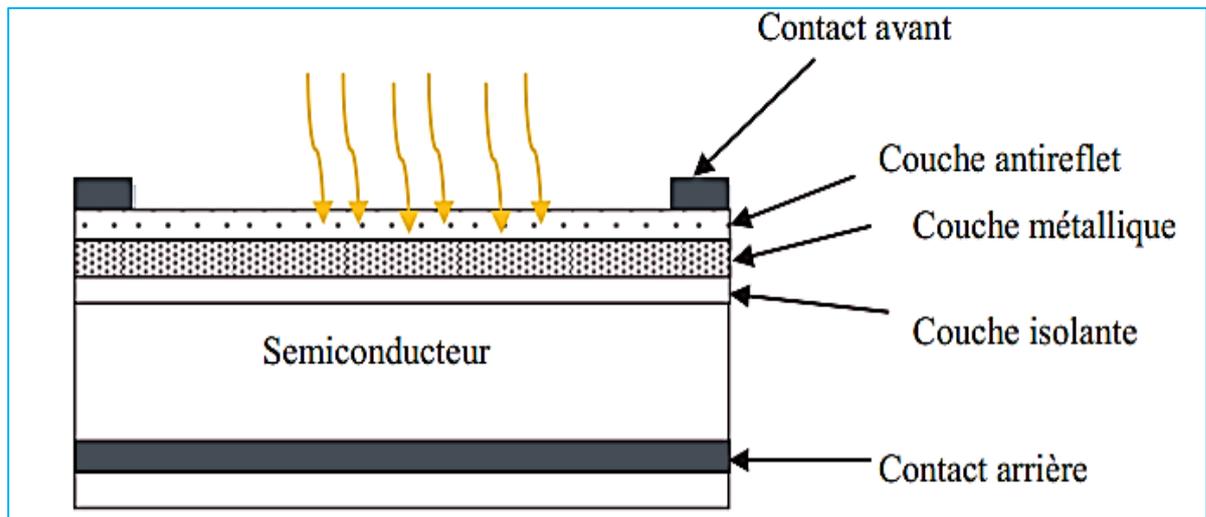
L'avantage des cellules en couche fine c'est qu'on utilise moins de matériaux donc elles sont moins coûteuses.

### 8.3. Hétérostructures :

Les hétérostructures sont formées par des matériaux différents soit un métal-isolant-semi-conducteur (MIS), métal-semi-conducteur (Schouky), SC1- SC2déposé l'un sur l'autre.

#### 8.3.1. Structure MIS :

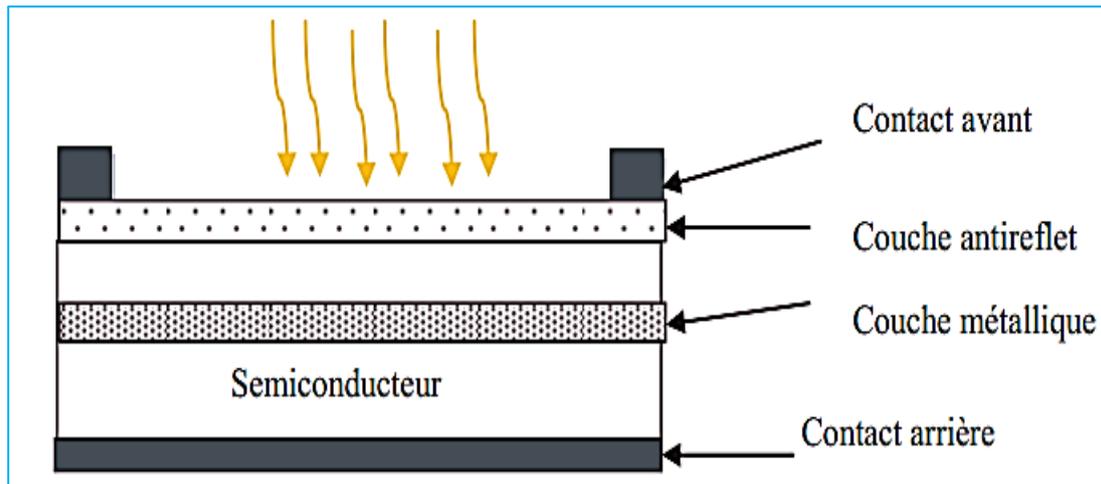
La structure métal-isolant-semi-conducteur est constituée de trois couches : le substrat semi-conducteur sur lequel on a déposé une couche isolante sur laquelle on a déposé une électrode métallique. L'isolant est le  $\text{SiO}_2$ , c'est un diélectrique transparent et anti réfléchissant. La cellule solaire à structure MIS est représentée dans la figure 27.



**Figure 27 :** Cellule solaire à structure MIS.

#### 8.3.2. Structure Schottky :

La structure Schottky est un contact entre un métal et un semi-conducteur. La cellule solaire à structure Schottky est représentée dans la figure 28.



**Figure 28 :** Cellule solaire à hétérojonction de type Schottky.

### 8.3.3. Semiconducteur1-semiconducteur2 :

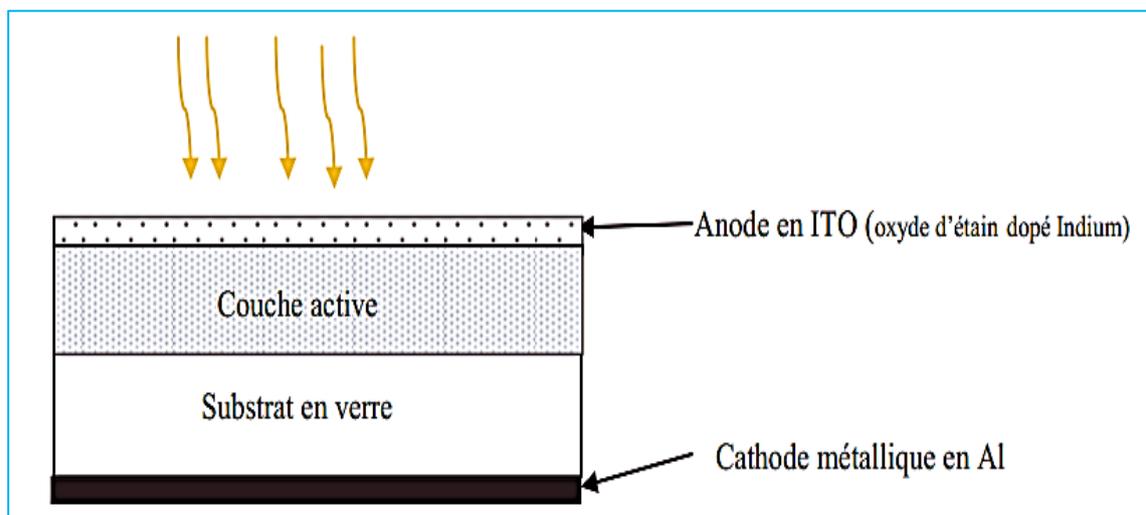
La structure semi-conducteur 1 - semi-conducteur 2 est appelée cellule solaire photovoltaïque à hétérojonction. C'est une jonction formée de deux semi-conducteurs de matériaux différents et de gap différents  $E_{g1}$  (gap du semi-conducteur 1) et  $E_{g2}$  (gap du semi-conducteur 2).

Le semi-conducteur 1 est de type n est déposé sur le semi-conducteur 2 de type p.

### 8.4. Cellules photovoltaïques organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organique, tel que les polymères. Leurs rendement est de 5% [35].

La structure de la cellule organique est montrée dans la figure 29.



**Figure 29 :** Cellule solaire organique

La couche active est composée deux matériaux l'un donneur d'électron comme une chaîne de polymère et l'autre accepteur d'électron comme le fullerène. Quand on éclaire la cellule on a un transfert d'électrons du polymère à la molécule de fullerène.

L'avantage de ces cellules c'est qu'on peut réaliser des grandes surfaces. Elles sont légères flexibles et leur coût de fabrication est faible.

### 8.5. Cellules hybrides :

C'est une nouvelle génération de cellules solaire, elles sont moins chères. Elles utilisent des matériaux organiques et inorganiques à base de semi-conducteur nanostructure.

Ces cellules sont mobiles et malléables. Parmi ces cellules, nous avons les cellules Grätzel. Ce sont des cellules nanocristallines à colorant. Elles sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique.

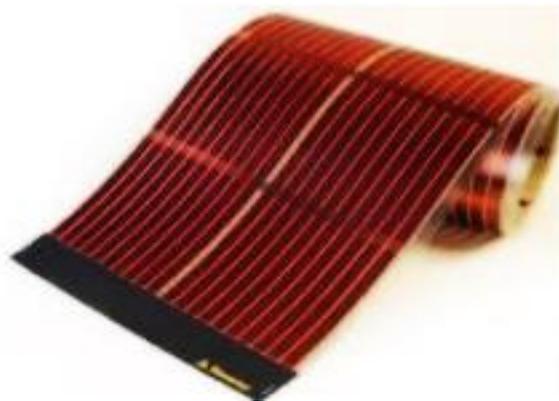


Figure 30 : Image d'une cellule Grätzel [36].

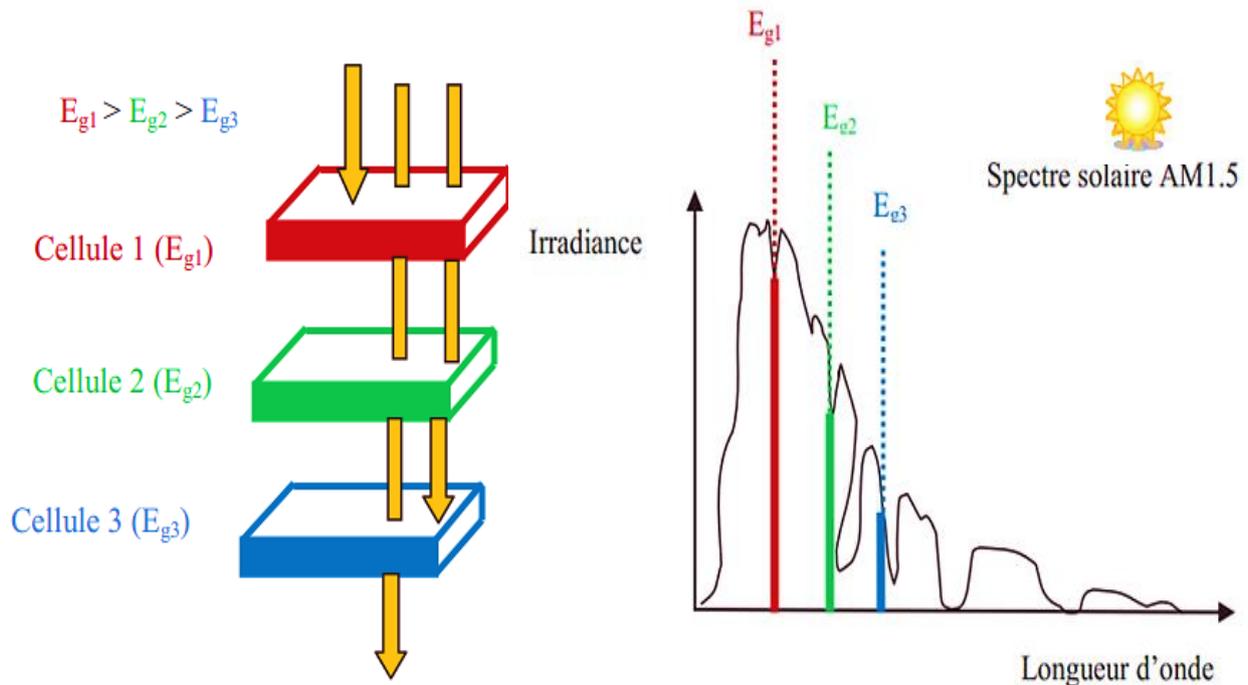
### 8.6. Cellules multijonctions :

Les cellules multijonctions sont appelées cellules de troisième génération. C'est plusieurs couches de matériaux déposées l'une sur l'autre. Les matériaux utilisés sont les semi-conducteurs III-V. Elles se composent de plusieurs jonctions p-n.

On améliore le rendement par rapport aux cellules simples ce qui permet d'atteindre des rendements de plus de 40% [37]. Elles sont utilisées pour des applications spatiales. Parmi les structures multi jonctions on a la cellule Tandem.

### 8.6.1. Cellules Tandem :

La cellule Tandem c'est l'empilement de plusieurs cellules l'une sur l'autre avec des gaps décroissant pour élargir le spectre d'absorption figure 31. Ce sont des cellules qui utilisent des semi-conducteurs comme le GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc



**Figure 31** : Structure de cellule Tandem.

Dans notre travail, nous allons utiliser cette structure avec les matériaux III-V puisqu'elle permet d'améliorer le rendement par rapport aux autres structures. [37]

## 9. Conclusion :

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés au principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, tout en précisant les notions de base, et le rayonnement solaire. Les structures photovoltaïques ont été détaillées.

De plus, nous avons cité les différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement.

**Introduction :**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la structure Tandem. Nous présenterons, dans un premier temps, les modèles utilisés pour la simulation, ensuite la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés. Ces paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques. Nous présenterons aussi les résultats obtenus de la simulation numérique à deux dimensions, sous TCAD\_Silvaco, de la structure Tandem.

**1. Modèles utilisés pour la simulation sous TCAD\_Silvaco**

L'exactitude des simulations numériques dépend fortement du choix des modèles physiques utilisés pour décrire le fonctionnement de la cellule solaire. Dans le cas de la structure Tandem, nous utilisons les modèles suivants :

- recombinaison Shockley Read Hall,
- recombinaison Auger,
- recombinaison en surface.

Dans les paragraphes suivants, nous décrirons en détail chacun de ces modèles.

**1.1. Simulation électrique sous TCAD\_Silvaco :**

La simulation électrique par TCAD\_Silvaco (Annexe. II) est basée sur la résolution numérique des trois équations fondamentales de transport de charges dans les semi-conducteurs qui sont respectivement l'équation de Poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous. La statistique de Boltzmann détermine la concentration des porteurs. Après le maillage de la structure étudiée, le simulateur évalue numériquement la résolution de ces équations à chaque nœud du maillage. L'équation de Poisson s'exprime par [6]:

$$\overrightarrow{div}(\varepsilon \cdot \varphi) = q(n - p + N_A^- - N_D^+) \quad (\text{III .1})$$

Avec :

$\varepsilon$ : La permittivité électrique ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative du matériau)

$\varphi$  : Le potentiel électrostatique

$q$ : La charge élémentaire ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

$n, p$  : Les densités d'électrons et de trous libres.

$N_D^+, N_A^-$  : Les densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

Les équations de continuité s'expriment par :

$$\text{Pour les électrons : } \quad \text{div } \vec{j}_n = qR_n + q \frac{\partial n}{\partial t} - qG_n \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Pour les trous : } \quad \text{div } \vec{j}_p = qR_p + q \frac{\partial p}{\partial t} - qG_p$$

Où  $R$ , représente le taux de recombinaison électron-trou ( $G$ , le taux de génération) et  $j_n$  et  $j_p$  sont respectivement les densités de courant d'électrons et de trous.

Les densités des porteurs sont calculées par le modèle de Dérive-Diffusion (modèle isothermique de transport). Ce modèle est basé sur l'expression des densités de courants suivantes :

$$\vec{j}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\vec{\text{grad}}n \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{j}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p\vec{\text{grad}}p$$

Si on considère le modèle de type linéaire, les deux équations deviennent :

$$J_n(x) = qn(x)\mu_n E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.4})$$

$$J_p(x) = qp(x)\mu_p E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Où  $E(x)$  est le champ électrostatique,  $p(x)$  et  $n(x)$  sont, respectivement les concentrations des trous et des électrons libres.  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  sont les mobilités respectives des électrons et des trous et  $D_n$ ,  $D_p$  sont leurs coefficients de diffusion.

Pour un semi-conducteur non dégénéré, les mobilités de porteurs sont liées à leurs coefficients de diffusion par la relation d'Einstein :

$$D = \frac{k_B T}{q} \mu \quad (\text{III.5})$$

Les densités des électrons et des trous sont données par :

$$\text{Pour électrons : } \quad n(x) = N_C e^{(E_F - E_C(x))/k_B T} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Pour trous : } \quad p(x) = N_V e^{(E_V(x) - E_F)/k_B T}$$

Les quantités  $N_C$  et  $N_V$  sont les concentrations équivalentes des états de la bande de conduction et de valence [6].

## 1.2. Recombinaison :

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$  s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons :

### Cas des semi-conducteurs inorganiques

#### a. Recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall) volumique

Le processus de recombinaison Shockley-Read-Hall est schématisé sur la figure 32. Il fut pour la première fois explicité par Shockley, Read et Hall. Ce processus fait appel à des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap (niveaux appelés pièges, dus à certains défauts cristallins ou à la présence de certaines impuretés dans le cristal) qui facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. La recombinaison Schokley-Read-Hall est modélisée par [38] :

$$R_{RSH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n \left[ p + n_i \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT}\right) \right] + \tau_p \left[ n + n_i \exp\left(\frac{(E_t - E_i)}{KT}\right) \right]} \quad (\text{III.7})$$

Où  $E_t$  est la position énergétique des états de piège,  $E_i$  est le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque,  $\tau_n, \tau_p$  sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous,  $n_i$  est la concentration intrinsèque,  $k$  est la constante de Boltzmann et  $T$  la température en Kelvin.

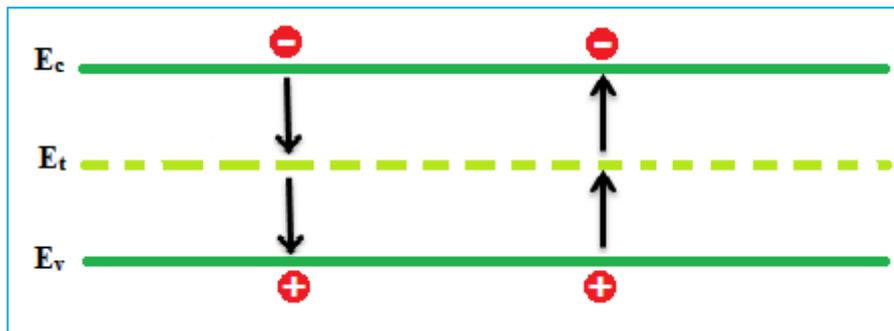


Figure 32 : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

### b. Recombinaison en surface

Les mécanismes précédents constituent des recombinaisons ayant lieu dans le volume du matériau. Il faut également considérer les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure 33. Dans ce cas, le formalisme du mécanisme de recombinaison SRH peut être reformulé avec des recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume. Le taux de recombinaison à la surface est donné par l'expression [38]:

$$R_{surf} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p^{eff} \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right) \right] + \tau_n^{eff} \left[ n + n_i \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT}\right) \right]} \quad (III.7)$$

Avec:

$$\frac{1}{\tau_n^{eff}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n \quad (III.8)$$

$$\frac{1}{\tau_p^{eff}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p$$

Equations dans lesquelles  $\tau_n^{eff}$  est la durée de vie effective,  $d_i$  et  $A_i$  sont la longueur et l'épaisseur de l'interface,  $S_n$  et  $S_p$  sont respectivement la vitesse de recombinaison pour les électrons et les trous. Par défaut :  $S_n = S_p = 0 \text{ cm/s}$ .

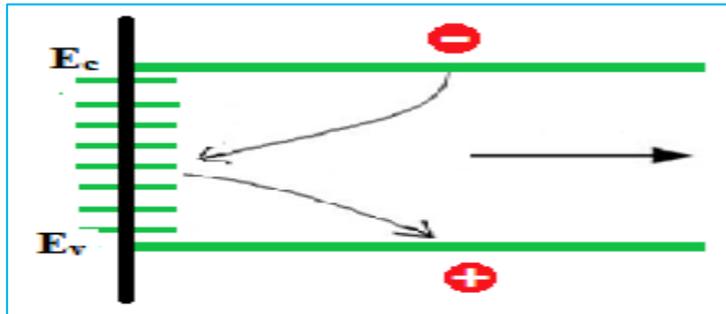


Figure 33: Mécanisme de recombinaison en surface

### c. Recombinaison en volume de type 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. Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (III.9)$$

Avec  $C_n$  et  $C_p$  sont des coefficients d'Auger. Leurs valeurs sont respectivement :

$$C_n = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s} \quad / \quad C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s} \quad [38]$$

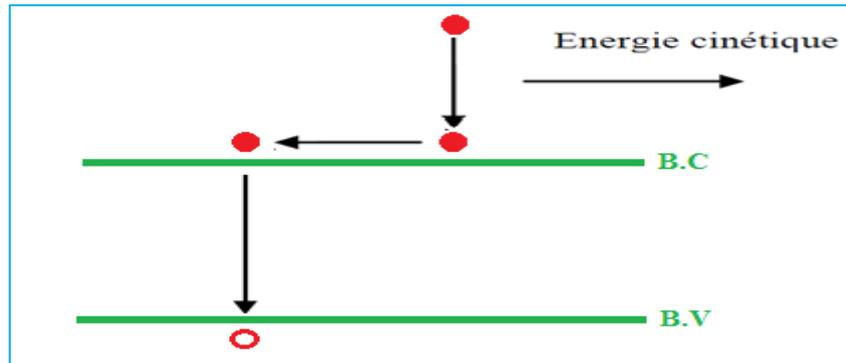


Figure 34 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

## 2. Structure simulée : paramètres et maillage

### 2.1. Structure simulée :

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord choisie une cellule de référence (littérature) avec un ensemble des paramètres fixés, puis nous avons fait varier les paramètres un par un, tout en maintenant les autres fixes, afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule Tandem. La figure 35, représente la structure de la cellule de référence utilisée lors de la simulation.

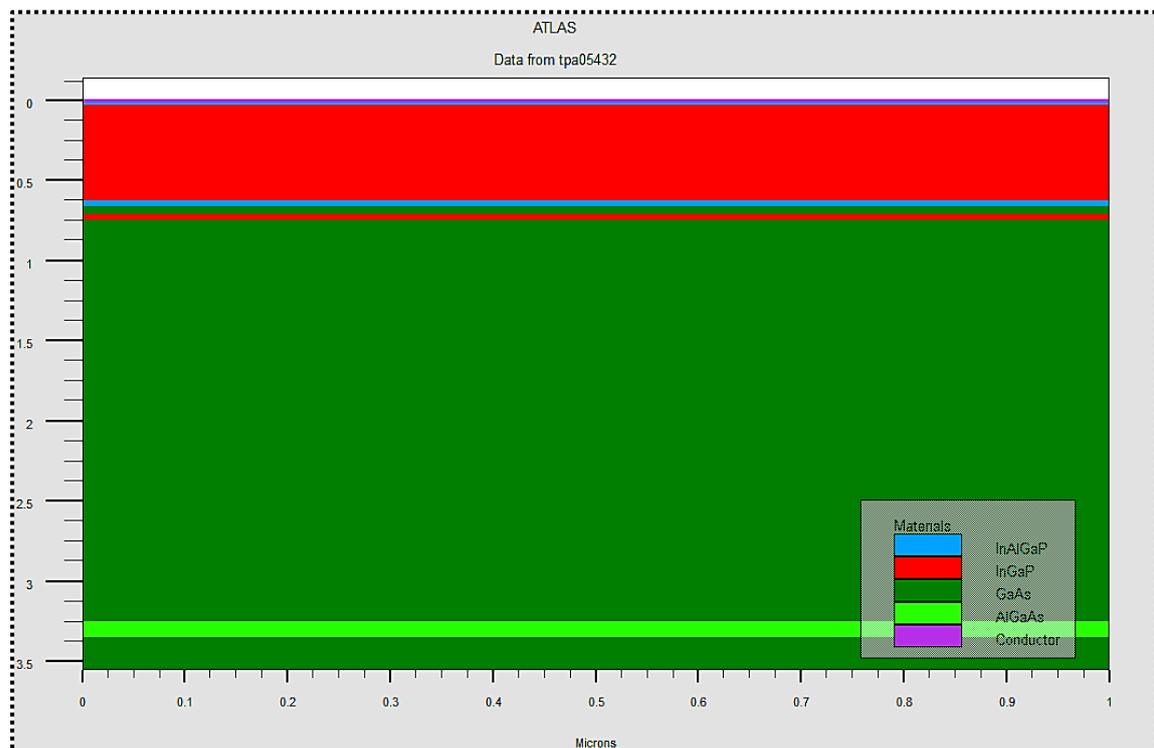


Figure 35 : Structure de la cellule simulée.

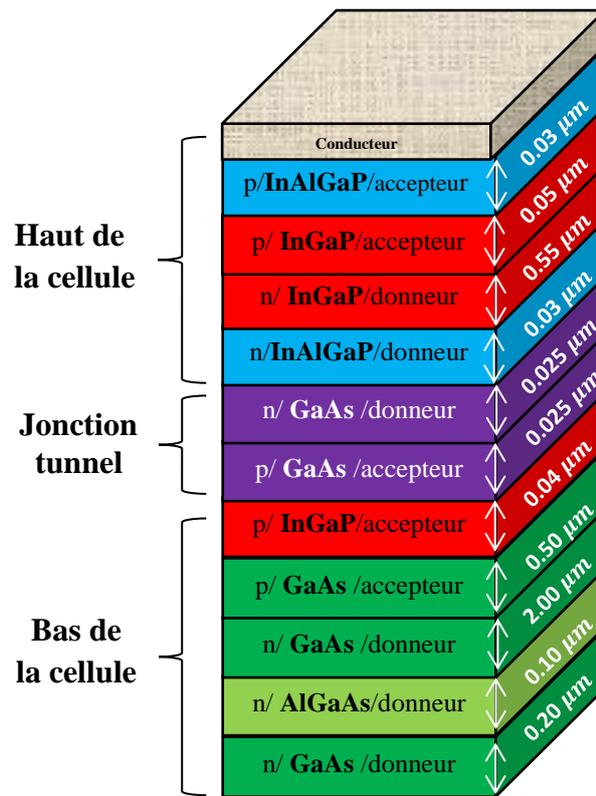


Figure 36 : Géométrie de la structure de référence.

## 2.2. Paramètres de la structure simulée :

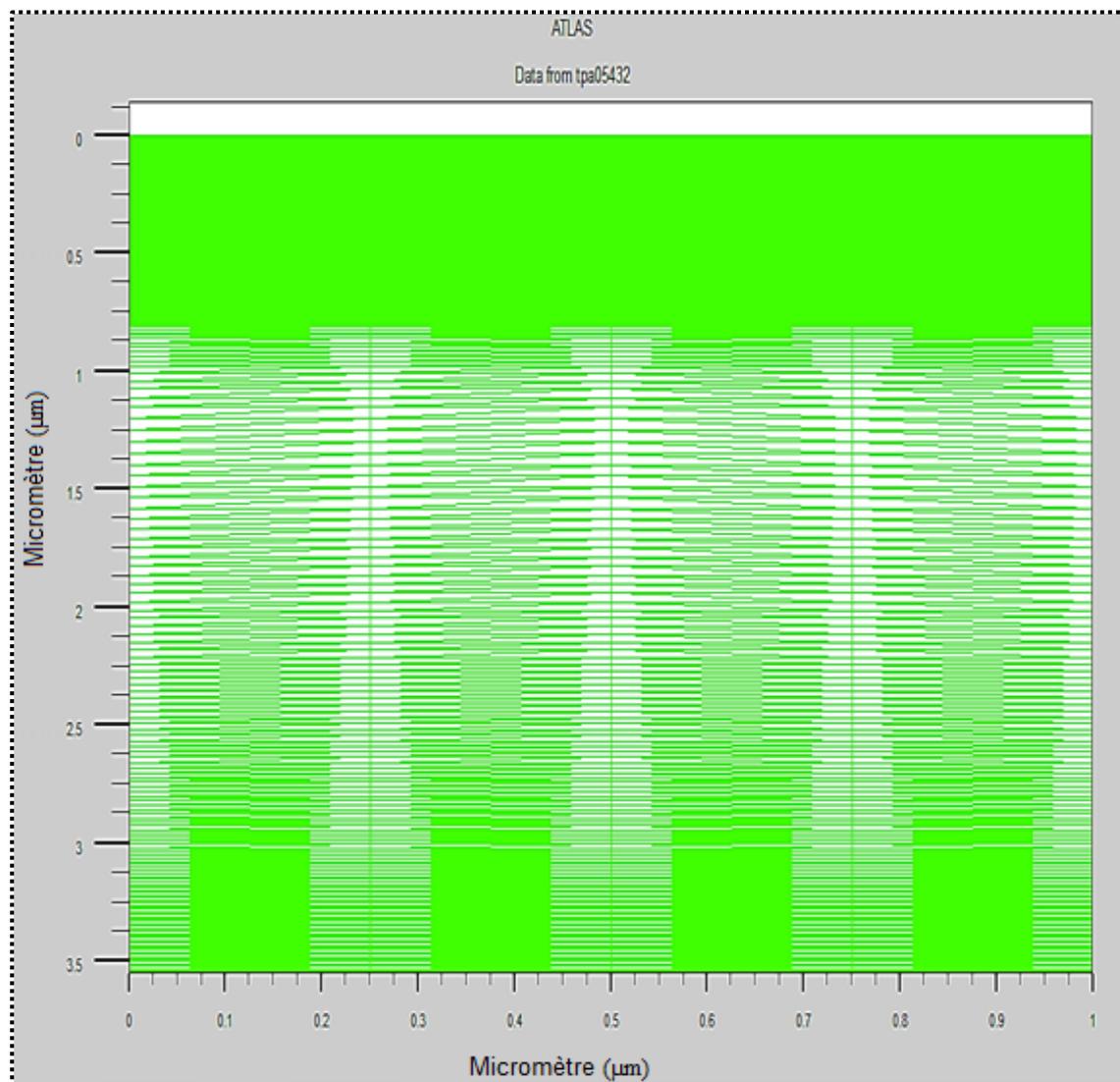
Les paramètres de la cellule de référence sont donnés dans le tableau 6 suivant :

Haut de la cellule					
Paramètres	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\chi_e$ (eV)	$E_g$ (eV)	$\epsilon$
InGaP	0.6	$N_A = 2 \cdot 10^{18}$ Ou $N_D = 7 \cdot 10^{16}$	4.08	1.61	12.1
InAlGaP	0.06	$N_A = N_D = 2 \cdot 10^{18}$	—	0	0
jonction tunnel					
GaAs	0.05	$N_A = 3 \cdot 10^{19}$ Ou $N_D = 5 \cdot 10^{19}$	—	1.42	13.2
Bas de la cellule					
InGaP	0.04	$N_A = 3 \cdot 10^{18}$	4.08	1.61	12.1
GaAs	2.5	$N_A = 2 \cdot 10^{18}$ Ou $N_D = 2 \cdot 10^{17}$	—	1.42	13.2
AlGaAs	0.1	$N_D = 5 \cdot 10^{18}$	3.54	1.8	12.3
GaAs	0.2	$N_D = 1 \cdot 10^{16}$	—	1.42	13.2

Tableau 6 : Paramètres de la cellule de référence.

### 2.3. Maillage :

Pour procéder à la simulation numérique, il est nécessaire de définir le maillage de la structure. L'outil **Deckbuild** permet de définir les dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (l'emplacement, le type, le niveau et le profil de dopage), de placer les contacts électriques sur la structure et de définir le maillage. Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations (III.1, III.2 et III.3) numériquement. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre, si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul. Nous avons utilisé le maillage suivant : (Figure 37)



**Figure 37 :** *Maillage utilisé pour les simulations.*

### 3. Résultats de la simulation :

#### 3.1. Caractéristique courant- tension, puissance – tension :

La figure 38, présente les caractéristiques courant-tension de la cellule étudiée sous spectre solaire AM 1.5 avec un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  et à la température ambiante (300 K). Le courant de court-circuit avoisine 14.23 mA alors que la tension de circuit ouvert est de l'ordre de 2.425 Volt et la figure 39, présente les caractéristiques puissance-tension de cette cellule étudiée.

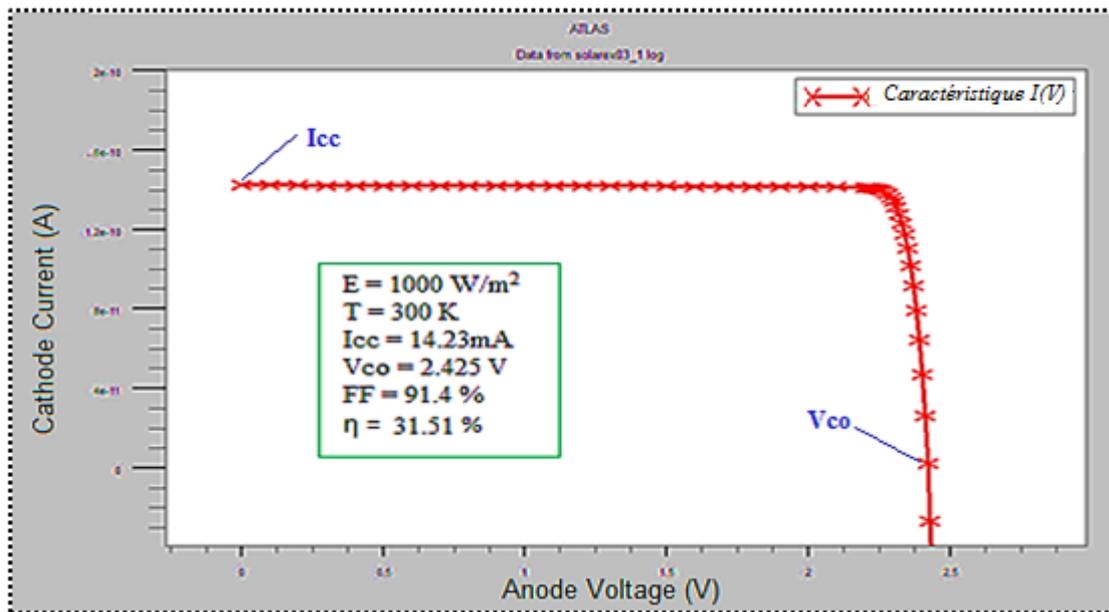


Figure 38 : Caractéristiques courant- tension.

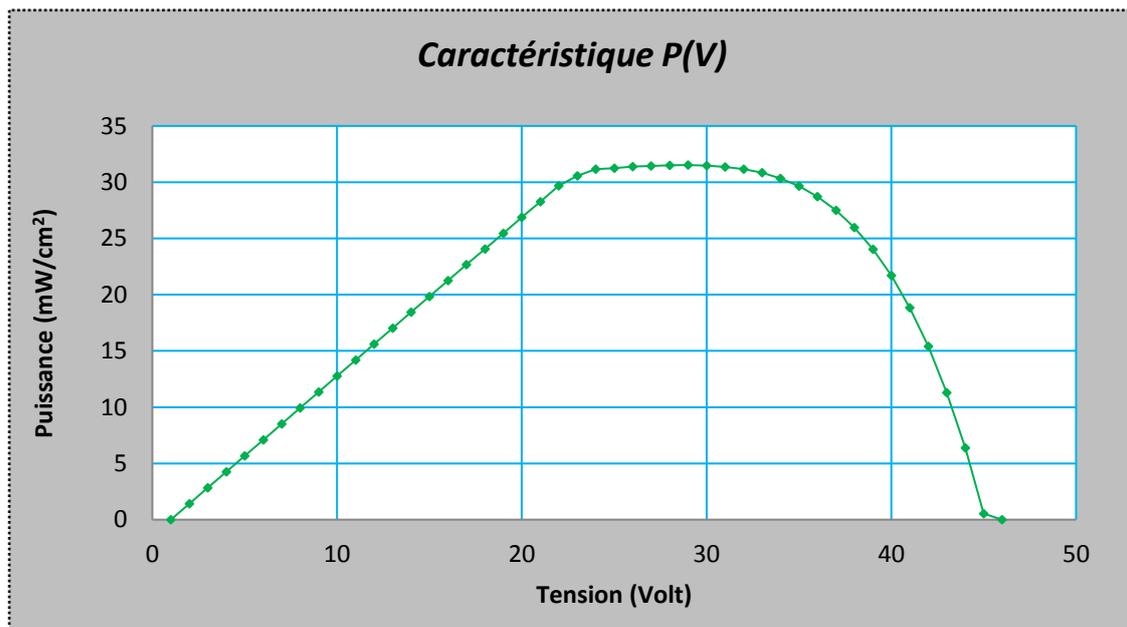


Figure 39 : Caractéristique puissance-tension.

### 3.2. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

#### 3.2.1. Influence de l'éclairement et de la température :

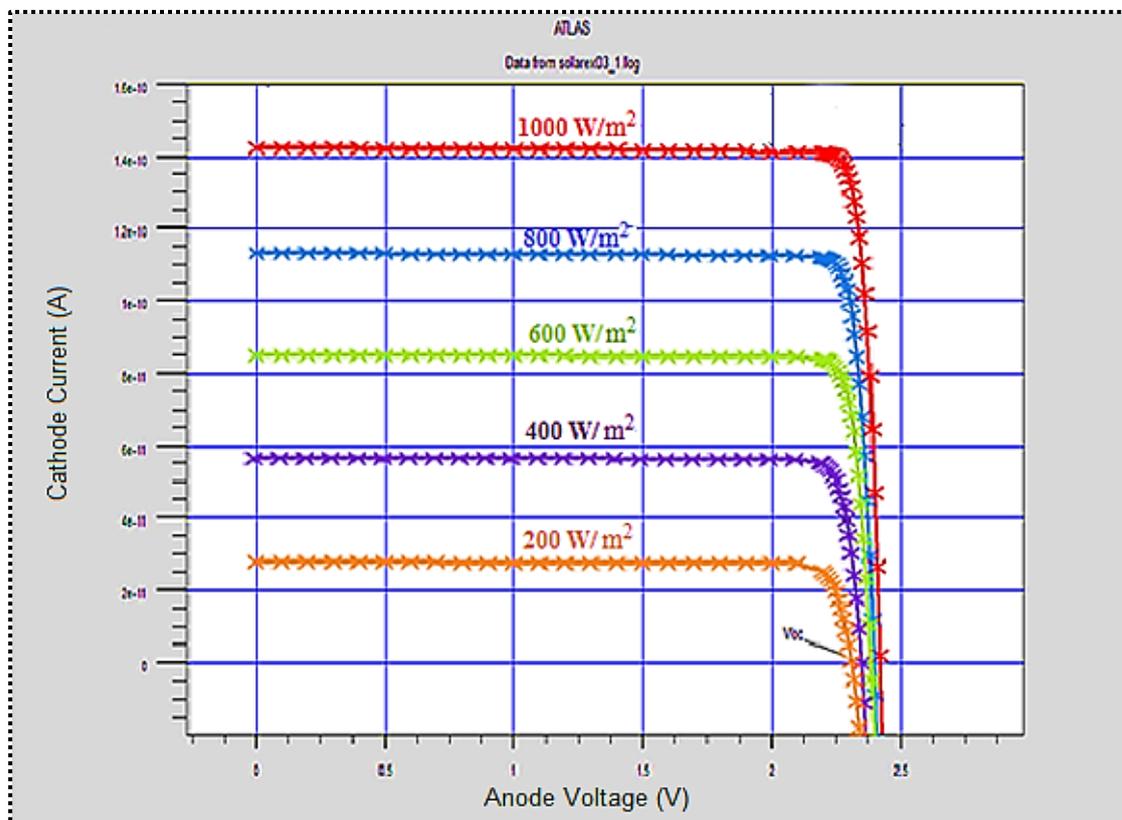
L'éclairement et la température modifient la caractéristique I(V) de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les paramètres suivant :

- ✚ Le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$
- ✚ La tension à circuit-ouvert notée  $V_{co}$
- ✚ Le courant de puissance maximale noté  $I_{max}$
- ✚ La tension de puissance maximale notée  $V_{max}$

Ces paramètres peuvent être obtenus sous l'effet des conditions standards d'éclairement de  $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , à une température de  $25^\circ\text{C}$  et sous un spectre AM1.5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » (Standard Test Conditions).

##### a. Influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre  $200\text{ W/m}^2$  et  $1000\text{ W/m}^2$  avec un pas de  $200\text{ W/m}^2$ , à  $T=300\text{ K}$ , on a déduit l'influence de celui-ci sur la caractéristique I-V de la cellule Tandem comme il est illustré par la figure 40.



**Figure 40 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) d'une cellule Tandem

D'après la figure 40, lorsque l'éclairement augmente, nous remarquons qu'une augmentation du courant de court-circuit et une très faible augmentation de la tension du circuit ouvert. Les différents paramètres de la cellule sont regroupés dans le tableau 7, ci-dessous pour différentes valeurs de l'éclairement.

Paramètres	200 (W/m <sup>2</sup> )	400 (W/m <sup>2</sup> )	600 (W/m <sup>2</sup> )	800 (W/m <sup>2</sup> )	1000 (W/m <sup>2</sup> )
<b>I<sub>cc</sub></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	2.84	5.68	8.53	11.38	<b>14.23</b>
<b>V<sub>co</sub></b> (Volt)	2.31	2.36	2.38	2.40	<b>2.42</b>
<b>I<sub>max</sub></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	2.81	5.56	8.38	11.18	<b>13.95</b>
<b>V<sub>max</sub></b> (Volt)	2.1	2.20	2.22	2.24	<b>2.26</b>
<b>P<sub>max</sub></b> (mW/cm <sup>2</sup> )	5.91	12.25	18.61	25.04	<b>31.52</b>
<b>FF</b> (%)	89.9	91.24	91.4	91.46	<b>91.4</b>
<b>η</b> (%)	29.59	30.63	31.02	31.30	<b>31.52</b>

**Tableau 7** : Différents paramètres de la cellule Tandem pour différentes valeurs de l'éclairement.

D'après les résultats de la simulation représentée dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que le courant du court-circuit  $I_{cc}$  est proportionnel à l'intensité lumineuse incidente (environ 2.84 (mA/cm<sup>2</sup>) par palier de 200 W/m<sup>2</sup>), la variation de  $I_{cc}$  avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante [30].

$$I_{CC} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (\text{III.10})$$

Ou :

$E$  : est l'éclairement en (W/m<sup>2</sup>)

$S$  : est la surface de la cellule en (m<sup>2</sup>)

$\alpha(T)$  : Coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en (A/W).

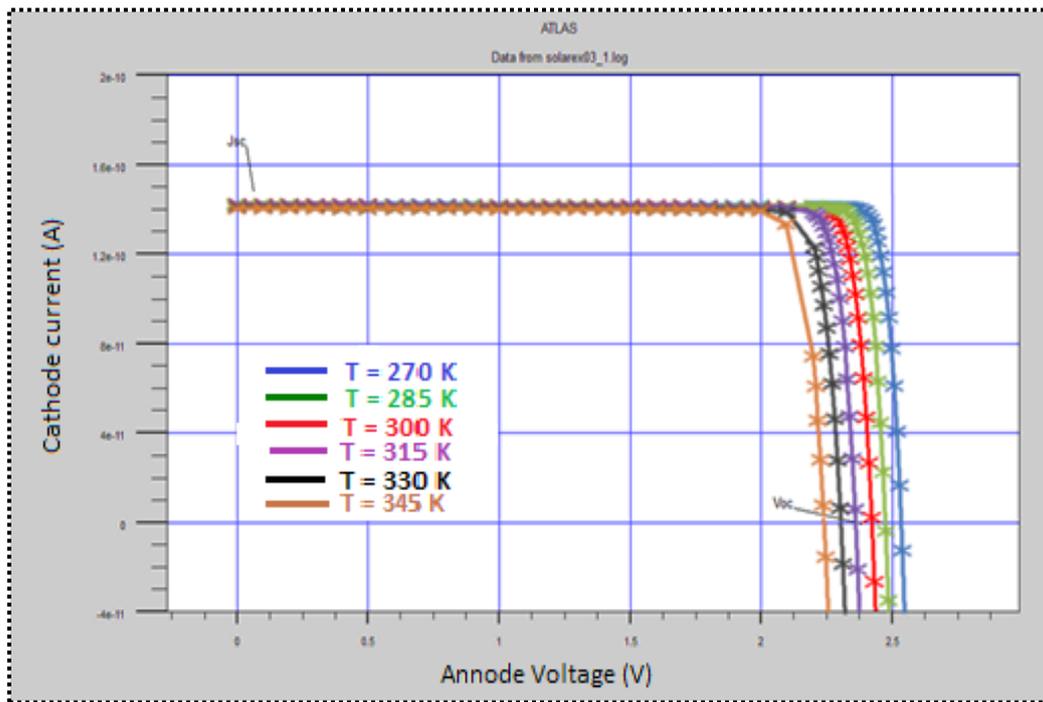
D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (environ 0,02 V).

Nous pouvons conclure que l'effet de l'illumination influe beaucoup sur la réponse globale de la cellule solaire ce qui traduit par une petite augmentation du rendement

### b. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

En faisant varier la température de la cellule entre 270 K et 345 K avec un pas de 15K, à  $E=1000 \text{ W/m}^2$ , l'influence de celle-ci sur la caractéristique I(V) est donnée par la figure 41.



**Figure 41 :** Influence de la température sur la caractéristique courant- tension.

Les différents paramètres de la cellule déduits de la caractéristique I (V) sont regroupés dans le tableau 8, ci-dessous :

Paramètres	270 K	285 K	300 K	315 K	330 K	345 K
$I_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	14.27	14.25	14.23	14.2	14.18	14.15
$V_{co}$ (V)	2.53	2.47	2.42	2.36	2.30	2.24
$I_{max}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	14.01	14.01	13.95	13.79	14	13.42
$V_{max}$ (V)	2.39	2.32	2.26	2.21	2.1	2.1
$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	33.48	32.50	31.52	30.5	29.4	28.18
FF %	92.6	92.2	91.4	90.9	89.9	88.8
$\eta$ %	33.48	32.50	31.52	30.5	29.4	28.18

**Tableau 8 :** Evolution avec la température de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale extraite de la cellule ( $P_{max}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de la conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

On observe que l'augmentation de la température provoque une légère diminution du courant du court-circuit ( $I_{cc}$ ), en même temps on assiste à une diminution de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_{max}$ ) et un léger décroissement du courant ( $I_{max}$ ) et l'influence de la température sur le reste des paramètres électriques de la cellule ( $P_{max}$ , FF et  $\eta$ ) sont illustrés par les figures 42, 43 et 44 ci-dessous. Le constat global est la diminution des trois paramètres de la cellule solaire avec l'augmentation de la température.

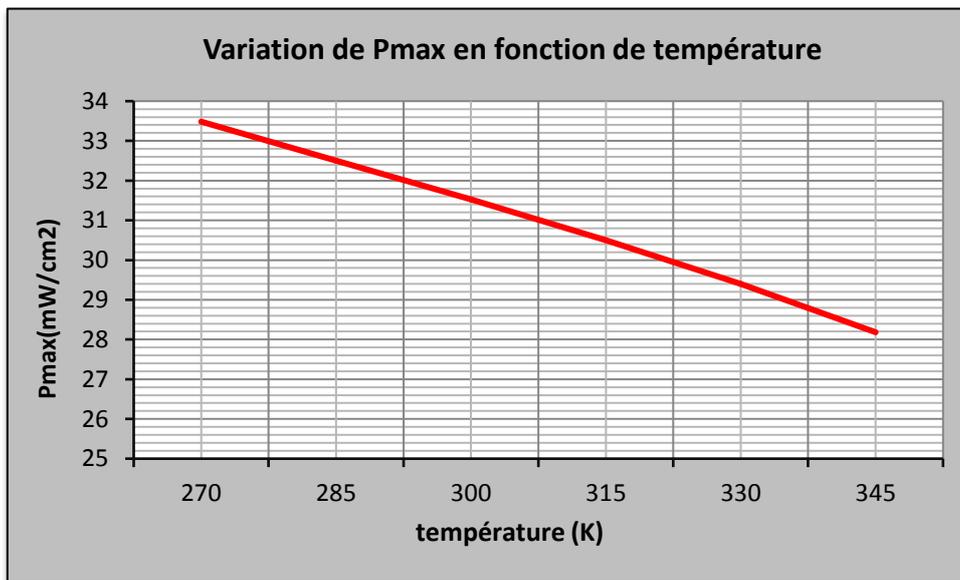


Figure 42 : Variation de  $P_{max}$  en fonction de la température (K).

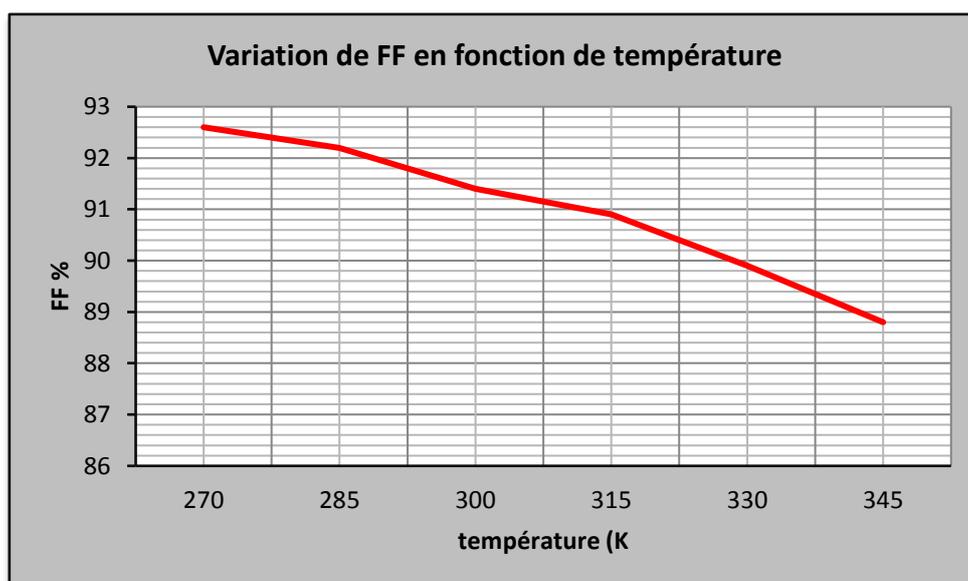
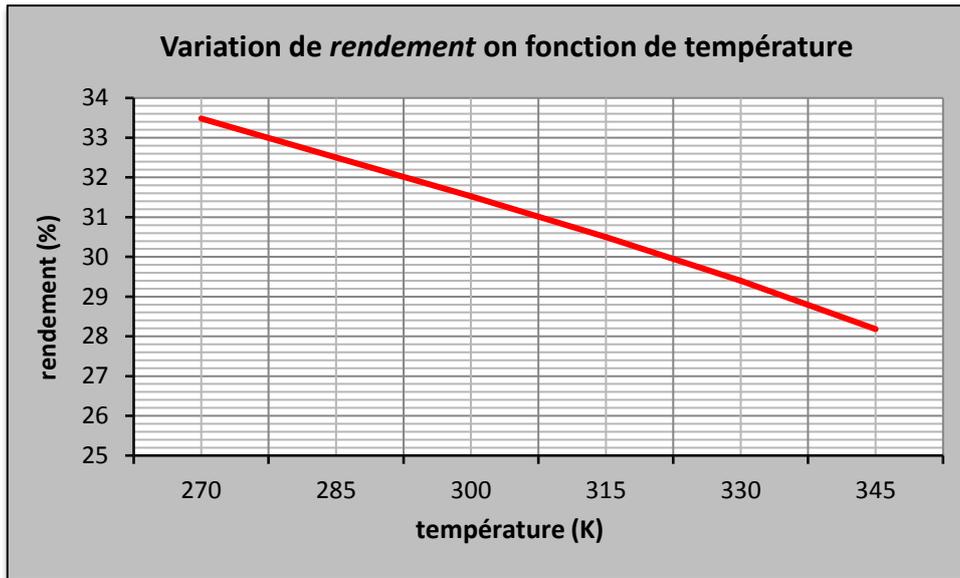


Figure 43: Variation de facteur de forme en fonction de la température (K).

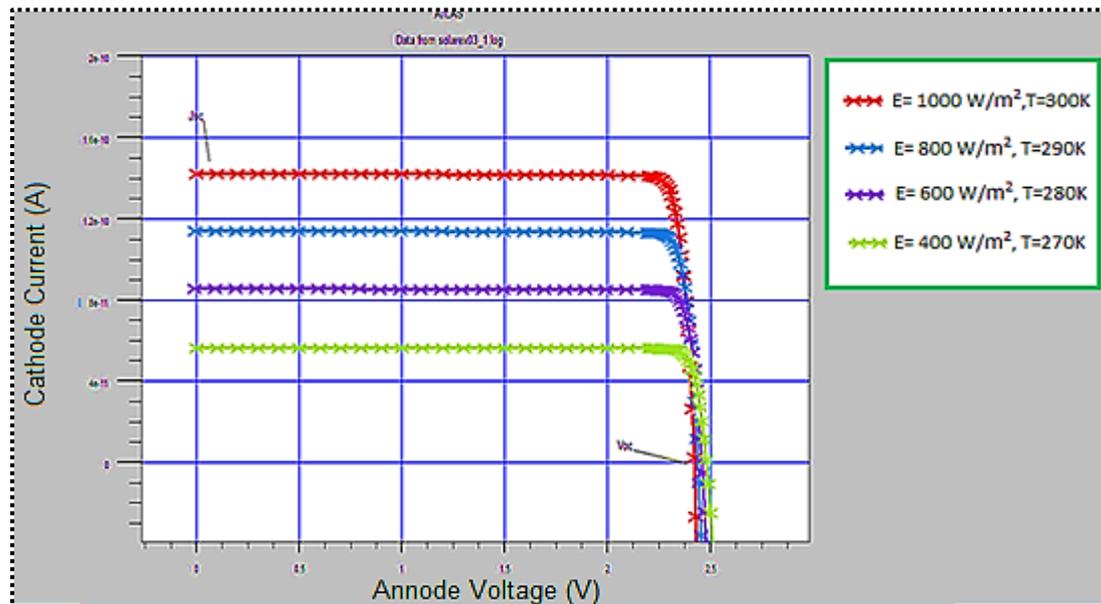


**Figure 44 :** Variation de rendement en fonction de la température (K).

Ainsi, le rendement subit une diminution de l'ordre de 1% par palier de 15 K. Donc, il est clair que la température a un effet néfaste sur la réponse de la cellule solaire.

### c. Influence de l'éclairement et la température en même temps:

La variation de la température et de l'éclairement en même temps ( $400\text{W/m}^2$  et  $270\text{K}$ ,  $600\text{W/m}^2$  et  $280\text{K}$ ,  $800\text{W/m}^2$  et  $290\text{K}$ ,  $1000\text{W/m}^2$  et  $300\text{K}$ ), On observe qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert ( $V_{oc}$ ), par contre il y a une grande variation du courant ( $I_{cc}$ ), voire la figure 45.



**Figure 45 :** Influence de l'éclairement et de la température en même temps sur  $I(V)$ .

Les différents paramètres de la cellule déduits de la caractéristique I (V) sont regroupés dans le tableau 9, ci-dessous :

Paramètres	E=400 W/m <sup>2</sup> T=270 K	E=600 W/m <sup>2</sup> T=280 K	E=800 W/m <sup>2</sup> T=290 K	E=1000 W/m <sup>2</sup> T=300 K
<b>I<sub>cc</sub></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	5.71	8.55	11.39	<b>14.23</b>
<b>V<sub>co</sub></b> (V)	2.48	2.46	2.44	<b>2.42</b>
<b>I<sub>max</sub></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	5.61	8.40	11.17	<b>13.95</b>
<b>V<sub>max</sub></b> (V)	2.33	2.32	2.29	<b>2.26</b>
<b>P<sub>max</sub></b> (mW/cm <sup>2</sup> )	13.07	19.50	25.57	<b>31.52</b>
<b>FF</b> %	92.1	92.5	91.8	<b>91.4</b>
<b>η</b> %	<b>32.69</b>	<b>32.50</b>	<b>31.97</b>	<b>31.52</b>

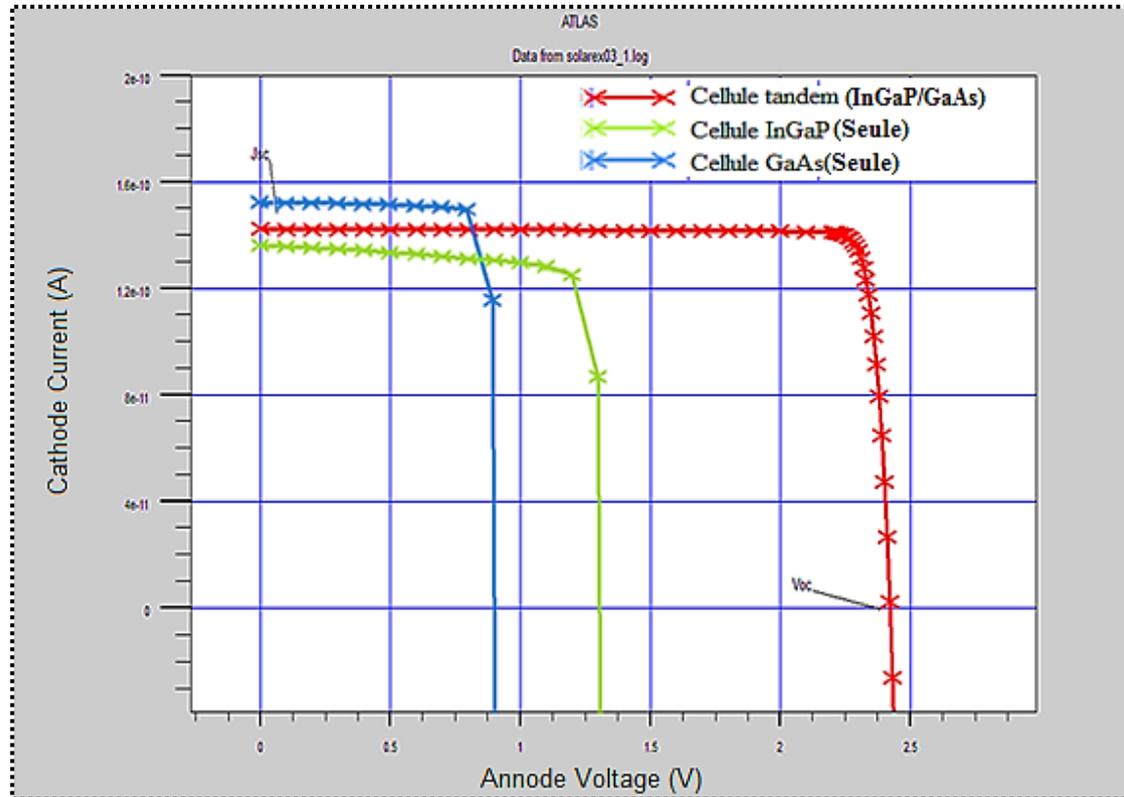
**Tableau 9** : Différents paramètres de la cellule Tandem pour différentes valeurs la température et de l'éclairement en même temps

D'après le tableau 9, lorsque la température et de l'éclairement augmente en même temps, on remarque une augmentation du courant de court-circuit I<sub>cc</sub> et une très faible diminution de la tension du circuit ouvert V<sub>co</sub> de l'ordre de 0.02 Volt.

On remarque aussi que la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que la variation de la température.

### 3.3. Effet de l'empilement des cellules sur la caractéristique I (V) :

La figure 46, donne les courbes des caractéristiques I(V) de la cellule tandem (InGaP/GaAs) illustrant un accroissement très important des performances en comparaison avec la conversion mono spectrale, sous spectre solaire AM 1.5 avec un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et à la température ambiante (300 K).



Figures 46 : Courbe I(V) de la cellule tandem (InGaP/GaAs).

Les paramètres caractéristiques obtenus à partir de la caractéristique I(V) sont résumés dans le tableau 10 suivant :

Matériaux	$I_{cc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{oc}$ (Volt)	$I_{max}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{max}$ (Volt)	$P_{max}$ ( $\text{mW/cm}^2$ )	FF %	$\eta$ %
InGaP	13.65	1.35	12.53	1.2	15.03	81.5	15.03
GaAs	15.23	0.95	14.98	0.8	11.98	82.7	11.98
Tandem	14.23	2.42	13.95	2.26	31.52	91.4	31.52

Tableau 10 : Différents paramètres de la cellule Tandem (InGaP/GaAs).

D'après le tableau 10, on remarque que le rendement de la cellule InGaP (seule) et la cellule GaAs (seule) est très faible par rapport le rendement globale de ces cellules c'est-à-dire de la cellule Tandem (InGaP/GaAs). On conclue que l'effet de l'empilement des cellules influe beaucoup sur la réponse globale de la cellule solaire ce qui traduit par une augmentation du rendement.

Donc l'empilement des cellules a un effet positif sur le rendement.

### 3.4 Effet de dopage :

Dans cette partie, En faisant varier le dopage de InGaP (haut de la cellule Tandem) et ensuite GaAs (bas de cette cellule) sous spectre solaire AM1.5 avec un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et à la température ambiante (300 K).

#### 3.4.1. Haut cellule (InGaP):

En faisant varier le dopage dans le haut de la cellule étudiée entre ( $N_A=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) et ( $N_A=2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), l'effet de celle-ci sur la caractéristique I(V) est donnée par la figure 47.

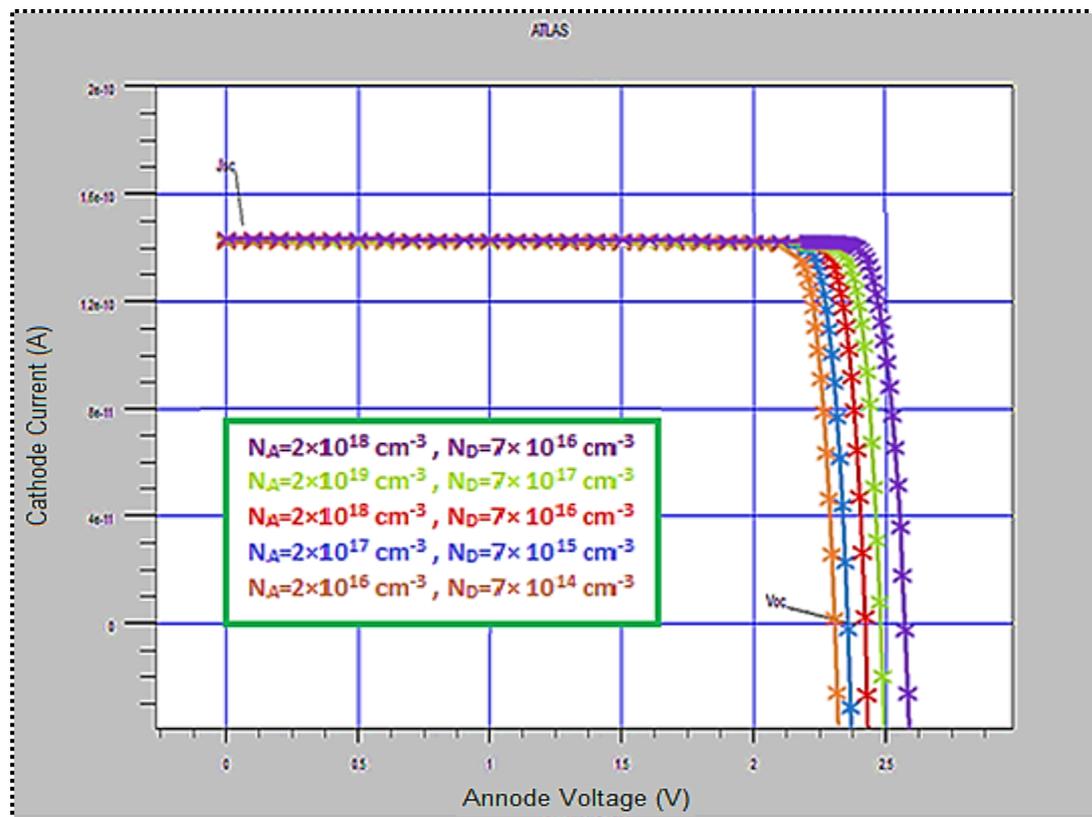


Figure 47 : Effet du dopage dans le haut de la cellule sur la caractéristique courant- tension.

Les différents paramètres de sortie de la cellule déduits de la caractéristique I (V) sont regroupés dans le tableau 11, ci-dessous :

Paramètres	$N_A=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
<b><i>I<sub>cc</sub></i></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	14.22	14.22	<b>14.23</b>	14.23	14.23
<b><i>V<sub>co</sub></i></b> (V)	2.32	2.35	<b>2.42</b>	2.48	2.56
<b><i>I<sub>max</sub></i></b> (mA/cm <sup>2</sup> )	14.11	13.94	<b>13.95</b>	13.96	13.96
<b><i>V<sub>max</sub></i></b> (V)	2.1	2.2	<b>2.26</b>	2.32	2.38
<b><i>P<sub>max</sub></i></b> (mW/cm <sup>2</sup> )	29.63	30.66	<b>31.52</b>	32.38	33.22
<b><i>FF</i></b> %	90	91.6	<b>91.4</b>	91.6	90.9
<b><i>η</i></b> %	29.63	30.66	<b>31.52</b>	<b>32.38</b>	<b>33.22</b>

**Tableau 11** : Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage dans le haut de la cellule.

Dans ce cas, le courant de court-circuit «*I<sub>cc</sub>*» est insensible (ne varie pratiquement pas) au dopage dans le haut de la cellule, alors que *V<sub>co</sub>* augmente.

Donc l'augmentation du niveau de dopage dans le haut de la cellule .donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule, ce qui conduit à une augmentation du rendement de la cellule.

### 3.4.2. Bas cellule (GaAs):

En faisant varier le dopage dans le bas de la cellule étudiée entre ( $N_A=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) et ( $N_A=2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), l'effet de celle-ci sur la caractéristique I(V) est donnée par la figure 48.

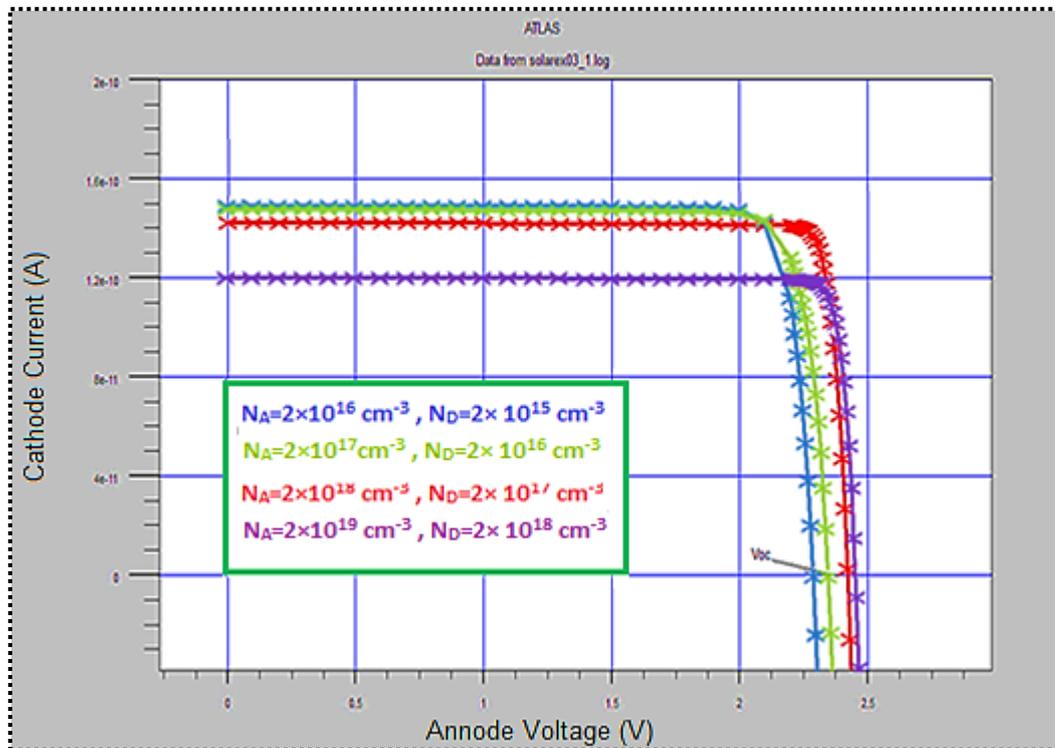


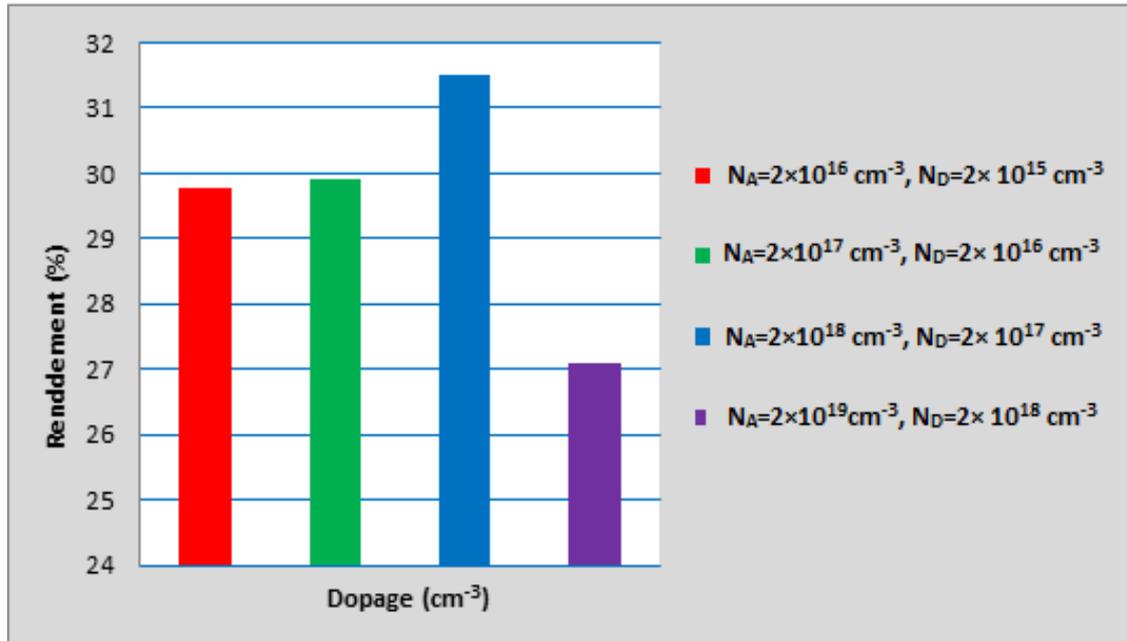
Figure 48 : Effet du dopage dans le bas de la cellule sur la caractéristique courant-tension.

Les différents paramètres de sortie de la cellule déduits de la caractéristique I (V) sont regroupés dans le tableau 12, ci-dessous :

Paramètres	$N_A=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_A=2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$I_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	14.84	14.69	<b>14.23</b>	11.99
$V_{co}$ (V)	2.28	2.34	<b>2.42</b>	2.45
$I_{max}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	14.179	14.25	<b>13.95</b>	11.75
$V_{max}$ (V)	2.1	2.1	<b>2.26</b>	2.31
$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	29.77	29.92	<b>31.52</b>	27.09
$FF$ %	87.59	86.7	<b>91.4</b>	93.3
$\eta$ %	29.77	29.92	<b>31.52</b>	27.09

Tableau 12 : Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage dans le bas de la cellule.

Lorsqu'on dope la cellule GaAs (bas de la cellule Tandem), on remarque que le meilleur rendement est obtenu avec :  $N_A=2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_D=2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$  (voir la figure 49) c'est-à-dire elle aura le maximum du rendement à ce dopage et dès que celle-ci commence à croître, les paramètres de la cellule extraits de la courbe I(V) diminuent ce qui induit la décroissance du rendement.



**Figure 49:** Variation de rendement en fonction de dopage de la cellule GaAs.

### 3.5. Etude le rendement quantique externe de la cellule Tandem III-V à base de (InGaP/GaAs) :

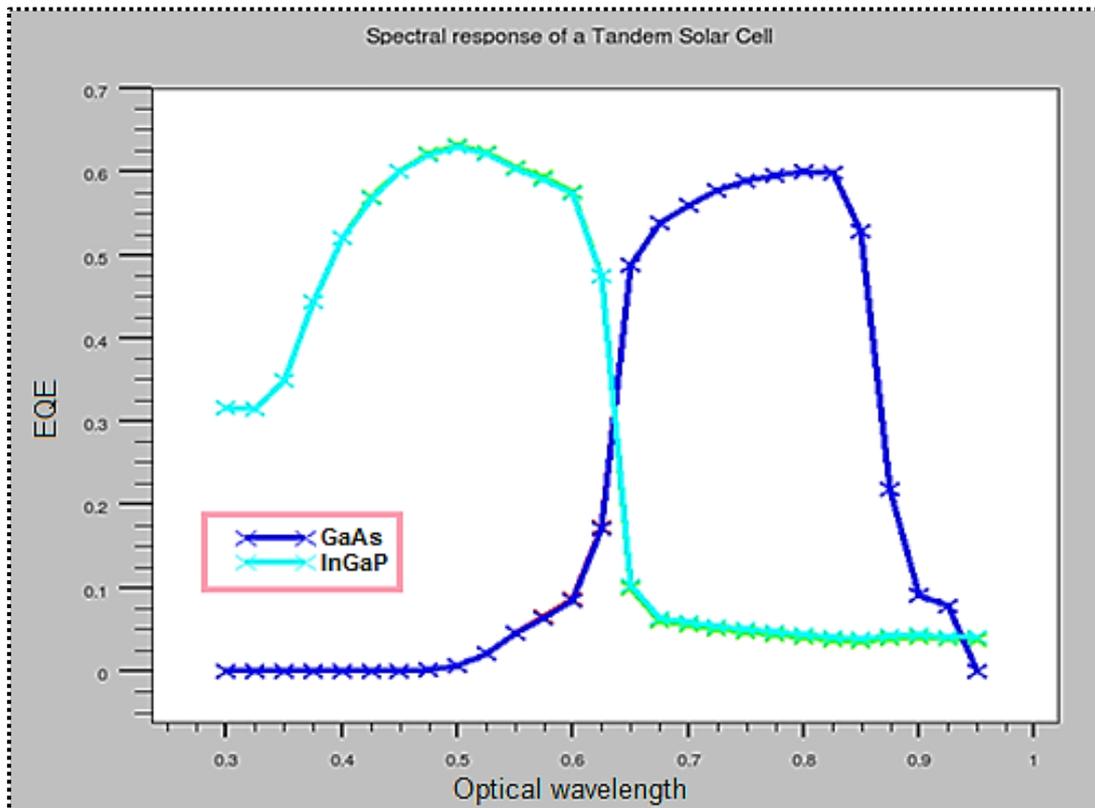
La figure 50, illustre la réponse spectrale (le rendement quantique externe) de la cellule Tandem (InGaP/GaAs) sous spectre solaire AM 1.5 avec un éclairement de  $1000\text{ W/m}^2$  et à la température ambiante (300 K) pour absorber une grande partie du spectre et la convertir en électricité.

On rappelle que la réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation :

$$RS = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (\text{III.11})$$

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron.

Il s'agit d'un point de vue quantique mais ce n'est pas le rendement le plus important au niveau énergétique. Il dépend surtout des matériaux utilisés.



**Figures 50 :** Rendement quantique externe de la cellule Tandem (InGaP/GaAs).

#### 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser le rendement de la cellule Tandem à base (InGaP/GaAs). Nous avons présenté, dans un premier temps, les modèles utilisés pour la simulation, ensuite la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés, Nous avons optimisé ces paramètres pour avoir un bon rendement.

Les paramètres à optimiser sont :

- Eclairage.
- Température.
- Empilement des cellules.
- Dopage (haut et bas de la cellule Tandem).

De plus, nous avons étudiée le rendement quantique externe (EQE) de cette cellule. D'après notre étude, nous avons remarqué que :

- L'évolution de l'éclairement avec une température fixe provoque une augmentation du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . On constate expérimentalement que le courant du court-circuit  $I_{cc}$  est proportionnel à l'éclairement (environ  $2.84 \text{ (mA/m}^2\text{)}$  par palier de  $200 \text{ W/m}^2$ ).
- L'augmentation de la température avec un éclairement fixe provoque une légère diminution du courant du court-circuit  $I_{cc}$ , en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , ce qui conduit à une diminution du rendement de la cellule.
- La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que la variation de la température.
- L'évolution de la température et de l'éclairement en même temps entraîne une augmentation du courant de court-circuit  $I_{cc}$ , par contre une faible diminution de la tension du circuit-ouvert  $V_{oc}$ .
- L'empilement des cellules a un effet positivement sur le rendement.
- L'augmentation du niveau de dopage de chaque couche de la cellule Tandem (InGaP/GaAs) donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques, ce qui conduit à une augmentation du rendement jusqu'à un point optimal du dopage.
- L'élévation de dopage de la cellule GaAs conduit à un niveau optimal pour un meilleur rendement de cette cellule étudié.
- Le rendement quantique externe nous montre que la cellule Tandem III-V à base de (InGaP/GaAs) présente un domaine d'absorption qui couvre une grande partie du spectre solaire.

## Conclusion générale

Le travail de notre mémoire a concerné l'étude des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V à base de (InGaP/GaAs) par simulation numérique TCAD\_Silvaco.

Les résultats obtenus à partir de cette simulation sont :

- L'effet de l'éclairement influe beaucoup sur la réponse globale de la cellule étudiée ce qui traduit par une augmentation du rendement. Donc, l'éclairement est considéré comme un paramètre avantageux pour augmenter le rendement de conversion photovoltaïque.
- La température a un effet néfaste sur le rendement de la cellule Tandem III-V.
- La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que la variation de la température.
- L'empilement des cellules a un effet positif sur le rendement.
- L'augmentation du niveau de dopage donne améliore toutes les caractéristiques de la cellule, ce qui conduit à une augmentation du rendement de cette cellule. Mais il ne faut pas dépasser le niveau de dopage optimal de cette cellule.
- L'empilement permet donc de capter une grande partie du spectre solaire. ce qui conduit à une augmentation du rendement quantique externe EQE.

Dans le cadre d'une étude plus précise, il serait intéressant de poursuivre ce travail par une :

- Etude des paramètres structurels de cette cellule.
- Etude du choix des matériaux composant la cellule Tandem.
- Etude d'empilement de plusieurs cellules (plus de deux couches).
- Etude des phénomènes de recombinaison et recherche un modèle adéquat à toute la cellule Tandem.

L'étude de ces points pourrait améliorer le rendement de ce type de cellule Tandem.