

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

pour l'obtention du diplôme master en Électronique option Micro-optoélectronique

présenté par

Gaci Houda

&

Zitari Hasnaa

# Simulation d'une cellule solaire double jonction à base de InGaP /Si

Proposé par : Mr Nacer Said

Année Universitaire 2018-2019

## Remerciements

---

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur *Mr NACER SAID* pour avoir proposé et dirigé ce travail. Son soutien, et ses précieux conseils, ses qualités humaines. Et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à nos enseignants de spécialité *Mr Aïssat Abdelkader , Mr Bounemerí*, qui nous ont transmis leur savoir sans réserve tout au long de nos années d'études.

Nous tenons remercier *M Guasmí Houcíne* pour son aide et sa disponibilité à répondre à nos questions.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents*

*Aucun mot ne saurait témoigner de l'étendue*

*Des sentiments que j'éprouve à leur égard*

*Je souhaite que Dieu leur octroie une longue vie*

*A mes frères et ma sœur Fadi, Sid Ahmed, Anfel.*

*Pour leur encouragement et leur affection*

*A tous mes collègues et amis : Nabil, Mohamed, Noureddine, Abdelsamie, Abdelhadi*

*A ma chère binôme : Houda*

*Pour les moments qu'on a partagés ensemble durant notre parcours*

*A vous tous, je dédie ce travail avec mes vœux de santé, de bonheur et de prospérité.*

*Hasnaa*

# *Dédicace*

Je dédie ce mémoire à :

*Mes chers parents*, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

Mes chers frères *Abdelrazek*, *Nabil* et ma chère sœur *Lamia* pour leur grand amour, pour leur encouragement permanent, et leur soutien moral.

Ma chère binôme *Hasna* pour les moments qu'on a partagés ensemble durant notre parcours.

Mes camarades de classe et à tous mes fidèles amis : *Amira*, *Abdelhadi*, *Nourredine*, *Mohamed*, *Yasmine*, *Khadidja* et à tous que j'ai pas citer.

*Houda*

---

## ملخص:

الخلايا الكهروضوئية هي مكونات قادرة على تحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية، باستخدام الضوء مع بعض مواد أشباه الموصلات. يمكن استخدام الكهرباء المنتجة لإمداد الطاقة أو إعادة بيعها إلى شبكة التوزيع. يتكون هذا العمل من دراسة ومحاكاة خلية شمسية مزدوجة الوصلات تعتمد على InGaP / Si. بعد التذكير بمبدأ التشغيل وخصائص الخلية الشمسية، تمت دراسة تأثير تركيز الإنديوم وسمك خلية InGaP العالي على خصائص الخلية. أظهرت نتائج المحاكاة أن تركيز الإنديوم له تأثير كبير على كفاءة الخلية، لذلك تم الحصول على محصول مثالي قدره 24.8٪ لتركيز إنديوم خلية مترادف بنسبة 59٪، وعائد قدره 27٪ لتركيز الإنديوم بنسبة 10٪ في خلية تتالي.

**كلمات المفاتيح :** الخلايا الكهروضوئية، المحاكاة، الكفاءة ، InGaP /Si .

---

**Résumé :** Les cellules photovoltaïques sont des composants capables de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, en utilisant de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. L'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation ou revendue au réseau de distribution. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire double jonctions à base de InGaP/Si. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence de la concentration d'indium et de l'épaisseur de la cellule du haut InGaP sur les caractéristiques de la cellule a été étudiée. les résultats de simulation montrent que la concentration d'indium influe considérablement sur le rendement de la cellule, aussi un rendement optimal de 24,8% a été obtenu pour une concentration d'indium de 59% en cellule tandem, et un rendement de 27% pour une concentration d'indium de 10% en cellule cascade.

**Mots clés :** photovoltaïque, simulation, rendement. InGaP /Si.

---

**Abstract :** Photovoltaic cells are components capable of directly converting light energy into electrical energy, using light with certain semiconductor materials. The electricity produced can be used for power supply or resold to the distribution network. This work consists in studying and simulating a double junction solar cell based on InGaP/Si. After recalling the operating principle and characteristics of a solar cell, the influence of indium concentration and InGaP high cell thickness on cell characteristics was studied. The simulation result show that the indium concentration has a considerable influence on the cell efficiency, So an optimal efficiency of 24.8% was obtained for a tandem cell indium concentration of 59%, and a yield of 27% for an indium concentration of 10% in cascade cell.

**Key words:** photovoltaics, simulation, efficiency, InGaP /Si.

---

## Listes des acronymes et abréviations

AM	Air mass (masse d'air)	
h	Constante de Planck	$4,136 \times 10^{-15} \text{ F.m}^{-1}$
$\lambda$	Longueur d'onde	$\mu\text{m}$
H	La densité de puissance des photons	
$\nu$	Fréquence du la lumière	
R <sub>s</sub>	Rayon du soleil	
d	Distance soleil – terre	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	
V <sub>n</sub>	Potentiel dans le matériau N	
V <sub>p</sub>	Potentiel dans le matériau P	
K	La constante de Boltzmann	$8,617 \times 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$
T	La température	
n <sub>i</sub>	La concentration de porteurs libres intrinsèques	$\text{cm}^{-3}$
P <sub>0</sub>	La concentration de trous à l'équilibre	
N <sub>d</sub>	La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N	
N <sub>a</sub>	La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P	$\text{cm}^{-3}$
N <sub>c</sub>	Densité d'états au bord de la bande de conduction	$\text{cm}^{-3}$
N <sub>v</sub>	Densité d'états au bord de la bande de valence	$\text{cm}^{-3}$
V <sub>0</sub>	Le potentiel de diffusion	
V	Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction	
E	Energie du photon	
F	L'irradiation spectrale d'un corps noir	
L <sub>p</sub>	Longueur de diffusion des trous dans le matériau N	

$J_0$	Courant de saturation
$P_i$	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface
$S$	La surface de la cellule PV
$\mu$	La mobilité des porteurs
$C_n, C_p$	coefficients d'Auger pour les électrons et les trous respectivement.
$v$	La vitesse moyenne des porteurs libres
$n$	La densité d'électrons libres
In	Indium
Ga	Gallium
P	Phosphore
$x$	Concentration de l'indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$
$b$	paramètre de bowing
$B_c$	Bande de conduction
$B_v$	Bande de valence
$E_g$	Energie de la bande interdite
$E_c$	Energie de la bande de conduction
$E_v$	Energie de la bande de valence
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$n$	Indice de réfraction
$R$	Coefficient de réflexion
$q$	Charge élémentaire

k	Constante de Boltzmann
R	Coefficient de réflexion.
G	Taux de génération.
$\phi$	le travail de sortie.
$\Phi$	le potentiel d'ionisation.
$\chi$	l'affinité électronique.
w	largeur de la zone de charge
ZCE	Zone de charge d'espace
$J_n$	La densité de courant d'électrons
$J_p$	La densité de courant des trous
$J_{ph}$	Le photo-courant
J	La densité de courant totale
$J_{obs}$	Le courant d'obscurité
$J_{cc}$	Densité de court-circuit
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$V_m$	Tension maximale
$U_m$	Tension correspondante à la puissance maximale fournie
$I_m$	Courant maximale
$P_{max}$	puissance maximale
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
FF	Facteur de forme
$\eta$	Rendement
c	La vitesse de la lumière dans le vide 299 792 458 m. s <sup>-1</sup>
x	distance de la surface



$\Delta_{n,p}$	La densité des porteurs générés.
$n_e, p_e$	Les densités des porteurs à l'équilibre.
$\tau_{n,p}$	durée de vie des porteurs.
$B$	le coefficient de recombinaison radiative
$R_{SRH}$	le taux net de capture.
$E_i$	le niveau de fermi intrinsèque.
$E_T$	l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite.
$\mu_n$	mobilité des électrons.
$\mu_p$	mobilité des trous.

# Table des matières

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

## Chapitre 1 : Généralités

1.1 Introduction .....	3
1.2 Energie solaire photovoltaïque.....	3
1.3 Le soleil .....	4
1.3.1 Caractéristiques générales.....	4
1.3.2 Le spectre solaire .....	5
1.4 Le rayonnement solaire .....	6
1.5 Masse d'air.....	8
1.6 Radiation d'un corps noir.....	9
1.7 Les semi-conducteurs .....	11
1.8 Les Matériaux III-V .....	13
1.9 La jonction PN .....	14
1.10 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs .....	15
1.11 Propriétés électriques.....	16
1.12 Evolution du gap d'énergie dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ .....	18
1.13 Propriétés optiques .....	18
1.13.1 Absorption .....	19
1.13.2 Coefficient d'absorption .....	19
1.14 Génération optique .....	19
1.15 Recombinaison.....	20
1.15.1 Recombinaison radiative .....	21

1.15.2 Recombination Shockley Read Hall (SRH) .....	22
1.15.3 Recombinaison Auger .....	22
1.15.4 Recombinaison de surface .....	23
1.16 Le phosphure d'indium et de galium (InGaP) .....	23
1.16.1 Le phosphure d'indium (InP) .....	23
1.16.2 Le phosphure de galium (GaP).....	24
1.17 Le silicium.....	25
1.18 Caractéristique des matériaux InGaP/Si .....	26
1.19 Conclusion.....	27

## **Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïque**

2.1 Introduction .....	28
2.2 La cellule solaire.....	28
2.2.1 Définition .....	28
2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	29
2.4 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire .....	31
2.4.1 L'équilibre thermodynamique.....	31
2.4.2 Hors équilibre thermodynamique .....	31
2.5 Architecture d'une cellule photovoltaïque.....	32
2.5.1 L'émetteur et la Base .....	33
2.5.2 Passivation des faces avant et arrière .....	33
2.5.3 La texturation de la surface .....	34
2.5.4 Contacts face avant et arrière .....	34
2.5.5 Champ électrique dans la zone arrière BSF .....	35
2.5.6 La couche antireflet .....	35
2.6 Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV .....	35
2.6.1 La caractéristique courant-tension d'une cellule PV .....	35
a Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	36

b	Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	36
c	Facteur de forme (Facteur de remplissage) FF .....	37
d	Rendement de conversion d'énergie .....	37
e	Point du fonctionnement $P_m$ : .....	38
2.7	Cellule photovoltaïque à base de InGaP .....	39
2.7.1	Cellule Multi-jonction .....	39
a	Cellule tandem .....	39
b	Cellule cascade.....	40
2.8	Conclusion.....	41

### **Chapitre 3 : Simulations**

3.1	Introduction .....	42
3.2	Description de la structure simulée.....	42
3.3	Paramètre de maille.....	43
3.4	Caractéristiques des matériaux .....	44
3.5	Irradiation d'un corps noir : .....	45
3.6	L'absorption .....	45
3.7	Cellule du haut InGaP.....	46
3.7.1	Densité de Courant de court-circuit $J_{cc}$ de la structure InGa .....	46
3.7.2	Tension de circuit ouvert .....	48
3.7.3	Caractéristiques courant-tension .....	48
3.7.4	Puissance délivrée.....	49
3.7.5	Puissance maximale .....	50
3.7.6	Facteur de Forme .....	50
3.7.7	Rendement .....	51
3.8	La cellule du bas Si .....	52
3.8.1	Densité de Courant de court-circuit $J_{cc}$ .....	52
3.8.2	Tension de circuit ouvert .....	52

3.8.3	Caractéristiques courant-tension .....	53
3.8.4	Puissance délivrée.....	54
3.8.5	Puissance maximale .....	55
3.8.6	Facteur de Forme.....	56
3.8.7	Rendement .....	56
3.9	Structure InGaP /Si.....	57
3.9.1	Structure tandem.....	57
a	Densité de courant de court-circuit .....	57
b	Caractéristique courant-tension .....	58
c	Puissance délivrée .....	59
d	Rendement.....	60
3.9.2	Structure cascade .....	60
a	Rendement.....	60
3.10	Conclusion.....	61
	Conclusion générale.....	62
	Bibliographie.....	64

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure 1.1 Le soleil .....	4
Figure 1.2 Spectre électromagnétique .....	6
Figure 1.3 Les composants du rayonnement solaire .....	7
Figure 1.4 Différentes constantes d'illumination .....	8
Figure 1.5 Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0(bleu) et AM1.5 (rouge).....	8
Figure 1.6 L'irradtiaon spectrale (AM0,AM1.5G,corp noir) en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ .....	11
Figure 1.7 Représentation de bande d'énergie .....	13
Figure 1.8 Tableau de Mendeleiev ou tableau periodique des éléments.....	14
Figure 1.9 Représentation d'une jonction PN.....	15
Figure 1.10 Diagramme des énergies pour un materiau .....	17
Figure 1.11 Type de recombinaisons .....	21
Figure 1.12 Structure cristalline de type blende(InP) .....	24
Figure 1.13 Structure cristalline de type blende (GaP).....	24

### Chapitre 2

Figure 2.1 Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque .....	30
Figure 2.2 Structure d'une cellule photovoltaïque.....	33
Figure 2.6.1 Caractéristiques I(V) sous obscurité et sous éclairément d'une cellule PV .....	36

Figure 2.7 Cellule tandem .....	40
Figure 2.8 Cellule cascade.....	41

### Chapitre 3

Figure 3.1 Schéma de la structure simulée.....	43
Figure 3.2 La variation du désaccord de maille $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ .....	44
Figure 3.3 Le flux incident $F$ en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ à $T=6000\text{k}$ .....	45
Figure 3.4 La variation du coefficient d'absorption $\alpha$ de $\text{InGaP}$ en fonction de la longueur d'onde.....	46
Figure 3.5 Variation du courant de court-circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur $L_b$ .....	47
Figure 3.6 Variation du courant de court-circuit $J_{cc}$ en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	47
Figure 3.7 Variation de la tension de circuit-ouvert $V_{co}$ en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	48
Figure 3.8 Caractéristiques courant-tension de la structure $\text{InGaP}$ pour plusieurs concentrations d'indium $x$ ( $L_b=2\mu\text{m}$ ).....	49
Figure 3.9 Puissance délivrée par la jonction $\text{InGaP}$ pour plusieurs concentrations d'indium $x$ .....	49
Figure 3.10 Variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	50
Figure 3.11 Variation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	51
Figure 3.12 Représentation du rendement de la structure $\text{InGaP}$ en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	51
Figure 3.13 Variation de courant de court-circuit en fonction de la concentration d'indium .....	52
Figure 3.14 Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration d'indium $x$ .....	53

Figure 3.15 Caractéristiques courant tension de la cellule du bas pour plusieurs concentrations d'indium x .....	54
Figure 3.16 Puissance délivrée par la jonction Si pour plusieurs concentrations d'indium x .....	55
Figure 3.17 Variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium .....	55
Figure 3.18 Variation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium x .....	56
Figure 3.19 Représentation du rendement de la structure Si en fonction de la concentration d'indium x.....	57
Figure 3.20 Densités de courant de court-circuit en fonction de la concentration d'indium x .....	58
Figure 3.21 Caractéristiques courant tension de la structure .....	59
Figure 3.22 Puissance délivrée de la structure .....	59
Figure 3.23 Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure InGaP/Si en fonction de la concentration d'indium x.....	60



## Liste des tableaux

Tableau 1 Le potentiel solaire en Algérie .....	1
Tableau 1.1 Paramètres physiques fondamentaux de InGaP ..	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 1.2 Propriétés électriques du silicium (Si) .....	26
Tableau 3.1 Donnée de la structure simulée.....	44

# Introduction générale

---

De nos jours, l'énergie est quelque chose d'indispensable à notre quotidien, elle est l'étincelle qui permet d'accomplir toute activité humaine. Elle est aussi un facteur de développement et le pilier de l'économie moderne.

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

L'Algérie dispose d'un rayonnement solaire assez impressionnant pour qu'elle s'engage pleinement à exploiter l'énergie solaire photovoltaïque et d'en profiter pour répondre aux besoins croissant d'électricité de sa population beaucoup plus que d'autres exploitations d'énergie.

Vu le gisement solaire important dont dispose l'Algérie, le programme national des énergies renouvelables se concentre essentiellement sur le développement de l'énergie photovoltaïque. Le tableau 1 montre le potentiel solaire en Algérie.

Région	Région côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau 1** Le potentiel solaire en Algérie [1].

L'objectif de la stratégie du développement de l'énergie photovoltaïque en Algérie est d'atteindre 40 % de la production nationale d'électricité d'ici 2030.

La technologie des cellules multi-jonctions permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements. Pour cela, plusieurs jonctions P-N, possédant des gaps d'énergie différents, sont empilées.

Les cellules solaires à base des matériaux III-V, ayant des paramètres cristallins voisins et peu de défauts, ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé par rapport à celle du silicium et de leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace[2].

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales[3].

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaire est considérée comme la plus importante tâche à être développée pour mieux utiliser l'énergie solaire et produire de l'électricité. Cette dernière nécessite l'optimisation des paramètres de la cellule solaire.

Ce travail est abordé selon les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous présentons les caractéristiques du soleil tels que le spectre solaire, le corps noir, le flux incident ainsi que l'étude des matériaux InGaP et Si et leurs caractéristiques structurelles, électriques et optiques.

Le deuxième chapitre consiste à présenter le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque, ainsi que les équations nécessaires aux simulations.

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de InGaP/Si. Enfin nous terminons ce travail par une conclusion.

## 1.1 Introduction

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie gratuite et non polluante, elle peut se transformer en énergie électrique par l'effet photovoltaïque découvert par A. Becquerel en 1839, cette conversion est sans doute l'un des modes les plus importants d'usage de l'énergie solaire.

La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction PN au Silicium.

Dans ce chapitre nous allons étudier les généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque : la cellule solaire.

## 1.2 Energie solaire photovoltaïque

Depuis plusieurs années, l'humanité fait face à une demande en énergie croissante due à l'augmentation de la population et à la qualité de vie exigeante en matière de consommation d'énergie.

Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent l'inconvénient d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gaz à effet de serre.

Comme la plupart des choses qui se passent sur la Terre peuvent être liées à l'énergie fournie par le soleil, le terme « énergie solaire » risque de s'étendre pour devenir si général qu'il perd son utilité. Par exemple, le vent étant causé par le réchauffement de l'atmosphère par le soleil, l'énergie éolienne peut être considérée comme une forme d'énergie solaire, les plantes en combustion ou les biocarburants peuvent également être considérées comme une forme d'énergie solaire, car les plantes utilisent la lumière visible comme source d'énergie et ne peuvent pas grandir sans elle [4].

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement

De vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie.

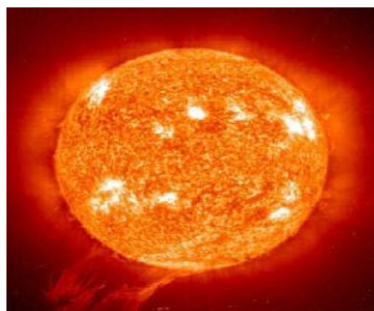
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Certains pays mettent en place des mesures pour inciter à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Et dans ce cadre-là, l'énergie produite est achetée à prix attractif (prix du kWh produit plus élevé que le prix du kWh consommé et facturé par le fournisseur d'énergie) [5].

## 1.3 Le soleil

### 1.3.1 Caractéristiques générales

Le Soleil est une étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise [5].



**Figure 1.1.** Le soleil [6].

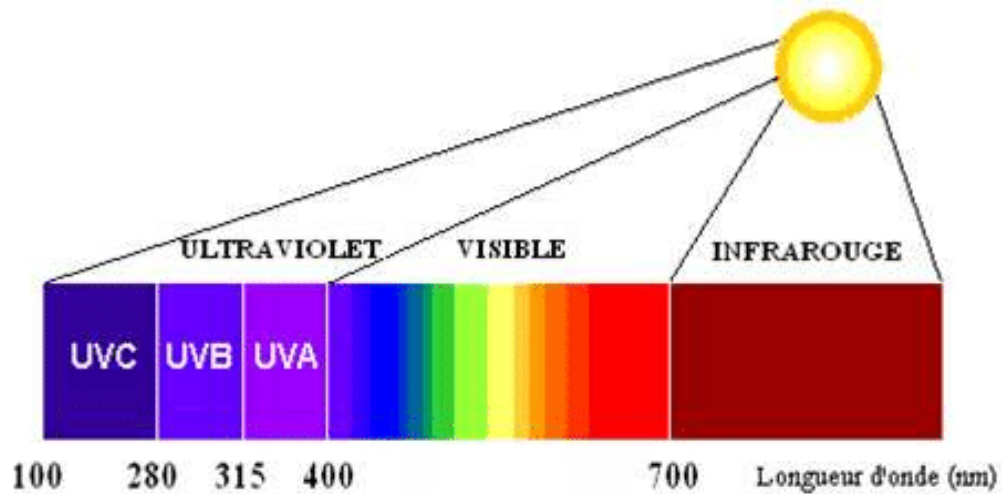
Sa lumière est 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir) et il est visible à une distance de 60 al (année-lumière). Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical éthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, etc.... [7].

### 1.3.2 Le spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'onde est appelée spectre électromagnétique. En effet, Il est 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 :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde. C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.



*Figure 1.2.* Spectre électromagnétique [8].

## 1.4 Le rayonnement solaire

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,25  $\mu\text{m}$  à 2,5  $\mu\text{m}$ , l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95 % environ du total.

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370  $\text{W}/\text{m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [9].

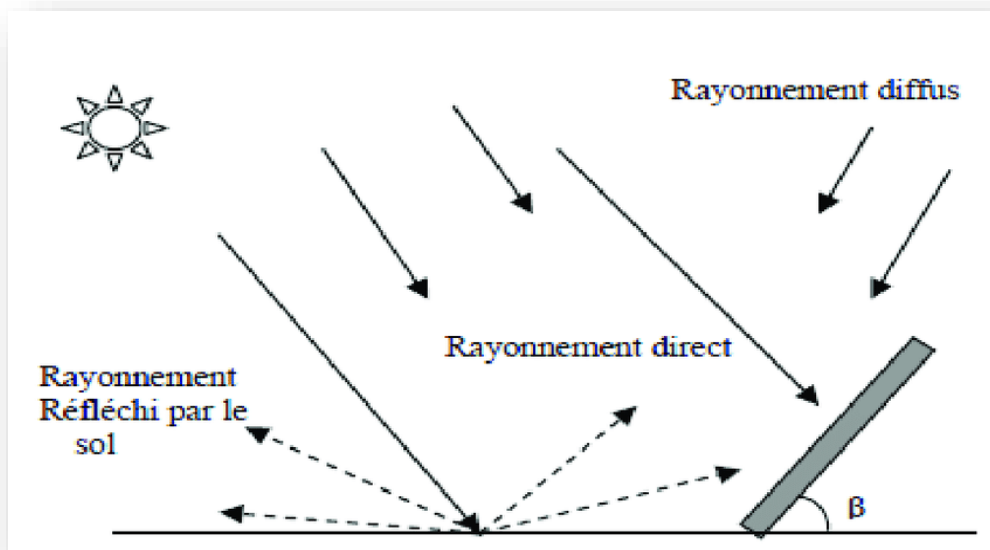
Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements :

- Le rayonnement direct : définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par nuages.
- Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre

après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle n'est donc nulle que la nuit.

- Le rayonnement réfléchi (albédo) : Radiation solaire incidente réfléchi par une surface.

Le rayonnement global est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustré dans la figure ci-dessous :



**Figure 1.3.** Les composantes du rayonnement solaire.

Le trajet parcouru par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son maximum aux premières heures de la matinée et en fin d'après-midi. Par contre, il est à son minimum lorsque le soleil est au zénith. Pour cette même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, le rayonnement solaire global reçu au cours d'une journée peut varier de 0,5 KWh/m<sup>2</sup> pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordique à plus de 6 KWh/ m<sup>2</sup> pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

Evidemment, par temps couvert le rayonnement solaire au sol peut tomber pratiquement à zéro. En revanche, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement dégagé, le rayonnement solaire diffus tombant au sol peut atteindre 15



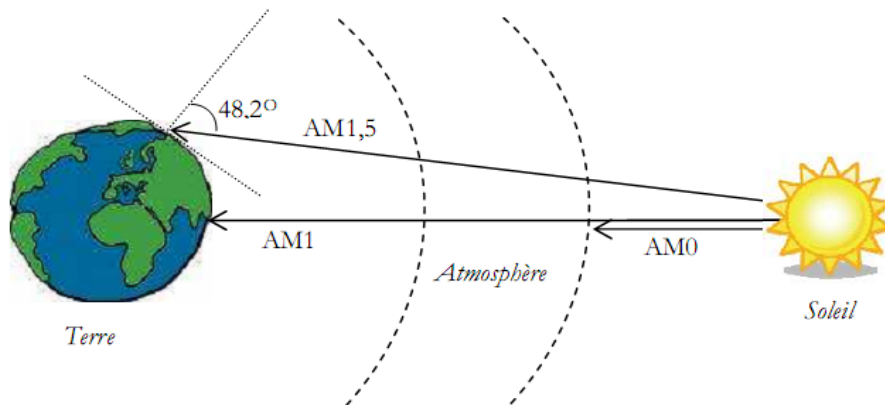
à 20 % du rayonnement global, mais avec un ciel couvert, le rayonnement parvenant au sol est en totalité un rayonnement diffus.

## 1.5 Masse d'air

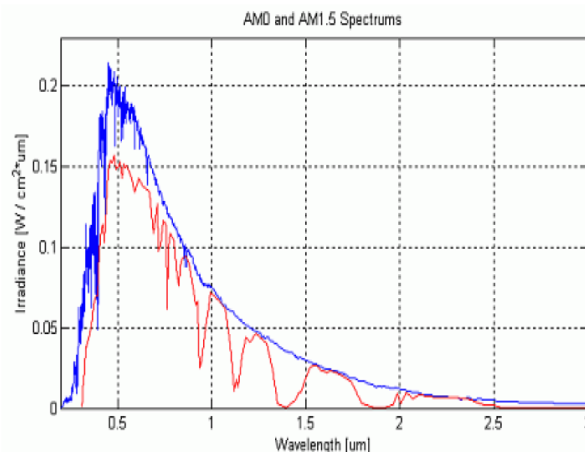
Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié [10]. On appelle masse d'air AM, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.2)$$

Où :  $h$  : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (deg).



**Figure 1.4.** Différentes constantes d'illumination [11].



**Figure 1.5.** Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge).

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 48,2° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

Soleil au zénith (au niveau de la mer) : AM 1

Soleil à 48,2° : AM 1.5.

Rayonnement solaire hors atmosphère : AM 0

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

- 9% dans la bande des ultraviolets < **0,4  $\mu\text{m}$**
- 47% dans la bande visible **0,4  $\mu\text{m}$  à 0,8  $\mu\text{m}$**
- 44% dans la bande des infrarouges > **0,8  $\mu\text{m}$**

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de **1,37  $\text{kW}/\text{m}^2$**  avec un spectre centré au voisinage de  **$\lambda=0.48 \mu\text{m}$** .

## 1.6 Radiation d'un corps noir

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température. Les sources corps noirs qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible. L'irradiation spectrale d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée par l'équation suivante :

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} \quad (1.3)$$

Avec :

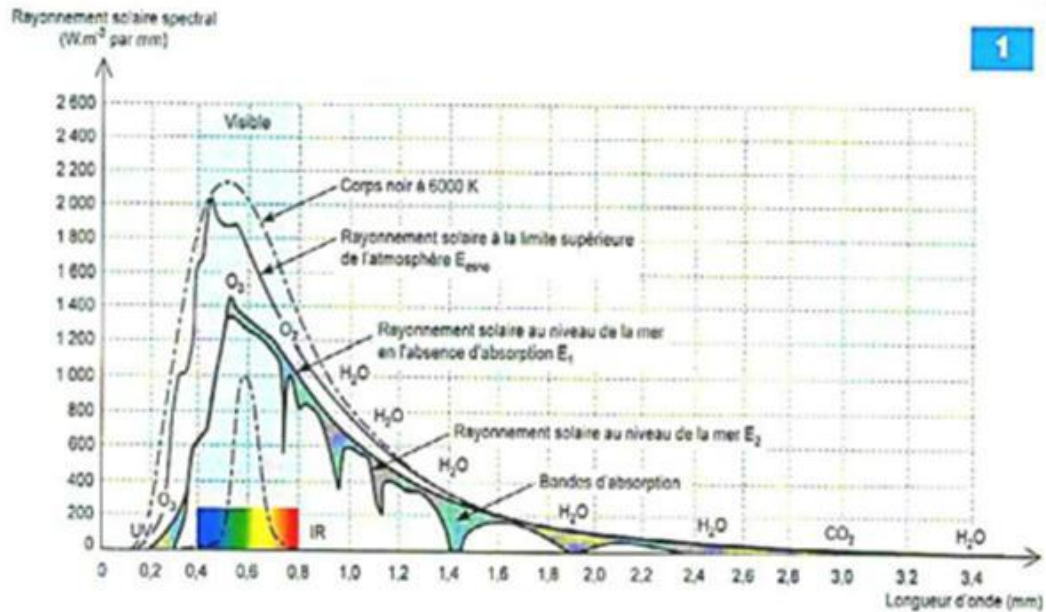
$$A = \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \quad (1.4)$$

- $\nu$  : La fréquence de la lumière.
- $k$  : La constante de Boltzmann.
- $T$  : La température.
- $c$  : vitesse de la lumière dans le vide.
- $R_s$  : Rayon du soleil ( $R_s = 6,96 \cdot 10^5$  km)
- $d$  : distance soleil-terre ( $d = 1,5 \cdot 10^9$  km)
- $\lambda$  : longueur d'onde de la lumière.

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- De l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- De la latitude du lieu et son degré de pollution.
- De la période de l'année.
- De l'instant considéré dans la journée.
- De la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.



**Figure 1.6.** L'irradiation spectrale (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde[12].

## 1.7 Les semi-conducteurs

Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes que sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs, On considère comme :

- Isolants : les matériaux de conductivité  $\sigma < 10^{-8}$  S/cm, pour le diamant  $10^{-14}$  S/cm.
- Semi-conducteurs : les matériaux tels que  $10^{-8}$  S/cm  $< \sigma < 10^3$  S/cm par exemple le silicium  $10^{-5}$  S/cm
- Conducteurs : les matériaux tels que  $10^3$  S/cm  $< \sigma$ , pour l'argent  $10^6$  S/cm.

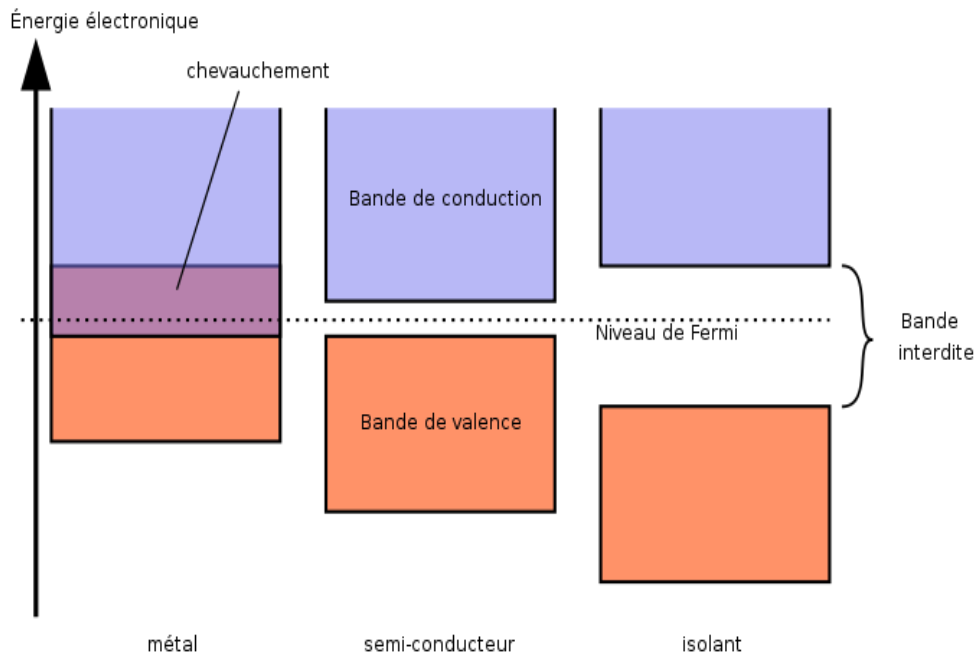
Les propriétés électriques d'un matériau sont fonction des populations électroniques des différentes bandes permises. La conduction électrique résulte du déplacement des électrons à l'intérieur de chaque bande. Sous l'action du champ électrique appliqué au matériau l'électron acquiert une énergie cinétique dans le sens opposé au champ électrique. Considérons à présent une bande d'énergie vide, il est évident de par le fait qu'elle ne contient pas d'électrons, elle ne participe pas à la

formation d'un courant électrique. Il est de même pour une bande pleine. En effet, un électron ne peut se déplacer que s'il existe une place libre (un trou) dans sa bande d'énergie. Ainsi, un matériau dont les bandes d'énergie sont vides ou pleines est un isolant. Une telle configuration est obtenue pour des énergies de gap supérieures à  $\sim 9\text{eV}$ , car pour de telles énergies, l'agitation thermique à 300K, ne peut pas faire passer les électrons de la bande de valence à celle de conduction par cassure de liaisons électroniques. Les bandes d'énergie sont ainsi toutes vides ou toutes pleines.

Un semi-conducteur est un isolant pour une température de 0K. Cependant ce type de matériau ayant une énergie de gap plus faible que l'isolant ( $\sim 1\text{eV}$ ), aura par agitation thermique ( $T=300\text{K}$ ), une bande de conduction légèrement peuplée d'électrons et une bande de valence légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de trous pour une bande presque pleine, on déduit que la conduction d'un semi-conducteur peut être qualifiée de « mauvaise ».

Pour un conducteur, l'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap. La bande de conduction est alors partiellement pleine (même aux basses températures) et ainsi la conduction du matériau est « élevée ».

- **la bande de valence** : c'est la bande énergétique des électrons qui assurent les liaisons covalentes (réalisées par les électrons de valence) entre les atomes du réseau.
- **la bande de conduction** : c'est la bande d'énergie immédiatement supérieure à la bande de valence.



**Figure 1.7.** Représentation de bande d'énergie.

## 1.8 Les Matériaux III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V de la classification périodique de Mendeleïev. Ils sont obtenus, soit par tirage de monocristaux massifs, soit par croissance épitaxiale de couches minces [13].

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et

optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en général) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs.

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figure 1.8. Tableau de Mendeleïev ou tableau périodique des éléments [14].

## 1.9 La jonction PN

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte c'est à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant

derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique  $E$  qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [15].

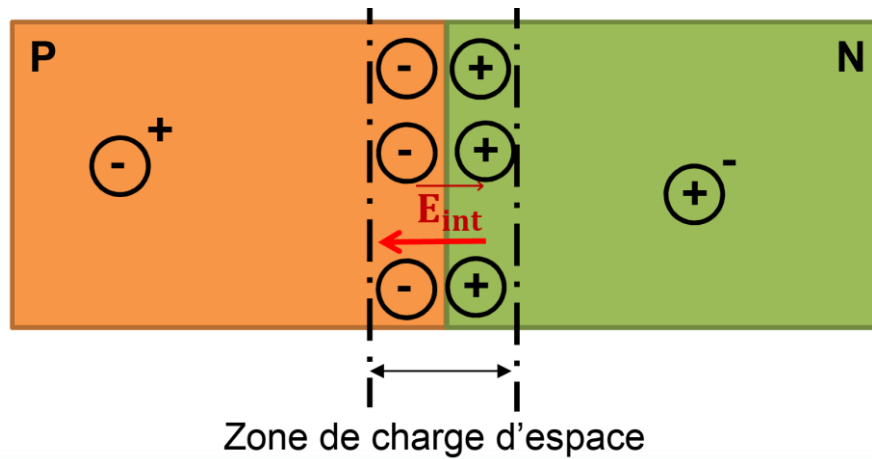


Figure 1.9. Représentation d'une jonction PN.

## 1.10 Equations fondamentales dans les semi-conducteurs

Le comportement électrique d'une jonction PN est décrit par les équations de transport des semi-conducteurs suivantes :

Equation de Poisson

$$\frac{\partial(\epsilon E)}{\partial x} = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.5)$$

Avec :

$$E = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

Les équations de continuité des électrons et des trous

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = -q(R - G) \quad (1.6)$$



$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = -q(R - G) \quad (1.7)$$

Avec :

R : Taux de recombinaison.

G : Taux de génération.

Les densités de courant des électrons et des trous sont données par les relations

$$J_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$J_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial x} \quad (1.9)$$

Avec :

$J_n$  : densité des courants des électrons.

$J_p$  : densité des courants des trous.

$\mu_n$  : mobilité des électrons.

$\mu_p$  : mobilité des trous.

$\partial E_{Fn}$  : Quasi de fermi des porteurs.

On intègre sur toutes les longueurs d'onde du spectre solaire pour avoir le photo-courant  $J_{ph}$ . Le courant total est donné par :

$$J = J_{ph} - J_{obs} \quad (1.10)$$

Avec :

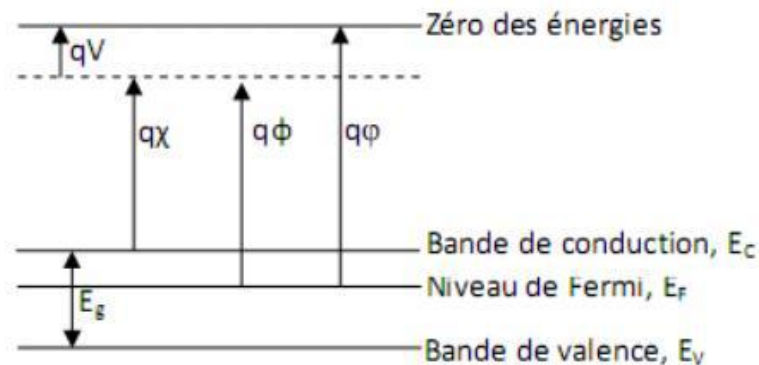
-  $J_{ph}$ : Photo-courant.

-  $J_{obs}$ : Courant d'obscurité.

## 1.11 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite  $E_g$ , et de sa densité de porteurs. Avant de détailler ces valeurs pour l'InGaP, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la

bande de valence et le bas de la bande de conduction.



**Figure 1.10.** Diagramme des énergies pour un matériau [11].

Avec :

$q$  : la charge élémentaire.

$V$  : le potentiel électrostatique pouvant régner dans les matériaux.

$\chi$  : l'affinité électronique.

$\phi$  : le travail de sortie.

$\varphi$  : le potentiel d'ionisation.

Le bas de la bande de conduction varie spatialement avec le potentiel électrostatique macroscopique  $V$  régnant à l'intérieur du matériau. L'affinité électronique  $\chi$  peut être définie comme la quantité d'énergie dégagée suite à la capture d'un électron par un atome en phase gazeuse. Plus l'affinité électronique est grande plus la capture d'un électron par l'atome dégage de l'énergie et plus cette capture est stable.

Le travail de sortie  $\phi$  correspond au travail à fournir pour extraire une particule du système sans l'emmener à l'infini, mais en la laissant à proximité immédiate du système où elle reste soumise au même potentiel électrostatique  $V$ . Enfin, le potentiel d'ionisation, est l'énergie nécessaire pour extraire une particule du système

et la mettre à l'infini [11].

## 1.12 Evolution du gap d'énergie dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaP et InP, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l'InGaP en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure.

La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constants élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants [16,17].

La loi de Vegard avec paramètre de courbure est définie par :

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}) = (1 - X) E_g(\text{GaP}) + x E_g(\text{InP}) - bx(1 - x) \quad (1.11)$$

Avec :

$x$  : la concentration d'indium dans ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ )

$E_g(\text{InGaP})$  : le gap d'énergie de l'InGaP

$E_g(\text{GaP})$  : le gap d'énergie du GaP

$E_g(\text{InP})$  : le gap d'énergie de l'InP

$b$  : paramètre de bowing

## 1.13 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau dépendent principalement de son indice de réfraction et de son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction.

## 1.13.1 Absorption

Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau [18].

## 1.13.2 Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau. Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite ( $E_g$ ), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie  $E$  supérieure à l'énergie de la bande interdite est donné par :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.12)$$

$E$  : énergie du photon

$\alpha_0$  : Constante qui dépend du matériau

$E_g$  : énergie de bande interdite

## 1.14 Génération optique

La génération est définie comme un processus par lequel les électrons et les trous sont créés [19]. La génération des électrons et des trous comme indiquée par les équations de continuité est faite grâce au rayon lumineux. Cette dernière est connue comme une génération optique. Quand la lumière frappe un semi-conducteur, elle excite et génère les porteurs de charge par des transitions de la bande de valence à la bande de conduction (transition directe) dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions indirectes dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque. Le déplacement des porteurs permet de créer des paires électrons trous. Cette recombinaison évite la création du courant électrique. Il faut, donc séparer ces charges en réalisant la jonction p-n.

Le taux de génération est donné par l'expression suivante :

$$G_{opt} = (1 - R). \alpha. \exp(-\alpha x) \quad (1.13)$$

Avec :

- R : est le coefficient de réflexion.
- x : est la distance de la surface.

## 1.15 Recombinaison

Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trous, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par [20] :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta_{n,p}}{\tau_{n,p}} \quad (1.14)$$

Avec :

- $\Delta_{n,p} = n.p - n_e.p_e$ : La densité des porteurs générés.
- $n_e, p_e$ : Les densités des porteurs à l'équilibre.
- $\tau_{n,p}$ : La durée de vie de ces porteurs.

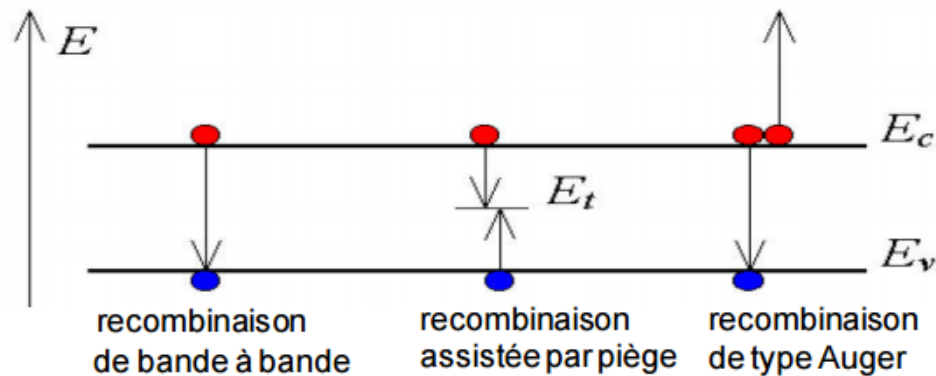
Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}s$ ) [21].

La recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison radiative (de bande à bande)
- Recombinaison Shockley Read Hall (SRH) (de bande aux impuretés, avec l'aide de pièges)
- Recombinaison Auger

- Recombinaison de surface

Ces processus sont présentés dans la figure 1-12.



**Figure 1.11.** Type de recombinaisons [22].

## 1.15.1 Recombinaison radiative

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs. Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire le taux de recombinaison est le plus élevé. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte [23].

$$R_d = B(np - n_i^2) \quad (1.15)$$

Avec : B est le coefficient de recombinaison radiative

## 1.15.2 Recombination Shockley Read Hall (SRH)

La recombinaison assistée par piège se produit lorsqu'un électron tombe dans un «piège», ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impureté. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et le trou, qui se rencontrent dans le piège [24].

$$R_{SRH,n} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{SRH,n} \left( p + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{kT}} \right) + \tau_{SRH,p} \left( n + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{kT}} \right)} \quad (1.16)$$

Avec :

- $R_{SRH}$  est défini comme étant le taux net de capture.
- $E_i$ : le niveau de fermi intrinsèque.
- $E_T$ : représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite.

## 1.15.3 Recombinaison Auger

C'est le mécanisme qui intervient lors d'une forte concentration de porteurs libre, comme dans les semi-conducteurs à gap indirect [25].

L'énergie libérée par la recombinaison transfère un électron à un niveau supérieur de la bande de conduction, ou un trou, à un niveau plus profond de la bande de valence.

Le taux de recombinaison total est calculé par la forme suivante [26] :

$$R_{Au} = (c_n n + c_p p)(np - n_i^2) \quad (1.17)$$

Avec :  $c_n$  et  $c_p$  Sont des coefficients d'Auger pour les électrons et les trous respectivement.

## 1.15.4 Recombinaison de surface

Ce sont des Recombinaisons au niveau des surfaces et des interfaces qui peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs semi-conducteurs. C'est parce que les surfaces et interfaces contiennent généralement un grand nombre de centres de recombinaison en raison de l'interruption soudaine du cristal semi-conducteur, ce qui laisse un grand nombre d'États électriquement actives. En outre, les surfaces et les interfaces sont plus susceptibles de contenir des impuretés car elles sont exposées pendant le processus de fabrication du dispositif [24].

## 1.16 Le phosphore d'indium et de galium (InGaP)

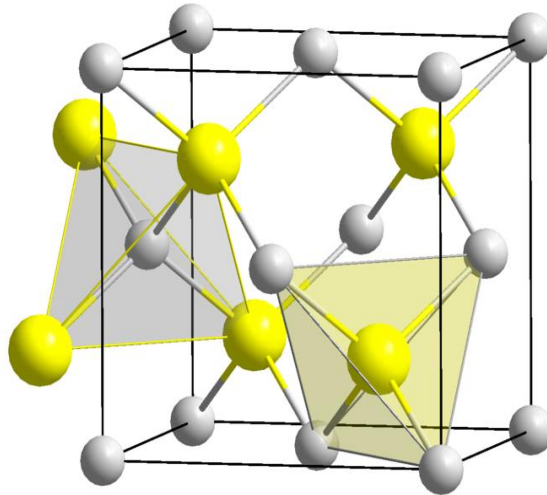
L'InGaP avec un gap  $E_g$  d'environ 1,9eV est le semi-conducteur le plus promoteur pour les cellules supérieures des cellules solaires multi jonction pour couvrir la gamme du spectre solaire comprise entre 350 nm et 650 nm. C'est un alliage de deux semi-conducteurs binaires. Il est composé de l'indium, du gallium et du phosphore, utilisé pour les hautes puissances et les hautes fréquences en électronique, en raison de la vitesse des électrons qui est supérieure par rapport au Si et au Ge. La croissance de l'InGaP par épitaxie peut être compliquée en raison de la tendance de celui-ci à croître en tant que matériau commandé, plutôt qu'un alliage vraiment aléatoire qui change sa structure de bande et les propriétés électriques et optiques du matériau.

### 1.16.1 Le phosphore d'indium (InP)

L'InP est un semi-conducteur binaire constitué de l'indium et du phosphore. Il possède une structure cubique à faces centrées (cfc), de chacun des deux composants imbriquées et décalées d'un vecteur  $(1/4 : 1/4 : 1/4)$ , autrement dit, une maille cfc de l'un des constituants dont quatre des huit sites tétraédriques sont occupés par l'autre constituant. Il possède donc une géométrie tétragonale où chaque ion d'indium est lié à quatre ions phosphore. Les propriétés physiques de l'InP telles que : l'énergie de gap 1,344 eV, la mobilité des électrons  $5400 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ , la densité  $4,81 \text{ g/cm}^3$ , le point de fusion  $1062 \text{ }^\circ\text{C}$ , la conductivité thermique  $0,68$



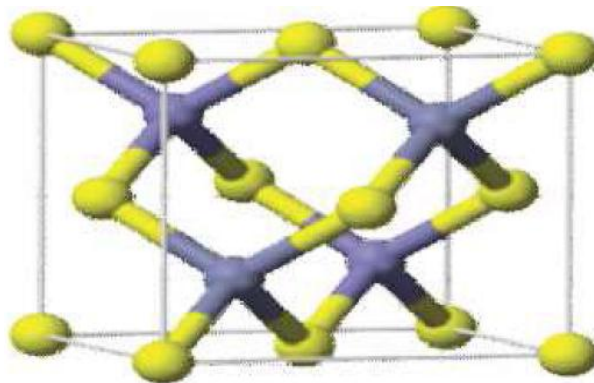
W/cm.K, l'indice de réfraction (de 3,1 à 3,55), nous permettent de l'utiliser en optoélectronique, comme par exemple dans la fabrication des diodes laser. InP est, aussi, utilisé comme substrat pour la croissance par épitaxie de composés optoélectroniques à base d'arséniure d'indium-gallium (InGaAs).



**Figure 1.12.** Structure cristalline de type blende (InP).

## 1.16.2 Le phosphure de gallium (GaP)

Le GaP est un matériau semi-conducteur composé de phosphore et de gallium. Il est inodore et insoluble. Les propriétés essentielles de GaP sont en général : l'énergie de gap 2,26eV, la masse molaire 100,697 g/mol le point de fusion 1477°C, la densité 1,138 g/cm<sup>3</sup>, la mobilité des électrons 250 cm<sup>2</sup>/V.s, la conductivité thermique 1,1W/K.cm et l'indice de réfraction compris entre 3,02 et 3,45. Le tellure est utilisé comme matériaux dopant pour produire du phosphure de gallium de type N et le zinc comme dopant pour produire du phosphure de gallium de type P.



**Figure 1.13.** Structure cristalline de type blende (GaP).

## 1.17 Le silicium

C'est le semi-conducteur le plus utilisé et est disponible en quantité incalculable à la surface de la terre, puisque présent dans le sable sous forme de silice et de silicates. C'est ce silicium qui compose les circuits intégrés, utilisés massivement dans l'électronique.

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique ; il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Son seul véritable inconvénient est :

- Gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  pour le silicium, alors que seulement 1  $\mu\text{m}$  de GaAs suffit.
- la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés [27].

## 1.18 Caractéristique des matériaux InGaP/Si

Paramètres à 300°K	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> P
Dopage	$N_a = N_d = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$
Durées de vie des électrons (s)	$\tau_n = 10^{-6}$
Durées de vie des trous (s)	$\tau_p = 10^{-6}$
a (Å)	5,655
$E_g$ (eV)	2.16
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> ) à 300°K	$1.64 \cdot 10^{25}$
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> ) à 300°K	$1,81 \cdot 10^{25}$
Permittivité relative	$\epsilon_r = 11,24$
Concentration d'indium	0,1
Mobilité électronique (cm <sup>2</sup> /V.s)	0,076
Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> /V.s)	0,015

**Table 1.1** : Paramètres physiques fondamentaux de InGaP.

Propriétés à 300°K		Si
Largeur de bande interdite $E_g$ (eV)		1,12
Concentration d'atomes (/cm <sup>3</sup> )		$5 \cdot 10^{22}$
Concentration intrinsèque (/cm <sup>3</sup> )		$1,45 \cdot 10^{10}$
Mobilités (m <sup>2</sup> /V.s)	$\mu_n$	1450
	$\mu_p$	500
Constantes diélectriques relatives $\epsilon_r$		11,7

**Tableau 1.2.** Propriétés électriques du silicium (Si) [28].

## 1.19. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire. Ensuite, nous avons abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et l'irradiation spectrale.

Puis nous avons étudié les caractéristiques structurelles, les propriétés électriques et optiques du matériau InGaP et du silicium (Si). Ces connaissances sont indispensables pour la détermination des caractéristiques des cellules solaires.

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

### 2.1 Introduction

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps.

Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales.

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.

### 2.2 La cellule solaire

#### 2.2.1 Définition

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Elle fournit la source d'énergie de longue durée la plus importante pour les satellites et les véhicules spatiaux. Elle a été aussi implantée avec succès dans plusieurs applications terrestres à échelle réduite. Son importance ne cesse pas de croître surtout depuis que le monde s'est mis à l'évidence qu'il doit développer d'autres ressources d'énergie autres que les ressources conventionnelles. Le meilleur candidat pour cette fonction est le soleil [29].

### 2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

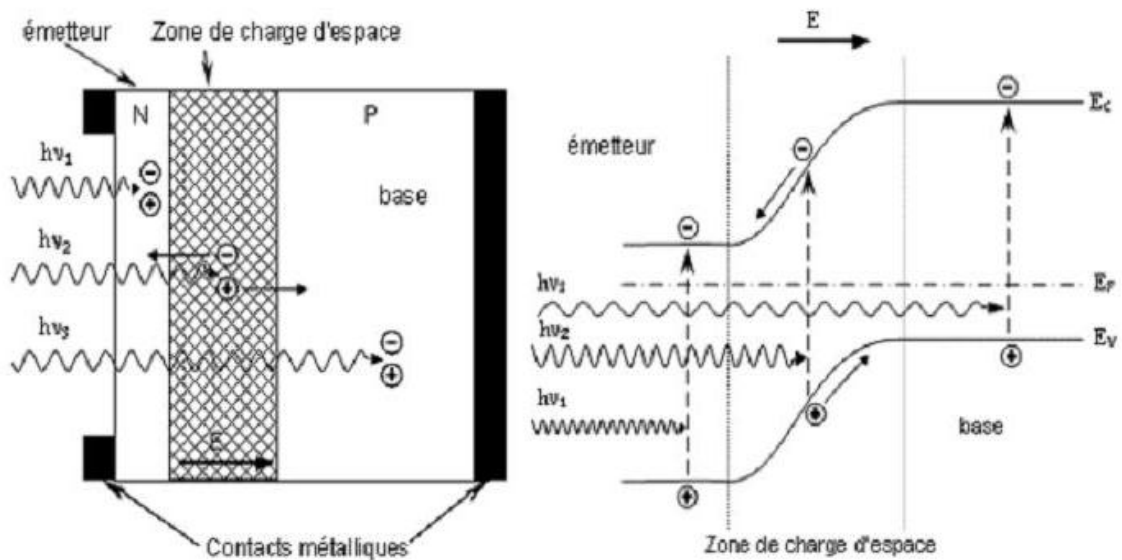
Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Le principe de fonctionnement d'une cellule à jonction p-n est décrit dans la figure 2.1. Les photons incidents créent des paires électron-trou et nous avons deux scénarios possibles suivant le lieu de création des paires électron-trou :

Si une paire est générée dans une zone électriquement neutre (p ou n), les porteurs diffusent. Si les porteurs minoritaires atteignent la zone de charge d'espace alors ils sont propulsés par le champ électrique dans la zone où ils deviennent porteurs majoritaires. Ces porteurs contribuent ainsi au courant par leur diffusion et il se crée un courant de diffusion.

Si une paire est générée dans la zone de charge d'espace, l'électron et le trou sont séparés par le champ électrique et chacun est propulsé dans la région où il est porteur majoritaire (région n pour l'électron et région p pour le trou). Ces porteurs donnent naissance à un courant de génération. Ces deux contributions donnent naissance à un photo-courant qui contribue au courant inverse de la diode formée par la jonction. Le courant inverse d'une jonction p-n est fonction des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode et de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. L'éclairement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les zones neutres et la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace [30].

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques



**Figure 2.1.** Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [30].

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- 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 que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN.

### 2.4 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

#### 2.4.1 L'équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, l'agitation thermique permet à des électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction en laissant un trou dans la bande de valence.

Le potentiel de diffusion de la jonction PN, ( $V_0$ ) est défini par :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{kT}{q}\right) \text{Log} \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.1)$$

Avec :

- $V_n$  et  $V_p$  : les potentiels dans les matériaux N et P, respectivement
- $k$  : la constante de Boltzmann
- $T$  : la température
- $n_i$  : la concentration intrinsèque des porteurs libres.
- $N_d$  : la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N
- $N_a$  : la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P.
- $q$  : la charge de l'électron.

#### 2.4.2 Hors équilibre thermodynamique

On s'éloigne de l'équilibre thermodynamique lorsque la jonction est éclairée, ou lorsque l'on y applique une polarisation. L'équilibre entre les courants de diffusion et inverse est modifié. Pour une excitation lumineuse, la tension d'excitation est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .



## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

Dans le cas d'une polarisation directe  $V_d$  aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel  $qV_0$  diminue. En conséquence, le courant des porteurs majoritaires augmente et l'intensité du champ électrique interne diminue. On a alors injection de porteurs minoritaires dans les zones neutres, des électrons dans le matériau P et des trous dans le matériau N. Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel.

$$V_{\text{tot}} = V_0 - V = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) - V \quad (2.2)$$

La largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation ( $V$ ) s'écrit alors :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon}{q}\right) \cdot (V_0 - V) \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.3)$$

Avec :

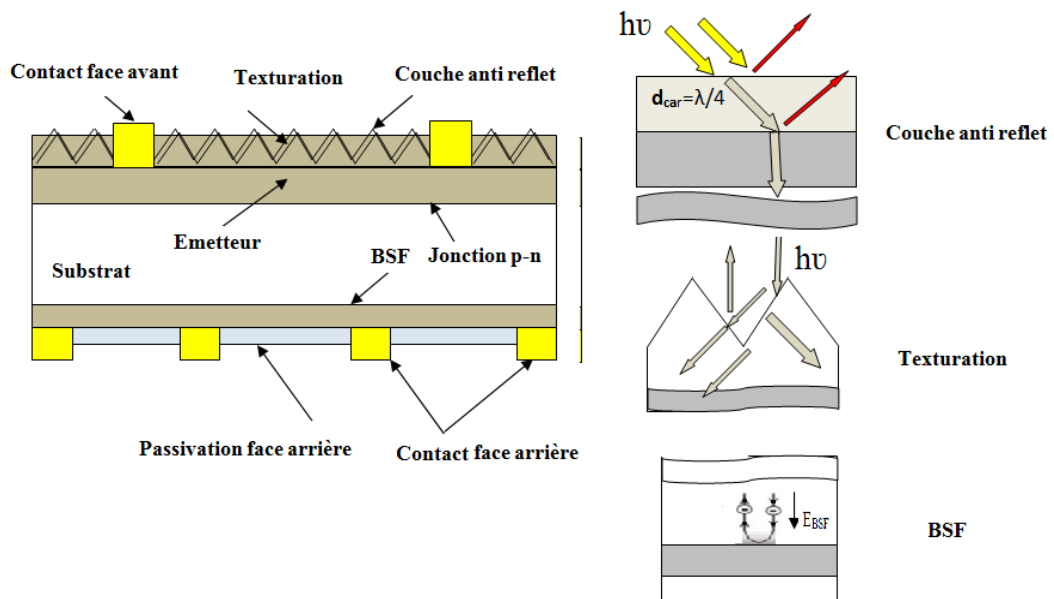
$V_0$  = Le potentiel de diffusion

$V$  = Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

### 2.5 Architecture d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est basé sur trois mécanismes : l'absorption des photons, la conversion de l'énergie optique en énergie électrique et la collecte de cette énergie sur un circuit extérieur. Chacun de ces mécanismes engendrent des pertes et la partie suivante présente les principaux composants utilisés à ce jour pour améliorer le rendement de Conversion. Ces composants sont utilisés dans de nombreuses structures de cellules et nous les présenterons sur la structure la plus commune, la cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces (Figure (2-2)) [31].

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques



**Figure 2.2.** Structure d'une cellule photovoltaïque [32].

### 2.5.1 L'émetteur et la Base

Les couches émetteur et base sont des couches fines à base de semi-conducteur. La région de type n dans une cellule n-p est nommée émetteur. La région de type p- est nommée la base" (Bates 7) [33]. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200  $\mu\text{m}$ . Les trous photo générés ayant une longueur de diffusion ( $L_p$ ) plus faible que celle des électrons ( $L_n$ ).

Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Le faible dopage augmente la durée de la vie des porteurs minoritaires, par contre il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de la cellule.

### 2.5.2 Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ces défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ).

### 2.5.3 La texturation de la surface

La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

### 2.5.4 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire. Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky » [34]. Le contact supérieur couvre la surface de cellule solaire d'un pourcentage de 2–8%. Ce contact a un rôle de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison. Alors que le contact inférieur couvre la partie inférieure de la surface de la cellule.

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

### 2.5.5 Champ électrique dans la zone arrière BSF

Le champ électrique à surface arrière BSF (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée. Elle est localisée sur la face arrière de la cellule solaire et permet de passiver la face arrière de la cellule. Elle est dopée (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat [35].

La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première et le silicium multi cristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées.

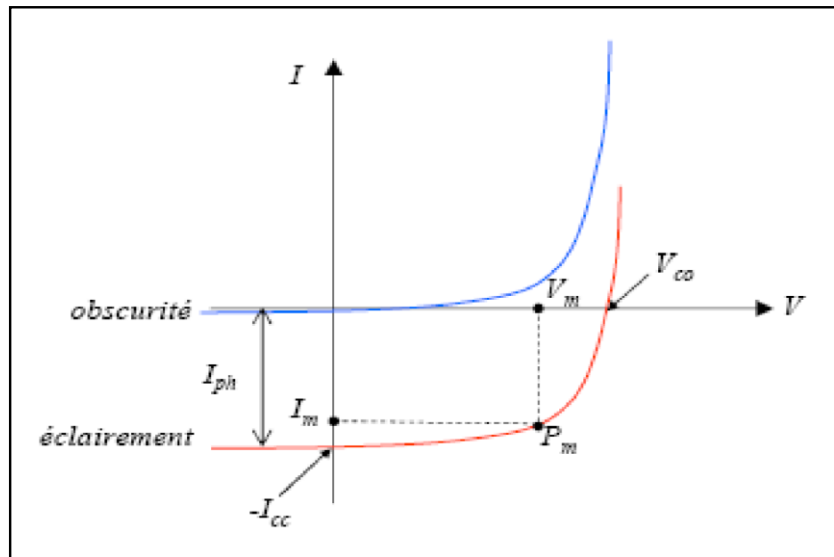
### 2.5.6 La couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) d'épaisseur ( $d_{CAR}$ ) et d'indice de réfraction  $n_{CAR}$  est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quart d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

## 2.6 Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV

### 2.6.1 La caractéristique courant-tension d'une cellule PV

La figure ci-dessous montre la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement, On distingue le courant de court-circuit  $J_{cc}$  pour une tension nulle ainsi que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  pour un courant nul.



**Figure 2.6.1** Caractéristiques I(V) sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV [36].

### **a Courant de court-circuit $I_{cc}$**

Il s'agit d'un courant ( $I_{cc}$ ) obtenu avec une différence de potentiels nulle aux bornes de la cellule ( $V=0V$ ). C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

### **b Tension de circuit ouvert $V_{co}$**

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo courant.

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo courant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.4)$$

$J_0$  : est la densité de courant de saturation.

### ***c Facteur de forme (Facteur de remplissage) FF***

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule PV. On appelle facteur de forme (FF) rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Ce facteur est donné par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.5)$$

### **d Rendement de conversion d'énergie**

Le rendement de conversion est le paramètre le plus important dans la cellule solaire. Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance maximale générée par la cellule et la puissance du rayonnement solaire incident [20].

Le rendement est donné par l'équation ci-dessous :

## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (2.6)$$

Avec :

- $P_i$  : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface
- $S$  : La surface de la cellule PV
- $FF$  : Facteur de Forme.
- $I_m$  : Le courant correspondant à la puissance maximale fournie.
- $U_m$  : La tension correspondante à la puissance maximale fournie.

Le rendement est lié de manière indirecte avec le gap d'énergie. Selon les matériaux utilisés et les applications souhaitées, les matériaux à semi-conducteurs couvrent une large bande de gap d'énergie qui permet de couvrir toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire.

### ***e Point du fonctionnement $P_m$ :***

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

$$P_m = V_m \cdot I_m. \quad (2.7)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V, le point du fonctionnement  $P_m (V_m, I_m)$  qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension  $V_m$  et du courant  $I_m$  appelées également tension et courant maximums respectivement [37].

### 2.7 Cellule photovoltaïque à base de InGaP

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multi-jonctions, sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaP, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire.

#### 2.7.1 Cellule Multi-jonction

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multi-jonctions comprennent des sous-cellules à simple jonction superposées l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie [38].

Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules. Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité a des bandes interdites directes, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [39]

##### *a Cellule tandem*

Dans la configuration tandem, les cellules sont placées en série donc reliées électriquement, d'où les contraintes :



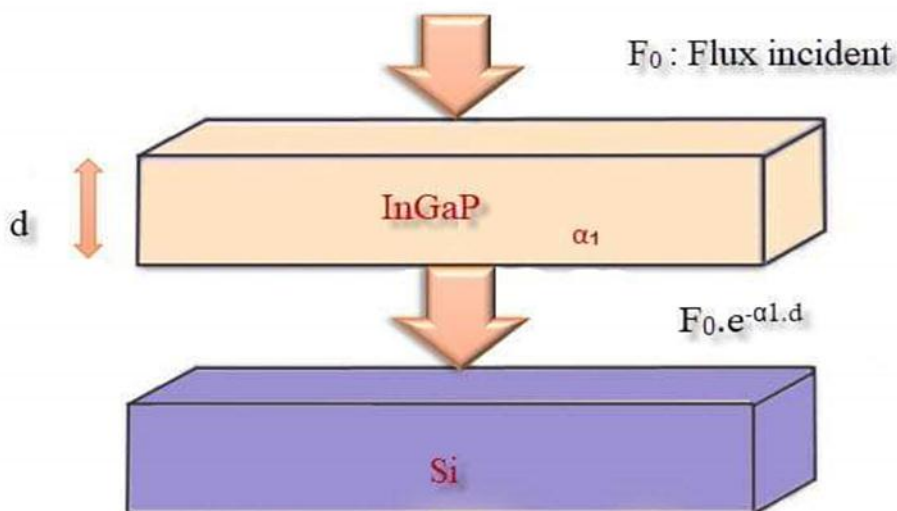
## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

- Les matériaux des cellules doivent avoir des paramètres de maille voisins afin que les interfaces soient exemptes de défauts qui piègent les électrons et réduisent donc le rendement de la cellule.
- Le courant dans les cellules en série est le même et donc limité par le plus faible courant des différentes cellules.

Le rendement d'une cellule tandem sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} * \min(J_{cc})}{P_i} FF \quad (2.8)$$



**Figure 2.7.** Cellule tandem.

### **b**    *Cellule cascade*

Dans la configuration cascade, les cellules sont fabriquées séparément ensuite reliées par une colle transparente. Les cellules sont isolées électriquement et dotées de contacts électriques.

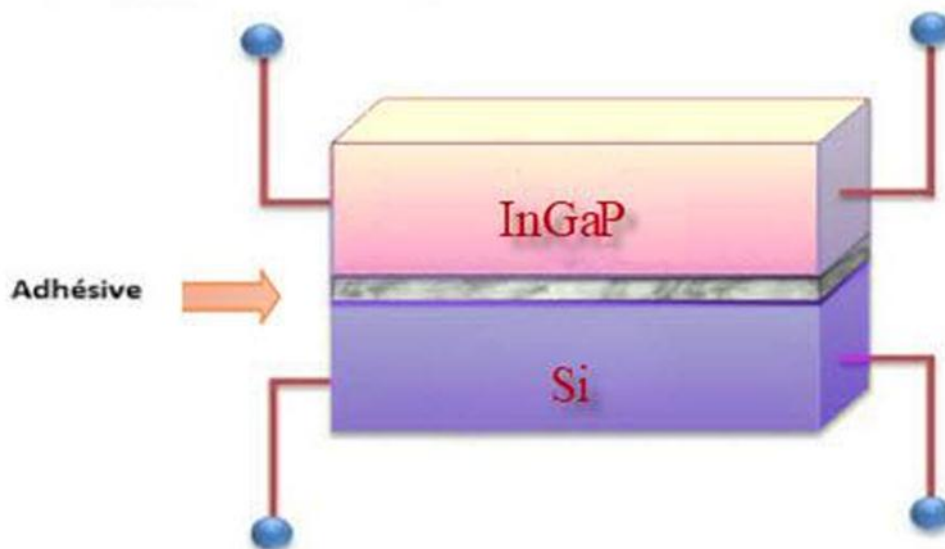
## Chapitre2      physiques des cellules photovoltaïques

---

Dans cette configuration, on s'affranchit des contraintes citées précédemment, Les matériaux des cellules peuvent avoir des paramètres de maille et des courants différents. Cependant, la réalisation de ces cellules est plus complexe.

Le rendement d'une cellule cascade sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \quad (2.9)$$



**Figure 2.8.** Cellule cascade.

### 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique fondamentale et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Aussi on a déduit les caractéristiques principales ainsi que les paramètres essentiels d'une cellule solaire ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $P_{max}$ ).

Enfin on a abordé les cellules III-V multi-jonctions InGaP/Si.

### 3.1 Introduction

Le modèle théorique d'une structure de cellule solaire nous permet de mettre en évidence la relation entre les caractéristiques du dispositif, les propriétés du matériau et la structure de la cellule, afin d'essayer d'expliquer et de comprendre le phénomène de conduction électrique dans une cellule solaire à base de InGaP/Si.

La simulation numérique est une série d'opérations effectuées sur un ordinateur et produisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film.

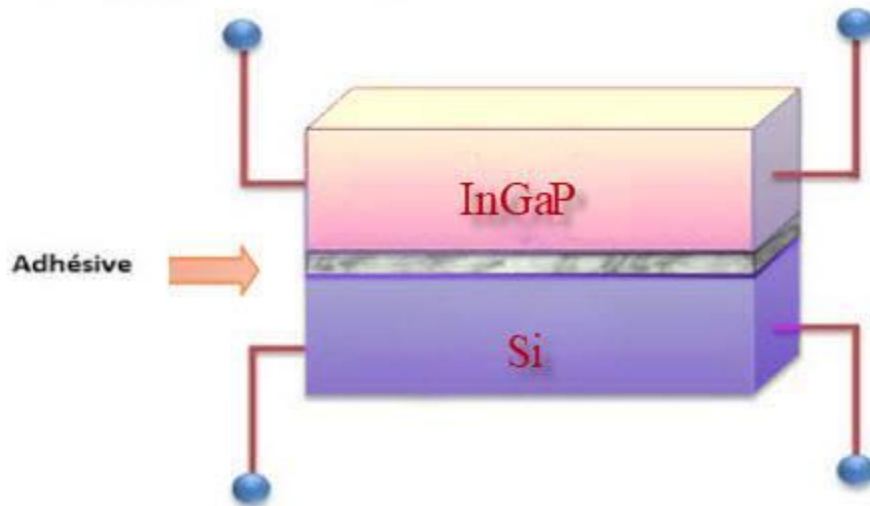
Ce chapitre est basé sur la simulation et la détermination des caractéristiques électriques de la cellule solaire.

À partir des caractéristiques I-V, on peut déterminer les valeurs des facteurs caractérisant la cellule tels que le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF, et le rendement  $\eta$ .

Pour cela on a utilisé le logiciel Comsol Multiphysiques de simulation numérique capable de simuler quasiment tous les phénomènes physiques et de nombreuses applications en ingénierie. Doté d'une interface graphique, le COMSOL Desktop" qui dispose de plusieurs interfaces physiques spécifiées pour les applications fréquentes, mais aussi de modules supplémentaires spécialement conçus pour atteindre d'autres applications plus particulières, que ce soit des applications électriques, mécaniques ou bien chimiques. Il est notamment possible d'intégrer d'autres modules afin d'assurer une plus large variation d'applications. Certains de ces modules ont aussi le rôle de connecter ce dernier à d'autres logiciels tels que Matlab, Excel, AutoCAD...etc.) [40-41].

### 3.2 Description de la structure simulée

Dans notre travail nous avons étudié la structure à base de InGaP/Si pour réaliser des cellules solaires de haut rendement. La figure (3.1) montre la structure de la cellule étudiée.



**Figure 3.1.** Schéma de la structure simulée.

### 3.3 Paramètre de maille

Pour le calcul des paramètres d'un alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  on utilise la loi de Vegard :

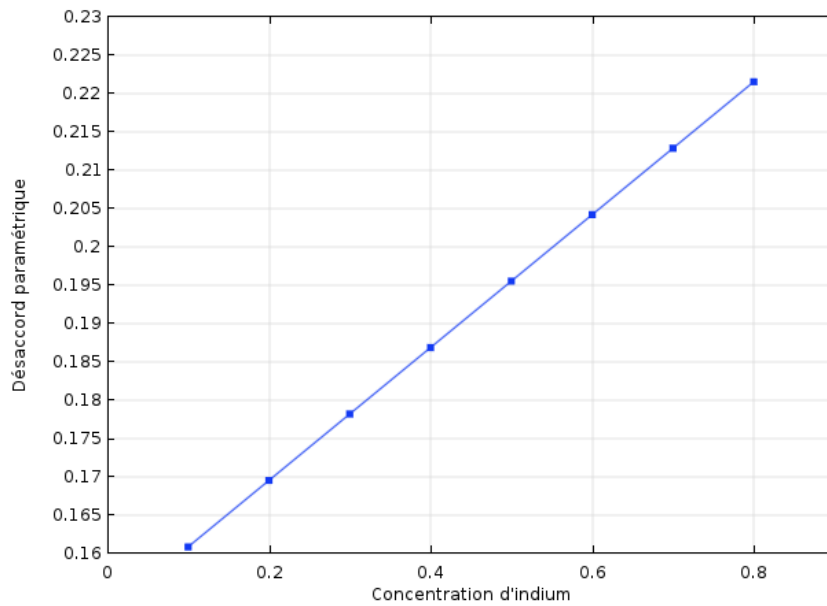
$$a(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}) = x \cdot a(\text{InP}) + (1-x) \cdot a(\text{GaP}) \quad (3.1)$$

$$a(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}) \neq a(\text{Si}) \quad (3.2)$$

Dès que les paramètres de maille du InGaP et Si sont différents, nous avons utilisé l'équation (3.3) pour calculer le désaccord de maille.

$$\varepsilon = \frac{a_{\text{InGaP}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} \quad (3.3)$$

La figure (3.2) nous montre la variation du désaccord de maille entre InGaP et Si en fonction de la variation des concentrations de l'indium  $x$ . On remarque une croissance du désaccord sur tout l'intervalle  $[0, 0.8]$ , variant de 16% à 22%. Ce désaccord représente un inconvénient pour la structure tandem.



**Figure 3.2.** La variation du désaccord de maille  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ .

### 3.4 Caractéristiques des matériaux

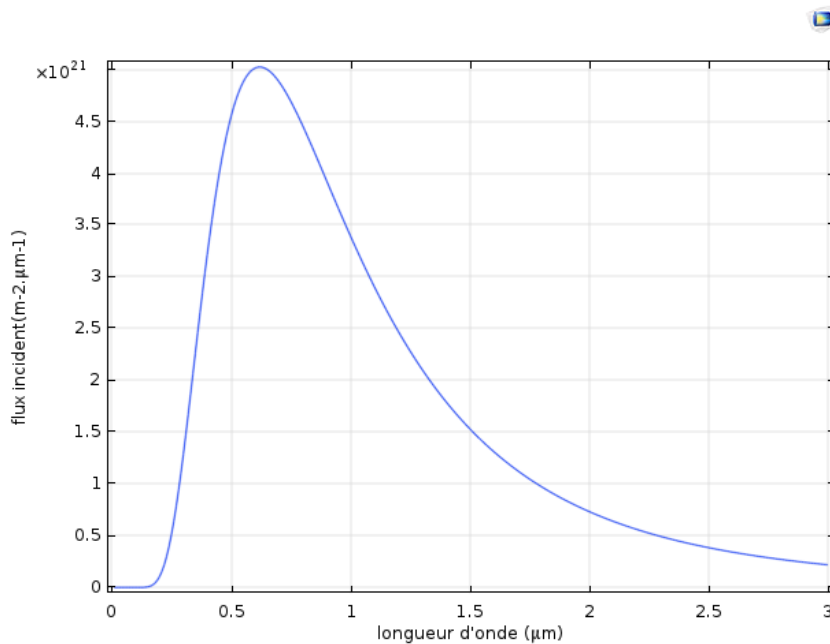
Les paramètres physiques des matériaux utilisés dans la simulation sont regroupés dans le tableau (3.1) :

Paramètres	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$	Si
Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_a = N_d = 10^{23}$	$10^{18}$
Épaisseur de l'émetteur ( $\mu\text{m}$ )	0,1	0,1
a ( $\text{Å}$ )	5,68	4.73
$E_g$ (eV)	2.16	1.12
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) à 300°K	$1.64 \cdot 10^{25}$	$2.8 \cdot 10^{19}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) à 300°K	$1,81 \cdot 10^{25}$	$1.04 \cdot 10^{19}$
Permittivité relative	$\epsilon_r = 11.24$	11.7
Concentration d'indium	0.1	
Mobilité électronique ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	0.076	1450
Mobilité des trous ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	0.015	500
Durée de vie ( $\mu\text{s}$ )	1	10

**Tableau 3.1.** Données de la structure simulée.

### 3.5 Irradiation d'un corps noir :

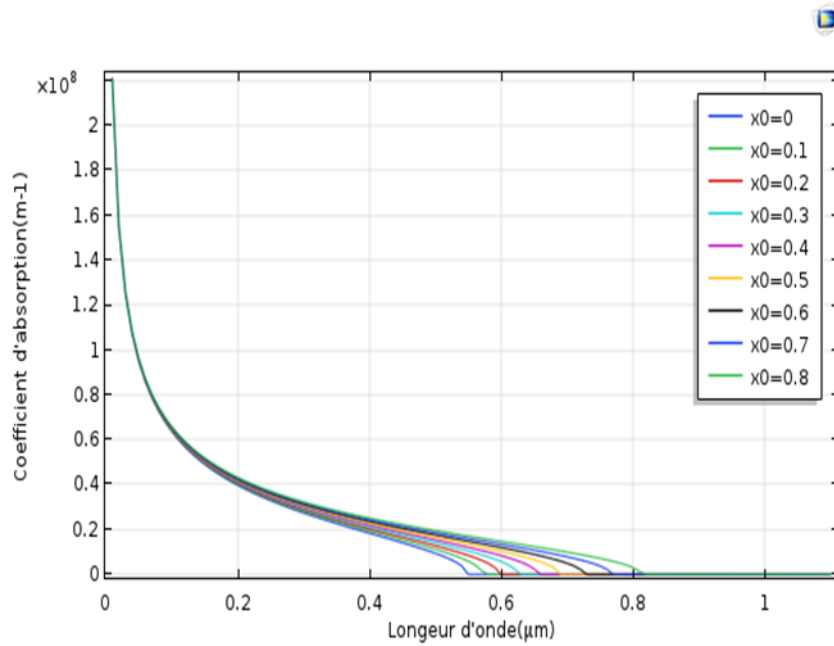
La Figure (3.3) représente le flux d'un corps noir  $F$  en fonction de la longueur d'onde pour une température  $T=6000\text{k}$ . Le flux représente un maximum pour  $\lambda=0,8$   $\mu\text{m}$ .



**Figure 3.3.** Le flux incident  $F$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  à  $T=6000\text{K}$ .

### 3.6 L'absorption

La figure (3.4) représente la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  de InGaP en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , pour différentes concentrations d'indium  $x$ . A partir d'une certaine valeur de  $\lambda$  le coefficient d'absorption devient nul.

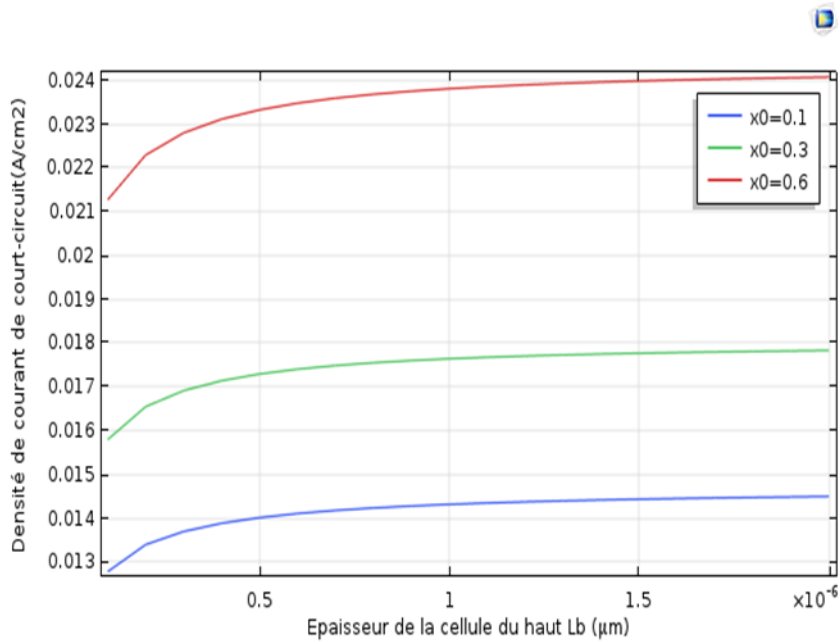


**Figure 3.4.** Variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  de InGaP en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

## 3.7 Cellule du haut InGaP

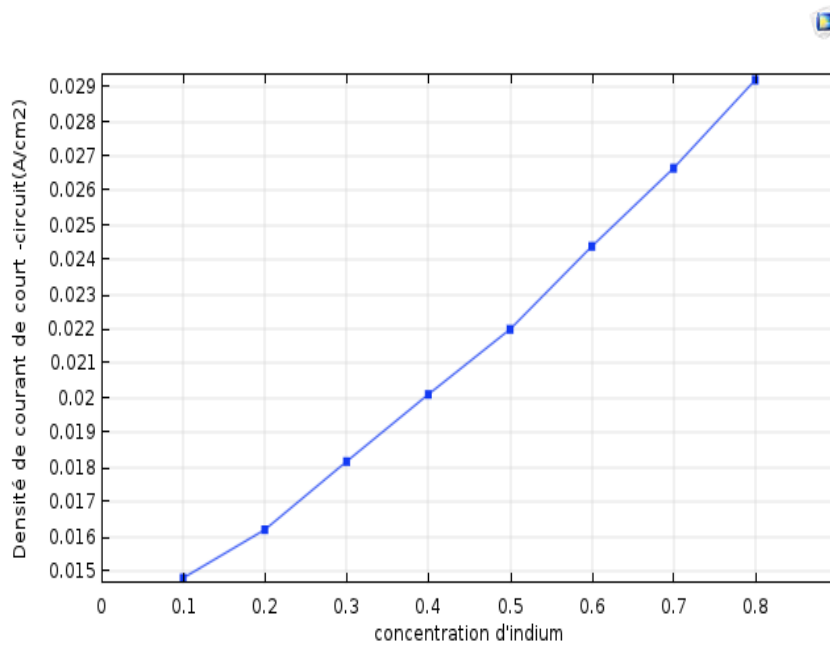
### 3.7.1 Densité de Courant de court-circuit $J_{cc}$ de la structure InGaP

Dans la figure (3.5), on a présenté l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$ . On remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une amélioration nette dans la densité de courant de court-circuit, notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à  $1,7 \mu\text{m}$ . Au-delà de  $1,7 \mu\text{m}$ , le courant  $J_{cc}$  se stabilise. Dans la suite de ce travail, on fixe l'épaisseur de la cellule du haut à  $2 \mu\text{m}$ .



**Figure 3.5.** Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur  $L_b$ .

La figure (3.6) représente la variation du courant de court-circuit en fonction de la concentration d'indium  $x$ . On observe une augmentation du courant de court-circuit lorsque la concentration d'indium  $x$  augmente, due à la diminution du gap.

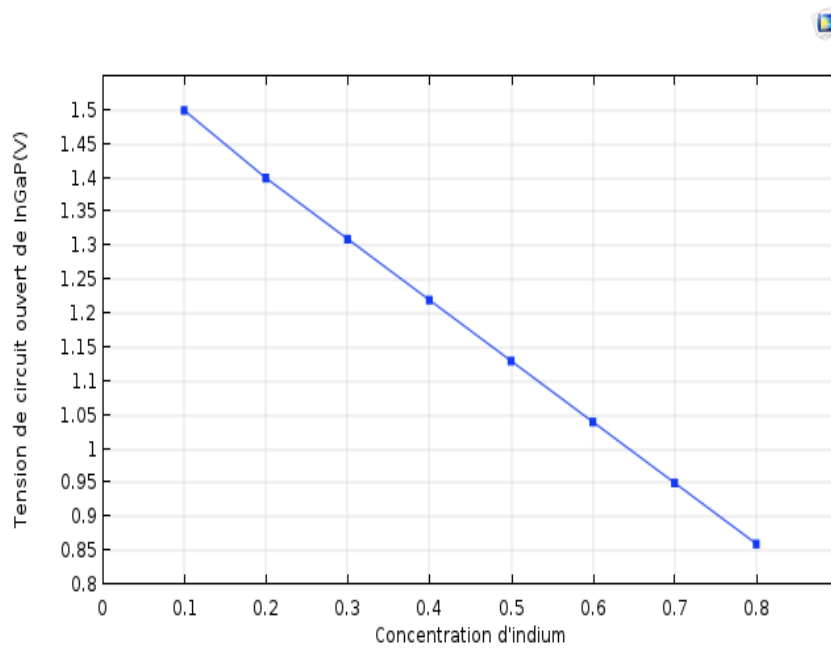


**Figure 3.6.** Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ .



### 3.7.2 Tension de circuit ouvert

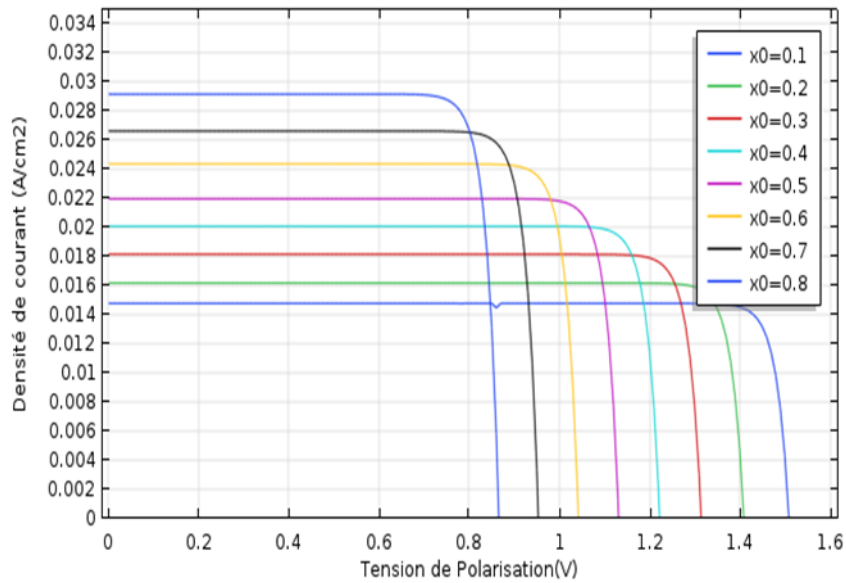
La figure (3.7) représente la variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ . L'augmentation de la concentration d'indium  $x$  provoque une diminution de la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  due à une diminution du gap  $E_g$ .



**Figure 3.7.** Variation de la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### 3.7.3 Caractéristiques courant-tension

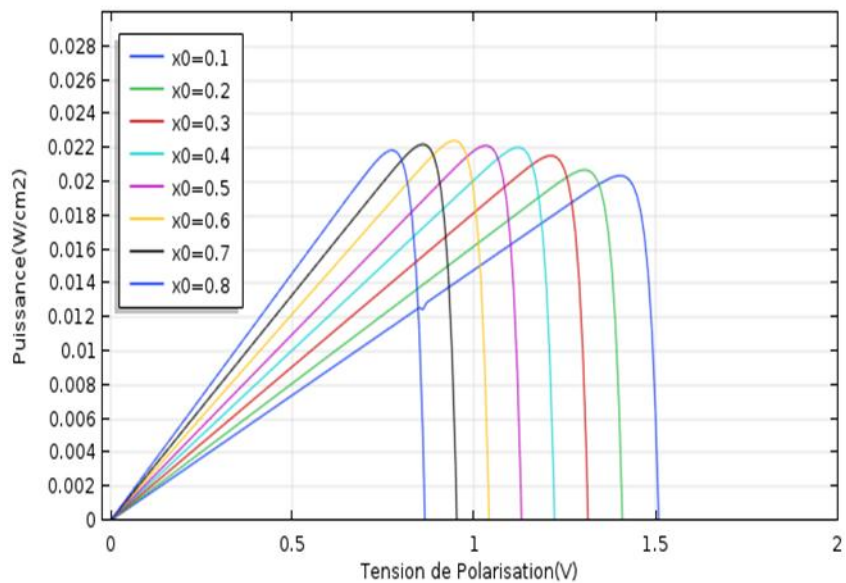
La figure (3.8) représente l'évolution de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation (V) pour différentes concentrations d'indium. On remarque que la densité de courant  $J_{cc}$  augmente et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  diminue avec  $x$ .



**Figure 3.8.** Caractéristiques courant-tension de la structure InGaP pour plusieurs concentrations d'indium  $x$  ( $L_b=2 \mu\text{m}$ ).

### 3.7.4 Puissance délivrée

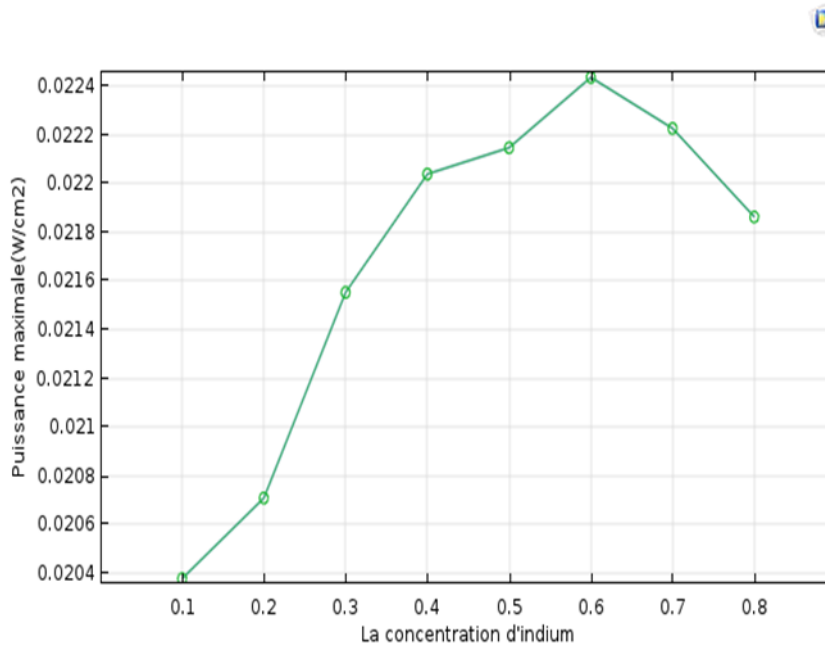
Dans la figure (3.9) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes concentrations d'indium  $x$ . Ces courbes présentent des maximums.



**Figure 3.9.** Puissance délivrée par la jonction InGaP pour plusieurs concentrations d'indium  $x$ .

### 3.7.5 Puissance maximale

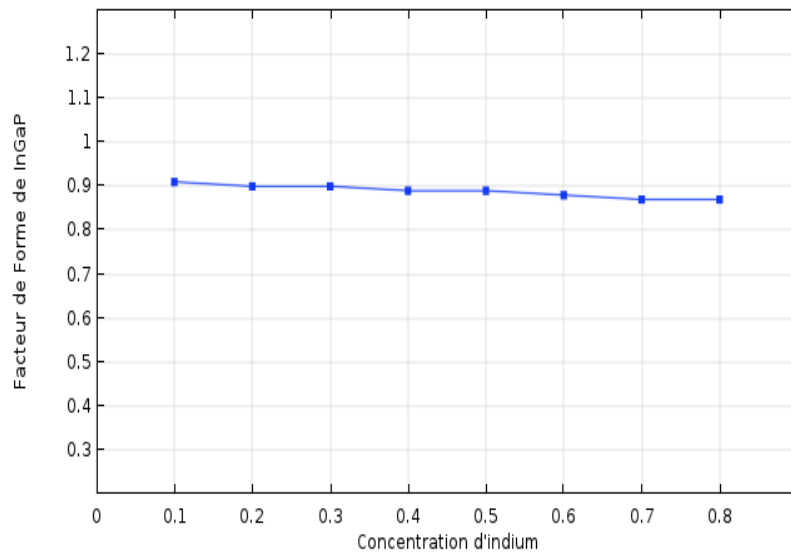
La figure (3.10) représente la variation de la puissance maximale  $P_{\max}$  en fonction de la concentration  $x$ .  $P_{\max}$  atteint sa valeur maximale pour  $x=0,6$ .



**Figure3.10.** Variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### 3.7.6 Facteur de Forme

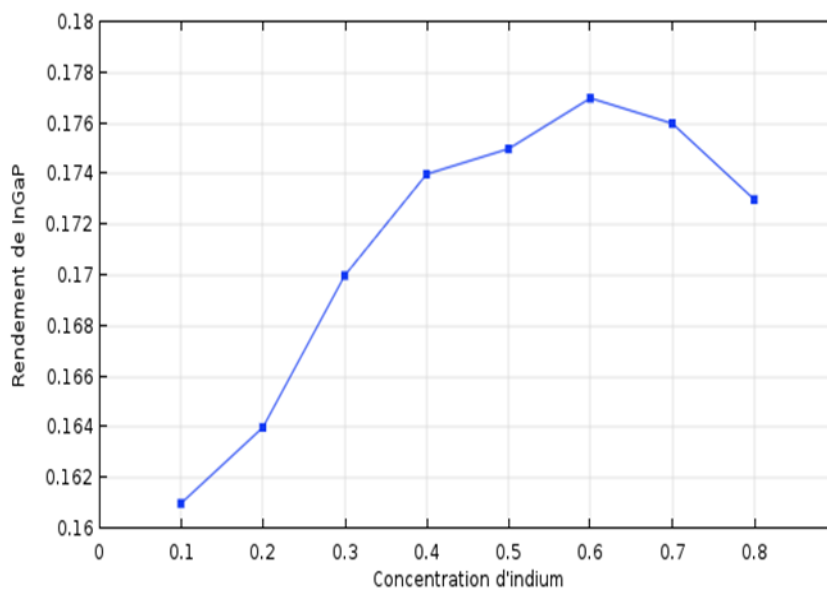
La figure (3.11) représente la variation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium  $x$ . On remarque que lorsqu'on augmente la concentration d'indium, le facteur de forme reste constant de l'ordre de 90%.



**Figure 3.11.** Variation du Facteur de Forme en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### 3.7.7 Rendement

La figure (3.12) montre la variation du rendement en fonction de la concentration d'indium  $x$ . On remarque une faible augmentation du rendement avec la concentration d'indium de 16,1 % à 17,7% où il atteint sa valeur maximale pour  $x=0,6$ , ensuite il diminue.

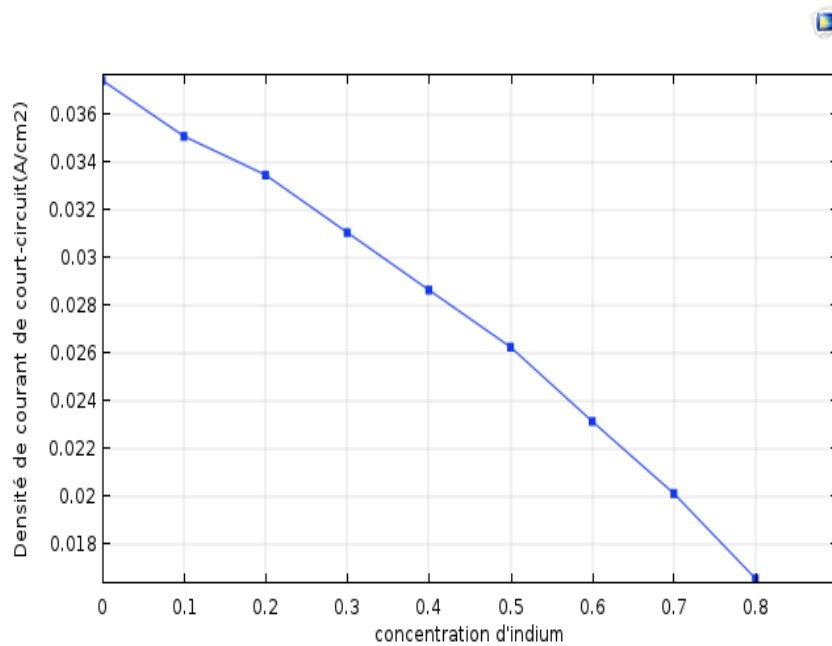


**Figure 3.12.** Représentation du rendement de la structure InGaP en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

## 3.8 La cellule du bas Si

### 3.8.1 Densité de Courant de court-circuit $J_{cc}$

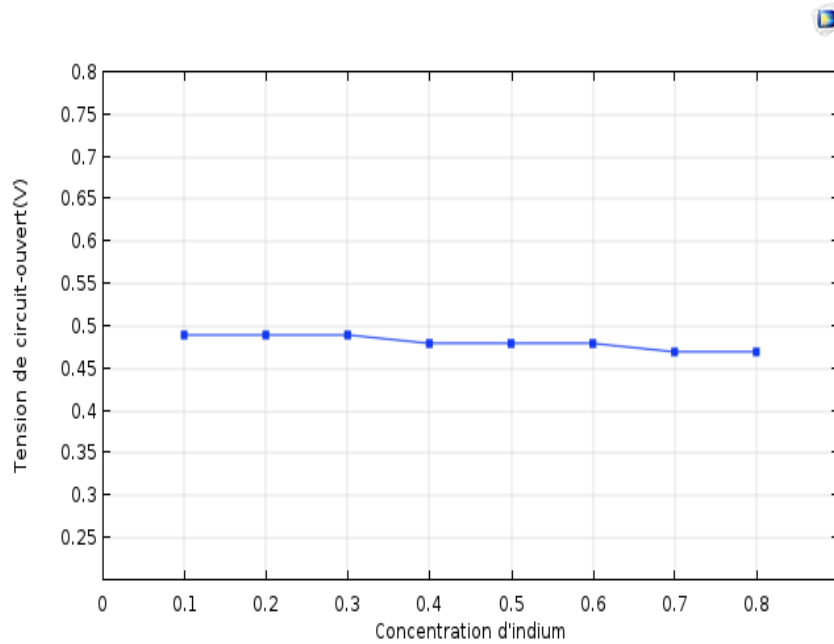
La figure (3.13) représente l'influence de la concentration d'indium  $x$  sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$ . On constate que la densité de courant de court-circuit décroît avec l'augmentation de la concentration d'indium  $x$  à cause de l'augmentation de l'absorption dans la cellule du haut.



**Figure 3.13.** Variation du courant de court-circuit en fonction de la concentration d'indium.

### 3.8.2 Tension de circuit ouvert

Sur La figure (3.14) on remarque que lorsque la concentration d'indium  $x$  augmente, la tension de circuit-ouvert est presque constante.

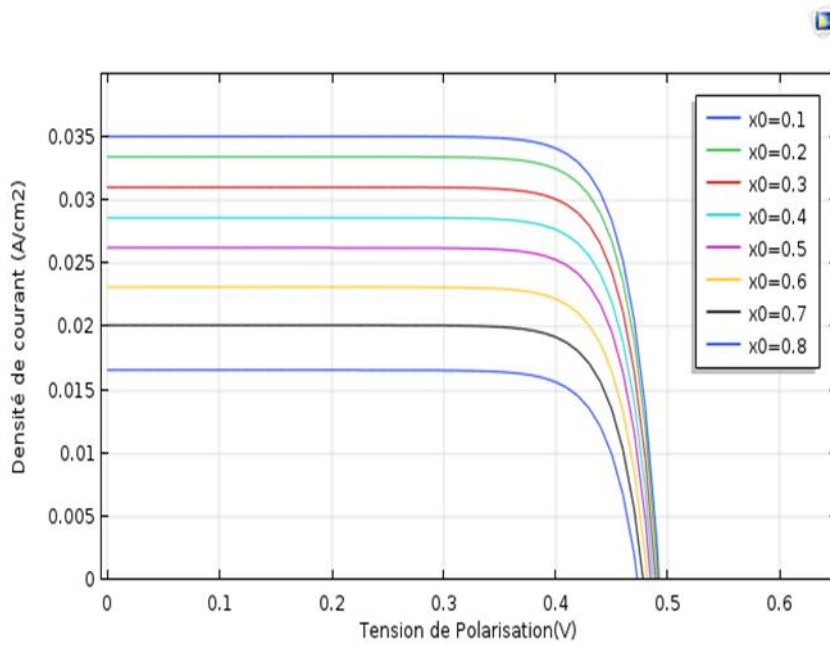


**Figure 3.14.** Variation de la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### 3.8.3 Caractéristiques courant-tension

La figure (3.15) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes concentration d'indium  $x$ .

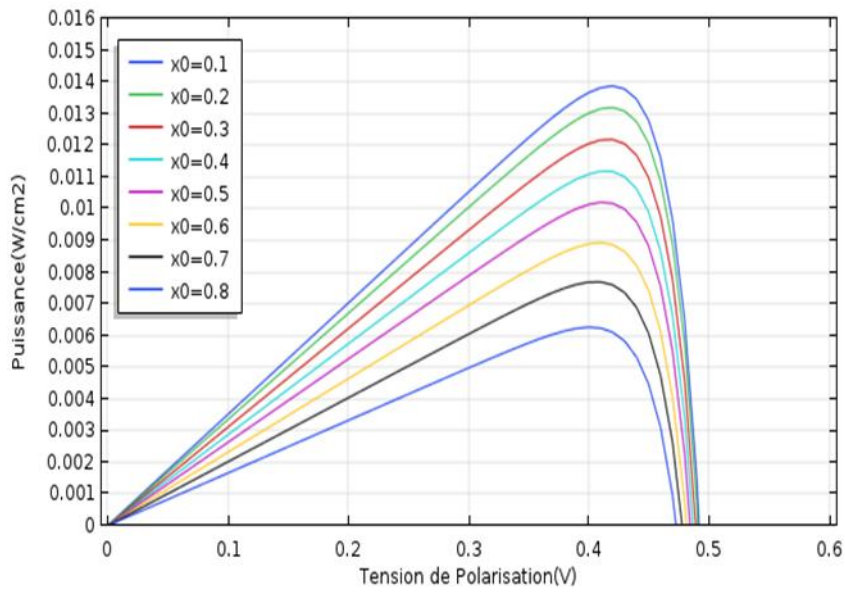
On constate que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  décroît et la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  diminue faiblement avec la concentration d'indium  $x$ .



**Figure 3.15.** Caractéristiques courant-tension de la cellule du bas pour plusieurs concentrations d'indium  $x$ .

### 3.8.4 Puissance délivrée

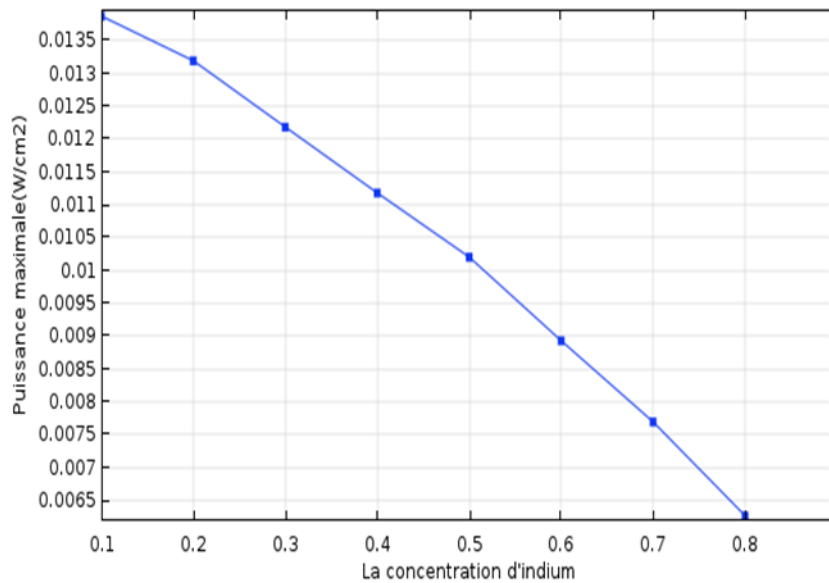
Sur la figure (3.16) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes concentration d'indium  $x$ . Ces courbes présentent des maximums.



**Figure 3.16.** Puissance délivrée par la jonction Si pour plusieurs concentrations d'indium x.

### 3.8.5 Puissance maximale

La figure (3.17) représente la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium x.  $P_{\max}$  est maximale pour  $x=0,1$ .

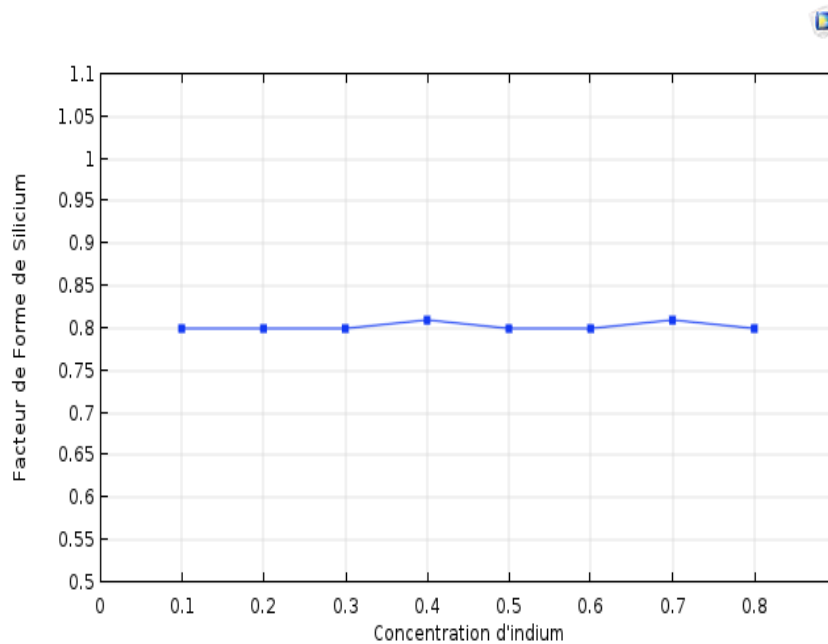


**Figure 3.17.** Variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'indium.



### 3.8.6 Facteur de Forme

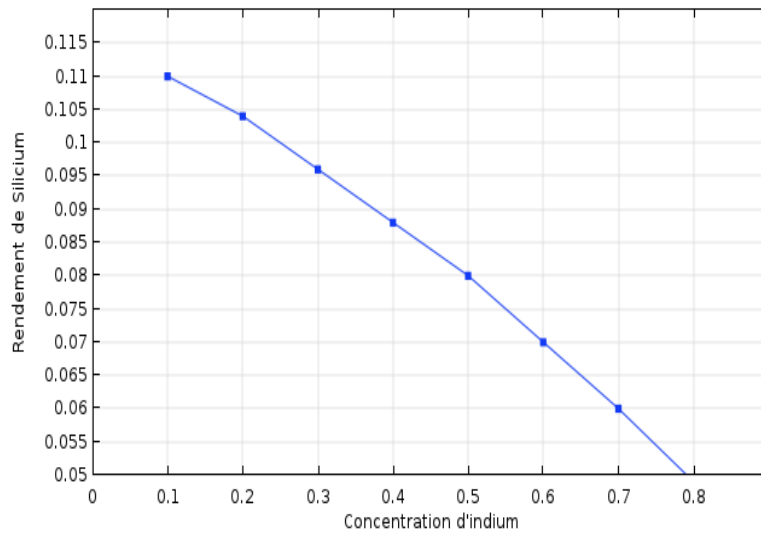
La figure (3.18) montre la variation du facteur de forme en fonction de la concentration d'indium  $x$ . On remarque que lorsqu'on augmente la concentration d'indium, le facteur de forme reste stable FF=80%.



**Figure3.18.** Variation du Facteur de Forme en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### 3.8.7 Rendement

La figure (3.19) représente la variation du rendement en fonction de la concentration d'indium  $x$ , on observe une atténuation rapide du rendement avec la concentration d'indium  $x$ . Le rendement varie de 11 % à 5 % lorsque la concentration d'indium varie de 0,1 à 0,8. Le rendement est maximum pour  $x=0,1$  (11%).



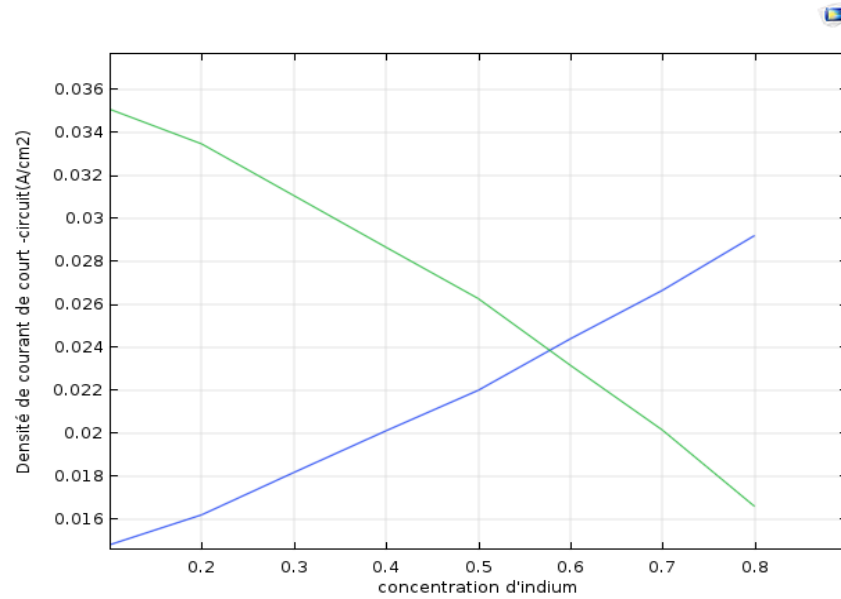
**Figure 3.19.** Représentation du rendement de la structure Si en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

## 3.9 Structure InGaP /Si

### 3.9.1 Structure tandem

#### *a* Densité de courant de court-circuit

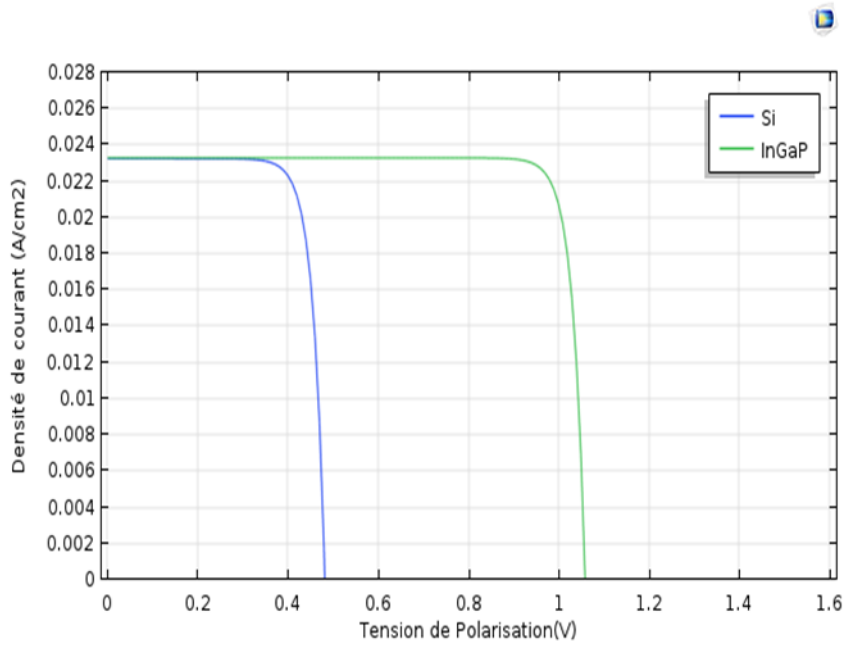
La figure (3.20) représente les variations de la densité de courant de court-circuit des deux jonctions en fonction de la concentration d'indium  $x$ . On remarque que les courants de court-circuit se croisent au point  $x=0,59$  (current matching).



**Figure 3.20** Densités de courant de court-circuit en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

### ***b*** **Caractéristique courant-tension**

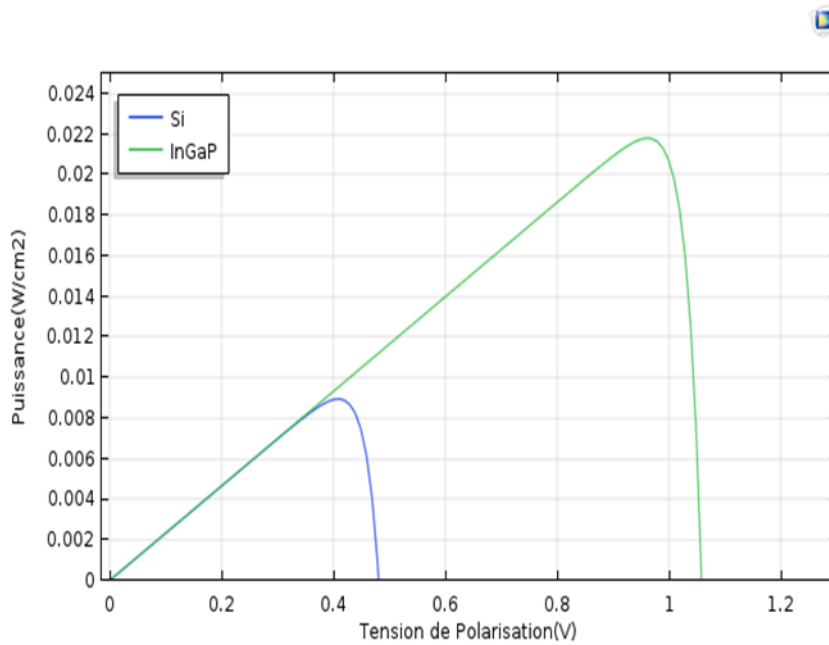
La figure(3.21) montre la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation (V) lorsque la concentration d'indium  $x=0,59$ . On voit que les courants de court-circuit sont égaux.  $J_{cc}=0.024A/cm^2$  et la tension de circuit-ouvert  $V_{co}=V_{co1}+V_{co2}=1,53V$ .



**Figure 3.21** . Caractéristiques courant-tension de la structure.

### c Puissance délivrée

La figure (3.22) représente les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation (V) pour une concentration d'indium  $x=0,59$ . Ces courbes présentent des maximums.



**Figure 3.22**. Puissance délivrée de la structure.

## d Rendement

$$\eta = \frac{P_1(x_0) + P_2(x_0)}{P_{in}} \quad (3.4)$$

$P_1$  : Puissance maximale de InGaP.

$P_2$  : Puissance maximale de Si.

$P_{in}$  : Puissance incidente.

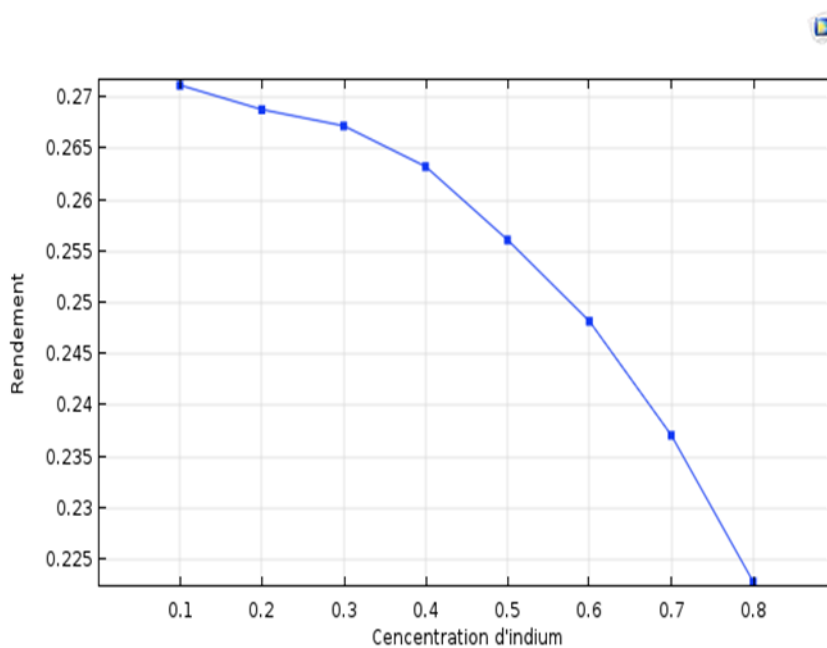
$\eta$  : Rendement.

D'après l'équation (3.4) , on a obtenu un rendement maximal de la structure tandem qui est égale a 24,8% pour une concentration d'indium  $x=0,59$ .

## 3.9.2 Structure cascade

### a Rendement

Il est illustré dans la figure (3.23) qui montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium. Le rendement atteint sa valeur maximale de 27%, pour une concentration d'indium  $x=0.1$ .



**Figure 3.23.** Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure InGaP/Si en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

On note que le rendement d'une cellule cascade est plus important que celui d'une cellule tandem.

### 3.10 Conclusion

Les performances optimales de la cellule solaire InGaP/Si ont été simulées en calculant le rendement avec différents paramètres de la structure : l'épaisseur et la concentration d'indium de la cellule du haut InGaP.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude et à l'analyse des résultats du modèle que nous avons adapté. Nous avons tracé le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , La caractéristique  $J(V)$ , la caractéristique  $P(V)$ , la puissance maximale  $P_{max}$ , le facteur de forme  $FF$ , et le rendement  $\eta$ .

Les simulations réalisées dans ce chapitre montrent que pour une cellule à double jonctions InGaP/Si, le rendement maximum est de l'ordre de 24.8% en cellule tandem et 27% en cellule cascade.

## Conclusion générale

---

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée.

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'une structure photovoltaïque à base de matériaux InGaP et Si, en considérant l'influence de l'épaisseur de la cellule et de la concentration d'indium sur les paramètres caractéristiques dans le but d'obtenir un rendement maximum.

Nous avons élaboré la simulation sous environnement Comsol. Ce dernier nous fournit les caractéristiques  $J(V)$  et les valeurs de paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}, V_{co}, FF, \eta$ ).

Nous avons rappelé en premier lieu des généralités sur l'énergie photovoltaïque, le soleil, et les propriétés de son rayonnement ainsi que les caractéristiques cristallines, électriques et optiques des matériaux InGaP et Si.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la physique des cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, l'Architecture d'une cellule photovoltaïque ainsi que ses caractéristiques principales. Enfin nous avons abordé les cellules III-V multi-jonctions (cellule tandem et cellule cascade).

Dans le dernier chapitre, nous avons analysé les résultats de la structure adoptée, et on a exposé les résultats de nos simulations. L'influence de l'épaisseur et la concentration d'indium sur les différentes caractéristiques de la cellule photovoltaïque a été étudiée, ce qui nous a permis de déterminer les valeurs optimales du rendement de conversion.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que pour une cellule à double

## Conclusion générale

---

Jonction à base de InGaP/Si, le rendement est optimal de l'ordre 24,8% en cellule tandem et 27% en cellule cascade.

En perspective, Nous suggérons une amélioration de ce travail de recherche en considérant une cellule à trois jonctions InGaP/GaAs/Si ce qui permettrait d'améliorer le rendement.



# Bibliographie

---

- [1] A.Khelif : « Expérience, Potentiel et marché photovoltaïque Algérien » New Energy Algeria NEAL, 2010.
- [2] H.Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques" Masson, Paris, 1996.
- [3] BALDOMERO Garcia, "Indium gallium nitride multi junction solar cell simulation using Silvaco Atlas", Master's Thesis. Naval Post Graduate School, Monterey, California : 2007.
- [4] Butti K, Perlin J. A golden thread : 2500 years of solar architecture and technology. Cheshire Books 1980.
- [5] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [6] B. BROUSSE, "Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïque organique obtenues par dépôt physique", thèse doctorat, université Limoges, 2004.
- [7] Oi, A., 'Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System', California Polytechnic State University, (s22 March 2012).
- [8] N.A.Sharp,NOAO/NSO/Kitt peak FTS/AURA/NSF.
- [9] Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadas, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [10] A. Auger J-A.Roger, «les photopiles solaires». Editeur : technique et documentation,1981.
- [11] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012. (s.d).
- [12] R Sekuler : Perception, New York, 1985.

## Bibliographie

---

- [13] Rachid Maraï. Livre : Cellules Solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque. EDSF « Editions Technique et scientifiques françaises ».
- [14] [www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg](http://www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg).
- [15] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, "Etude de la jonction p-n d'une semi-conducteur a l'équilibre thermodynamique", Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126 JED [ISSN: 1682 -3427 ].
- [16] Vegard, L. Z. Phys. 1921, Vol. 5, 17. (s.d.).
- [17] Denton, A.R. and Ashcroft, N.W. Vegard's Law. Physical Review A. 1991, Vol. 43, 3161.
- [18] D.J.Chin and D.H.Navon,"Two-dimensional analysis of the interdigitated back contact solar cell", solid-stat electronics vol.24, pp.109-114 © pergamon press Ltd,1981.printed in Great Britain.
- [19] F.Boudjerad, « Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013.
- [20] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997.presses polytechniques et universitaires romandes.
- [21] A.Laugier, "Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications",Institut National des Sciences Appliquées-Lyon 1981.
- [22] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple Junction solar cell using silvaco atlas", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [23] M. Grundmann, The Physics of Semiconductors", Book, Université Leipzig, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [24] B. Van Zeghbroeck, Principles of Electronic Devices", Book. 2011.

## Bibliographie

---

- [25] A Haug "Auger recombination in direct gap semi-conductors: band structure effects J,phys.C.Solide state phys .164159.1983,DOI:10.1088/0022-3719/16/21/017.
- [26] M.Zazoui, J.C.Bourgoin, D.Stievenard and D.Deresmes and G.Strobl, Recombinaison centers in electron-irradiated Czochralski silicon solar cells, J. Appl. Phys, Vol.76 (1994).
- [27] Ouddah. M. Magister : Etude du silicium poreux destine aux cellules solaires.Université de Constantine (2009).
- [28] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981. ISBN: 0-8493-9623-9.
- [29] G. A. Gow. C. D. Maning, "Development of photovoltaic array model for use in power-electrons simulation studies",IEE proc .Electr.power Appl.Vol 146.No 2;1999.
- [30] H.Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème édition.
- [31] M. Bashahu and A. Habyarimana. Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. Renewable Energy, 1995, Vol. 6, pp. 129-138.
- [32] S. Quoizola, « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [33] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [34]A. Mahfoud, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », thèse de doctorat, université de Sétif 1, 2015.

## Bibliographie

---

- [35] Y. Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco », mémoire de magister, Juin 2013.
- [36] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [37] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.
- [38] B. Burnett, "The basic physics and design of III-V multi junction solar cells", 2002.
- [39] M. Yamaguchi, "Present status of R&D super-high-efficiency III-V compound solar Cells in Japan", 17th Photovoltaic European Conference, 2001.
- [40] <https://www.comsol.fr/products>.
- [41] [https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics).