

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Microélectronique

présenté par

BAKALEM Nesrine

&

MEHDI Nesrine

---

# Etude et simulation comparative entre des cellules solaires homo- jonction et hétérojonction à Base d'une jonction PIN en GaAlAs.

---

Proposé par : Mr Nacer Saïd

Année Universitaire 2019-2020

## Dédicace

Avec un énorme plaisir et une grande joie que je dédie ce travail à toute personne

qui a laissé un impact dans ma vie :

Mon cher papa Bakalem Brahim qui m'a soutenue tout au long de ma vie.

A mes sœurs,

A mon frère et sa femme,

A ma cousine Mahdia pour son aide et son soutien moral.

Et a tous ceux qui me sont chers.

Le dédie ce travail en particulier à tous mes enseignants pour leurs appuis et

encouragements.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,

Et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Bakalem Nesrine

## **Dédicace**

Je dédie ce travail:

A mon cher père et A ma Jolie mère

A mes frères et A mes sœurs

A toute la famille Mehdi

A tous mes amis

A tous ceux que j'aime

Mehdi Nesrine

## Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour terminer ce présent travail.

Nos Vifs remerciements, nos reconnaissances et nos profonds respects vont à notre encadreur Mr. **Nacer Saïd** qui nous a accompagnées durant la préparation de ce mémoire et de nous avoir donné de son précieux temps pour le terminer.

Nous exprimons de même nos remerciements les plus sincères aux honorables membres de jury.

Nous aimerions exprimer notre reconnaissance envers, tous nos professeurs, qui nous ont accompagné durant notre cursus universitaire, ainsi que tout le personnel administratif du département Electronique, de la Faculté de Technologie **Université Saad-Daheb Blida1**.

Nos derniers remerciements vont à nos familles, nos amies et nos collègues pour leur patience et leurs encouragements.

**Un grand merci encore**

---

**ملخص:** الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي واحدة من أكثر الطاقات ا لمتجددة استخداما وهي تحويل الاشعاع الكهرومغناطيسي مباشرة الى كهرباء، هذا الاخير هو احد الأشكال غير الملوثة والصامتة لتحويل الطاقة الشمسية، ويحدث عن طريق جهاز تحويل يسمى " الخلايا الشمسية " على اساس التأثير الكهروضوئي .تعتمد الخلايا عالية الكفاءة على أشباه الموصلات. III-V الهدف من هذا العمل هو دراسة وإجراء محاكاة مقارنة الخلايا الشمسية المتجانسة والغير متجانسة باستخدام برنامج COMSOL. بعد عرض بعض المفاهيم الأساسية للخلايا الكهروضوئية وأشباه الموصلات، ومبدأ التشغيل وخصائص الخلية الشمسية. تظهر النتائج إن كفاءة الخلايا الشمسية غير المتجانسة أفضل مقارنة بالخلية الشمسية المتجانسة.

**كلمات المفاتيح:** الطاقة الشمسية/ الخلايا الشمسية/ أشباه الموصلات/ الخلايا الشمسية المتجانسة /الغير متجانسة

---

**Résumé:** l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité. Cette dernière est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « cellule solaire » basé sur l'effet photovoltaïque. Les cellules solaires à haut rendement étant souvent basées sur la technologie des semi-conducteurs III-V. Ce travail a pour but d'étudier et faire une simulation comparative entre des cellules solaires homo-jonction et hétérojonction à base d'une jonction PIN en GaAl<sub>x</sub>Asen utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Après avoir présenté quelques

---

---

notions de base sur la photovoltaïque; les matériaux semi-conducteurs, le principe de fonctionnement et les caractéristiques de la cellule solaire, les résultats de simulation montrent que le rendement de la cellule solaire à hétérojonction à base d'une jonction PIN est meilleur que celui de la cellule solaire à homo-jonction.

**Mots clés:** cellule solaire, semi-conducteur, jonction PIN, hétérojonction, homo-jonction.

---

**Abstract:** Photovoltaic solar energy is one of the most widely used renewable energies. It consists in directly converting electromagnetic radiation into electricity. The latter is one of the non-polluting and silent forms of conversion of solar energy, it occurs by means of a conversion device called "Solar cell" based on the photovoltaic effect. High efficiency solar cells are often based on III-V semiconductor technology. This Work aims to study and make a comparative simulation of homojunction and heterojunction solar cells based on a PIN junction using COMSOL software. After presenting some basic notions of photovoltaic and semiconductor, Operating principle and characteristics of the solar cell. The simulation results show that the efficiency of the heterojunction solar cell is better compared to the homojunction solar cell.

**Keywords:** photovoltaic, semiconductor, PIN junction, heterojunction, homojunction.

---

## Listes des acronymes et abréviations

**G** : rayonnement globale.

**Gdif** : rayonnement diffu.

**Gd** : rayonnement direct.

**Gref** : rayonnement réfléchi

**F** : irradiation spectrale.

**n**: La concentration des électrons dans la bande de conduction

**T**: La température

**p**: La concentration des trous

**A**: Constante spécifique du matériau

**Ec:** Energie de la bande de conduction.

**Ev:** Energie de la bande de valence.

**EF:** Energie de niveau de fermi.

**Eg:** Energie de la bande interdite.

**$\lambda$ :** Longueur d'onde.

**h:** constant de Planck.

**c:** La vitesse de la lumière dans le vide

**m\*:** masse effective

**$\mu$ :** La mobilité

**q:** Charge de l'électron

**E:** Energie de photon

**$\alpha$ :** coefficient d'absorption

**$\alpha_0$ :** cst qui dépend du matériau.

**Icc:** Courant de court-circuit.

**Vco:** La tension de circuit ouvert.

**Pm:** Puissance maximal.

**Vm:** Tension maximal.

**Im:** courant maximal.

**FF:** Facteur de forme.

**Pin:** puissance incidente.

**$\eta$ :** rendement de conversion.

**v:** La fréquence de la lumière.

**k:** La Constante de Boltzmann.

**Iph:** la densité de courant photo-g énééré.

**l<sub>obs</sub>** : la densité de courant d'obscurité.  
**I<sub>s</sub>** : le courant de saturation de la diode.  
**n** : le facteur d'idéalité.  
**D** : Constant de la diffusion.  
**τ** : Durée de vie de recombinaison du porteur.  
**A.M** : masse d'air.  
**J<sub>n</sub>** : densité de courant des électrons.  
**J<sub>p</sub>** : densité de courant des trous.  
**L** : longueur de diffusion.  
**R<sub>s</sub>** : résistance série.  
**R<sub>p</sub>** : résistance parallèle.  
**I<sub>d</sub>** : courant de la diode.

## Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Energie solaire</b>	
<a href="#">1.1 Introduction</a>	3
<a href="#">1.2 Historique de l'énergie solaire Photovoltaïque</a>	3
<a href="#">1.3 Rayonnement Solaire</a>	4
<a href="#">1.4 Rayonnement du corps Noir</a>	6
<a href="#">1.5 Absorption</a>	6
<a href="#">1.6 Conversion photopile (photovoltaïque)</a>	7
<a href="#">1.6.1 Effet photovoltaïque</a>	7
<a href="#">1.6.2 Principe de conversion photovoltaïque</a>	8
<a href="#">1.7 Matériaux semi-conducteurs III-V</a>	9
<a href="#">1.7.1 Définition</a>	9
<a href="#">1.7.2 Types des matériaux étudié</a>	10

a.	<a href="#">Les composés binaires</a>	10
b.	<a href="#">Les composés ternaires</a>	11
1.7.3	<a href="#">Equation de transport des semi-conducteurs</a>	12
1.7.4	<a href="#">Propriétés électroniques</a>	13
a.	<a href="#">Notion de bandes d'énergie</a>	13
b.	<a href="#">Gap direct et gap indirect</a>	13
1.7.5	<a href="#">Propriétés Optiques</a>	14
a.	<a href="#">Absorption</a>	14
b.	<a href="#">Recombinaison</a>	15
c.	<a href="#">Taux de recombinaison</a>	16
1.8	<a href="#">Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</a>	16
1.9	<a href="#">Avenir du photovoltaïque</a>	17
1.10	<a href="#">Secteurs d'applications</a>	17
1.11	<a href="#">Conclusion</a>	18
<b>Chapitre 2: Cellule solaire photovoltaïque</b>		
2.1	<a href="#">Introduction</a>	19
2.2	<a href="#">Cellule Solaire</a>	19
2.2.1	<a href="#">Principe de fonctionnement d'une cellule Solaire</a>	20
2.2.2	<a href="#">Caractéristique électrique d'une cellule Solaire</a>	21
2.2.3	<a href="#">Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque</a>	23
2.2.4	<a href="#">Courant fournie par la cellule</a>	24
2.2.5	<a href="#">Paramètres de la cellule solaire</a>	24
a.	<a href="#">Courant de court-circuit <math>I_{cc}</math></a>	24
b.	<a href="#">Tension de circuit ouvert <math>V_{co}</math></a>	25
c.	<a href="#">Facteur de forme FF</a>	25
d.	<a href="#">Rendement de conversion <math>\eta</math></a>	26
2.2.6	<a href="#">Différents Technologies de la Cellule Photovoltaïque</a>	26
a.	<a href="#">1ère génération : Cellules cristallines</a>	27
b.	<a href="#">2ème génération : couche minces</a>	27
c.	<a href="#">3ème génération</a>	28
2.3	<a href="#">Jonctions PIN / PN</a>	28
2.4	<a href="#">Cellule solaire à structure PIN</a>	29
2.4.1	<a href="#">Principe de fonctionnement de la cellule solaire à structure PIN</a>	30

<a href="#">2.5</a>	<a href="#">Technologies hétérojonction et homo-jonction</a>	30
<a href="#">2.5.1</a>	<a href="#">Structures Hétérojonction</a>	30
<a href="#">a.</a>	<a href="#">Cellule solaire a Hétérojonction</a>	31
<a href="#">b.</a>	<a href="#">Avantages d'une telle cellule</a>	32
<a href="#">2.5.2</a>	<a href="#">Structures Homo-jonction</a>	32
<a href="#">2.6</a>	<a href="#">Différents types des pertes dans une cellule solaire</a>	33
<a href="#">2.7</a>	<a href="#">Conclusion :</a>	33
<b>Chapitre 3 : Simulation et résultats</b>		
<a href="#">3.1</a>	<a href="#">Introduction</a>	34
<a href="#">3.2</a>	<a href="#">Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics</a>	34
<a href="#">3.3</a>	<a href="#">Principe et objectif de la simulation</a>	35
<a href="#">3.4</a>	<a href="#">Simulation des cellules solaires Homojonction GaAlAs à jonction PIN</a>	35
<a href="#">3.4.1</a>	<a href="#">Présentation de la structure homojonction</a>	35
<a href="#">3.4.2</a>	<a href="#">Présentation des paramètres utilisés dans la simulation de la structure homojonction</a>	35
<a href="#">3.4.3</a>	<a href="#">Résultats de la simulation à l'aide de COMSOL</a>	37
<a href="#">a.</a>	<a href="#">Caractéristique courant-tension J(V) de la CS GaAl<sub>0.3</sub>As à jonction PIN</a>	37
<a href="#">b.</a>	<a href="#">Caractéristique puissance-tension P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN</a>	38
<a href="#">c.</a>	<a href="#">Influence de l'épaisseur W sur le courant de court-circuit J<sub>cc</sub></a>	40
<a href="#">d.</a>	<a href="#">L'influence de l'épaisseur W sur la tension de circuit ouvert V<sub>co</sub></a>	40
<a href="#">e.</a>	<a href="#">Influence de l'épaisseur W sur la puissance maximale P<sub>max</sub></a>	41
<a href="#">f.</a>	<a href="#">L'influence de l'épaisseur W sur le rendement de conversion η</a>	42
<a href="#">g.</a>	<a href="#">L'influence de l'épaisseur W sur le facteur de forme FF</a>	42
<a href="#">3.5</a>	<a href="#">Simulation des cellules solaires hétérojonction GaAlAs/GaAs/GaAlAs à jonction PIN</a>	43
<a href="#">3.5.1</a>	<a href="#">Présentation de la structure</a>	43
<a href="#">3.5.2</a>	<a href="#">Présentation des paramètres utilisés dans la simulation de la structure hétérojonction</a>	43
<a href="#">3.5.3</a>	<a href="#">Résultats de la simulation à l'aide de COMSOL</a>	45
<a href="#">a.</a>	<a href="#">Caractéristique courant-tension J(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN</a>	45
<a href="#">b.</a>	<a href="#">Caractéristique Puissance-tension P(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN</a>	45
<a href="#">c.</a>	<a href="#">L'influence de la concentration d'Al x0 sur le courant de court de circuit I<sub>cc</sub></a>	46
<a href="#">d.</a>	<a href="#">L'influence de la concentration d'Al x0 sur la tension de circuit ouvert V<sub>co</sub></a>	47
<a href="#">e.</a>	<a href="#">L'influence de la concentration d'Al x0 sur la puissance maximale P<sub>max</sub></a>	48
<a href="#">f.</a>	<a href="#">L'influence de la concentration d'Al x0 sur le rendement de conversion</a>	48

g. <a href="#">L'influence de la concentration d'Al x0 sur le facteur de forme FF</a>	49
3.6 <a href="#">Comparaison entre les deux cellules solaires</a>	50
3.7 <a href="#">Conclusion</a>	50
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>52</b>

## Liste des figures

<a href="#">Figure 1.1. Différentes positions de soleil</a>	5
<a href="#">Figure 1.2. Principe de l'effet photovoltaïque.</a>	9
<a href="#">Figure 1.3. Génération de pair électron-trou.</a>	9
<a href="#">Figure 1.4. Structure de bandes d'énergie des matériaux .</a>	13
<a href="#">Figure 1.5. Structure de bande d'énergie du : (A) gap direct (B) gap indirect.</a>	14
<a href="#">Figure 1.6. L'absorption fondamentale de la lumière par les porteurs.</a>	15
<a href="#">Figure 1.7. recombinaisons Dans un SC.</a>	16
<a href="#">Figure 2. 1. Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.</a>	20
<a href="#">Figure 2. 2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.</a>	21
<a href="#">Figure 2. 3. Caractéristiques courant-tension à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.</a>	23
<a href="#">Figure 2. 4. Notion de FF pour une cellule photo-électrique.</a>	26
<a href="#">Figure 2. 5. Les différents types d'une jonction PN.</a>	29
<a href="#">Figure 2. 6. structure de base d'une cellule solaire pin a) entrée lumière haut b) entrée de côté .</a>	30
<a href="#">Figure 2. 7. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN.</a>	30
<a href="#">Figure 2. 8. Diagramme montrant deux types d'hétérojonction .</a>	31
<a href="#">Figure 2.9. Schéma de bande d'une jonction PN</a>	33

<a href="#">Figure 3. 1. Caractéristique J(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de W...</a>	37
<a href="#">Figure 3. 2. Caractéristique J(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de concentration d'Al</a>	38
<a href="#">Figure3. 3. Caractéristique P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de W</a>	39
<a href="#">Figure3 .4. Caractéristique P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'Al x0</a>	39
<a href="#">Figure 3. 5. Effet de W sur le courant de court de circuit Jcc</a>	40
<a href="#">Figure 3. 6. Effet de W sur la tension de circuit ouvert Vco</a>	41
<a href="#">Figure 3. 7. Effet de W sur la puissance maximal Pmax</a>	41
<a href="#">Figure3. 8. Effet de W sur le rendement <math>\eta</math></a>	42
<a href="#">Figure3. 9. effet de W sur le facteur de forme FF</a>	43
<a href="#">Figure3. 10. Caractéristique J(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'aluminium x0</a>	45
<a href="#">Figure3. 11. Caractéristique P(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'aluminium x0</a>	46
<a href="#">Figure3. 12. Effet de x0 sur le courant de court-circuit Icc</a>	47
<a href="#">Figure3. 13. Effet de x0 sur la tension de circuit ouvert Vco</a>	47
<a href="#">Figure3. 14. Effet de x0 sur la puissance maximale Pmax</a>	48
<a href="#">Figure3. 15. Effet de x0 sur le rendement de conversion</a>	49
<a href="#">Figure3. 16. Effet de x0 sur le facteur de forme FF</a>	49

## Liste des tableaux

Tableau 1.1. Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K°	11
Tableau 1.2. Quelques exemples des matériaux semi-conducteurs III-V	12
Tableau 3. 1. Les paramètres physiques utilisés comme données pour la simulation.	36
Tableau 3. 2. Les paramètres physiques, utilisés comme données pour la simulation...	44
Tableau 3. 3. Différents valeurs optimales des caractéristiques pour les deux cellules	50



# Introduction générale

---

Notre planète est aujourd'hui dans une phase de changement climatique qui risque d'influencer la qualité de notre vie, comme l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique à cause du secteur électrique mondial qui est en pleine mutation du fait de la libération des marchés.

Les filières vertes comme l'éolien, l'hydroélectricité et le solaire photovoltaïque présentent pour les années à venir les meilleurs potentiels de réduction des gaz à effet de serre. La filière solaire photovoltaïque représente théoriquement le plus grand potentiel.

Cependant l'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable capable de produire l'électricité en grande quantité sur le long terme. Et pour cela plusieurs avancées technologiques sont effectuées ces dernières années pour réduire le prix du Watt crête du module et augmenter son rendement.

Afin d'obtenir des cellules à haut rendement, les semi-conducteurs sont pris une importance considérable. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, la télécommunication, la télévision, les voitures et les appareils électroménagers, etc.

Parmi tous les matériaux semi-conducteurs, les composés III-V sont d'une classe bien définie avec des propriétés qui sont des sources d'intérêt en termes de connaissances et d'applications fondamentales.

Notre travail aborde l'étude des caractéristiques électriques des cellules solaires à jonction PIN homojonction et hétérojonction à base du matériau GaAl<sub>x</sub>As.

La présentation de cette étude est a été repartie en trois chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principes généraux de l'énergie solaire, de l'effet photovoltaïque, du rayonnement solaire, de la conversion photovoltaïque, des matériaux semi-conducteurs ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le second chapitre, les notions importantes relatives aux cellules solaires telles que les caractéristiques, les paramètres électriques, le principe de fonctionnement ainsi que les différentes technologies de la cellule solaire et les différents types de pertes dans une cellule, y sont présentés.

Dans le dernier chapitre, des simulations comparatives à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysic des deux cellules solaires homo-jonction et hétérojonction à base d'une jonction PIN, sont réalisées et les résultats sont présentés et discutés..

Finalement, une conclusion générale résumant notre travail est présentée.

---

# Chapitre 1 : généralités sur l'énergie photovoltaïque

## 1.1 Introduction

Après des énormes recherches, des nouvelles façons de produire de l'énergie ont vu le jour, ces solutions ont pris le nom d'énergie renouvelable «source d'énergie renouvelable» car ce sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain.

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Il existe plusieurs types de sources d'énergies: l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence la plus jeune des énergies renouvelables électrique produite à partir du rayonnement solaire qui est dite l'énergie solaire photovoltaïque, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable[1].

## 1.2 Historique de l'énergie solaire [Photovoltaïque]

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du

monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

- **1839**: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875**: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958**: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973**: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983**: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie[2].

### 1.3 Rayonnement Solaire

L'énergie solaire exploitée ici par les cellules solaires présente un spectre d'émission comparable à celui d'un corps noir à 5800K. Hors de l'atmosphère, le rayonnement solaire a une puissance moyenne de  $1,37\text{kW/m}^2$ .

Cependant, en traversant l'atmosphère, une partie de cette énergie est absorbée par diverses molécules dans l'atmosphère telles que l'oxygène, l'ozone ou encore le dioxyde de carbone. Au niveau de la surface terrestre, le rayonnement solaire a une puissance maximale d'environ  $1\text{kW/m}^2$ . Le spectre solaire obtenu à la surface de la terre est donc fonction de la

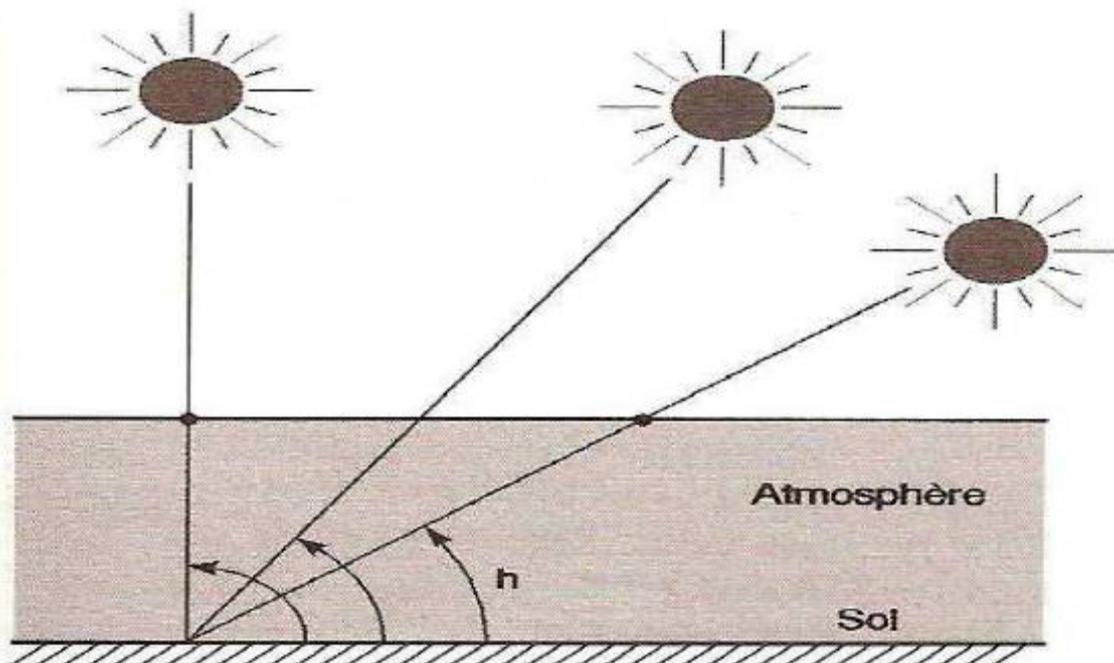
composition de l'atmosphère et surtout de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement.

Afin de caractériser les différents spectres solaires incidents, on a défini le paramètre AM (AirMass)

La masse d'air est définie par : (1.1)

Où :

- $\alpha$  : l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.
- **AM1** = correspond au soleil au zénith ( $\alpha=0$ )
- **AM4** = correspond à horizon ( $\alpha = 75^\circ$ )
- **AM1.5** = correspond ( $\alpha = 48, 19^\circ$ )
- **AM0** Correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de l'atmosphère à incidence normale.



**Figure 1.1.** Différentes positions du soleil

Il y a quatre types de rayonnement:

- **Rayonnement direct** : rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhélio-mètre.

- **Rayonnement diffus** : rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyrano-mètre.
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol**: le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global**: la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyrano-mètre ou un Solari-mètre sans écran [3].

$$G = G_d + G_{dif} + G_{réf}$$

## 1.4 Rayonnement du corps Noir

Un « corps noir » est un modèle idéal, caractérisé par son comportement, il absorbe toutes les radiations sur sa surface rien ne passe au travers et rien n'est réfléchi. Puisqu'il absorbe toutes les couleurs du spectre visible, un tel corps serait noir.

Un corps noir réémet l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnement électromagnétique, d'une quantité qui dépend de sa température. L'irradiation spectrale est donnée par la loi de Planck :

$$(1.2)$$

Où : **v**: fréquence de la lumière.

**k**: constante de Boltzmann.

**c**: vitesse de la lumière dans le vide.

**λ**: La longueur d'onde de la lumière.

## 1.5 Absorption

Le matériau photovoltaïque absorbe la lumière et la transforme en énergie électrique.

L'absorption est une propriété physique du matériau. Dans le cas des cellules solaires à applications terrestres, le matériau semi-conducteur idéal doit absorber fortement les longueurs d'ondes disponibles du spectre AM1.5.

Le coefficient d'absorption qui définit la quantité de lumière absorbé est exprimer par :

$$(1.3)$$

Avec  $\alpha_0$  : constante qui dépend du matériau.

E : énergie du photon.

E<sub>g</sub> : énergie de gap.

## 1.6 Conversion photopile (photovoltaïque)

Une photopile est un transformateur d'énergie convertissant un rayonnement électromagnétique en courant électrique. L'intérêt de l'utilisation de semi-conducteurs pour la réalisation de cellules solaire tient à la possibilité de moduler dans le temps et dans l'espace la concentration interne des porteurs de charges. Cette faculté est-elle même dépendante de la structure électronique fondamentale des semi-conducteurs qui les différencie nettement des métaux et dans une moindre mesure des isolants.

### 1.6.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [4].

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

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.

- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

### 1.6.2 Principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **n** et dopée de type **p**.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériaux **p**.

La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. Une jonction (**p-n**) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **n** et **p**, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et le courant électrique circule.

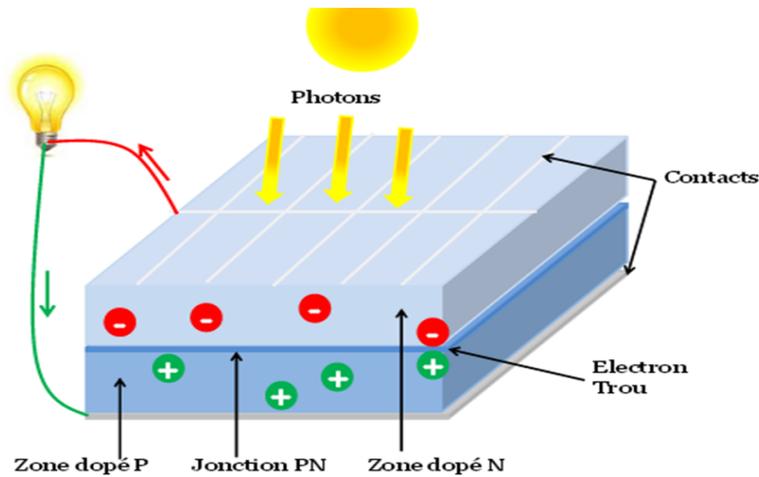


Figure 1.2. Principe de l'effet photovoltaïque.

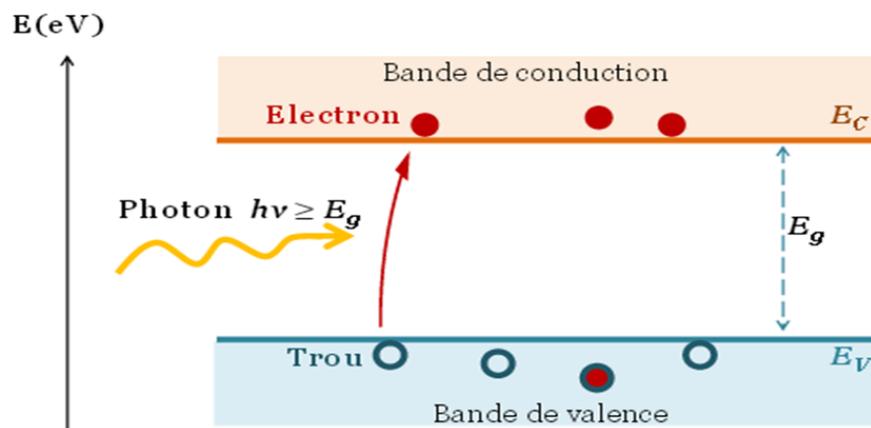


Figure 1.3. Génération de paires électron-trou.

## 1.7 Matériaux semi-conducteurs III-V

### 1.7.1 Définition

Après la découverte du transistor en 1948, l'étude des semi-conducteurs est devenue l'un des principaux domaines de la physique.

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés à partir d'un élément de la 3<sup>ème</sup> colonne et d'un élément de la 5<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique de Mendeleïev ; après le silicium ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie, en raison de leurs propriétés:

- Ils sont robustes.
- Ils possèdent une conductivité thermique élevée.

- Leur point de fusion est élevé.
- Ils ont une bande interdite directe.

Ces matériaux sont principalement utilisés en microélectronique pour les circuits intégrés, dans les cellules photovoltaïques et dans les dispositifs optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes.

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bande, montre que les éléments les plus légers donnent des composés à large bande interdite, dont les propriétés se rapprochent de celles des isolants, et à structure de bande indirecte. Les composés incluant des éléments du bord, l'aluminium, l'azote, et le phosphore de gallium **GaP**, ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs, ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique. On considérera donc essentiellement les composés à base de gallium (**GaAs, GaSb**), ou d'indium (**InP, InAs, InSb**) dont les propriétés sont les plus intéressantes.

### 1.7.2 Types des matériaux étudiés

Dans notre étude on a traité deux types de matériaux

#### a. Les composés binaires

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

Composé III-V	Eg (eV)	m*/m°	μ (cm <sup>2</sup> /V.S)	a (Å°)
---------------	---------	-------	--------------------------	--------

BN	7,5	-	-	3,6150
AIP	2,45	-	-	5,4510
AlAs	2,16	-	-	5,6605
AlSb	1,58	0,12	200	6,1355
BP	2	-	-	4,5380
GaN	3,36	0,19	380	a=3,189 b=5,185
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8800	5,653
GaSp	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSp	0,17	0,0145	80000	6,4794

**Tableau 1.1.** Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K° [5]

### b. Les composés ternaires

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

$A_xA'_{(1-x)}B$  exemple:  $Al_xGa_{1-x}As$  , lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court AlGaAs[5].

Alliages binaires	Alliages ternaires
Phosphure de gallium (GaP)	Arséniure de gallium- indium (InGaAs)

<b>Arséniure de gallium (GaAs)</b>	Phosphure de gallium- indium (InGaP)
<b>Nitride d'indium (InN)</b>	Arséniure -Phosphure de gallium (GaAsP)
<b>Phosphure d'indium (InP)</b>	Nitride de gallium-indium(InGaN)
<b>Arséniure d'indium (InAs)</b>	Arséniure- Antimoniure d'indium (InAsSb)
<b>Antimoniure d'indium (InSb)</b>	Antimoniure de gallium- indium (InGaSb)

**Tableau 1.2.** Quelques exemples des matériaux semi-conducteurs III-V

### 1.7.3 Equation de transport des semi-conducteurs

Le comportement électrique d'une jonction PN est décrit par :

- L'équation de poisson :

$$(1.4)$$

Ou :

- Les équations de continuité et les densités de courant des électrons et des trous sont :

$$\text{Où } J_n = q \mu_n \quad (1.6)$$

$$(1.7)$$

$$\text{Où } J_p = q \mu_p \quad (1.8)$$

Avec :

**R** : taux de recombinaison.

**G** : taux de Génération.

$\mu_n$  et  $\mu_p$  : Mobilité des électrons et des trous.

**n** et **p** : concentrations des électrons et des trous.

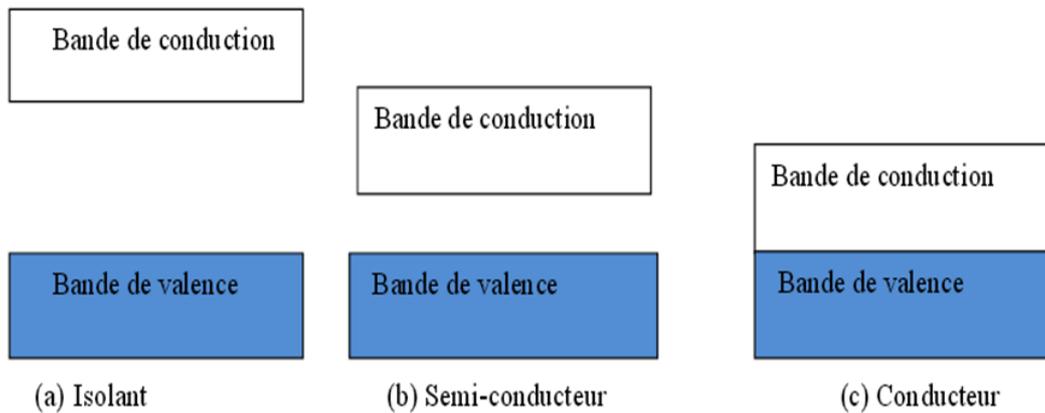
$E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$  : quasi niveau de Fermi des électrons et des trous.

### 1.7.4 Propriétés électroniques

#### a. Notion de bandes d'énergie

Un matériau semi-conducteur se caractérise par sa structure de bande :

- La bande de valence: c'est la bande qui correspond à la bande d'énergie la plus élevée entièrement remplie d'électrons
- La bande de conduction: est définie comme le premier niveau énergétique au-dessus de la bande de valence où accèdent les électrons excités.
- La bande interdite: cette bande représente l'énergie qu'il faut fournir à un électron pour qu'il passe de la bande de valence à la bande de conduction.



**Figure 1.4.** Structure de bandes d'énergie des matériaux

### **b. Gap direct et gap indirect**

Pour un semi-conducteur, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont caractérisés par une énergie  $E$  et un vecteur d'onde  $k$ .

Le gap est la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence.

Les structures de bandes représentées sur **la figure (1-7)** font apparaître deux types fondamentaux de semi-conducteurs:

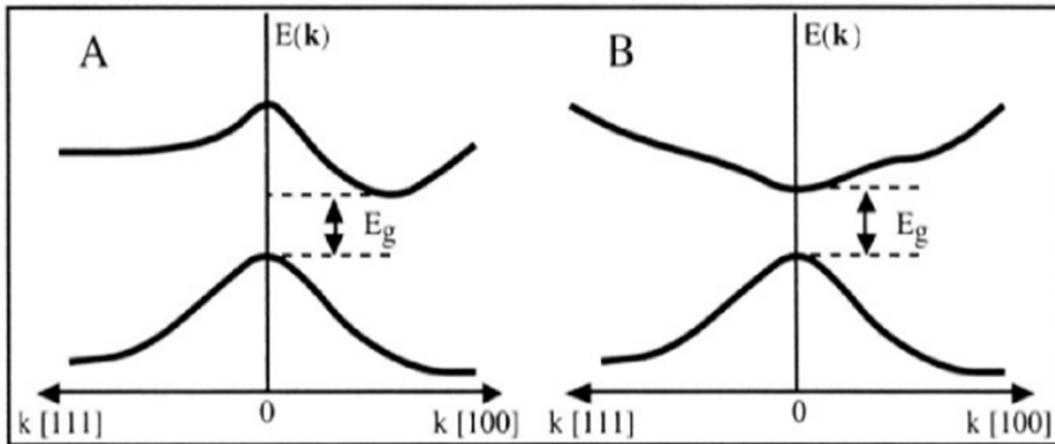


Figure 1.5. Structure de bande d'énergie du : (A) gap indirect (B) gap direct.

### 1.7.5 Propriétés Optiques

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont intimement liées à leur structure électronique dans la mesure où elles mettent en jeu des transitions entre différents états électroniques [6].

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent les propriétés dues à l'interaction du matériau avec la lumière. Il s'agit essentiellement de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption du matériau, paramètres essentiels dans le cas de cellules solaires.

#### a. Absorption

Lorsqu'un photon d'énergie  $h\nu$  supérieure à la largeur de bande interdite  $E_g$  est envoyé sur le semi-conducteur, il provoque un saut d'électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état vide de la bande de conduction, on dit qu'il y a absorption.

Ce phénomène représenté sur la figure 1.6 :

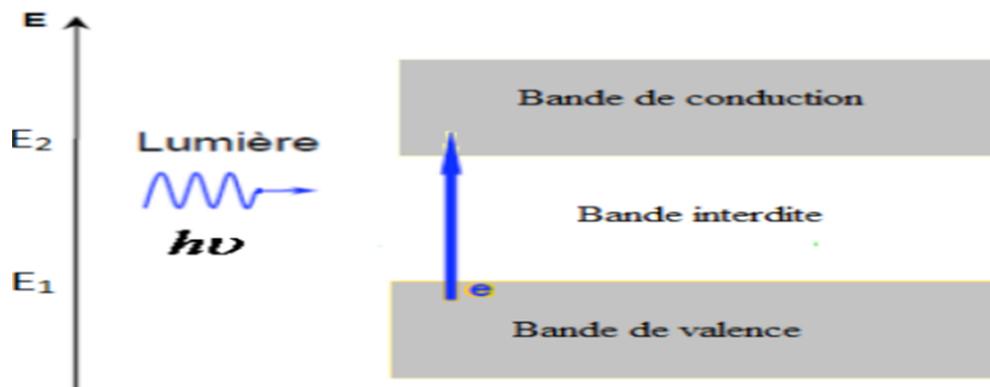


Figure 1.6. L'absorption de la lumière par les porteurs.

## b. Recombinaison

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle engage une perte d'énergie ; les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique. Un semi-conducteur ayant subi une perturbation reconstitue son équilibre thermodynamique à travers plusieurs mécanismes possibles :

- **La recombinaison radiative ou " Bande à Bande " :** Ce mécanisme est le plus dominant dans les SC à gap direct tel que le GaAs ; La recombinaison radiative est décrite comme le mécanisme inverse de l'absorption optique, un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence.
- **La recombinaison indirecte ou assistée (par piège) :** ou des centres de recombinaison, dominante dans les SC fortement dopés à gap indirect comme le Si [7].
- **La recombinaison Auger :** C'est le mécanisme qui intervient lors d'une forte concentration de porteurs libres, comme dans les semi-conducteurs à gap indirect [8].

Ces processus sont présentés dans la figure 1.7 :

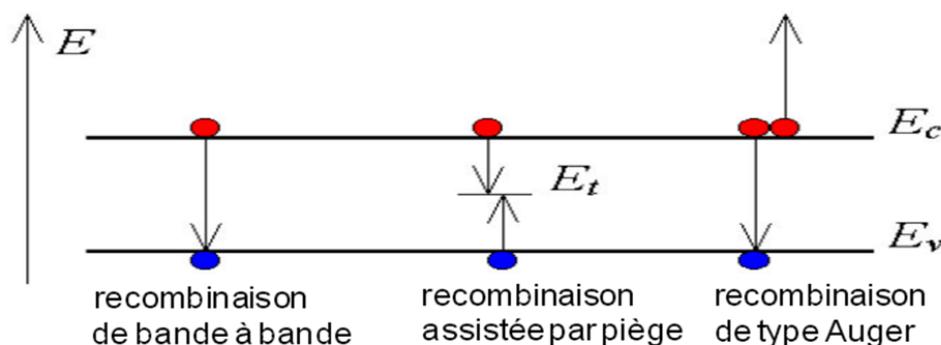


Figure 1.7. recombinaisons Dans un SC.

## c. Taux de recombinaison

Le taux de recombinaison est donné par :

$$(1.9)$$

Avec  $\Delta n$ ,  $p$  : excès des porteurs

$\tau_{n,p}$  : durée de vie des porteurs

## 1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- ✓ Source d'énergie 'Soleil' gratuite.
- ✓ Pas de gaz polluant, ni de bruit [9].
- ✓ Entretien minimal pour un fonctionnement.
- ✓ Pas de parties mobiles, peu d'usure dans le temps [9].
- ✓ Système modulaire fonction du besoin, facile à monter.
- ✓ Autonomie [9].
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt [3].

Et parmi ses inconvénients :

- ✓ Technologie à ses débuts, encore peu diffusée, donc chère.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- ✓ Production non continue d'énergie (jour/nuit, été/hiver) énergie intermittente.
- ✓ Intégration au bâti (forme, couleur).

## 1.9 Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse[9],

les autorités nationales et internationales doivent engager une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque.

C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation a été dans le domaine des télécommunications.

Après, certains puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV.

A nos jours, quelques dizaines de villages sahariens utilisent cette source d'énergie (Tamanrasset et Adrar...)[10].

### **1.10 Secteurs d'applications :**

- ✓ Domaine spatial.
- ✓ Habitation isolée.
- ✓ Industrie isolée.
- ✓ Centrale de puissance.
- ✓ Résidence urbaine.
- ✓ Biens de consommation.

### **1.11 Conclusion :**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales sur le photovoltaïque ainsi que les avantages et inconvénients de cette énergie solaire et son avenir.

## **Chapitre 2 : la cellule solaire photovoltaïque**

---

### **2.1 Introduction**

Durant les dernières années, les cellules photovoltaïques ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entrainer de pollution atmosphérique, locale ou globale.

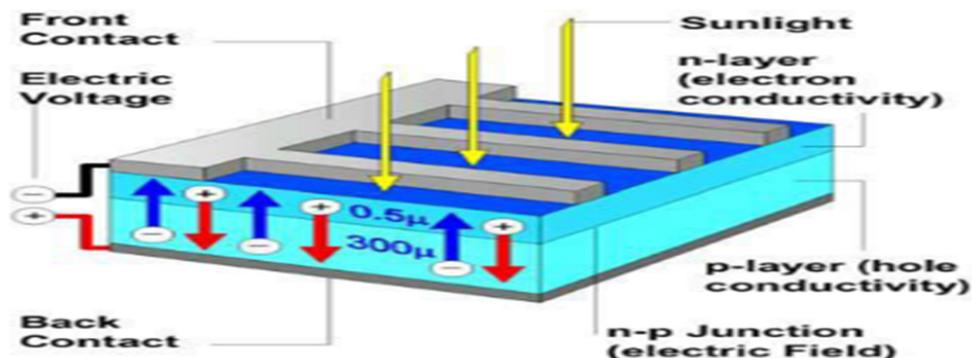
Les cellules solaires à base des matériaux III-V ont été largement utilisées, aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace.

Dans la recherche des rendements les plus élevés obtenus par la conversion photovoltaïque, les cellules solaires à l'arséniure de gallium s'avèrent les plus intéressantes. La largeur de la bande interdite du **GaAs** ( $E_g = 1,425 \text{ eV}$ ) est proche de la valeur nécessaire à la conversion la plus grande du rayonnement solaire.

## 2.2 Cellule Solaire

La cellule Solaire photovoltaïque, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie, le soleil.

Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.



**Figure 2. 1.** Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore), l'autre est dopée **P** (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les deux faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique. La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100cm<sup>2</sup> ou plus. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries[1].

### 2.2.1 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.

Un semi-conducteur est constitué d'une bande de conduction dans laquelle circulent les électrons chargés négativement et d'une bande de valence dans laquelle circulent les trous chargés positivement. Entre ces deux bandes se trouve une bande interdite(gap) dont la largeur  $E_g$  est définie par la différence entre le bas de la bande de conduction  $E_c$  et le haut de la bande valence  $E_v$ . Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui eux comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p[1].

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches *n* et *p*.

Les électrons libérés se déplacent dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche *p*, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche *n*. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

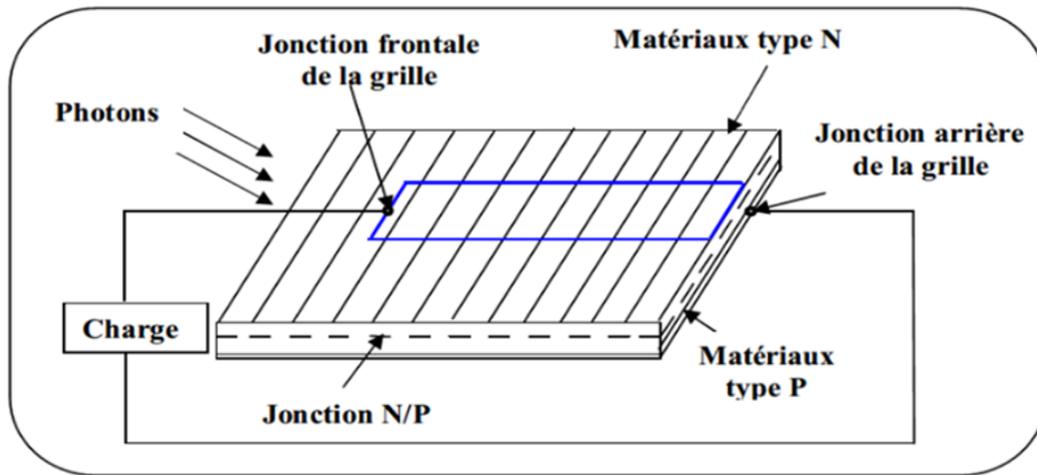


Figure 2. 2Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

### 2.2.2 Caractéristique électrique d'une cellule Solaire

Les performances d'une cellule solaire sont principalement évaluées à partir de sa caractéristique courant-tension sous un éclairage normalisé (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m<sup>2</sup>, à 25°C).

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairage solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique courant-tension correspond à la soustraction du photo-courant et du courant de la diode à l'obscurité par [2]-[3]:

$$(2.1)$$

$$\text{Où} \quad (2.2)$$

Avec: **I<sub>ph</sub>** : densité de courant photo-généré.

**I<sub>obs</sub>** : densité de courant d'obscurité.

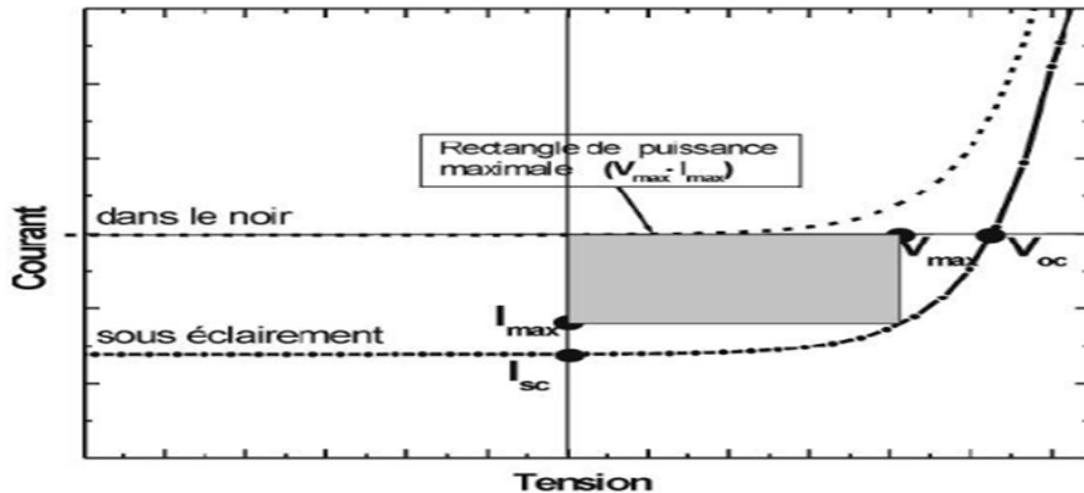
**I<sub>s</sub>** : courant de saturation de la diode.

**q** : charge élémentaire.

**k** : constante de Boltzmann et **T** la température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la Figure (I2.3)Les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein. On

remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur  $I_{cc}$ , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur  $V_{oc}$ , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Elle représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité.

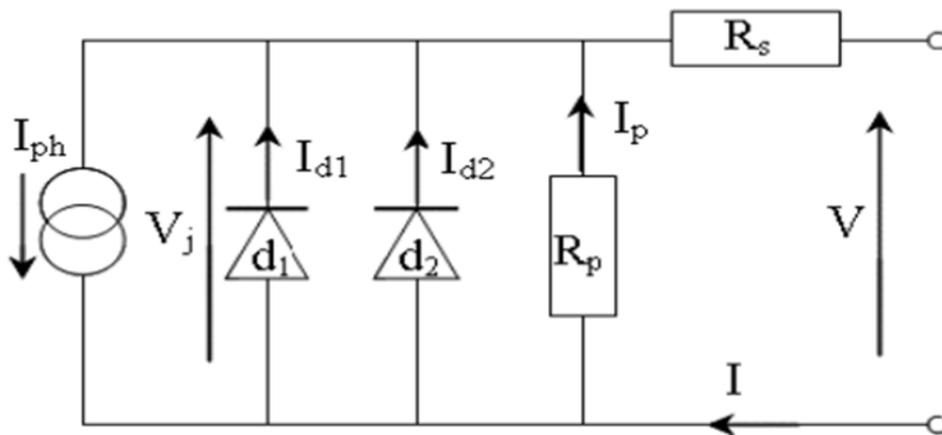


**Figure 2. 3.** Caractéristiques courant-tension à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

### 2.2.3 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement et celui d'un générateur de courant, produisant un courant  $I_{ph}$  auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule.

On peut modéliser une cellule photovoltaïque comme ci-dessous :



**Figure (2.4)** : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

- **Le générateur de courant:** il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photo-généré.
- **La résistance série  $R_s$**  : elle prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium
- **La résistance parallèle  $R_p$**  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule.
- **La diode  $d_1$ :** modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- **La diode  $d_2$ :** modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

## 2.2.4 Courant fourni par la cellule

(2.3)

Vue la très faible valeur de  $R_s$ , on peut négliger la chute de tension à ses bornes ( $R_s I$ ) devant la tension de sortie  $V$ , et l'équation de courant devient :

(2.4)

Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité se comporte comme une diode classique et elle obéit à la loi Shockley qui est la suivante [5] :

$$(2.5)$$

Avec:

- **I<sub>s</sub>** Le courant de saturation.
- **q** la Charge de l'électron.
- **k** la constante de Boltzmann.
- **T** la température.
- **n** le facteur d'idéalité (n=2 pour une diode en silicium).

Sous éclairage, il faut tenir compte du photo-courant généré (**I<sub>ph</sub>**), on obtient l'équation suivante :

$$(2.6)$$

## 2.2.5 Paramètres de la cellule solaire

La cellule peut être caractérisée par ses paramètres :

### a. Courant de court-circuit **I<sub>cc</sub>**

Le courant **I<sub>cc</sub>** exprimé en **mA**, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage, en court-circuitant les bornes de la cellule.

Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclairage **G** (W/m<sup>2</sup>), à la température ambiante, à la vitesse de circulation de l'air ambiant.

On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule. Il est fonction directement de la surface de la cellule.

### b. Tension de circuit ouvert **V<sub>co</sub>**

La tension de circuit ouvert exprimée en **Volt**, elle correspond à la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la couche active. Dans le cas des cellules solaires, **V<sub>co</sub>** est linéairement dépendant du niveau de la bande de conduction du matériau

semi-conducteur donneur d'électrons et du niveau d'énergie de la bande de valence du matériau semi-conducteur accepteur d'électrons.

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

Elle est liée au courant de court-circuit  $I_{cc}$  et au courant de saturation  $I_s$  par :

$$(2.7)$$

### c. Facteur de forme FF

C'est le facteur de remplissage ou facteur de forme(FF). Il est illustré sur la figure (2.5). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance Maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc}V_{co}$ .

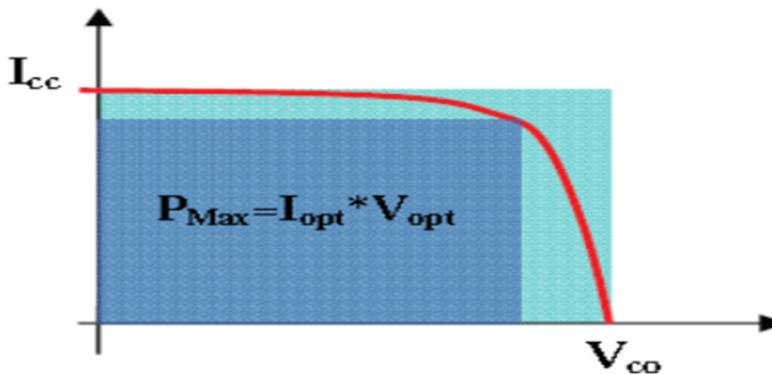


Figure 2. 5. Notion de FF pour une cellule photo-électrique.

### d. Rendement de conversion $\eta$

Le rendement de conversion est aussi une caractéristique électrique importante qui exprimé en pourcentage(%), et est défini comme le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_{in}$

Alors, il est obtenu par la formule :

$$(2.8)$$

Où :

$P_{in}$  : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>.

En général, le rendement d'une cellule unique ne dépasse pas 15-17%, c'est pour cela on associe des batteries de cellules pour arriver à une puissance électrique convenable.

Sur le marché photovoltaïque actuellement les cellules très consommées en grande quantité sont à base de silicium vu leur bas prix par rapport aux cellules à base des matériaux tels que : **GaAS ; CdTe, CIGS....**

## **2.2.6 Différentes Technologies de la Cellule Photovoltaïque**

Presque toutes les cellules solaires sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le Silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de caduim (CdS), le tellure de caduim (CdTe), des alliages de cuivre induim et Sélénium(CIS), Arséniure de gallium (GaAs).....

### **a. 1ère génération : Cellules cristallines**

Généralement ces cellules en Silicium, ne comprennent qu'une seule jonction **pn**. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de " Wafer "à partir d'un Si très pure, reste très énergivore et couteuse. La limite de rendement de ces cellules est de 27%.On distingue deux types de cellules cristallines :

- **La cellule Poly-cristalline** :est constituée de cristaux de 1mm à environ 2cm assemblés, appelée 'grains'. La multitude de cristaux se forme pendant le refroidissement du silicium. La cellule est d'aspect bleuté, mais pas uniforme; et peut être de forme carrée. Cette technologie a un bon rendement de conversion de 16-18%, cette cellule reste la plus utilisée du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leur homologue monocristallin.
- **La cellule monocristalline** : est constituée de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du Silicium. Cette cellule est de coût élevé, car elle offre un très bon rendement de 17-20%.

### **b. 2ème génération : couches minces**

Dans le cas de couches minces, le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support. L'amorphe, le tellurure de cadmium (CdTe), le di-sélénium de cuivre indium (CIS) font partie de cette Génération :

- **L'amorphe** :Est un silicium non cristallisé, ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en « wafer ». Moins couteux par rapport à son rendement faible 6-7% et sa durée de vie courte.
- **CdTe**: Le CdTe présente de bonnes performances.

Les avantages de cette technologie sont :

- fonctionne avec un faible éclaircissement.
- une absorption importante.
- liaisons fortes (stabilité).

Ses problèmes :

- Rendement plus faible.
  - Structure complexe, matériaux couteux.
  - Toxicité : Cd et Te polluants et reste problématique pour leur production.
  - Tellure est un élément rare.
  - Diminution de performance avec le temps plus importante.
- **GaAs** : Les cellules solaires à base de GaAs, sont plus efficaces que **Si** pour la conversion solaire. La cellule multi-jonction GaAs a un rendement très élevé 25-30% mais elle est très chère.

### c. 3<sup>ème</sup> génération

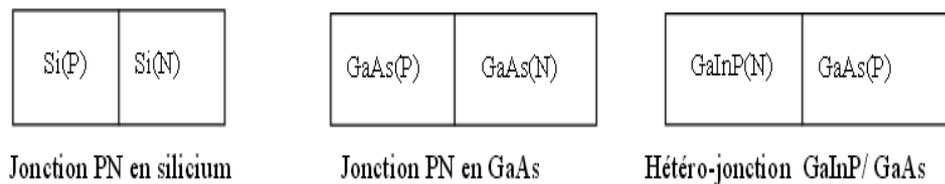
Il existe plusieurs types de la troisième génération, nous citons quelques une : Perovskites, multi-jonction, concentration;...

- **Cellules Pérovskites** : sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite. Ces cellules sont apparues en 2000 avec un rendement de 3,8%. Depuis 2016 le rendement est passé à 22,1%. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance à l'eau et à la Température.
- **Cellules a concentration** permet d'utiliser des photons a basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule.
- **Cellule Organiques**[4].

## 2.3 Jonctions PIN / PN

La jonction **PIN** se compose de trois régions dopées différemment. Comme son nom l'indique, il existe une couche intrinsèque ou non dopée prise en sandwich entre une région dopée **P** et une région dopée **N**. Typiquement, ce type de jonction est fabriqué à partir de silicium amorphe avec une bande interdite d'environ 1,8eV.

Une jonction **PN** est réalisée par la juxtaposition de deux régions de types différents soit du même Semi-conducteur, soit de deux semi-conducteurs différents .



**Figure 2. 4.** Les différents types d'une jonction PN.

- Le contact entre un semi-conducteur de type **p** et un semi -conducteur de type **n** et de structure chimique différente est appelé hétérojonction **p-n** .
- Le principe de base d'une cellule solaire est la formation d'une jonction réalisée par un sur-dopage du silicium. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau.

## 2.4 Cellule solaire à structure PIN

La cellule solaire à jonction PIN, est illustrée par la figure 2.6 :

- La structure consiste en un substrat type **n**.
- sur lequel une couche intrinsèque légèrement dopée **I** est épitaxiée[5].
- SiO<sub>2</sub> est ensuite déposée et configuré pour former des fenêtres pour une ultérieure diffusion à haute température d'un dopant de type **p**.
- La région **n** peut ensuite être amincie de l'arrière et les contacts métalliques sont placés des deux côtés, surfaces devant et arrière.
- Les contacts devant sont conçus pour laisser passer la lumière à l'intérieur du dispositif, tandis que celui arrière est planaire, sur toute la surface.

- Typiquement l'épaisseur de la région **p** devra être très petite, comparée avec la région intrinsèque.
- Ce schéma forme la base de tous les dispositifs semi-conducteurs unique et binaire, bien que des fois il est mis sens dessus dessous; **P**, épitaxie intrinsèque et enfin la diffusion-n.

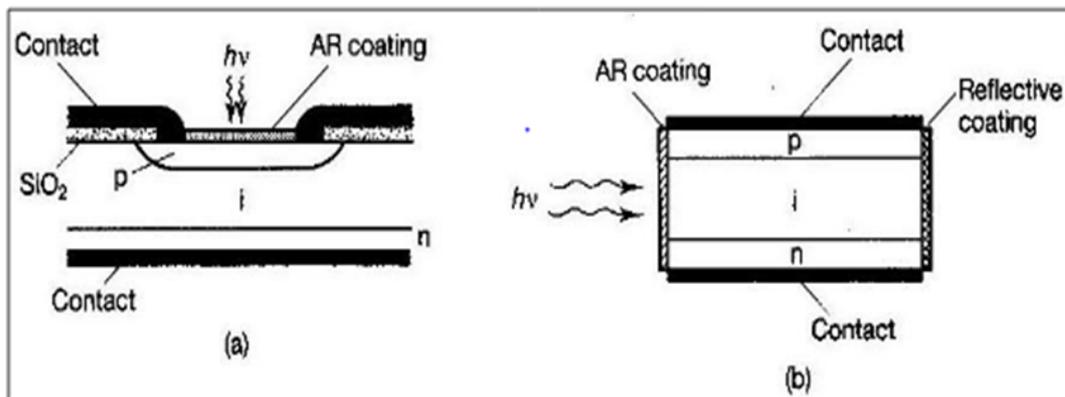


Figure 2.

5. Structure de base d'une cellule solaire pin a) entrée lumière haut b) entrée de côté [6].

### 2.4.1 Principe de fonctionnement de la cellule solaire PIN

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure(2.8), qui représente le fonctionnement d'une jonction **PN** où la zone de charge d'espace créée est une région intrinsèque. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions **P, I, N**, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés[6].

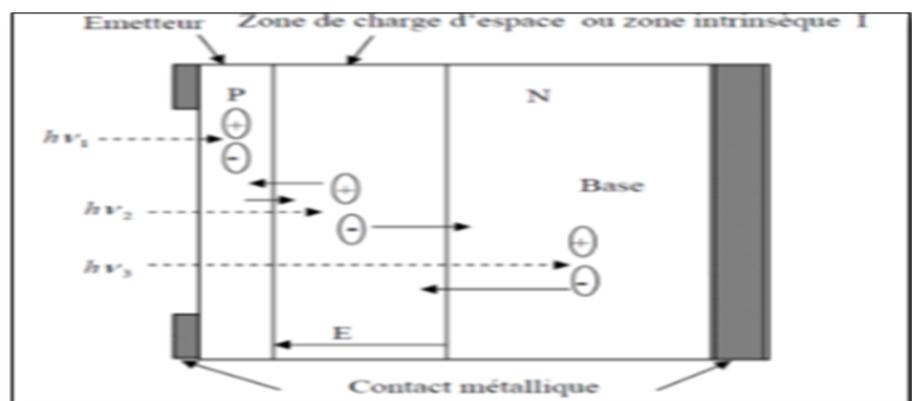


Figure 2. 6.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN[8].

## 2.5 Technologies hétérojonction et homo-jonction

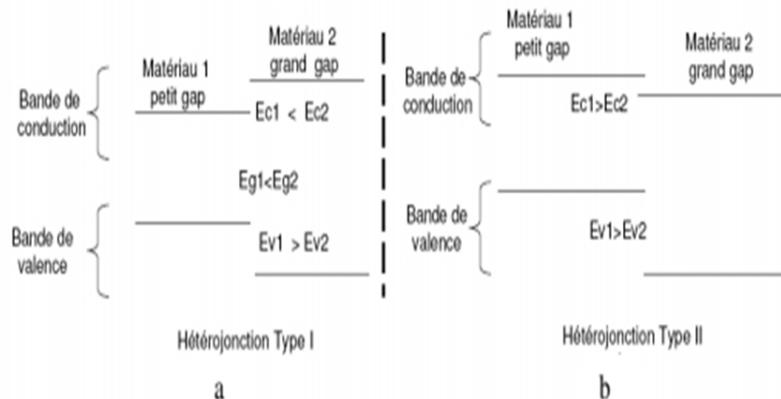
### 2.5.1 Structure hétérojonction :

Les jonctions réalisées entre deux matériaux semi-conducteurs de type et de gap différents cristallin ou non cristallin sont appelées hétérojonction. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant la taille des atomes assez proche.

Selon les matériaux utilisés pour les semi-conducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions.

**Type 1:** les hétérojonction ( GaAs-AlGaAs, InP-InGaAs..) : les offsets de bandes pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Pour faire déplacer les porteurs du matériau petite bande interdite au matériau grande bande interdite il nécessite une énergie.

**Type 2:** à bande interdite décalée favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs.



**Figure 2. 7.** Diagramme montrant deux types d'hétérojonction [9].

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

**L'hétérojonction iso-type**, pour laquelle les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage [7].

**L'hétérojonction aniso-type**, dans laquelle les deux semi-conducteurs sont dopés différemment [7].

### **a. Cellule solaire à hétérojonction**

Alors que les cellules photovoltaïques du marché ont un rendement de conversion de 19 à 20%, la technologie hétérojonction permettra d'atteindre très prochainement 25%, tel qu'estimé par les meilleurs laboratoires mondiaux.

Parmi eux, le CEA-Liten vient de démontrer: un rendement de 23,9% sur la globalité de la surface d'une cellule de taille standard (244 cm<sup>2</sup>), ainsi qu'une puissance nominale de 348W[8].

### **b. Avantages d'une telle cellule**

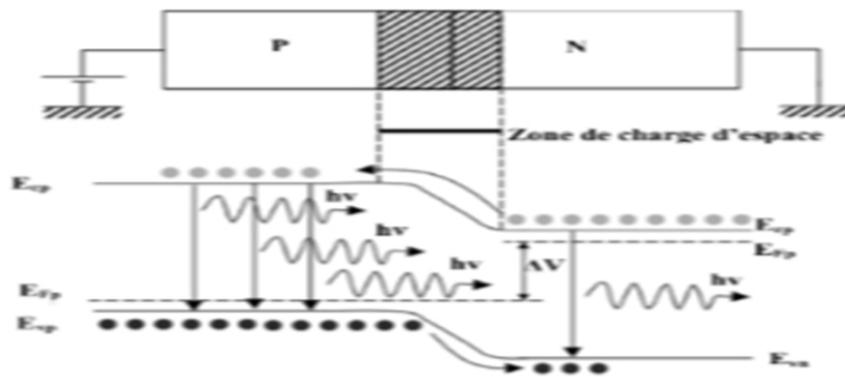
- Un haut rendement.
- La face arrière de la cellule étant également active, une partie des rayons du soleil réfléchis par le sol peut être captée. Cela représente jusqu'à 30% de lumière en plus, soit un gain de rendement de conversion de l'énergie lumineuse en électricité de 10%.
- Tenue en température : Meilleur coefficient de température comparé aux cellules c-Si et ainsi plus grande puissance de sortie à plus grandes températures.
- Un moindre impact économique et écologique : du fait de rendements de conversion élevés, l'hétérojonction permet d'utiliser moins de matière (cellule, modules, structures de montage). De même, ses procédés de fabrication ont un moindre impact environnemental [9].

## **2.5.2 Structures homo-jonction**

L'homo-jonction est la structure solaire la plus couramment utilisée. Elle est constituée principalement de la juxtaposition des deux bloc de même nature mais de dopage différent, d'un même semi-conducteur monocristal [10].

Les composants optoélectroniques à base d'homo-jonction ont été développées depuis les années 1960 et constituent la naissance de l'émission de la lumière sur un semi-conducteur.

La figure 2.9 représente le schéma de bandes d'une structure homo-jonction alimenté en direct.



**Figure 2.8.** Schéma de bande d'une jonction PN

## 2.6 Différents types de pertes dans une cellule solaire

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types de pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèques et extrinsèques [11] ou selon les pertes optiques et électriques [12].

- **Les pertes extrinsèques** : Cela concerne des pertes dues à la réflexion, l'ombrage dû aux contacts, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative[13].
- **Les pertes intrinsèques** : Ce type est dû à l'incapacité de la cellule solaire mono-jonction, de répondre efficacement à toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire, et aux recombinaisons radiatives dans la cellule[13].

## 2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur la cellule solaire et ses caractéristiques. Dans la suite, nous avons décrit certaines technologies des cellules solaires photovoltaïques, puis on a focalisé sur les principes de fonctionnements des cellules solaires à structure **PIN** (homojonction et hétérojonction). A la fin on a cité les différents types de pertes dans une cellule solaire.

# Chapitre 3 Simulations et résultats

---

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque  $W$  et de la concentration d'Aluminium des cellules solaires à homojonction en GaAlAs sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la densité de courant  $J_{cc}$ , la puissance maximal  $P_{max}$ , le rendement  $\eta$ , et sur le facteur de forme  $FF$ . Ensuite on a repris les mêmes simulations mais avec l'influence de la concentration d'Aluminium dans des cellules solaires à hétérojonction GaAlAs.

A ce titre nous avons calculé le rendement de chaque cellule à jonction PIN par le logiciel COMSOL Multiphysics.

## 3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics, logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis, est apparu pour la première fois en 1986.

Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Les étapes essentielles pour simuler un système :

- définir la géométrie de notre système
- introduire les propriétés correspondantes
- préciser le maillage
- choisir la physique ou les physiques du système
- Lancer le calcul
- afficher les résultats

## 3.3 Principe et objectif de la simulation

Dans notre travail, nous allons étudier les caractéristiques de la cellule solaire simulée (le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert, la caractéristique  $J(V)$ , la puissance délivrée  $P(V)$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ , tout en variant les paramètres de la cellule (l'épaisseur  $W$  et la concentration d'Aluminium), dans le but de déterminer la structure optimale qui assure un rendement maximal.

### 3.4 Simulation des cellules solaires homojonction GaAlAs à jonction PIN

#### 3.4.1 Présentation de la structure homojonction

<b>GaAl<sub>x</sub>As(p)</b> NA=10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	<b>GaAl<sub>x</sub>As(I)</b> W	<b>GaAl<sub>x</sub>As(n)</b> ND=10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
--	-----------------------------------	--

#### 3.4.2 Présentation des paramètres utilisés dans la simulation de la structure homojonction

Le choix des paramètres repose sur des résultats expérimentaux montrés sur le tableau 3.1.

Paramètres	Valeurs	Description
A0	2,15e-5	Constante

c (m/s)	3e8	Vitesse de la lumière
F(m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )		Flux de photons
tau (s)	1e-6	Durée de vie des porteurs
W (μm)	1-3	Epaisseur de la couche intrinsèque
x0	0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4	Concentration d'Aluminium
Eg(eV)	1,424+1,247*x0	Largeur de gap
alpha(m <sup>-1</sup> )	$\lambda < 1.24/Eg$ 0 $\lambda > 1.24/Eg$	Coefficient d'absorption
G(m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	F.alpha.exp(-alpha.x)	Taux de génération
ε <sub>r</sub>	12,9-2,84.x0	Permittivité relative
χ(V)	4,07-1,1.x0	Affinité électronique
Nv(cm <sup>-3</sup> )	$(0,51+0,25.x0)^{1,5}.4,82.10^{15}.T^{1,5}$	Densité d'états effective de la bande de valence
Nc(cm <sup>-3</sup> )	$(0,063+0,083.x0)^{1,5}.4,82.10^{15}.T^{1,5}$	Densité d'états effective de la bande de conduction
μ <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	$8*10^3-2,2.10^4.x0+10^4.x0^2$	Mobilité des électrons
μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	$(370-970.x0+740.x0^2)$	Mobilité des trous

**Tableau 3. 1.** Les paramètres physiques utilisés comme données pour la simulation.

### 3.4.3 Résultats de la simulation à l'aide de COMSOL

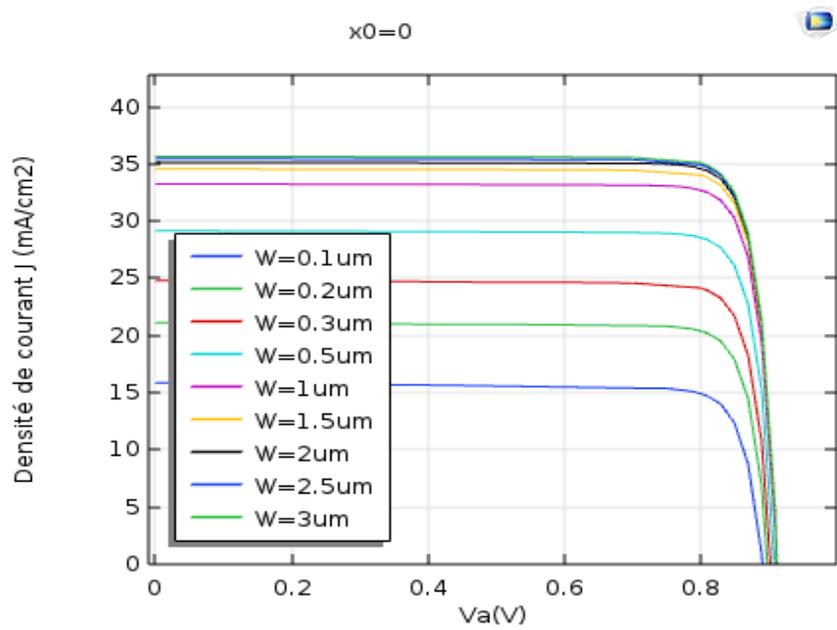
#### a. Caractéristiques courant-tension J(V) de la CS GaAl<sub>0</sub>As à jonction PIN

##### ➤ Pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque W

La figure 3.1 représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension Va pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque W pour une structure PIN homojonction à base de GaAs (x0=0). On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur W,

le courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente et ensuite il sature, et pour la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , on note une légère augmentation.

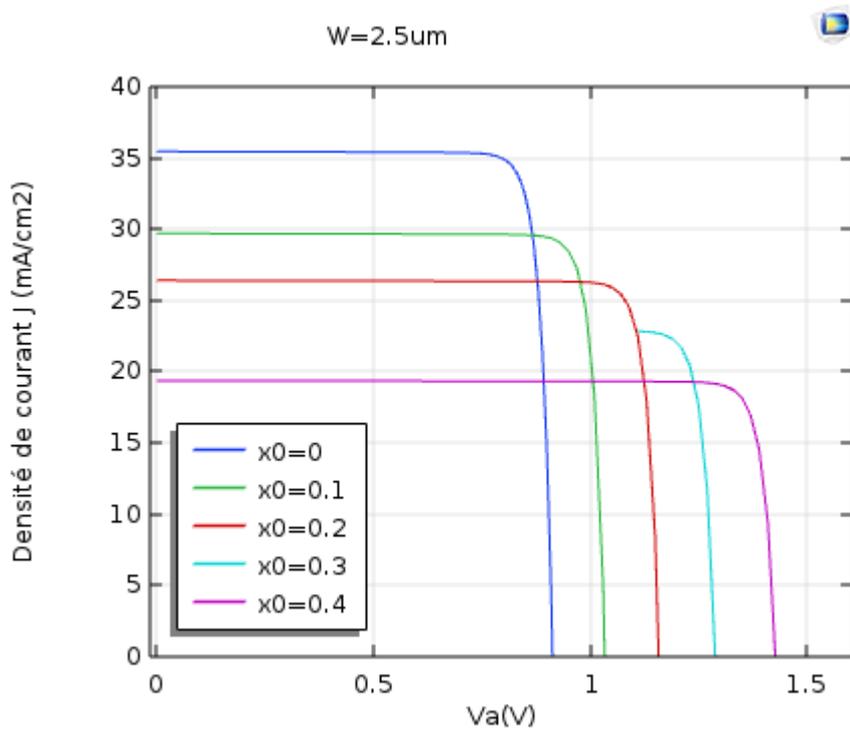
L'augmentation du courant  $J_{cc}$  peut être expliquée par le fait que lorsque l'épaisseur  $W$  augmente, le nombre de photons absorbés augmente. Alors que l'augmentation de  $V_{co}$  est due à l'augmentation du courant  $J_{cc}$ .



**Figure 3. 1.** Caractéristiques  $J(V)$  de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de  $W$  ( $x_0=0$ )

➤ **Pour plusieurs valeurs de concentration d'Aluminium**

Les caractéristiques courant tension pour différentes concentration d'Al  $x_0$  sont illustrées sur la figure 3.2. On remarque que lorsqu'on augmente la concentration  $x_0$ , le courant de court-circuit  $J_{cc}$  diminue alors que la tension de circuit ouvert augmente.

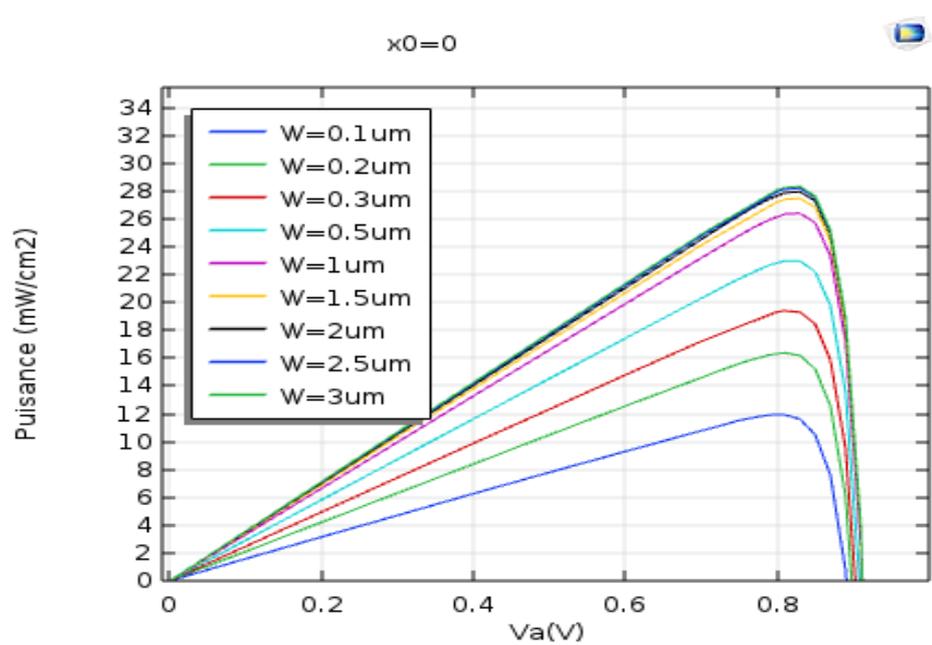


**Figure 3.2.** Caractéristiques J(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de concentration d'Al ( $W=2,5\mu\text{m}$ )

### b. Caractéristiques puissance-tension P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN

#### ➤ Pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de la couche intrinsèque W

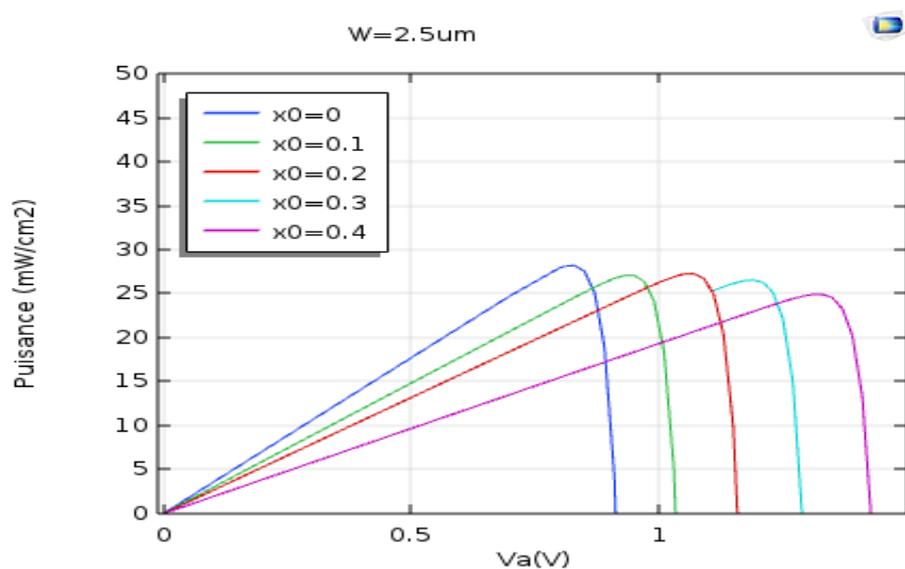
Sur la figure 3.3 sont représentées les variations de la puissance en fonction de la tension  $V_a$ , pour différentes valeurs de l'épaisseur  $W$ , d'une structure PIN en GaAs. Ces courbes présentent des maximums  $P_{\text{max}}$ . On constate que la puissance maximale  $P_{\text{max}}$  augmente lorsque  $W$  augmente et ensuite elle sature. L'augmentation de  $P_{\text{max}}$  peut être expliquée par l'augmentation de la tension  $V_{\text{co}}$  et du courant  $J_{\text{cc}}$  ( $P_{\text{max}}=V_{\text{co}}.J_{\text{cc}}.FF$ ).



**Figure 3.3.** Caractéristiques P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de W

➤ **Pour plusieurs valeurs de concentration d'Aluminium**

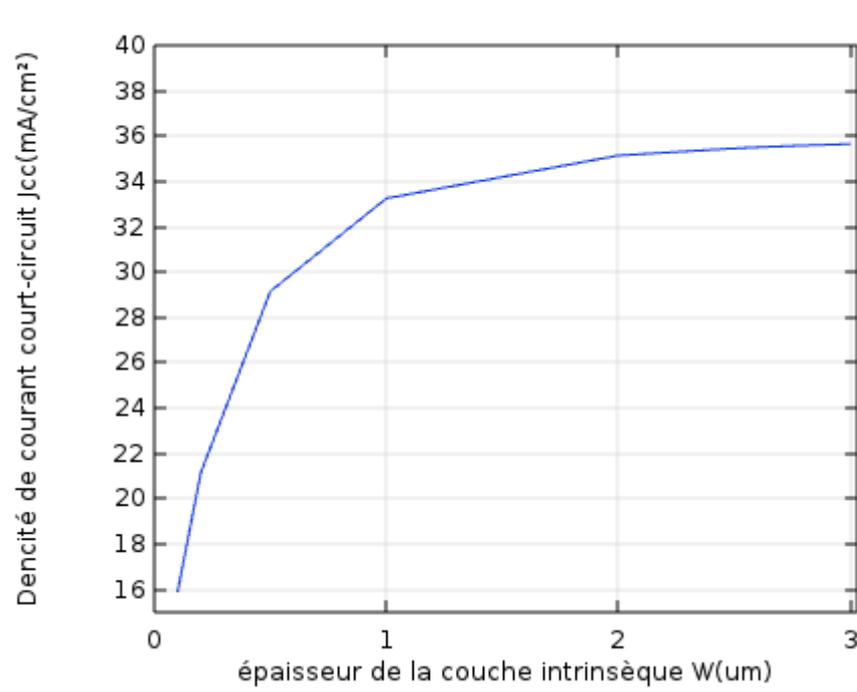
Les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension sont représentées sur la figure 3.4 pour différentes valeurs de la concentration d'Al  $x_0$ . Ces courbes présentent des maximums correspondant aux puissances maximales  $P_{max}$ .



**Figure 3.4.** Caractéristiques P(V) de la CS GaAlAs à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'Al  $x_0$  (W=2,5μm)

### c. Influence de l'épaisseur $W$ sur le courant de court-circuit $J_{cc}$

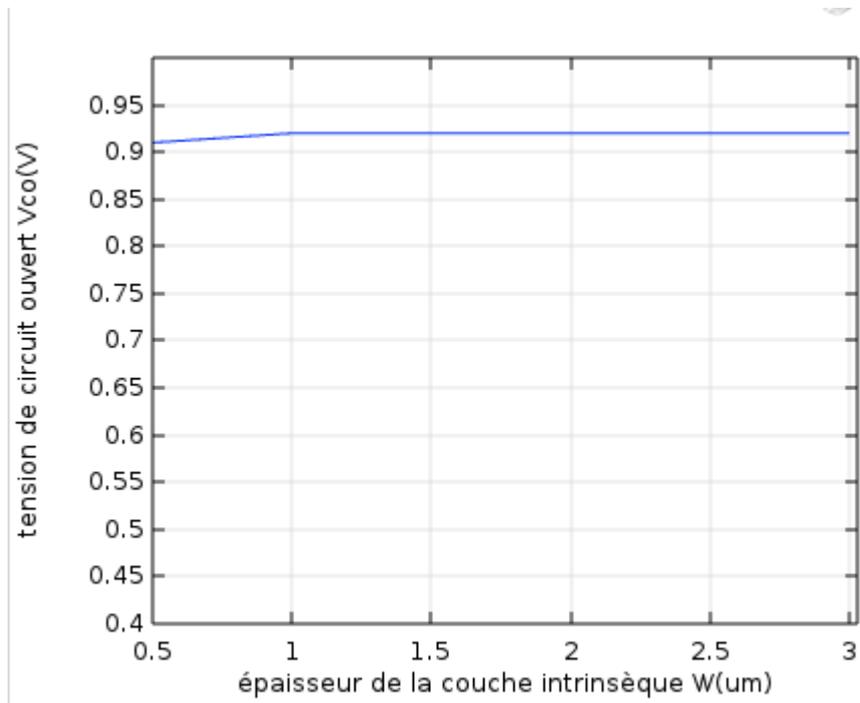
La figure 3.5 présente la variation du courant  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur  $W$ . Le courant  $J_{cc}$  augmente avec  $W$  et ensuite sature à partir d'une épaisseur  $W=2\mu\text{m}$  et atteint une valeur égale à environ  $35\text{mA}/\text{cm}^2$ .



**Figure 3.5.** Effet de  $W$  sur le courant de court de circuit  $J_{cc}$

### d. Influence de l'épaisseur $W$ sur la tension de circuit ouvert $V_{co}$

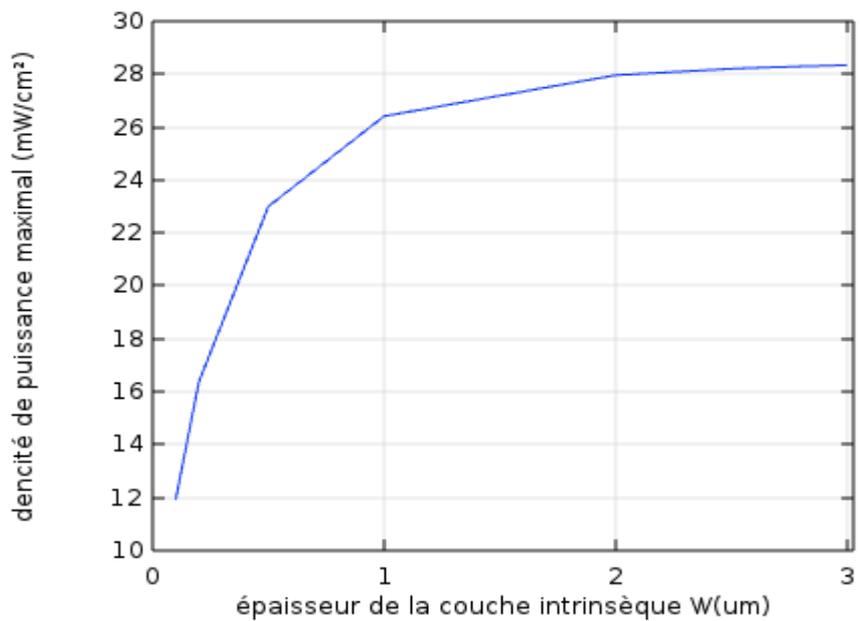
La figure 3.6 représente la variation de la tension  $V_{co}$  en fonction de  $W$ . On remarque une légère augmentation de  $V_{co}$  avec  $W$  qui stabilise à une valeur de l'ordre de  $0,93\text{V}$ .



**Figure36.** Effet de W sur la tension de circuit ouvert Vco

**e. Influence de l'épaisseur W sur la puissance maximale Pmax**

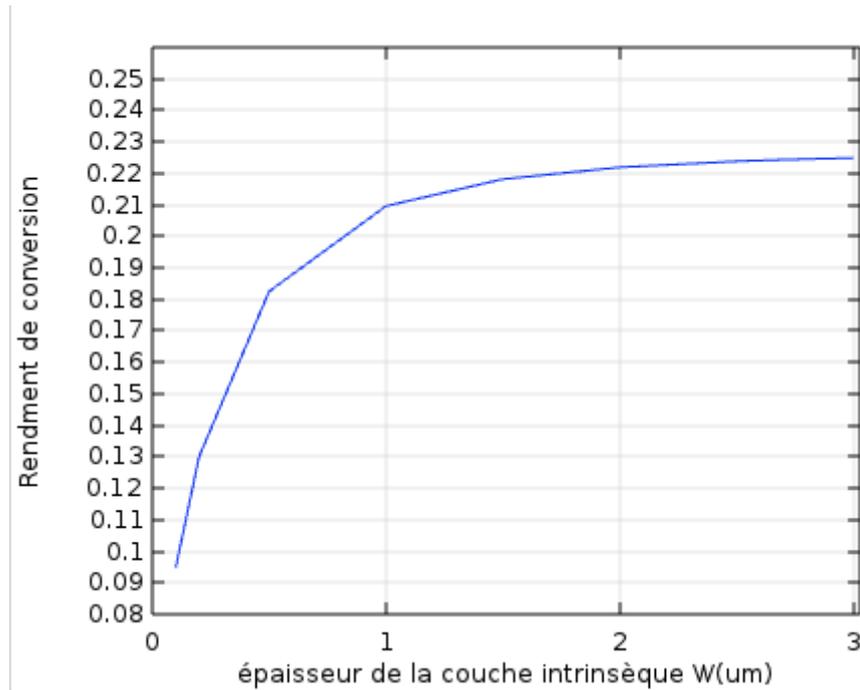
La figure 3.7 illustre la variation de la puissance maximale Pmax en fonction de l'épaisseur W. La puissance maximale Pmax augmente avec W et ensuite sature à partir d'une épaisseur  $W=2\mu\text{m}$  et atteint une valeur égale à environ  $28\text{mW}/\text{cm}^2$ .



**Figure3.7.** Effet de W sur la puissance maximal Pmax

#### f. Influence de l'épaisseur $W$ sur le rendement de conversion $\eta$

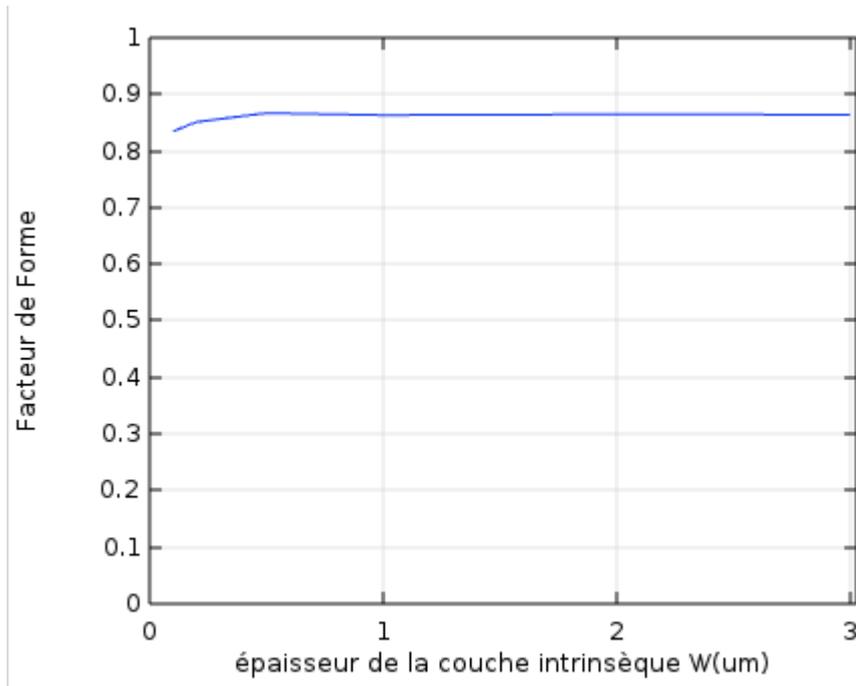
La figure 3.8 montre la variation du rendement  $\eta$  en fonction de  $W$ . On note le même comportement, le rendement augmente lorsque  $W$  augmente et stabilise à une valeur égale à 22%.



**Figure3. 8.** Effet de  $W$  sur le rendement  $\eta$

#### g. Influence de l'épaisseur $W$ sur le facteur de forme $FF$

La figure 3.9 représente la variation du facteur de forme  $FF$  en fonction de  $W$ . Le facteur de forme présente une valeur de l'ordre de 85% ce qui renseigne sur la bonne qualité de la cellule.



**Figure3. 9.** Effet de W sur le facteur de forme FF

### 3.5 Simulation des cellules solaires hétérojonction GaAlAs/GaAs/GaAlAs à jonction PIN

#### 3.5.1 Présentation de la structure

GaAl <sub>x0</sub> As (P)  NA=10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	GaAs (I)  W=2,5μm	GaAl <sub>x0</sub> As (n)  ND=10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
---	-------------------------	---

#### 3.5.2 Présentation des paramètres utilisés dans la simulation de la structure hétérojonction

Le choix des paramètres repose sur des résultats expérimentaux montrés sur le tableau 3.2.

Paramètres	Valeurs	Description
A0	2,15e-5	Constante
c (m/s)	3e8	Vitesse de la lumière
F(m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )		Flux de photons
tau (s)	1e-6	Durée de vie des porteurs
W (μm)	2,5	Epaisseur de la couche intrinsèque
x0	0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4	Concentration d'Aluminium
Eg0(eV)	1,424	Gap du GaAs
Eg(eV)	1,424+1,247.x0	Largeur de gap du GaAlAs
Alpha0(m <sup>-1</sup> )	$\lambda < 1,24/Eg$ 0 $\lambda > 1,24/Eg$	Coefficient d'absorption du GaAs
Alpha(m <sup>-1</sup> )	$\lambda < 1,24/Eg$ 0 $\lambda > 1,24/Eg$	Coefficient d'absorption du GaAlAs
W1 ; W2(μm)	0,05	Epaisseur des couches P et N
G1(m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	F.alpha.exp(-alpha.x)	Taux de génération de la couche GaAlAs P
G2(m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	F.alpha0.exp(-alpha.W1). *exp(-alpha0.(x-W1))	Taux de génération de la couche intrinsèque GaAs
G3(m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	F.alpha.exp(-alpha.W1). *exp(-alpha0.W).exp(-alpha.(x-W1-W))	Taux de génération de la couche GaAlAs N

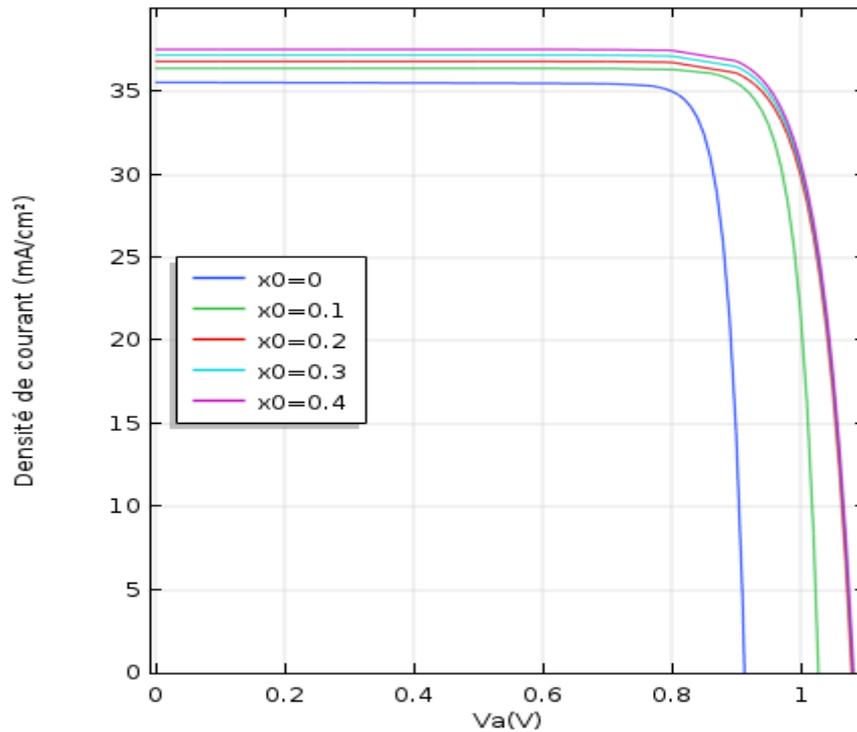
**Tableau 3.2.** Paramètres physiques utilisés comme données pour la simulation

### 3.5.3 Résultats de la simulation à l'aide de COMSOL

#### a. Caractéristiques courant-tension J(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN :

La figure 3.10 représente la variation de la densité de courant J(mA/cm<sup>2</sup>) en fonction de la tension Va pour plusieurs valeurs de la concentration d'aluminium x0. On constate que

le courant de court-circuit augmente légèrement et la tension de circuit ouvert augmente ensuite elle sature pour  $x_0=0.2$ . L'augmentation du courant  $J_{cc}$  est due aux barrières de potentiel aux interfaces GaAs/GaAlAs qui préviennent la diffusion des porteurs minoritaires et l'augmentation de  $V_{co}$  est due à l'augmentation du gap de GaAlAs avec  $x_0$ .

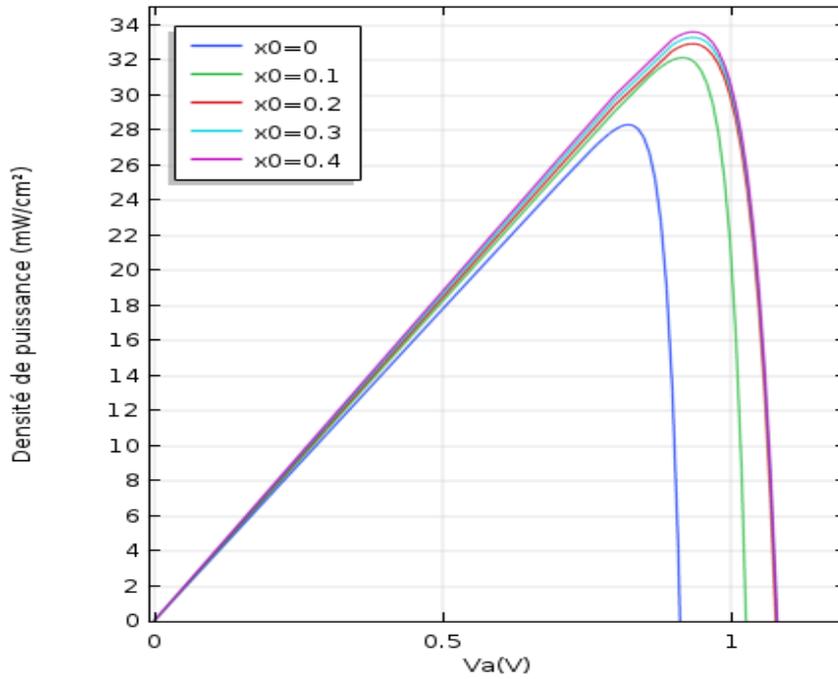


**Figure3.10.**Caractéristiques J(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'aluminium  $x_0$

**b. Caractéristiques Puissance-tension P(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN**

Sur la figure 3.11 sont représentées les variations de la puissance en fonction de la tension  $V_a$ , pour différentes valeurs de la concentration d'Al ( $x_0$ ), d'une structure PIN en GaAlAs. Ces courbes présentent des maximums  $P_{max}$ . On constate que la puissance maximale  $P_{max}$  augmente lorsque  $x_0$  augmente et ensuite elle sature.

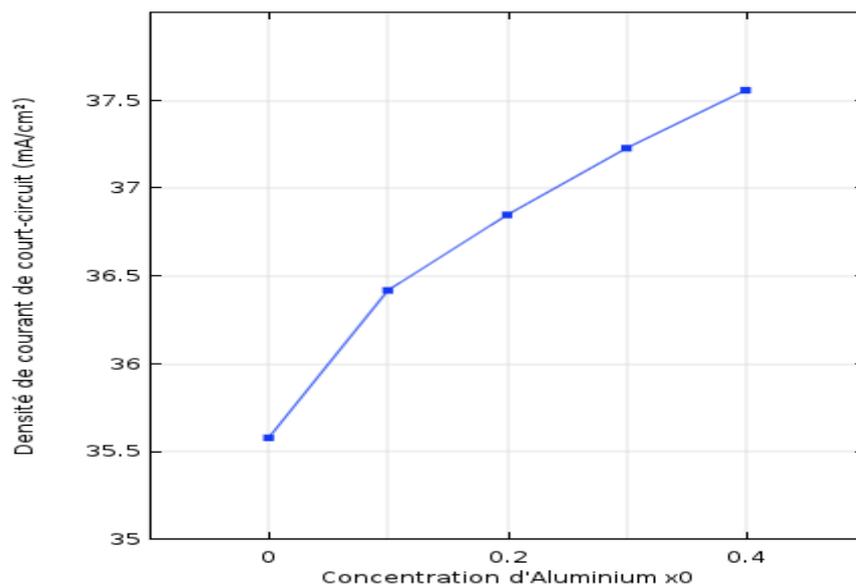
L'augmentation de  $P_{max}$  peut être expliquée par l'augmentation de la tension  $V_{co}$  et du courant  $J_{cc}$  ( $P_{max}=V_{co}.J_{cc}.FF$ ).



**Figure 3.11.** Caractéristiques P(V) de la CS hétérojonction à jonction PIN pour plusieurs valeurs de la concentration d'aluminium  $x_0$

**c. Influence de la concentration d'Al ( $x_0$ ) sur le courant de court de circuit  $J_{cc}$**

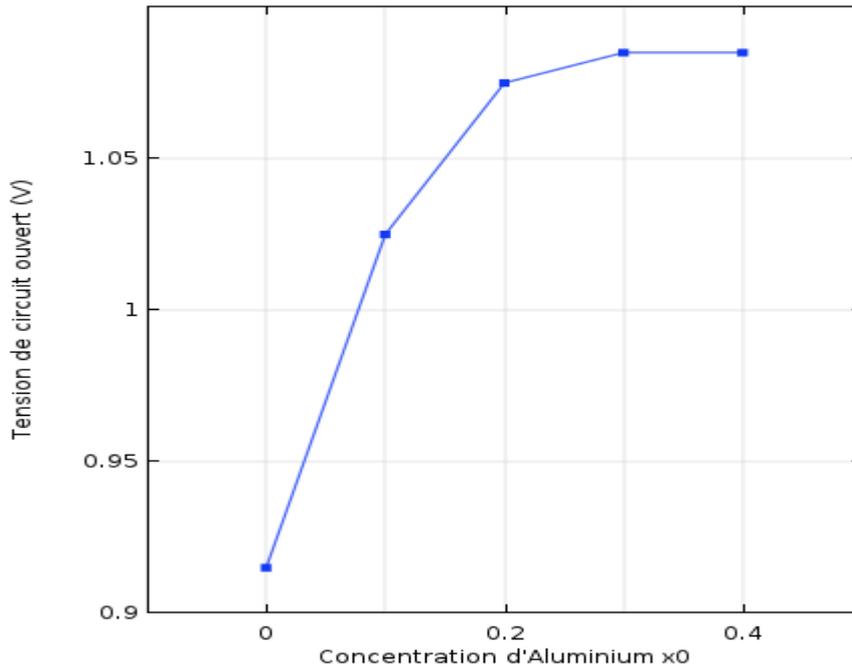
La figure 3.12 présente la variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration d'aluminium  $x_0$ . On constate qu'en augmentant la concentration  $x_0$  le courant  $J_{cc}$  augmente de 35,57 à 37,55 mA/cm<sup>2</sup>.



**Figure 3.12.** Effet de  $x_0$  sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$

#### d. Influence de la concentration d'Al ( $x_0$ ) sur la tension de circuit ouvert

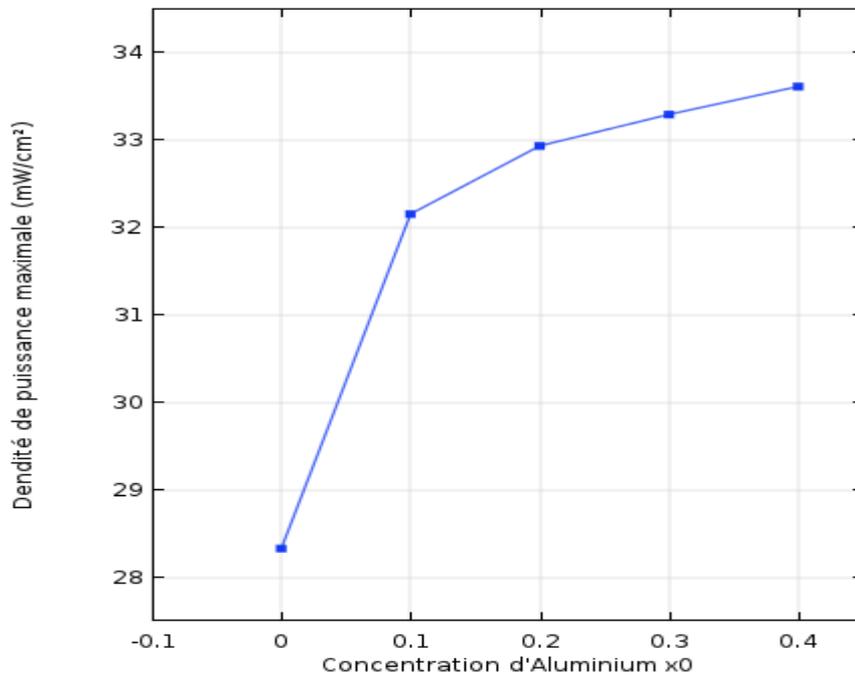
La figure 3.13 illustre la variation de la tension  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'Al ( $x_0$ ). On remarque une augmentation de  $V_{co}$  avec  $x_0$  qui stabilise à une valeur de l'ordre de 1,08V.



**Figure 3.13.** Effet de  $x_0$  sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$

#### e. Influence de la concentration d'Al ( $x_0$ ) sur la puissance maximale $P_{max}$

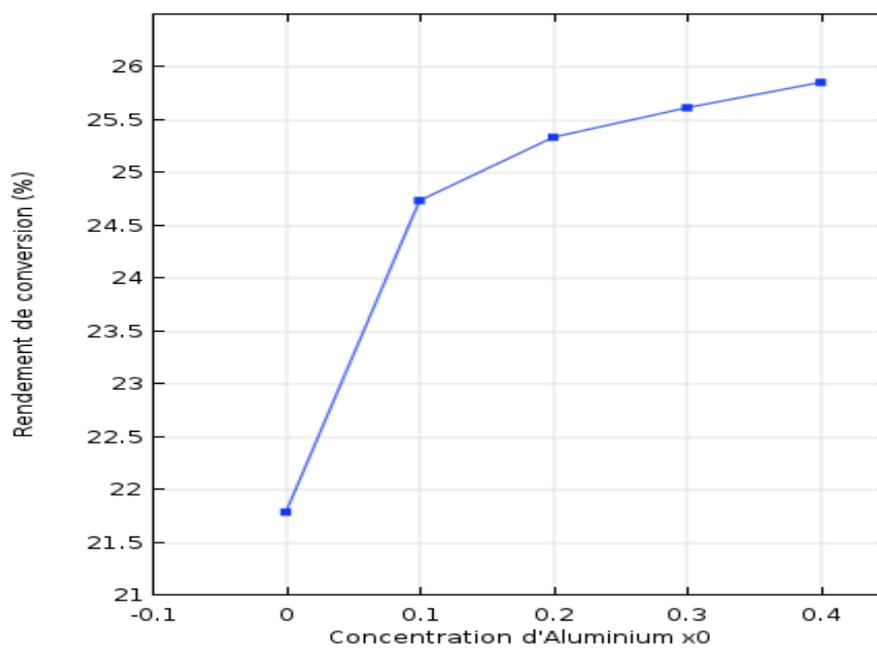
La figure 3.14 montre la variation de la puissance maximale en fonction de la concentration d'Al ( $x_0$ ). On constate qu'en augmentant la concentration  $x_0$ , la puissance  $P_{max}$  augmente à cause de l'augmentation du courant  $J_{cc}$  et la tension  $V_{co}$ .  $P_{max}$  varie de 28,2 à 33,6mW/cm<sup>2</sup>.



**Figure3.14.** Effet de  $x_0$  sur la puissance maximale  $P_{max}$

**f. Influence de la concentration d'Al ( $x_0$ ) sur le rendement de conversion**

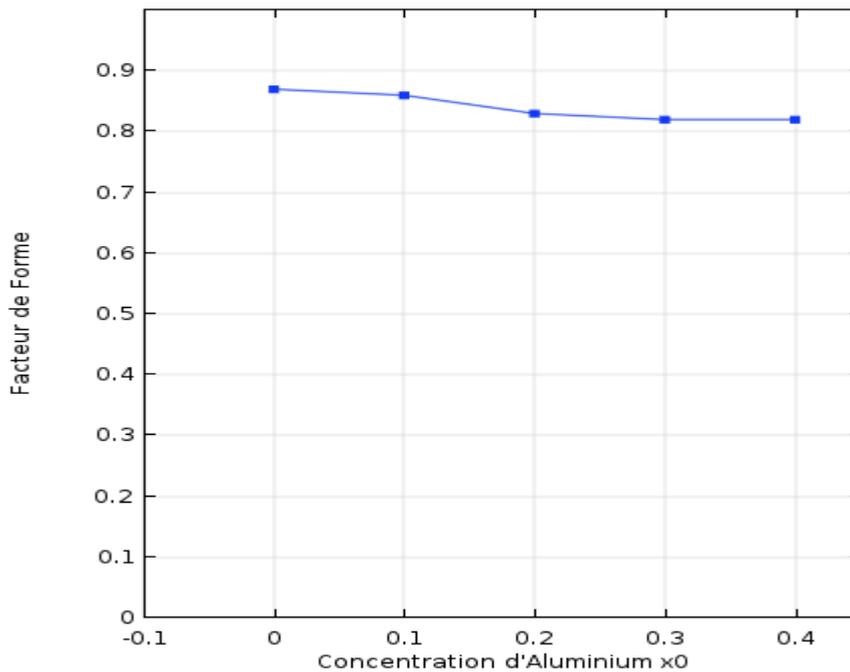
La figure 3.15 montre la variation du rendement en fonction de  $x_0$ . On note le même comportement que pour  $P_{max}$ . Le rendement augmente de 21,75% à environ 26% lorsque  $x_0$  varie de 0 à 0,4.



**Figure3. 15.** Effet de  $x_0$  sur le rendement de conversion

### g. Influence de la concentration d'Al ( $x_0$ ) sur le facteur de forme FF

La figure 3.16 présente la variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'Al ( $x_0$ ). Le facteur de forme présente des valeurs comprises entre 0,82 et 0,88 ce qui indique la bonne qualité de la cellule.



**Figure3. 16.** Effet de  $x_0$  sur le facteur de forme FF

### 3.6 Comparaison entre les deux cellules solaires

Cellules Solaires	Cellule homojonction	Cellule hétérojonction
Caractéristiques		
Jcc(mA/cm <sup>2</sup> )	35	35,57-37,55
Vco(V)	0.93	0.91 - 1,08
Pmax(mW/cm <sup>2</sup> )	28	28,2 - 33,6
$\eta$ (%)	22%	21,75% - 26%
FF	0,85	0,82 - 0,88

**Tableau 3.3.** Différentes valeurs optimales des caractéristiques pour les deux cellules

Les différentes valeurs optimales des caractéristiques pour les deux cellules homojonction et hétérojonction, résultats de nos simulations, sont regroupées dans le tableau 3.3.

A partir de ce tableau, on observe que les caractéristiques de la cellule hétérojonction sont meilleures que celles de la cellule homojonction et on prévoit un rendement maximum de 26% pour la cellule PIN à hétérojonction GaAs/GaAl<sub>0,4</sub>As.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude des performances des cellules solaires homojonction et hétérojonction à jonction PIN par des simulations numériques. Les résultats de simulation ont clairement montré que l'épaisseur de la zone intrinsèque et la concentration d'aluminium jouent un rôle important dans les performances de la cellule.

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure sont : La valeur optimale de l'épaisseur de la zone intrinsèque est  $W=2,5\mu\text{m}$  et la concentration d'Al optimale est  $x_0=0,4$ .

Un rendement maximum de l'ordre de 26% peut être atteint pour une structure PIN hétérojonction GaAs/GaAl<sub>0,4</sub>As.

## Conclusion générale

---

Ce modeste travail porte principalement sur l'étude et la simulation d'une cellule solaire homojonction et cellule solaire hétérojonction à jonction PIN à base de GaAl<sub>x0</sub>As, afin d'absorber le maximum du rayonnement solaire et de délivrer aussi un maximum d'énergie électrique en optimisant la meilleure structure d'une cellule solaire.

Dans ce mémoire, nous avons élargi nos connaissances concernant l'énergie solaire photovoltaïque, qui représente une source d'énergie renouvelable capable de produire

l'électricité en grande quantités et en long terme. L'élément de base de la conversion photovoltaïque est la cellule, qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par le soleil ;De ce fait, une étude était focalisée sur les cellules solaires homojonction et hétérojonction à base d'une jonction PIN en matériau  $\text{GaAl}_{x_0}\text{As}$ .

Afin de montrer les performances de la cellule, une simulation était faite par le logiciel COMSOL, qui étudie le fonctionnement des cellules solaires. Nous avons basé sur l'importance de l'épaisseur de la zone intrinsèque et la concentration d'aluminium. On a constaté que la cellule solaire hétérojonction est d'un rendement meilleur que celle de l'homojonction. Avec des performances optimales: La valeur optimale de l'épaisseur de la zone intrinsèque est  $W=2,5\mu\text{m}$  et la concentration d'Al optimale est  $x_0=0,4$ .

Un rendement maximum de l'ordre de 26% peut être atteint.

---

## Bibliographie

[1] M. Angel Cid Pastor: conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, thèse de doctorat de l'institut national des sciences Appliquées de Toulouse; septembre 2006.

[2] [uqam.ca-pascal.sca.uqam.ca/~sca5002/Présentation](http://uqam.ca-pascal.sca.uqam.ca/~sca5002/Présentation).

- [3] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables", (version 45), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 23, 1–9 (2015).
- [4] Ed. Becquerel, C.R. Acad. Sci., 9 (1839) 561.
- [5] D. Said, Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP)", Mémoire magistère, Université El- Hadj Lakhder-Batna. 2011.
- [6] M. Labidi, Thèse Doctorat, Univ Badji Mokhtar Annaba (2011)
- [7] P. Jayarama Reddy «Science and technology of photovoltaics», BS publications, Second edition. CRC Press, 2010.
- [8] A. Haug , " Auger recombination in direct-gap semiconductors: band-structure effects ", J. Phys. C: Solid State Phys. 16 4159. 1983, DOI:10.1088/0022-3719/16/21/017
- [9] Etude des Cellules Photovoltaïque, Olympiades de la Physique 2004
- [10] M. Wang, "High Efficiency Single-and Polycrystalline Silicon Solar Cells Using ACJ-HIT Structure», Springer, USA, 2014.

## Chapitre 2:

- [1] W. Shockley .US Patent 2, 569, 347, 1 951
- [2] A. Martin Green, " Photovoltaic principles. Physica" E, 2002, Vol.14, pp.11-17
- [3] Yacine MAROUF, " Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco", Mémoire de Magister, Université de Biskra, 27/06/2013
- [4] José Miguel Navarro, "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible", Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 23 octobre 2008
- [5] «Composants Semi-Conducteurs De Puissance», DUT GEii1–2ème année Module MC-ET2, Université Joseph Fourier.
- [6] Henry Mathieu Hervé Fanet, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», 6ème édition Dunod.
- [7] Benloucif Nisrine, «Potentialités de films de silicium poly cristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches», Doctorat en Sciences En Electronique, Option : Semi-conducteurs et systèmes électroniques, Université des frères Mentouri Constantine
- [8] S. Alaa, Caractérisation en impulsions étroites et modélisation de transistors bipolaires à hétérojonction en technologie InP", thèse docteur, université de Limoges. 2009

[9] A .Hamroun, Transistor bipolaire a hétérojonction (HBT) AlGaN/GaN : Modélisation et simulation des performances ', Mémoire magistère, Université aboubekr belkaid-Telemcen.2011

[10] Les défis du CEA Février 2019 N°234 Aurélien Boudault (infographie) et Aude Ganier, en collaboration avec Pierre-Jean Ribeyron, responsable stratégie au CEA-Liten

[11] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 4ème édition, Masson, Paris 1998.

[12] C. H. Henry, " Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells ", J. Appl. Phys, Vol. 51, N°.8, pp. 4494-44500, 1980.

[13] A. R. Jha, " Solar cell Technology and applications ", Taylor & Francis Group, p.26, 2010, ISBN 978-1-4200-8177-0,