

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Université Saad DAHLAB Blida 01  
Faculté de technologie Département des énergies renouvelables

Option: conversion photovoltaïque



**Mémoire présenté pour l'obtention du  
diplôme Master en Énergies Renouvelables**

**Thème:**

**ÉTUDE DE L'EFFICACITE DES CELULES SOLAIRES A  
HETEROJONCTIONS EN PRESENCE DES IRRADIATIONS  
A ELECTRONS.**

**Présenté par:**

**CHETOUI Mohamed**

**BARR Billal**

Soutenu devant le jury composé par:

Mr. DOUMAZ Toufik	MAA	USDB	Président
Dr.BEDIAAsma	MCA	USDB	Examineur
Dr.BENAHMEDAbdelmoune	MCB	USDB	Examineur
Dr.MAZOUZHalima	MCA	USDB	Encadrante

**Juillet2022**

## ملخص

تلعب الخلايا الشمسية القائمة على عناصر III-V دورًا مهمًا في التطبيقات الفضائية والأرضية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إجراء محاكاة عددية لثلاثة هياكل مختلفة غير متجانسة تعتمد على GaAs من أجل تحسينها واختيار الهيكل الأكثر كفاءة والأكثر مقاومة للإشعاعات الإلكترونية MeV1. تظهر نتائج التحسين التي تم الحصول عليها أن كل هيكل يحتوي على نسبة عالية - معلمات الأداء فيما يتعلق بطبيعة طبقات النافذة. بينما تلعب إضافة طبقات مختلفة من AZO و ITO دورًا مهمًا للغاية في مقاومة هذه الهياكل لتشعيع الإلكترون MeV1. استخدام ZnO ، AZO كطبقة نافذة يحسن أداء الخلايا الشمسية في بيئة الفضاء.

الكلمات الرئيسية: غير المتجانسة ، GaAs ، GaInP ، التشعيع ، MeV1 ، الإلكترون ، الخلية الشمسية.

## Résumé :

Les cellules solaires à base d'éléments III-V jouent un rôle important dans les applications spatiale et terrestre. Le but principal de ce travail est de faire une simulation numérique de trois différentes structures à hétérojonction à base de GaAs afin de les optimiser et choisir la structure la plus performante et la plus résistante aux irradiations à électrons de 1MeV. Les résultats d'optimisations obtenus montrent que chaque structure présente des paramètres performants vis-à-vis la nature des couches fenêtres. Tandis que l'ajout des différentes couches d'AZO et ITO jouent un rôle très important à la résistivité de ces structures aux irradiations à électrons de 1MeV. L'utilisation d'AZO, ZnO comme couche fenêtre améliore les performances des cellules solaires au milieu spatial.

**Mots clés :** hétérojonction, GaAs, GaInP, irradiations, 1MeV, électron, cellule solaire.

## Abstract:

Solar cells based on III-V elements play an important role in space and terrestrial applications. The main goal of this work is to make a numerical simulation of three different heterojunction structures based on GaAs in order to optimize them and choose the most efficient structure and the most resistant to 1MeV electron irradiations. The optimization results obtained show that each structure has high-performance parameters with respect to the nature of the window layers. While the addition of the different layers of AZO and ITO plays a very important role in the resistivity of these structures to 1MeV electron irradiations. The use of AZO, ZnO as a window layer improves the performance of solar cells in the space environment.

**Keywords:** heterojunction, GaAs, GaInP, irradiations, 1MeV, electron, solar cell.

## ***Remerciements***

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon **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 promotrice **Dr. MAZOUZ Halima**, Maitre de conférences « A » à l'université de SAAD DAHLAB Blida 1, pour sa patience, sa disponibilité, surtout ses judicieux conseils, son suivi et pour toutes les informations qu'elle nous a prodigué tout au long de la période du travail malgré les obstacles afin de mener ce travail à bon port.

Nos vifs remerciements vont à **Mr. DOUMAZ Toufik**, pour avoir fait l'honneur de présider le juré de soutenance du présent mémoire.

Nous remercions vivement **Dr. BEDIA Asma** et **Dr. BENAHMED Abdelmoumene**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant au jury en qualité d'examineurs.

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de Près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail en premier à mes parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*A mes frères, mes sœurs, épouse de mon frère et ma nièce.*

*A tous mes enseignants du département des énergies renouvelables.*

*A tous mes camarades et mes amis en particulier Anis, Yacine, Sarah, Sabrina, Lydia et surtout mon binôme Mohamed.*

*A mes collègues du Master 2 EnR Conversion Photovoltaïque sans exception.*

***Billal BARR***

*Je dédie ce modeste travail en premier à mes parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*A mon frère et à toute ma famille.*

*A tous mes enseignants du département des énergies renouvelables.*

*A tous mes camarades et mes amis en particulier Yasmine, Sahbi, Yacine, Sarah, Sabrina, Nadjat et surtout mon binôme Billal*

*A mes collègues du Master 2 EnR Conversion Photovoltaïque sans exception.*

***Mohamed CHETOUI***

# SOMMAIRE

---

Résumé	I
Remerciements	II
Dédicace	III
Sommaire	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Nomenclature-Symboles-Acronymes	X
Introduction Générale	1

## Chapitre I : Cellules Solaires à Hétérojonctions.

I.1	Introduction.	5
I.2	Matériaux III-V pour hétérojonction.	5
I.2.1	L'Arséniure de Gallium (GaAs).	5
I.2.2	Le phosphure de gallium et d'indium(GaInP).	6
I.3	Hétérojonction.	7
I.3.1	Avantages et Inconvénients des hétérojonctions.	8
I.3.1.1	Avantages.	
I.3.1.2	Inconvénients.	8
I.4	Composition d'une cellule solaire à hétérojonction.	9
I.4.1	Les oxydes transparents (TCO).	9
I.4.2	La couche fenêtre.	10
I.4.3	La couche tampon.	10
I.4.4	Les couches absorbantes.	10
I.4.5	La couche BSF.	11
I.4.6	Contacts face avant et arrière.	11
I.5	Fonctionnements des cellules solaires à hétérojonction.	11
I.6	Bandes d'énergies d'une structure à hétérojonctions.	13
I.7	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction.	13
I.7.1	Résistance série $R_s$ .	14
I.7.2	Résistance parallèle (shunt) $R_{sh}$ .	14
I.8	Paramètres externes d'une cellule solaire.	15
I.8.1	Courants de court-circuit $I_{cc}$ .	15
I.8.2	Tension a circuit ouvert $V_{co}$ .	15

## SOMMAIRE

---

I.8.3	Facteur de forme FF.	15
I.8.4	Rendements de conversion.	15
I.8.5	Réponses spectrales $R_s$ .	16
I.8.6	Rendement quantique externe EQE (%).	16
I.8.7	Rendement quantique interne EQI (%).	16
I.9	Exemple de cellules solaires à hétérojonctions.	16
I.9.1	Expérimentales : L'épitaxie en phase vapeur (HVPE).	16
I.9.2	Exemple de cellule solaire à hétérojonction simulée à base de GaAs.	18
I.10	Conclusion.	19

### **Chapitre II : Les Défauts dans l'Arsenic du Gallium**

II.1	Introduction.	21
II.2	Origines des particules radiatives dans l'espace.	21
II.2.1	Irradiation à protons.	23
II.2.1	Irradiation à électrons.	23
II.3	Effets des électrons et/ou protons sur les cellules solaires.	23
II.3.1	Défauts profonds.	23
II.3.2	Rayonnement de freinage.	24
II.3.3	Défauts de déplacement.	24
II.3.4	Recombinaison assistée par pièges $R_{SRH}$ .	25
II.3.4	Effet de Compensation.	26
II.3.5	Effet tunnel.	26
II.4	Injection des défauts dans la cellule optimisée.	27
II.5	Conclusion.	27

### **Chapitre III : Simulation Numérique des Cellules Solaires à Base de GaAs**

III.1	Introduction.	29
III.2	Les équations de base dans les SCs.	29
III.2.1	Equation de poisson.	29
III.2.2	Equation de continuité.	29
III.2.3	Equations de transport.	30
III.2.3.1	Courant de conduction.	30
III.2.3.2	Courant de diffusion.	30

## SOMMAIRE

---

III.2.3.3	Courant total dans le semi-conducteur.	31
III.2.4	Les mobilités des porteurs de charges.	31
III.3	Absorption dans le semi-conducteur.	32
III.4	Présentation des structures simulées.	33
III.5	Simulation numérique des différentes cellules solaires.	34
III.5.1	Outils de simulation.	34
III.5.2	Méthodes de calcul numérique.	36
III.5.2.1	Méthode de Newton.	36
III.5.2.2	Méthode des différences finies.	36
III.5.3	Etapas de simulation.	36
III.5.3.1	Paramètres d'entrés.	36
III.5.3.2	Choix de flux.	37
III.5.3.3	Caractéristique I-V et paramètres externes.	37
III.5.4	Schématisation de la structure GaAs / GaInP.	38
III.6	Conclusion.	39

## Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1	Introduction.	41
IV.2	Simulations numériques des trois structures.	41
III.3	Optimisation des cellules solaires.	43
III.3.1	Optimisation de la structure B.	43
III.3.2	Optimisation de la structure C.	45
III.3.2.1	La couche transparente ZnO.	45
III.3.2.2	La couche transparente AZO.	46
III.3.2.3	La couche p-GaInP-BSF.	47
III.3.3	Récapitulatif.	48
IV.4	Effet des irradiations à électrons.	49
IV.4.1	Effet des irradiations sur la Structure B.	49
IV.4.2	Effet des irradiations sur la Structure C.	50
IV.5	Conclusion.	51
	Conclusion générale.	53
	Annexes.	56
	Références.	62



## LISTE DES FIGURES

---

### Liste des figures :

Figure (I.1)	Cristal de GaAs.	5
Figure (I.2)	Structure cristalline zinc blende GaAs.	5
Figure (I.3)	Structure cristalline du $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ .	7
Figure (I.4)	Spectre d'absorption des différentes couches de l'hétérojonction.	8
Figure (I.5)	Structure standard d'une cellule solaire a hétérojonction en couche minces.	9
Figure (I.6)	Principe de fonctionnement des cellules solaires à hétérojonction.	12
Figure (I.7)	Structure de bandes typique d'une cellule à hétérojonction.	13
Figure (I.8)	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction.	13
Figure (I.9)	Différentes résistances séries dans une cellule solaire à hétérojonction.	14
Figure (I.10)	Procédé épitaxie en phase vapeur à l'hydrure (HVPE).	17
Figure (I.11)	Structure en couches minces à base de GaAs et GaInP.	17
Figure (I.12)	Résultats graphique obtenus après la réalisation de la cellule GaAs et GaInP.	18
Figure (I.13)	Modèles d'une cellule solaire à base de n-ZnSe/p-GaAs/p+-AlAs <sub>0.9</sub> Sb <sub>0.1</sub> .	19
Figure (I.14)	Résultat de la simulation d'une cellule solaire n-ZnSe/p-GaAs/p+-AlAs <sub>0.9</sub> Sb <sub>0.1</sub> en fonction de a l'épaisseur, b. la concentration des dopants, c.densités des défauts.	19
Figure (II.1)	Les particules reçues par les satellites orbitant autour de la terre.	21
Figure (II.2)	Ceinture de protons, courbes d'iso- flux de protons d'énergie > 10 MeV dans le plan de l'axe géomagnétique.	22
Figure (II.3)	Ceinture d'électrons, courbes d'iso-flux d'électrons d'énergie > 1 MeV.	22
Figure (II.4)	Schéma illustrant l'émission et la capture d'électrons et de trous.	24
Figure (II.5)	Déplacement d'un atome par une particule incidente.	25
Figure (II.6)	Description schématique des types de défauts induits par irradiations et leurs impacts sur les propriétés électriques des semi-conducteurs.	26

## LISTE DES FIGURES

---

Figure (III.1)	Variation de coefficient d'absorption GaInP en fonction de la longueur d'onde.	32
Figure (III.2)	Variation de coefficient d'absorption GaAs en fonction de la longueur d'onde.	32
Figure (III.3)	Variation de coefficient d'absorption d'a-Si-H en fonction de la longueur d'onde..	32
Figure (III.4)	Variation de coefficient d'absorption d'ITO en fonction de la longueur d'onde.	32
Figure (III.5)	Variation de coefficient d'absorption d'AZO en fonction de la longueur d'onde.	33
Figure (III.6)	Les structures simulées.	33
Figure (III.7)	Interface du logiciel.	35
Figure (III.8)	Organigramme de fonctionnement de Scaps-1D.	35
Figure (III.9)	La section 'point de travail'.	36
Figure (III.10)	Choix des conditions luminances de la simulation.	37
Figure (III.11)	Section 'Action'.	37
Figure (III.12)	Schématisation des différentes couches d'une cellule.	38
Figure (III.13)	Les données d'entrés pour chaque couche.	38
Figure (IV.1)	Caractéristiques I(V) de nos trois structures.	41
Figure (IV.2)	La réponse spectrale en fonction des longueurs d'ondes des trois structures A, B et C.	43
Figure (IV.3)	Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur de ITO.	44
Figure (IV.4)	Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur d'AZO.	45
Figure (IV.5)	Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur de ZnO.	46
Figure (IV.6)	Variations des paramètres externes en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre p-GaInP-BSF.	48
Figure (IV.7)	Variations des paramètres externes de la structure B avec et sans irradiations.	49
Figure (IV.8)	Variations des paramètres externes de la structure C avec et sans irradiations.	50

## LISTE DES TABLEAUX

---

### Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Paramètres de base du GaAs.	6
Tableau (I.2)	Paramètres de base du $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P} / \text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ .	6
Tableau (II.1)	Paramètres des défauts injectés dans la cellule à base de GaAs.	27
Tableau (III.1)	paramètres d'entrés de la structure A, B, C.	34
Tableau (IV.1)	Les paramètres externes de nos structures et celles de référence.	42
Tableau (IV.2)	Les paramètres externes de la structure B en fonction de l'épaisseur de la Couche fenêtre ITO.	44
Tableau (IV.3)	Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.	45
Tableau (IV.4)	Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre AZO.	46
Tableau (IV.5)	Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche Fenêtre p-GaInP-BSF.	47
Tableau (IV.6)	Récapitulatif des paramètres externes de la structure C optimisée.	48
Tableau (IV.7)	Récapitulatif des paramètres externes de la structure B sans et avec irradiations.	49
Tableau (IV.8)	Récapitulatif des paramètres externes de la structure C sans et avec irradiations.	50

### Nomenclature- Symboles-Acronymes

AlGaInP	Aluminium phosphore de Galium et d'Indium
a-Si	Couche en silicium amorphe
a-Si-H	Couche en silicium amorphe hydrogéné
BC	Bande de conduction
BV	bande de valence
BSF	Back surface field
c	Vitesse de la lumière
CFC	Cubique face centré
CIGS	Cuivre, indium, gallium et sélénium
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur
$D_n$	Coefficient de diffusion des électrons
$E_{ph}$	Energie de photon
$E_g$	Energie de bande interdite
$E_c$	Energie de bande de conduction
$E_v$	Energie de bande de valence
$E_F$	Niveau de Fermi
eV	Electron volt
EPL	L'épitaxie en phase liquide
FF	Facteur de forme
GaInP	Phosphore de Galium et d'Indium
GaAs	Arseniure de Galium
$G_n$	Le taux de génération optique des électrons
$G_p$	Le taux de génération optique des trous
h	Constante de Planck
HVPE	L'épitaxie en phase vapeur à l'hydrure
$I_{ph}$	Le courant photo généré
$I_0$	Le courant de saturation de la diode
$I_{cc}$	Le courant de court-circuit
$I_0$	Courant de saturation.
$I_m$	Courant maximal
ITO	Oxyde indium dopé d'étain
J	Jonction

## Nomenclature- Symboles-Acronymes

---

Jcc	Densité de courant à court circuit
$k_B$	La constante de Boltzmann
LED	Diode électroluminescente
MOVPE	L'épitaxie en phase vapeur métallo-organique
MBE	Epitaxie par jets moléculaires
$m_c$	Masse effective dans la bande de conduction
$m_v$	Masse effective dans la bande de valence
N	Zone n
$N_d$	Dopage type n
$N_p$	Dopage type p
$N_c$	Densité d'état effective dans la bande de conduction
$N_v$	Densité d'état effective dans la bande de valence.
Ph	Photon
P	Zone p
P+	Zone fortement dopé de type p
$P_m$	Puissance maximal
$P_{inc}$	Puissance incidente
$P_g(\lambda)$	L'éclairement monochromatique global
PVD	Dépôt physique en phase vapeur
q	La charge de l'électron
RS	Réponse spectrale
$R_S$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance parallèle
$R_n$	Le taux de recombinaisons pour les électrons et les trous
$R_p$	Le taux de recombinaisons pour les trous
S	La vitesse de recombinaison aux interfaces
SC	Semi-conducteur
$S_E$	Surface effective
$S_B$	La vitesse de recombinaison pour la surface de la face arrière au contact ohmique.
T	La température en Kelvin
$T_{eff}$	Température effective de la cellule
TCO	Oxyde transparent conducteur
$T_a$	La température absolue.

## Nomenclature- Symboles-Acronymes

---

$T_f$	Température de fusion.
$V_m$	La tension au point de puissance maximale
$V_m$	Tension maximal
$V_{co}$	La tension de circuit ouvert
$V_{thn}$	La vitesse thermique des électrons
$V_{thp}$	La vitesse thermique des trous
$W$	L'épaisseur des différentes couches
$X$	Facteur de concentration
$ZnO$	Oxyde de zinc
$ZCE$	La zone de charge d'espace.
$\eta$	Rendement
$\nu$	La fréquence.
$\lambda$	Longueur d'onde
$\tau$	Durée de vie des porteurs..
$\mu_n$	La mobilité électronique des électrons
$\mu_p$	La mobilité électronique des trous
$\epsilon_0$	La permittivité électrique du vide
$\epsilon_r$	La permittivité relative du matériau
$\epsilon$	Constante diélectrique.
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$\chi_e$	Affinité d'électron



# Introduction Générale

---

L'énergie à toujours était un débat mondial depuis des années, du fait de la pollution grandissante et de l'expansion des technologies et des marchés économiques, ce qui en résulte une consommation de plus en plus élevée. Néanmoins, jusqu'ici les sources d'énergies que l'on emploie le plus régulièrement nous paraissaient infinies, inépuisables, et sans conséquences environnementales. Heureusement, depuis une dizaine d'années, ces idées sont remises en cause et même révolues. Aujourd'hui, un intérêt grandissant est porté aux ressources énergétiques renouvelables. Parmi ces ressources, la lumière du soleil et sa conversion en électricité par effet photovoltaïque. C'est l'une des voies énergétiques les plus séduisantes pour la production de l'énergie, tant dans son principe que pour d'autres raisons telles que son immensité et disponibilité.

Les orientations actuelles des recherches et développements dans le domaine du photovoltaïque sont basées sur deux axes :

-Le premier consiste à développer de nouveaux procédés moins coûteux d'élaboration des matériaux utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques et de réduire les épaisseurs et d'améliorer les cellules solaires.

-Le second axe est orienté vers l'utilisation en couches minces de nouveaux semi-conducteurs, tels que les multi-jonctions et les hétérojonctions, mais également la recherche de nouveaux matériaux ultras performants (rendement).

Les matériaux candidats potentiels pour les structures à hétérojonctions sont les matériaux III-V comme le GaAs, GaInP. En effet, les cellules solaires à hétérojonctions à base de GaAs, sont de plus en plus réalisées en raison de leurs hauts rendements supérieurs à 25% explicables en raison de l'élargissement du spectre d'absorption solaire et les propriétés intrinsèques du GaAs.

Des combinaisons de GaAs avec du GaInP comme couche fenêtre ou bien du ZnO accentue les performances des cellules à hétérojonctions et les rendent plus utilisables dans de nouveaux secteurs tels que les applications spatiales. L'utilisation de ce type de cellules solaires dans l'espace est de plus en plus fréquent en raison de leur légèreté, leur faible volume, leur résistivité thermique et leur résistantes aux particules radiatives.

Cela dit d'autres avantages sont à noter, les dispositifs spatiales sont constamment exposés aux irradiations spatiales tel que les irradiations à protons et à électrons. Ces cellules ont la réputation d'être résistantes aux défauts générés par ses irradiations.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Ce travail consiste à une optimisation des différentes structures des cellules solaires en hétérojonctions à base de GaAs, GaInP et ainsi que d'autres matériaux. Cette optimisation est suivie d'une étude détaillée de la résistivité des différentes structures optimisées aux irradiations à électrons de 1MeV.

Ce modeste travail est subdivisé en 4 chapitres :

Le premier chapitre est une présentation des matériaux semi-conducteurs : le GaAs et le GaInP, pour la mise en place des cellules solaires à hétérojonctions, suivi d'une présentation de ce type de cellules solaires et leurs principes de fonctionnement.

Le second chapitre est un aperçu général sur les irradiations dans l'espace, leurs origines et le type d'irradiations tels que les irradiations à électrons et à protons, nous avons également exposé leurs effets sur les cellules solaires.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique des cellules solaires de différentes structures hétérojonctions à l'aide du logiciel SCAPS-1D, et cela après la présentation des propriétés électriques et optiques des semi-conducteurs choisis ainsi que les phénomènes occurrents dans les cellules solaires.

Le quatrième et dernier chapitre de ce travail est une présentation des résultats obtenus ainsi que les discussions de ses résultats.

Finalement, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

# **Chapitre I**

---

## **Cellules Solaires à Hétérojonctions.**

---

## I.1 Introduction :

Le secteur de la conversion photovoltaïque connaît une ascension fulgurante, outre la découverte de nouveaux matériaux plus optimaux, la quête des performances les plus élevées demeure la principale priorité des scientifiques, surtout dans le domaine spatiale où l'obtention des paramètres externes des cellules idéales sont cruciales.

Les cellules solaires à base de matériaux III-V sont largement utilisés, plus particulièrement les cellules solaires à base d'Arséniure de Gallium avec du phosphore de gallium et d'indium comme couche fenêtre, et ce grâce à leurs rendements élevés et leurs faibles dégradations face aux irradiations dans l'espace [1].

Dans ce chapitre, on va faire une présentation des cellules solaires à base de GaAs et GaInP ainsi que leurs technologies d'élaborations. Ensuite nous allons introduire la notion de l'hétérojonction et les filières des couches minces. En guise de clôture, nous allons présenter plusieurs travaux réalisés par certains chercheurs et terminer avec une conclusion.

## I.2 Matériaux III-V pour hétérojonction :

### I.2.1 L'Arséniure de Gallium (GaAs) :

L'Arséniure de Gallium (GaAs) est un matériau semi-conducteur dit binaire utilisé en particulier pour réaliser des composants électroniques et optoélectroniques, tel que les diodes électroluminescentes, les lasers et les cellules photovoltaïques. Le GaAs est un semi-conducteur dit « III-V » car le gallium et l'arsenic sont respectivement dans les colonnes III et V dans le tableau de classification périodique des éléments, et présentent donc 3 et 5 électrons de valence. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires) [2]. Le GaAs est un matériau semi-conducteur à gap direct.



Figure I.1 : Cristal de GaAs [3].

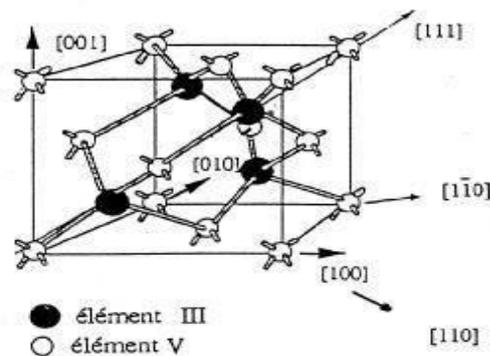


Figure I.2 : Structure cristalline zinc blende GaAs [2].

**Tableau I.1** Paramètres de base du GaAs[4].

Structure en cristal	Zinc blende
Nombre d'atomes dans 1 cm <sup>3</sup>	4.42 · 10 <sup>22</sup>
longueur d'onde électronique de Broglie	240 Å
Densité	5,32 g cm <sup>-3</sup>
Constante diélectrique (statique)	12.9
Constante diélectrique (haute fréquence)	10.89
Masse électronique effective $m_e$	0,063 $m_0$
Masses effectives des trous $m_h$	0,51 $m_0$
Affinité électronique	4,07 eV
Constante de réseau	5.65325 Å
Énergie des phonons optiques	0,035 eV

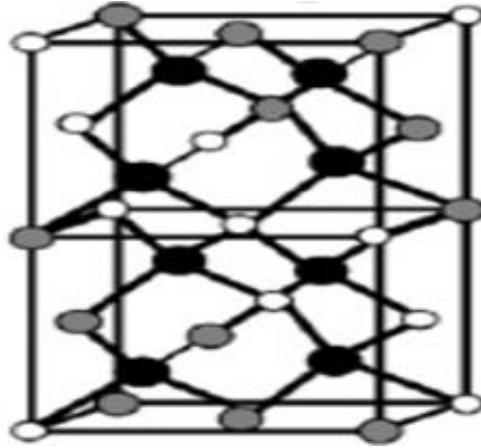
### I.2.2 Le phosphure de gallium et d'indium(GaInP) :

Le phosphure de gallium et d'indium (GaInP) est un semi-conducteur composé d'indium, de gallium et de phosphore. Il est principalement utilisé dans la fabrication des cellules solaires à haut rendement utilisées pour les applications spatiales et en combinaison avec l'aluminium (alliage AlGaInP) pour fabriquer des LED haute luminosité. Certains dispositifs semi-conducteurs tels que Fluor Nano-Crystal qui utilisent GaInP comme particule centrale [5].

**Tableau I.2** Paramètres de base du  $Ga_{0,51}In_{0,49}P / Ga_xIn_{1-x}P$  [6].

	$Ga_{0,51}In_{0,49}P$	$Ga_xIn_{1-x}P$
Structure en cristal	Zinc blende	Zinc blende
Nombre d'atomes dans 1 cm <sup>3</sup>	4.46 · 10 <sup>22</sup>	(3,96+0,98x) · 10 <sup>22</sup>
Densité	4,47 g · cm <sup>-3</sup>	4,81-0,67xg · cm <sup>-3</sup>
Constante diélectrique (statique)	11.8	12,5-1,4x
Constante diélectrique (haute fréquence)	9.35	9,61-0,5x
Densité d'états masse électronique $m_e$	0,088 $m_0$	0,63+ 0,13x (x > 0,74) $m_0$
Masses effectives des trous $m_h$	0,7 $m_0$	0,6 +0,19x $m_0$
Affinité électronique	4.1	4,38-0,58x eV
Constante de réseau	5.653 Å	5.8687-0.4182x Å

La structure cristalline du gallium indium phosphorique est une structure zinc blende représenté dans la figure qui suit :



*Figure I.3 : Structure cristalline du  $Ga_{0.5}In_{0.5}P$  [7].*

### I.3 Hétérojonction :

L'hétérojonction désigne la mise en contact des matériaux semi-conducteurs différents contrairement à l'homojonction qui repose sur un seul matériau. Cette technologie permet en outre d'exploiter efficacement le spectre solaire et d'augmenter le rendement des cellules solaires en mettant en place des matériaux ayant des caractéristiques optimales.

Un design innovant pour des rendements élevés, l'ajout des différentes couches de semi-conducteur, favorise l'attraction des électrons vers les zones de collecte. Ces couches sont elles-mêmes recouvertes d'oxyde transparent conducteur qui permet le transport latéral des électrons et améliore le confinement optique des photons. Les surfaces actives de la cellule sont texturées : des pyramides micrométriques permettent de piéger les photons, qui rebondissent sur leurs faces, pour en capter jusqu'à deux fois plus qu'avec une surface plane [8].

D'autre part, la particularité que présente une hétérojonction pour l'absorption du spectre solaire, est que chaque matériau consécutif de la cellule solaire absorbe une partie de ce spectre.

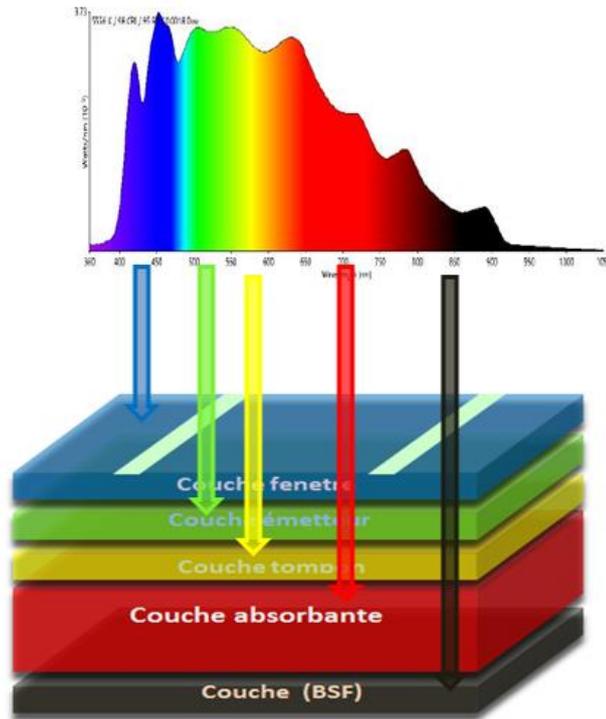


Figure 1.4 Spectre d'absorption des différentes couches de l'hétérojonction [9].

### I.3.1 Avantages et Inconvénients des hétérojonctions :

#### I.3.1.1 Avantages :

- Absorption élevée : les cellules solaires à hétérojonction permettent, grâce à l'utilisation de différents types de semi-conducteurs, une absorption large du spectre lumineux, de ce fait le rendement global des cellules sera optimisé.
- Tenue en température : toutes les cellules solaires voient leur rendement baisser à mesure que la température du dispositif augmente (exposition au Soleil), avec l'hétérojonction, le coefficient thermique des cellules est bien meilleur.
- 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.

#### I.3.1.2 Inconvénients :

Cependant quelques inconvénients sont à noter :

- La rareté : certains éléments chimiques sont faiblement abondants ce qui induit une difficulté pour synthétiser certains alliages.

- La toxicité : l'un des inconvénients de l'hétérojonction c'est la toxicité de certains éléments ce qui suscite une dangerosité de ses matériaux.
- Le prix : le problème majeur des cellules solaires à hétérojonctions est le cout de fabrication, du fait des technologies utiliser pour la conception des cellules solaires à hétérojonctions et les matériaux qui sont difficile à fabriqué, le prix des cellules reste très élevé.

#### I.4 Composition d'une cellule solaire à hétérojonction :

Une structure classique de cellule réalisée dans des matériaux semi-conducteurs III-V est présentée en figure (I.5) Cette cellule se décompose en 5 couches: une couche fenêtre (window layer), couche tampon, l'émetteur et l'absorbeur, et le BSF (Back Surface Field). Ainsi que les contacts avant et arrière.



*Figure I.5 Structure standard d'une cellule solaire a hétérojonction en couche minces.*

##### I.4.1 Les oxydes transparents conducteurs (TCO) :

On site :

- Dioxyde d'étain dopé (Fluor Fluorine-doped tin oxide, SnO<sub>2</sub>: F ou FTO).
- Oxyde d'indium dopé d'étain ou Indium tin oxide (ITO).
- Oxyde de Zinc, parfois dopé à l'Aluminium. Zinc oxide (ZnO).

Ce Sont des matériaux à grand gap (supérieur à 3 eV, transparents conducteurs – d'où le terme « TCO = Transparent Conductive Oxides » afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif. Employés comme substrats dans des nombreuses applications : cellules solaires en couche mince, organiques ou inorganiques, LCD, écrans plats, dispositifs électro-chromes ...

Ils disposent d'une bonne conductivité, pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes [10].

### I.4.2 La couche fenêtre :

La couche fenêtre, (window layer) sert à passiver la face avant de la cellule et de minimiser les recombinaisons près de l'interface absorbeur, et également à conduire le courant à la grille métallique.

Les couches fenêtres doivent également être aussi transparentes que possible afin que la lumière entrante atteigne l'absorbeur. Leur transparence est liée à la valeur de leur gap tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches (écart ou non à la stœchiométrie) et d'un éventuel dopage. Généralement, on dépose une première couche non dopée de ZnO puis une deuxième couche de ZnO dopé Al ou d'ITO. La couche ZnO (non-conductrices) peut être évitée si l'on dépose une couche tampon plus épaisse [11].

### I.4.3 La couche tampon :

La couche tampon est située entre la couche absorbante et la couche fenêtre. Si un contact (couche absorbante / couche fenêtre) est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister. En revanche, son rendement sera limité par l'inadaptation des bandes interdites et les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains. De ce fait, il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle de l'absorbeur et de la fenêtre optique dont la valeur est comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est de type p. De plus, pour éviter les effets de fuite de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante de l'ordre de  $10^{-3} (\Omega.cm)^{-1}$ .
- Elle doit être morphologiquement très homogène et compacte pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains de la couche absorbante [12].

### I.4.4 Les couches absorbantes

La couche absorbante est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous, une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, autrement dit la valeur de sa bande interdite directe (gap), soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV.

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction à base de GaAs. La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le GaAs. Il s'agit d'un semi-conducteur

de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. Son épaisseur est d'environ 1  $\mu\text{m}$  à 2  $\mu\text{m}$  [13].

#### **I.4.5 La couche BSF :**

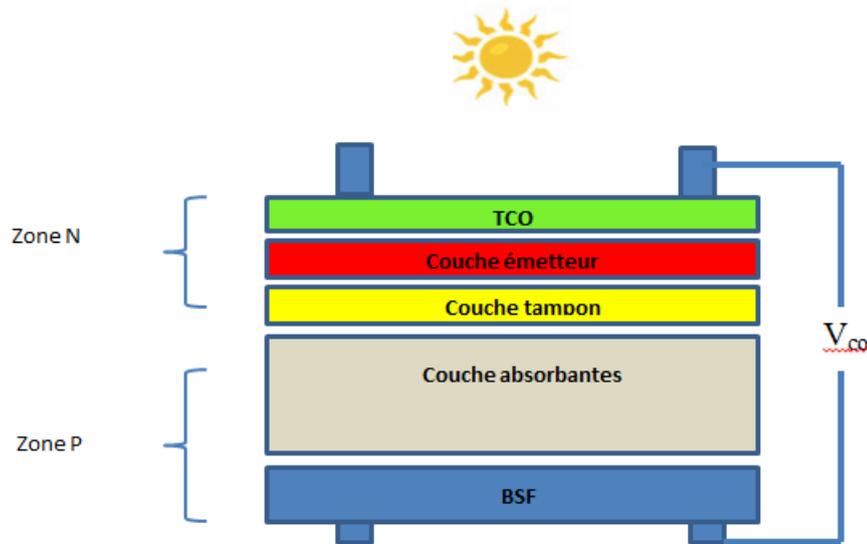
Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction  $p^+-p$ ) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner 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 [14].

#### **I.4.6 Contacts face avant et arrière :**

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 [15].

#### **I.5 Fonctionnements des cellules solaires à hétérojonctions :**

Les cellules solaires sont basées sur le phénomène d'effet photovoltaïque découvert en 1839 par le français Edmond Becquerel, c'est-à-dire la transformation de l'énergie lumineuse reçue en électricité par les semi-conducteurs tel que le GaAs et le GaIn [16].



*Figure I.6 : Principe de fonctionnement des cellules solaires à hétérojonctions.*

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire à hétérojonctions réside dans la transformation des photons en paires électrons-trous.

Les différentes couches de semi-conducteurs de ses cellules ont plusieurs rôles :

Après avoir reçu un flux lumineux, la couche fenêtre qui est constitué d'oxyde transparent joue un double rôle : le premier consiste à laisser passer les photons vers la couche absorbante où va se dérouler la génération des porteurs et le deuxième rôle consiste à protéger la structure des irradiations, la couche tampon est utiliser soit comme couche de protection ou bien comme couche de conversion. Elle doit être morphologiquement très homogène et compacte pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains de la couche absorbante.

La conversion des photons en électron-trous se déroule dans la couche absorbante dont la couche est composée de GaAs. Le photon interagit avec les électrons GaAs et il cède son énergie  $E_{ph} = h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Ensuite les électrons sont conduits vers les contacts du au champ électrique interne c'est alors que on obtient un courant électrique et une tension au borne de la cellule.

**I.6 Bandes d'énergies d'une structure à hétérojonctions :**

La bande de conduction et la bande de valence, présentent une discontinuité conduisant à une barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires. Ceci permet aux porteurs minoritaires d'éviter les interfaces où ils se recombineraient, permettant d'agir comme passivation. Les bandes des porteurs majoritaires ne doivent présenter aucune discontinuité (ou minime) afin de préserver de bonnes propriétés de transport des porteurs majoritaires.

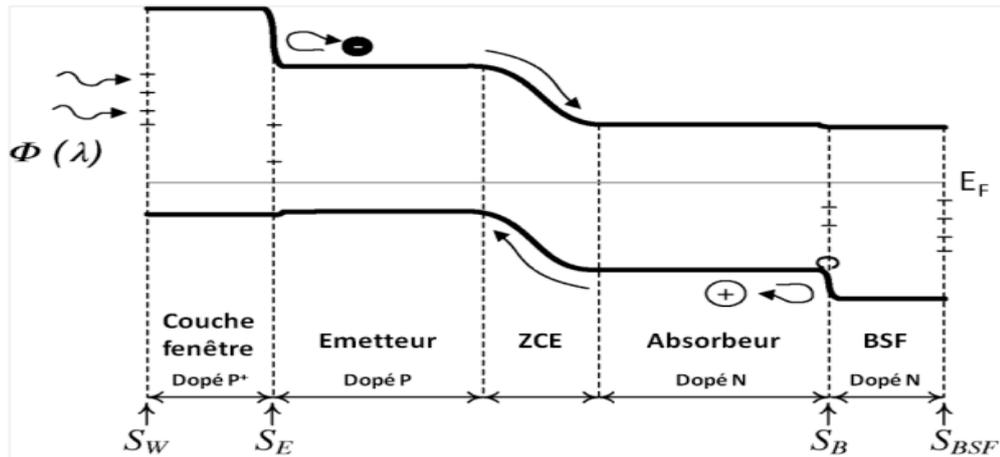


Figure I.7 : Structure de bandes typique d'une cellule à hétérojonction [17].

Pour limiter la présence de défauts aux interfaces, et minimiser ainsi les vitesses de recombinaison, la couche fenêtre et la couche BSF doivent être des paramètres structuraux en accord avec le matériau de la jonction PN. Si cette condition est réalisée, les vitesses de recombinaison de l'émetteur et de l'absorbeur respectivement resteront faibles. Dans ce cas, on dit que la couche fenêtre passive la face avant de la cellule, et le BSF passive l'interface avec la couche tampon.

**I.7 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction :**

La figure (I.8) représente le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire sous éclairement.

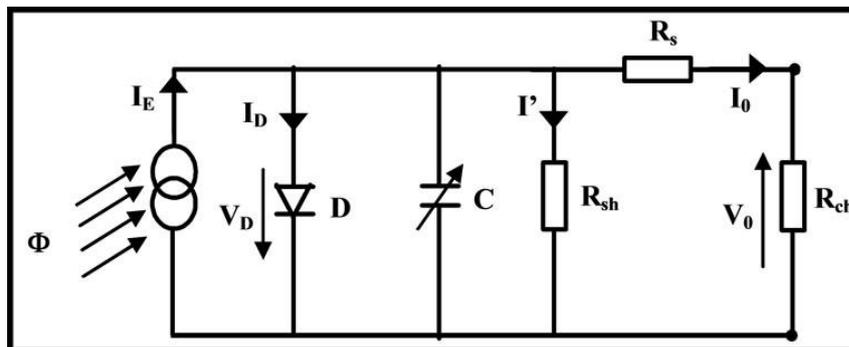
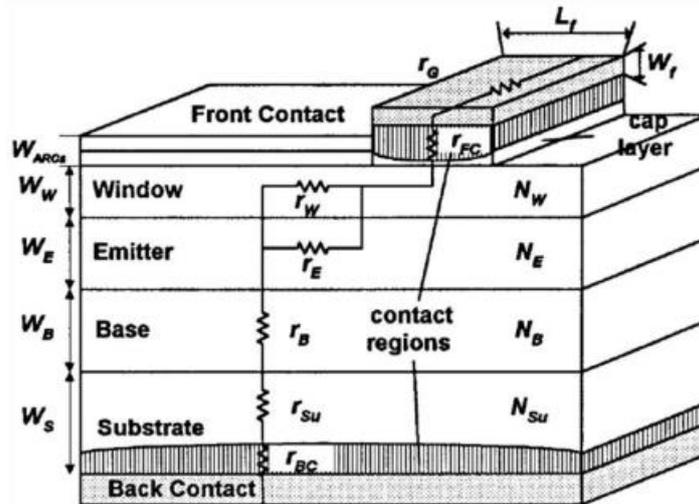


Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction.

**I.7.1 Résistance série  $R_S$  :**

La résistance série  $R_S$  d'une cellule hétérojonction est la somme de plusieurs contributions résistives. Elle tient compte des pertes ohmiques (matériaux, métallisations, contact-métal-s/c) La Figure (I.8) illustre les différentes composantes de  $R_S$  d'une cellule solaire.



*Figure I.9 : Les différentes résistances séries dans une cellule solaire à hétérojonction [17].*

Nous pouvons observer que  $R_S$  est constituée d'un ensemble de contributions résistives latérales et verticales. Parmi celles-ci nous retrouvons des contributions propres aux matériaux épitaxiaux, ainsi que des contributions liées à la technologie de fabrication (grille de contact, interfaces métal/semi-conducteur et soudures par exemple).

Afin de calculer la valeur de la résistance série  $R_S$ , on utilise la relation suivante :

$$R_S = \frac{P_{joule(x)}}{X \times I_{ph}} \tag{I.1}$$

**I.7.2 Résistance parallèle (shunt)  $R_{sh}$  :**

La résistance shunt  $R_{sh}$  correspond à la fuite de courant entre les deux zones N et P de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Le facteur d'idéalité de la cellule dépend des mécanismes de recombinaison dans la ZCE.

Le courant de fuite généré contribue à la dégradation de la caractéristique I(V) en surface de la cellule hétérojonction.

## I.8 Paramètres externes d'une cellule solaire :

Le fonctionnement d'une cellule solaire est caractérisé par différents paramètres externes :

### I.8.1 Courants de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit résulte de la collecte des porteurs générés par la lumière. Pour une cellule solaire parfaite avec des mécanismes de perte très efficaces, le courant de court-circuit et la lumière générée seraient tous les deux correspondants. Par conséquent, le courant de court-circuit est le plus grand courant pouvant être extrait de la cellule solaire.

$$I_{cc} = q \times G(L_n + L_p) \quad (I.2)$$

### I.8.2 Tension à circuit ouvert $V_{co}$ :

Suite à une mise en place d'une cellule solaire composée de plusieurs couches P et d'autre de type N une jonction va se former et alors nous aurons une différence de potentiel qui sera mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.3)$$

### I.8.3 Facteur de forme FF :

Le facteur de forme indique l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . C'est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \times V_{co}$  :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.4)$$

### I.8.4 Rendements de conversion :

Le rendement est le paramètre décisif pour démontrer la performance d'une cellule. Il exprime la capacité de la conversion des photons lumineux (ou l'énergie lumineuse) en énergie électrique d'ailleurs on le calcule à partir du rapport entre la puissance maximale  $P_{max}$  et la puissance incidente  $P_{incidente}$ . Dans notre cas de figure nous allons essayer d'améliorer le rendement en jouant sur l'ajout de couches plus performantes ou bien la manipulation des paramètres d'entrées de nos cellules :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{incidente}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{incidente}} \quad (I.5)$$

L'optimisation du rendement se fera en proposant divers option : la variation des épaisseurs des différentes couches qui compose la cellule, les coefficients d'absorption afin d'augmenter le courant de court-circuit, ainsi que les mobilités des porteurs de charges et le dopage.

### I.8.5 Réponses spectrales RS:

C'est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photo-courant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

$$RS = \frac{I_{cc}}{P_g(\lambda)} \quad (I.6)$$

### I.8.6 Rendement quantique externe EQE (%):

C'est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'ondes, il est relie à la réponse spectrale par :

$$EQE = RS(\lambda) \frac{h \times c}{q \times \lambda} \quad (I.7)$$

### I.8.7 Rendement quantique interne EQI (%):

C'est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique EQE par l'équation :

$$IQE = \frac{EQE}{1-R(\lambda)} \quad (I.8)$$

## I.9 Exemple de cellules solaires à hétérojonctions :

### I.9.1 Expérimentales : L'épitaxie en phase vapeur (HVPE) :

L'épitaxie en phase vapeur d'hydrure ( HVPE ) est une technique de croissance épitaxie souvent utilisée pour produire des semi-conducteurs tels que GaN, GaAs, InP et leurs composés apparentés, dans laquelle le chlorure d'hydrogène réagit à température élevée avec les métaux du groupe III-V pour produire des chlorures métalliques gazeux, qui réagissent ensuite avec l'ammoniac pour produire les nitrures du groupe III-V. Les gazes vecteurs couramment utilisés comprennent l'ammoniac , l'hydrogène et divers chlorures .

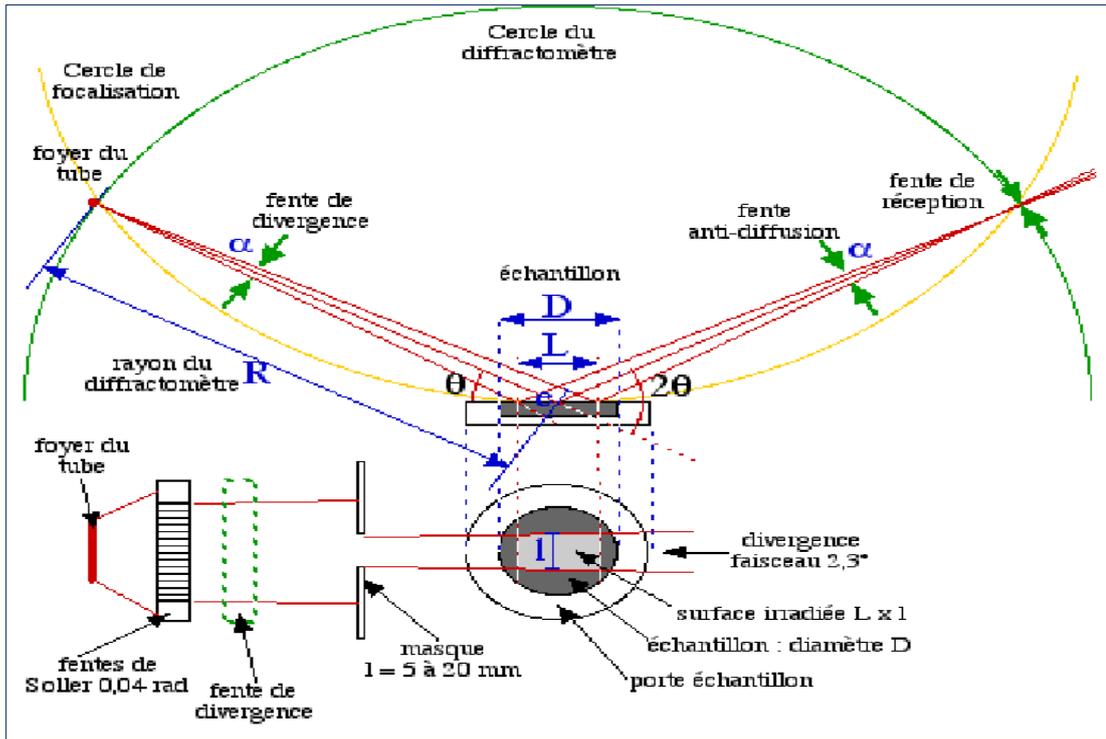


Figure I.10 : Procédé épitaxie en phase vapeur à l'hydrure (HVPE)[18].

L'épitaxie en phase vapeur à l'hydrure (HVPE) possède le potentiel pour réduire considérablement les coûts de dépôt des matériaux III-V sans sacrifier les performances. Ainsi comme le montre cette réalisation de Kevin L. Schulte, John Simon, and Aaron J. Ptak National du laboratoire des énergies renouvelables, Golden, CO 80401 USA réalisé par épitaxie en phase vapeur.

La figure qui suit montre la structure réalisée par épitaxie en phase vapeur.

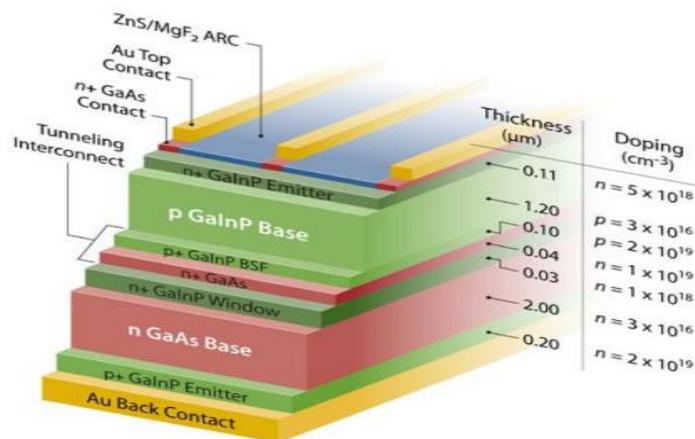


Figure I.11 : Structure en couches minces à base de GaAs et GaInP[19].

Résultats obtenus par épitaxie phase vapeur :

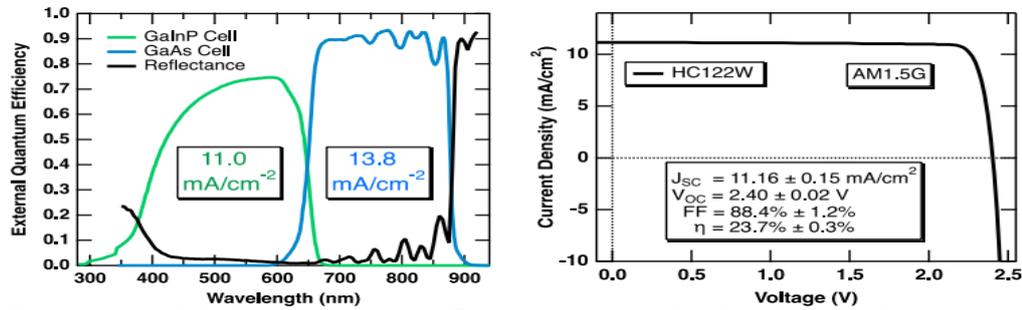


Figure I.12 : Résultats graphiques obtenus après la réalisation de la cellule GaAs et GaInP [20].

### I.9.2 Exemple de cellules solaires à hétérojonctions simple à base de GaAs :

Cette modélisation est beaucoup plus adapter dans le domaine spatial du fait de ses quelques avantages :

- Une absorption très élevée des cellules en couches minces, ce qui traduit un gain en volume et en masse à cause de leurs légèretés.
- Elles sont moins affecter par les différences de température que les cellules solaires en silicium, de ce faite leur utilisation sur la station spatiale est très répondeue.

Dans l'article publier en 2021 intitulé Conception et simulation des cellules solaires à double hétérojonctions basées sur des Plaquettes Si et GaAs réalisé par Jaker Hossain département de génie électrique et d'électronique de l'université de Rajshani au Bangladesh [21].

Une cellule composée d'un contact métallique en Titane pour les contacts avant et arrière, trois couches de matériaux semi-conducteurs dont une couche fenêtre de n-ZnSe et d'une couche absorbante de type p-GaAs et une couche BSF de p+AlAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>.

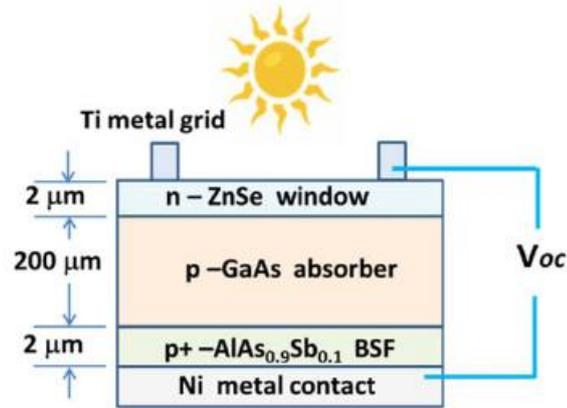


Figure I.13 : Modèles d'une cellule solaire à base de n-ZnSe/p-GaAs/p+-AlAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub> [21].

La simulation numérique faite avec SCAPS-1D de la structure n-ZnSe/p-GaAs/p+- Al As<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>, a donné les résultats suivants :

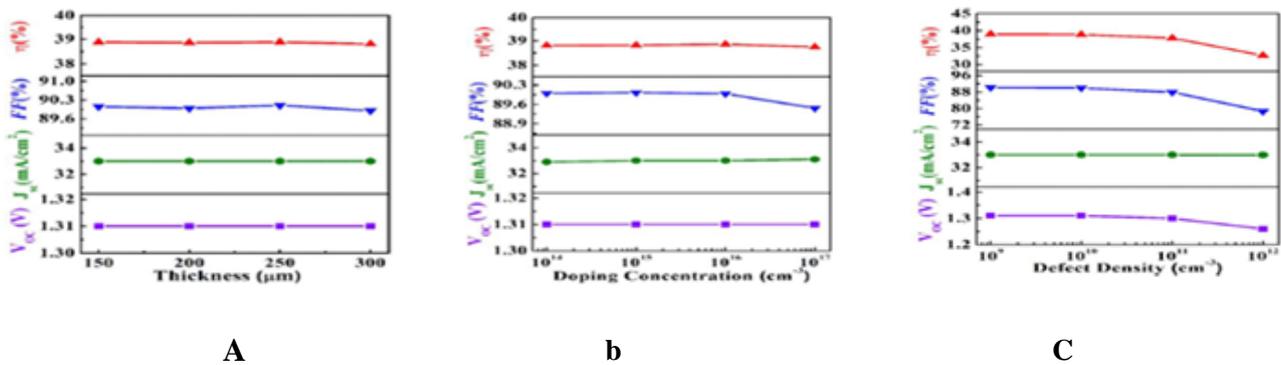


Figure I.14 : Résultat de la simulation d'une cellule solaire n-ZnSe/p-GaAs/p+-Al As<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub> en fonction de a. l'épaisseur, b. la concentration des dopants, c. densités des défauts [21].

D'après cette étude et d'après les résultats obtenus, les paramètres les plus optimaux pour une telle structure sont :  $V_{co}= 1.31$  volt,  $J_{cc}=33$  mA/cm<sup>2</sup>,  $FF=90\%$  et  $\eta=38.9\%$ .

### I.10 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre la technologie interne des cellules solaires a hétérojonctions ainsi que les matériaux dont elles sont composées tel que le GaAs le GaInP, nous avons également énoncé la notion de l'hétérojonction, des modes de fabrication des cellules solaire en couches minces, puis nous avons mentionner les phénomènes occurrents dans les cellules solaires, leurs technologies et leurs avantages et inconvénients.

# **Chapitre II**

---

## **Les Défauts dans l'Arсениc de Gallium.**

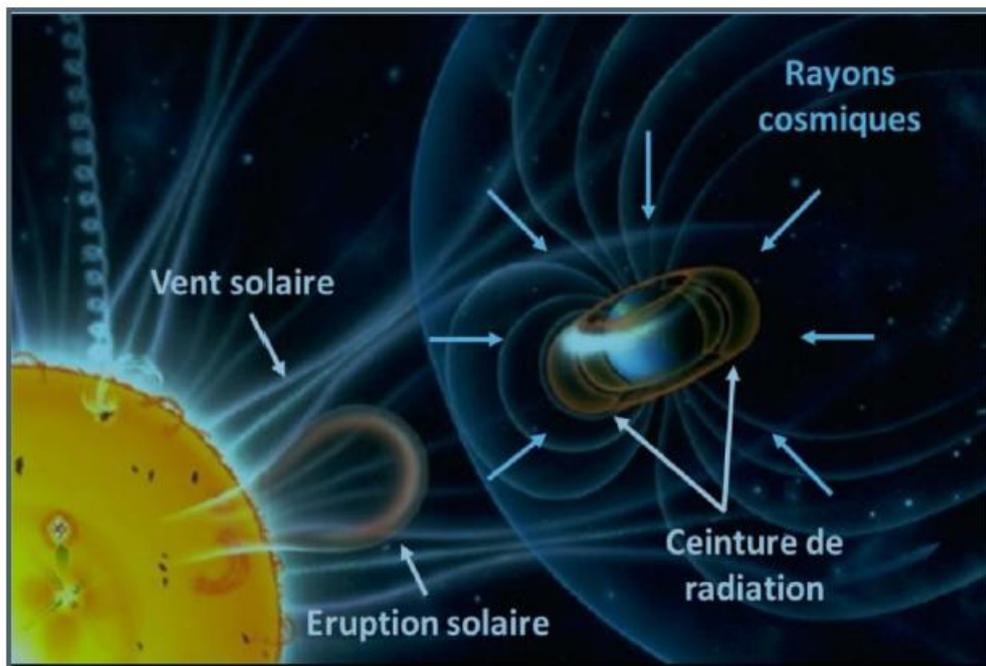
---

## II.1 Introduction :

Les cellules solaires spatiales sont exposées à un environnement de radiation composé principalement de protons et/ou d'électrons. Ces particules énergétiques dégradent les performances électriques des cellules solaires. Par conséquent, il est extrêmement important de comprendre la réponse du dispositif aux rayonnements pour pouvoir prédire avec précision les performances et la durée de vies de ses dispositifs. Pour cela, nous évoquerons, dans ce chapitre, la dégradation lie aux défauts causés par les différentes particules existant en générale et aux électrons en particulier qu'on trouve en dehors de l'atmosphère.

## II.2 Origines des particules radiatives dans l'espace :

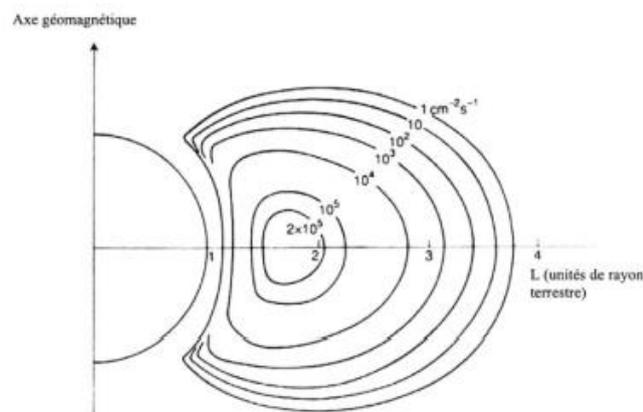
On retrouve dans l'espace différente astres, les planètes, les exo planètes, les satellites et les étoiles. Les étoiles comme le soleil génèrent de la lumière sous forme de quanta d'énergie (onde-corpuscule) dont les dispositifs photosensibles comme les cellules solaires utilisent pour produire de l'électricité, et génèrent également des particules chargées sous formes de vent et d'éruptions solaires ainsi que des rayonnements cosmiques.



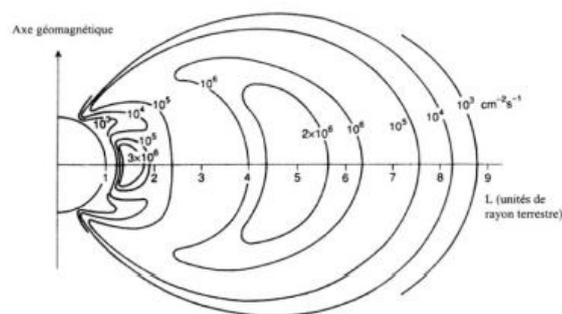
*Figure II.1 Les particules reçues par les satellites orbitant autour de la terre [22].*

Les éruptions solaires sont constituées de plusieurs particules. Des particules alpha, des ions, des protons et des électrons, dont l'énergie varie de quelque eV à plus de 100 MeV.

Aux abords de la Terre, les particules chargées sont piégées par le champ magnétique, formant les ceintures de radiations, aussi appelées ceintures de Van Allen. Il existe deux ceintures de radiations : l'une piégeant les protons et l'autre les électrons. La ceinture de protons est constituée de protons d'énergies comprises dans la gamme [1 keV – 100 MeV] dans une zone allant de 1 à 7  $R_T$  (rayon de la terre). Les électrons piégés ont eu une énergie comprise dans la gamme [1 keV - 30 MeV] dans une zone allant de 1 à 10  $R_T$  [23].



**Figure II.2 :** Ceinture de protons, courbes d'iso-flux de protons d'énergie  $> 10$  MeV dans le plan de l'axe géomagnétique [23].



**Figure II.3 :** Ceinture d'électrons, courbes d'iso-flux d'électrons d'énergie  $> 1$  MeV dans le plan de l'axe géomagnétique, d'après [23].

### II.2.1 Irradiation à protons :

Pour l'irradiation par des protons, la profondeur de pénétration est liée à l'énergie des protons, le bombardement par des protons génère des endommagements non uniformes dans le matériau, et la majorité des dommages sont produits près de la fin du parcours des protons. Par conséquent, la nature des dommages par l'irradiation des protons est déterminée en grande partie par la profondeur de pénétration des protons dans la cellule solaire [24]. Par exemple, dans une cellule solaire en GaAs, les protons de faible énergie (inférieures à 300 KeV) sont arrêtés dans la région active de la cellule, alors que les protons de haute énergie (supérieures à 1) vont pénétrer dans la totalité de la cellule solaire.

### II.2.1 Irradiation à électrons :

Pour les électrons, le pouvoir de pénétration est faible par rapport aux protons et donc ils sont plus susceptibles d'être stoppés par le blindage du satellite.

Lors des bombardements sur les cellules solaires en GaAs, les endommagements sont uniformes mais on retrouve les mêmes phénomènes, par contre les énergies de transition entre les différents mécanismes diffèrent. Les cascades simples de défauts apparaissent pour des électrons d'énergies supérieures à 2 MeV, alors que les cascades complexes n'apparaissent que pour des électrons d'énergies supérieures à 5 MeV [24].

## II.3 Effets des électrons et/ou protons sur les cellules solaires :

### II.3.1 Défauts profonds :

Un défaut profond dans un semi-conducteur peut se comporter comme un piège, comme un centre de recombinaison ou comme centre de génération. Si un porteur est piégé sur un niveau et si après un temps de piégeage il est réémis vers la bande de provenance, le défaut est considéré comme un piège. Si un porteur de signe opposé est aussi capturé avant que le premier soit réémis, le niveau est un centre de recombinaison. Les interactions possibles de ces niveaux profonds avec les porteurs libres sont illustrées en figure (II.4) : capture d'un électron (a) ; émission d'un électron (b) ; Piège à électrons (c) ; Piège à trous (d) [24].

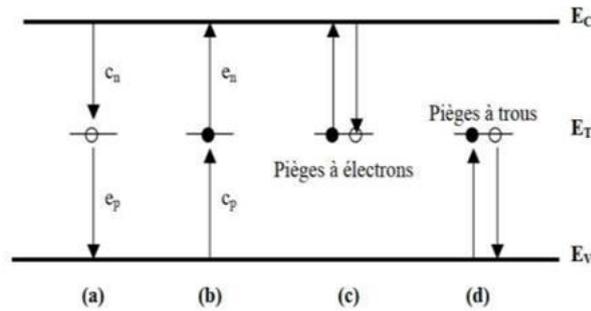


Figure II.4 : Schéma illustrant l'émission et la capture d'électrons et de trous [24].

### II.3.2 Rayonnement de freinage :

Dans le cas des particules chargées, et en particulier pour les électrons, lors de l'interaction avec le champ électrique des atomes cibles, la particule est déviée, et donc rayonne. Ces rayonnements, qui sont principalement dans la gamme des rayons gamma, peuvent à leur tour ioniser la matière. Ce rayonnement est appelé rayonnement de freinage. Il devient important pour des particules de forte énergie ( $> 10$  MeV pour les électrons et  $> 1$  GeV pour les protons) [23].

### II.3.3 Défauts de déplacement :

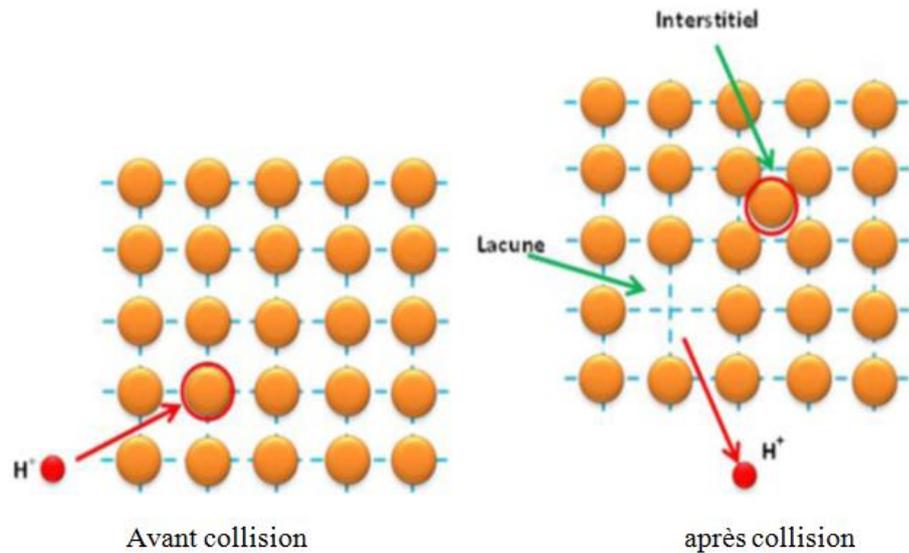
Les défauts créés par déplacement sont d'une importance primordiale pour l'étude de l'impact des radiations sur les composants optoélectroniques. Les phénomènes à l'origine de ces défauts peuvent être des interactions ou des collisions nucléaires. L'interaction se produit quand la particule incidente chargée réagit avec la charge positive du noyau. Si l'énergie transférée est supérieure à l'énergie de déplacement de l'atome  $E_d$ , celui-ci peut alors être déplacé hors de sa position dans le réseau, produisant une paire lacune / interstitiel ou paire de Frenkel. Si l'énergie transmise est bien supérieure à  $E_d$ , le premier atome déplacé peut transmettre à son tour une partie de son énergie et produire une cascade de défauts.

Les défauts de déplacement modifient les propriétés physiques des semi-conducteurs. L'énergie requise de la particule incidente pour déplacer un atome du réseau est appelé énergie de seuil,  $E_s$ , et peut être déterminée par l'équation suivante :

$$E_s = m \times c^2 \left( \sqrt{1 + \frac{E_d}{2 \times m \times c^2} \times \frac{M}{m}} - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

L'équation (II.1) est valable dans le cas où la masse de la particule incidente est très faible par rapport à la masse du noyau cible ( $m \ll M$ ). On observe que plus l'atome cible est léger, plus il est facile de le déplacer

hors de sa position dans le réseau cristallin. Les valeurs admises couramment pour les énergies de déplacement du silicium et de l'arséniure de gallium sont de l'ordre  $\approx 20$  eV.



*Figure II.5 : Déplacement d'un atome par une particule incidente [22].*

### II.3.4 Effet de Compensation :

Ce procédé est la compensation de donneurs par les défauts induits. Par exemple, les électrons libres (respectivement trous libres) disponibles depuis le donneur (respectivement accepteur) sont compensés par des défauts profonds.

### II.3.5 Effet tunnel :

L'effet tunnel désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière. C'est un effet purement quantique, qui ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique et peut être assisté par des défauts profonds.

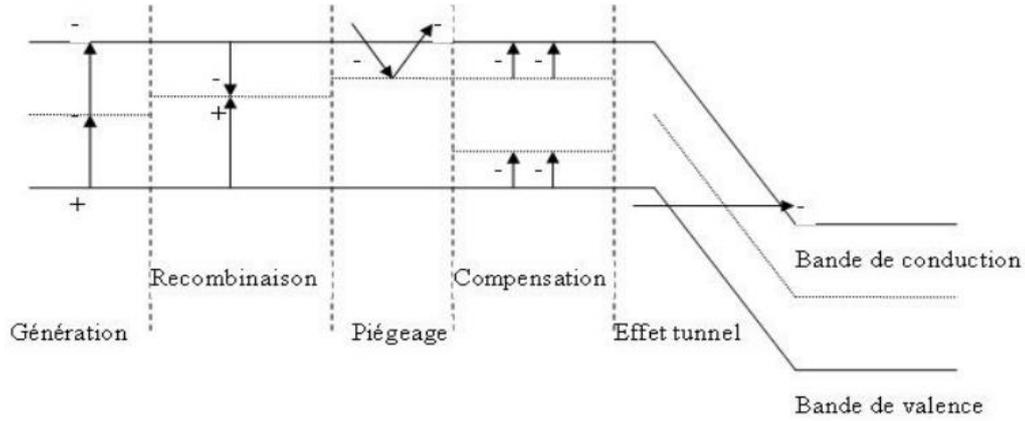


Figure II.6 : Description schématique des types de défauts induits par irradiations et leurs impacts sur les propriétés électriques des semi-conducteurs.

### II.4. Impact des irradiations sur la cellule solaire :

On sait que la présence de défauts cristallins dans les semi-conducteurs détermine la durée de vie des porteurs, car une structure électronique modifiée au sein du cristal donnera lieu à des niveaux de défaut, ou à des niveaux d'énergie qui ne se situent pas près du bord de la bande interdite. Les défauts profonds peuvent se situer dans la bande interdite ; ces niveaux d'impuretés sont également appelés niveaux de piège car ils constituent des pièges pour les porteurs de charge. Ces niveaux peuvent effectivement faciliter un processus de recombinaison en deux étapes appelé recombinaison de Shockley-Read-Hall, où les électrons de conduction peuvent se relaxer jusqu'au niveau du défaut, puis se relaxer jusqu'à la bande de valence, annihilant un trou au cours du processus.

$$R_{SRH} = \sum_{j=1}^m \frac{n.p - n_i^2}{\tau_p.(n_t + n) + \tau_n.(P_t + p)} \quad (II.2)$$

$\tau_n$  et  $\tau_p$  sont les durées de vie des électrons et des trous donnés par la relation :

$$\frac{1}{\tau_{n,p}} = \frac{1}{\tau_{on,p}} + \frac{1}{\tau_{radn,p}} N_t \times \sigma_{n,p} \times v_{thn,p} \quad (II.3)$$

$N_t$  est la concentration de piège, qui dépend de la fluence  $\varphi$  par la relation :

$$N_t = K \times \varphi \quad (II.4)$$

Dans le cas du GaAs, trois défauts à électrons E2, E3 et E4 de niveaux énergétiques  $E_c - 0.41$ ,  $E_c - 0.71$  et  $E_c - 0.9$  respectivement. Et également 4 défauts à trous H1, H2, H3 et H4 aux niveaux énergétiques  $E_v + 0.13$ ,  $E_v + 0.29$ ,  $E_v + 0.71$  et  $E_v + 0.35$  respectivement. Les caractéristiques de ces

défauts et qui seront injectés dans les différentes structures optimisées par la suite, sont résumées dans le tableau qui suit :

*Tableau II.1 : Paramètres des défauts injectés dans la cellule à base de GaAs [34].*

	Niveau énergétique Et (eV)	Section efficace à électron $\sigma_n$ (cm <sup>2</sup> )	Section efficace à trous $\sigma_p$ (cm <sup>2</sup> )	Nt (cm <sup>-3</sup> )
<b>Pièges à Electron</b>				
<b>E2</b>	Ec-0.41	2.6 10 <sup>-13</sup>	2.6 10 <sup>-15</sup>	8.8 10 <sup>13</sup>
<b>E3</b>	Ec-0.71	8.3 10 <sup>-13</sup>	8.3 10 <sup>-15</sup>	5 10 <sup>13</sup>
<b>E4</b>	Ec-0.90	3 10 <sup>-11</sup>	3 10 <sup>-13</sup>	6.5 10 <sup>13</sup>
<b>Pièges à trous</b>				
<b>H1</b>	Ev+0.13	2.6 10 <sup>-15</sup>	2.6 10 <sup>-13</sup>	8.4 10 <sup>14</sup>
<b>H2</b>	Ev+0.29	2 10 <sup>-16</sup>	2 10 <sup>-14</sup>	1.6 10 <sup>15</sup>
<b>H3</b>	Ev+0.35	6.4 10 <sup>-17</sup>	6.4 10 <sup>-15</sup>	1.10 <sup>15</sup>
<b>H4</b>	Ev+0.71	4 10 <sup>-15</sup>	4 10 <sup>-13</sup>	2.7 10 <sup>14</sup>

## II.5 Conclusion :

Les particules qui existent dans l'espace affectent de façon remarquable les performances des cellules solaires à base de GaAs, selon la nature des particules. Ce chapitre nous a permis de savoir l'origine de ses particules, leurs impacts sur les cellules solaires. Cela permet de mieux comprendre les défauts dans les semi-conducteurs et nous permettre d'introduire les défauts dans notre simulation.

---

## **Chapitre III**

---

# **Simulation Numérique des Cellules Solaires en Présence des Défauts.**

---

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, la simulation numérique est utilisée comme un moyen d'optimisation de trois différentes cellules solaires à hétérojonctions ainsi que leurs modes de fonctionnement en présence des défauts créés par irradiations à électrons. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel SCAPS-1D, un logiciel de simulation numérique pour les matériaux et structures de cellules solaires, qui va nous permettre de réaliser des simulations numériques de cellules solaires en couches minces à hétérojonctions à base de GaAs, GaInP et ZnO.

### III.2 Les équations de base dans les SC :

La simulation numérique des cellules solaires est basée sur la résolution couplée de l'équation de Poisson (II.1) et les équations de continuité pour les électrons (II.4) et les trous (II.5). Les trois variables dépendantes sont:  $\psi$  le potentiel électrostatique, les concentrations  $n$  et  $p$  des électrons et des trous respectivement. Les expressions sont données dans la direction  $x$ .

#### II.2.1 Equation de poisson :

L'équation de poisson relie les variations du potentiel électrostatique (champ électrique) aux densités locales de charge. Elle est donnée par :

$$\text{Div}(\mathbf{E}) = \frac{\partial \mathbf{E}(x)}{\partial x} = \frac{\mathbf{p}(x)}{\varepsilon} = \frac{-\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} \quad (\text{III.1})$$

D'où l'équation de neutralité :

$$\mathbf{p} = e(N_d^+ + \mathbf{p} - N_a^- - n) \quad (\text{III.2})$$

Et la résistivité diélectrique :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{III.3})$$

#### III.2.2 Equation de continuité :

Les équations de continuité permettent de déterminer les concentrations des porteurs dans un semi-conducteur, elles s'expriment par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{j}_n + G_n - R_n \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{j}_p + G_p - R_p \quad (\text{III.5})$$

### III.2.3 Equations de transport:

Le déplacement des porteurs de charge (électrons et trous) engendre des courants dans le semi-conducteur sous l'action d'un champ électrique ou d'un gradient de concentration. Dans le premier cas, le courant est appelé courant de conduction, dans le deuxième cas le courant est appelé courant de diffusion.

#### III.2.3.1 Courant de conduction :

En présence d'un champ électrique, les électrons sont soumis à une force constante :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (\text{III.6})$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (\text{III.7})$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ.

Le courant total est :

$$J_{tot} = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)E \quad (\text{III.8})$$

Ainsi, la conductivité  $\sigma(T)$  et la résistivité  $\rho(T)$ , sont données par :

$$\sigma(T) = q(n \cdot \mu_n(T) + p \cdot \mu_p(T)) \quad (\text{III.9})$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q(n \cdot \mu_n(T) + p \cdot \mu_p(T))} \quad (\text{III.10})$$

#### III.2.3.2. Courant de diffusion :

Quand les porteurs libres ne sont pas répartis uniformément dans le semi-conducteur, ils sont soumis au processus général de diffusion de la région de forte concentration vers la région de faible concentration. Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est :

$$J_{Dp} = -qDp \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{III.11})$$

$$Dp = \mu_p \frac{Kt}{q} \quad (\text{III.12})$$

Il en est de même dans le cas des électrons de concentration  $n(x)$  et on a :

$$J_{Dn} = -qDn \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.13})$$

$$Dn = \mu_n \frac{Kt}{q} \quad (\text{III.14})$$

### III.2.3.3. Courant total dans le semi-conducteur :

Lorsque deux phénomènes existent simultanément la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée en explicitant la relation de dépendance avec la température par :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + qDn \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.15})$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - qDp \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{III.16})$$

Le courant total est donné par :

$$J_{tot} = J_n + J_p \quad (\text{III.17})$$

Les constantes  $D_p$  et  $D_n$  sont liées aux mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  par la relation d'Einstein :

$$\frac{Dp}{\mu_p} = \frac{Dn}{\mu_n} = \frac{Kt}{q} \quad (\text{III.18})$$

### III.2.4 Les mobilités des porteurs de charges :

Les mobilités des porteurs de charges désignent l'aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin sous l'effet des champs électrique. Elle est définie par :

Pour les trous :

$$\mu_p = \left[ 0.0025 \left( \frac{T}{300} \right)^{2.3} + 4 \cdot 10^{21} p \left( \frac{T}{300} \right)^{1.5} \right]^{-1} \quad (\text{III.19})$$

Pour les électrons :

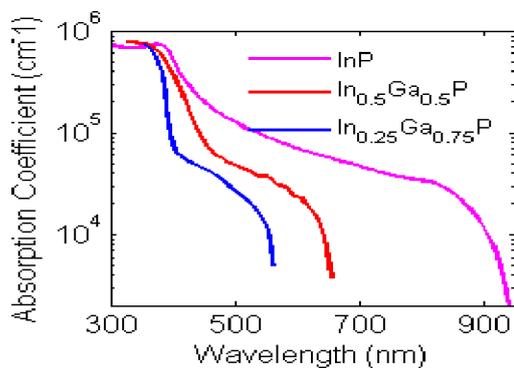
$$\mu_n = \left[ 0.0025 \left( \frac{T}{300} \right)^{2.3} + 4 \cdot 10^{21} n \left( \frac{T}{300} \right)^{1.5} \right]^{-1} \quad (\text{III.20})$$

### III.3 Absorption dans le semi-conducteur :

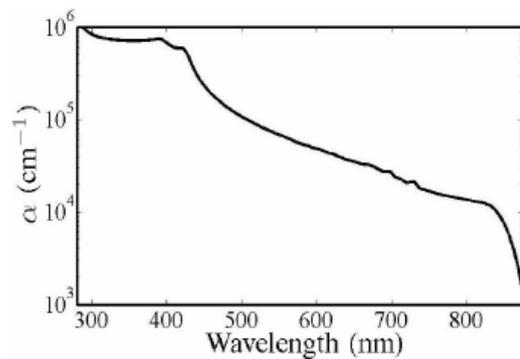
Les différentes couches de semi-conducteurs, dont les cellules solaires à hétérojonctions sont élaborées, absorbent le spectre lumineux selon différentes gammes et différentes longueurs d'ondes.

Le coefficient d'absorption dépend d'un matériau à un autre. Chaque semi-conducteur possède des caractéristiques intrinsèques et des coefficients d'absorptions différentes qu'on peut exprimer :

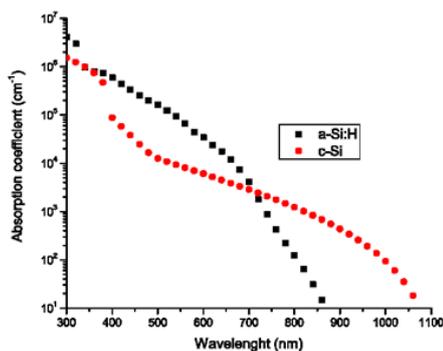
Pour quelques matériaux on a extrait leurs coefficients d'absorption à partir des graphes qu'on les trouve ci-dessous :



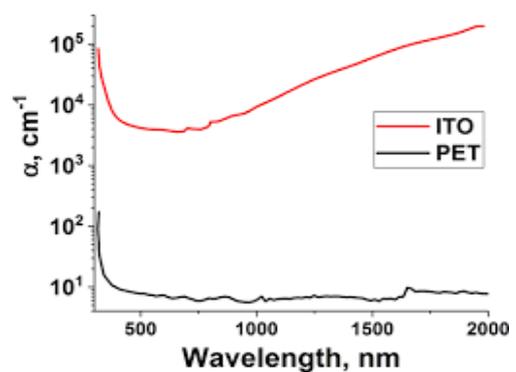
**Figure III.1 :** Variation de coefficient d'absorption GaInP en fonction de la longueur d'onde [26].



**Figure III.2 :** Variation de coefficient d'absorption GaAs en fonction de la longueur d'onde [27].



**Figure III.3 :** Variation de coefficient d'absorption d'a-Si-H en fonction de la longueur d'onde [28].



**Figure III.4 :** Variation de coefficient d'absorption d'ITO en fonction de la longueur d'onde [29].

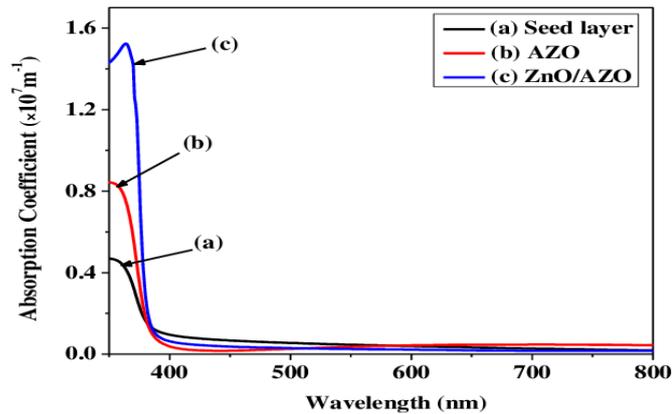


Figure III.5 : Variation de coefficient d'absorption d'AZO en fonction de la longueur d'onde [30].

### III.4 Présentation des structures simulées :

Ce sont des structures à hétérojonction à base de GaAs. Elles consistent la juxtaposition de plusieurs couches dont les couches fenêtres, en GaInP pour la structure A, en ITO, a-Si et a-Si:H pour la structure B et en AZO, ZnO pour la dernière structure C. Ensuite elles se suivent par une couche absorbante aussi en GaAs, la couche BSF et le contact en dernier.

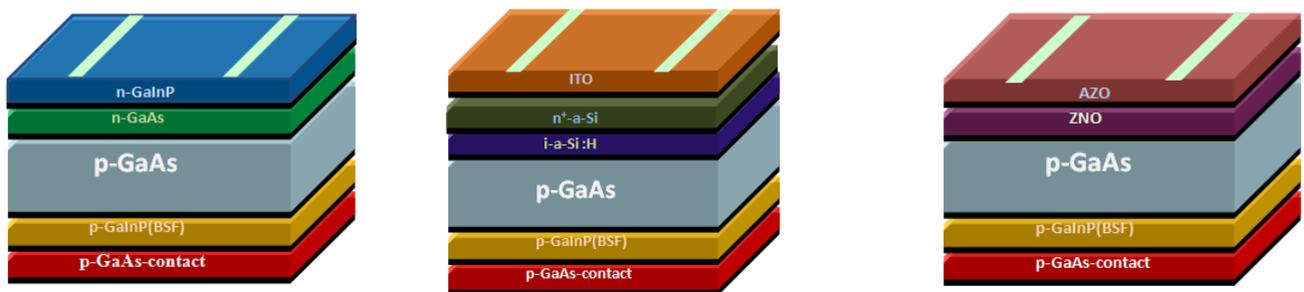


Figure III.6 : Les structures hétérojonction simulées [31].

Les paramètres d'entrés	n-GaInP	n-GaAs	ITO	n <sup>+</sup> -a-Si	i-a-Si:H	AZO	ZnO	p-GaAs	p-GaInP-BSF	p-GaAs-contact
W (μm)	0.03	0.15	0.08	0.007	0.005	0.03	0.15	2	0.06	0.5
E <sub>g</sub> (eV)	1.8	1.4	3.65	1.7	1.7	3.3	3.3	1.42	1.80	1.42
χ <sub>e</sub> (eV)	4.16	4.0	4.8	3.9	3.9	4.3	4.3	4.0	4.16	4.0
ε	9.5	10.9	8.9	11.9	11.8	9	9	10.9	9.5	10.9
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.54 10 <sup>19</sup>	4.7 10 <sup>18</sup>	5.2 10 <sup>18</sup>	10 <sup>21</sup>	10 <sup>2</sup>	2 10 <sup>18</sup>	2.2 10 <sup>18</sup>	4.7 10 <sup>18</sup>	1.54 10 <sup>19</sup>	4.7 10 <sup>18</sup>
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.45 10 <sup>19</sup>	1.9 10 <sup>19</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>21</sup>	10 <sup>20</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>	1.9 10 <sup>19</sup>	1.45 10 <sup>19</sup>	9 10 <sup>19</sup>
V <sub>thn</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	2 10 <sup>5</sup>	4.4 10 <sup>7</sup>	2 10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	4.4 10 <sup>7</sup>	2 10 <sup>5</sup>	4.4 10 <sup>7</sup>
V <sub>thp</sub> (cm.s <sup>-1</sup> )	1.7 10 <sup>5</sup>	1.8 10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	1.8 10 <sup>7</sup>	1.7 10 <sup>5</sup>	1.8 10 <sup>7</sup>
μ <sub>n</sub> (m <sup>2</sup> .Vs <sup>-1</sup> )	300	8500	10	5	5	30	60	8500	300	8500
μ <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> .Vs <sup>-1</sup> )	150	400	10	1	1	5	10	400	150	400
m <sub>c</sub>	8.810 <sup>-2</sup>	0.06	/	/	/	/	/	0.06	8.810 <sup>-2</sup>	0.06
m <sub>v</sub>	0.7	0.51	/	/	/	/	/	0.51	0.7	0.51
N <sub>d</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>18</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>18</sup>	00	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	00	10 <sup>18</sup>	00
N <sub>a</sub> (cm <sup>-3</sup> )	00	00	00	00	00	00	00	10 <sup>18</sup>	00	10 <sup>17</sup>

Tableau III.1 : Paramètres d'entrés des différentes couches [32].

### III.5 Simulation numérique des différentes cellules solaires :

La simulation numérique des différentes structures de cellule solaire se fera en plusieurs étapes :

- La première étape consiste à réaliser une simulation numérique de des trois structures à base de GaAs dans les conditions idéales en y incorporant les différents paramètres des semi-conducteurs : optiques et électriques.
- La deuxième étape sera l'optimisation de la structure ayant les paramètres de sorties les plus optimaux, optimisation en variant les épaisseurs des couches fenêtres.
- Ensuite pour terminer nous allons injecter les défauts dans la cellule optimale afin d'étudier les effets des irradiations à électrons de 1Mev sur les structures optimisées.

#### III.5.1 Outils de simulation :

Afin de réaliser notre étude nous nous somme penchés sur l'outil de simulation et logiciel SCAPS-1D acronyme de « SolarCell Capacitance Simulator one Dimension» qui est un programme développé à l'université de Gent en Belgique avec Windows/CVI National Instruments par Marc Burgelman et ses étudiants [31]. Ce programme est conçu spécialement pour la simulation des dispositifs des cellules solaires tels que les cellules au CdTe et CIGS mais aussi de cellules à base de Si et GaAs.

Parmi les principaux avantages de SCAPS-1D :

- Les fichiers d'entrée, tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif, sont accessibles à l'utilisateur en format texte.
- Possibilité d'ajouter jusqu'à 7 couche de semi-conducteurs.
- C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.
- Une facilité d'utilisation, et des nouveautés font de ce logiciel un programme intéressant

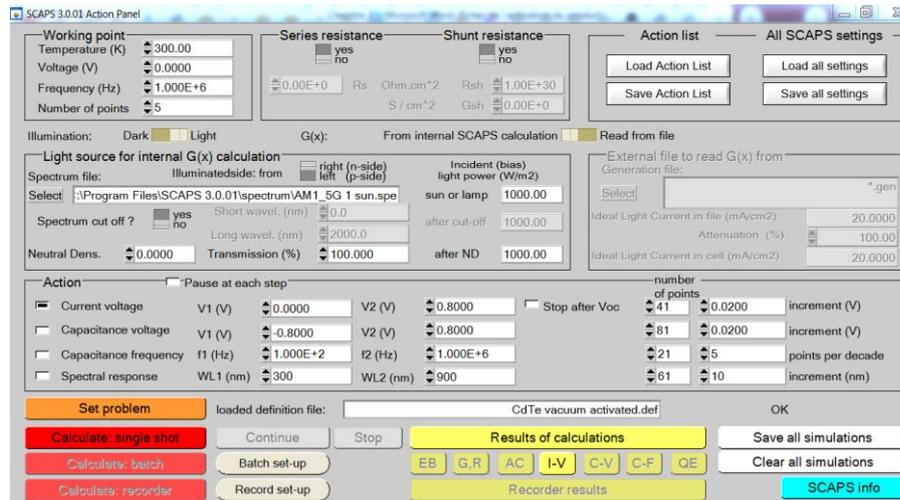


Figure III.7 : Interface du logiciel.

Logiciel SCAPS-1D fonctionne selon l'organigramme ci-dessous :

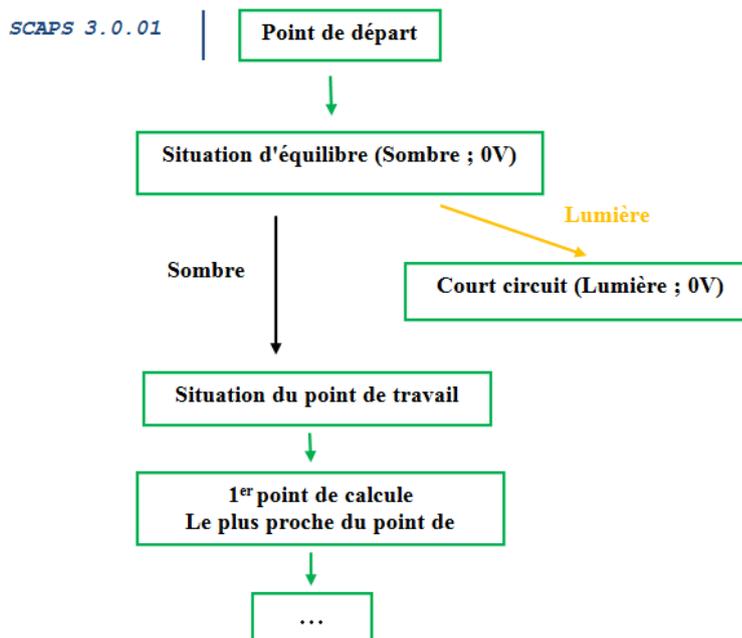


Figure III.8 : Organigramme de fonctionnement de Scaps-1D.

### III.5.2 Méthodes de calcul numérique :

Pour la résolution des équations fondamentales des cellules solaires, le logiciel SCCAPS-1D utilise deux grandes méthodes : la méthode de NEWTON-Raphson et la méthode des différences finies.

#### III.5.2.1 Méthode de Newton :

La méthode de Newton-Raphson est une méthode algorithmique pour trouver numériquement la racine d'une fonction. C'est-à-dire trouver  $x$  tel que  $f(x)=0$ . Cette méthode doit son nom aux mathématiciens anglais Isaac Newton (1643-1727) et Joseph Raphson (peut-être 1648-1715), qui furent les premiers à la décrire pour la recherche des solutions d'une équation polynomiale [32].

#### III.5.2.2 Méthode des différences finies :

C'est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres. Cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue.

### III.5.3 Etapes de simulation :

#### III.5.3.1. Paramètres d'entrés :

Pour fixer la température, le voltage, la fréquence et le nombre de point, on utilise la section [working point]

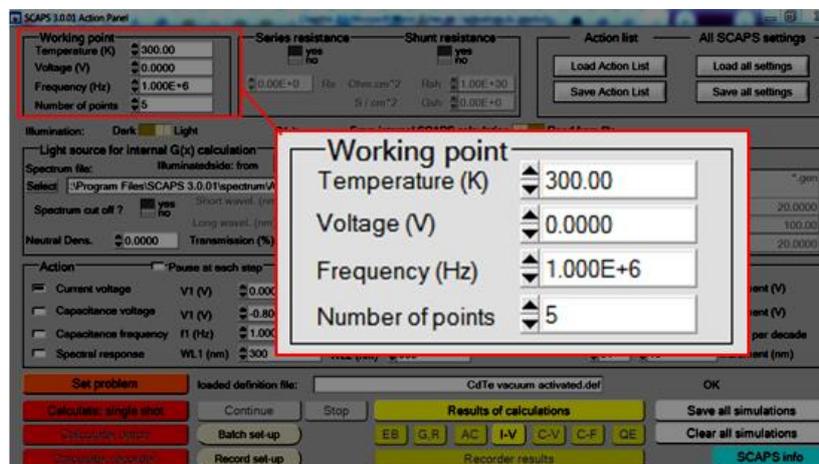


Figure III.9 : La section 'point de travail'.

### III.5.3.2. Choix de flux :

Plusieurs spectres sont disponibles dans (C:\Program Files\SCAPS\spectrum), en cliquant sur (Dark-Light), Scaps nous donne accès à la section dans spectres (Light source for internal G(x) Calculation), en cliquant sur (select) on peut choisir un spectre parmi plusieurs spectre

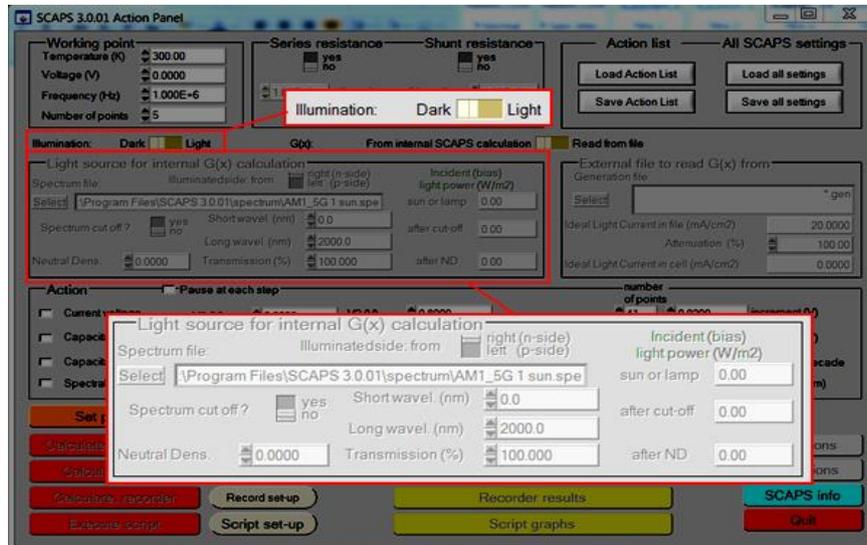


Figure III.10 : Choix des conditions luminances de la simulation.

### III.5.3.3. Caractéristique I-V et paramètres externes :

La section action permet de choisir les caractéristiques à simuler, la première case celle qui nous intéresse vas nous permettre de visualiser es courbes I-V et également avoir le graphe de la réponse spectrale.

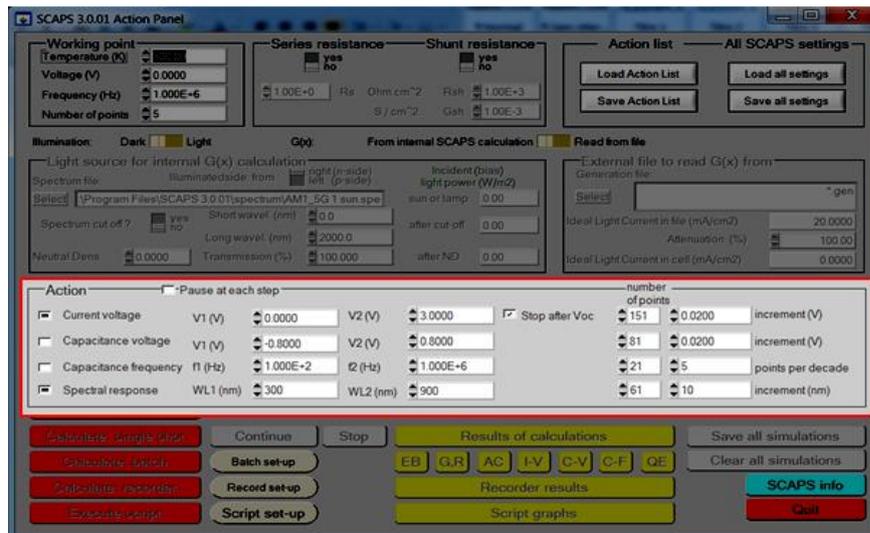


Figure III.11 : Section 'Action'.

### III.5.4 Schématisation de la structure GaAs / GaInP :

En cliquant sur le bouton (Set problem) on peut ouvrir la fenêtre de schématisation. Pour ajouter une couche en clique sur le bouton (Add layer) ce qui nous permettra d'entre les différentes données de cette couche

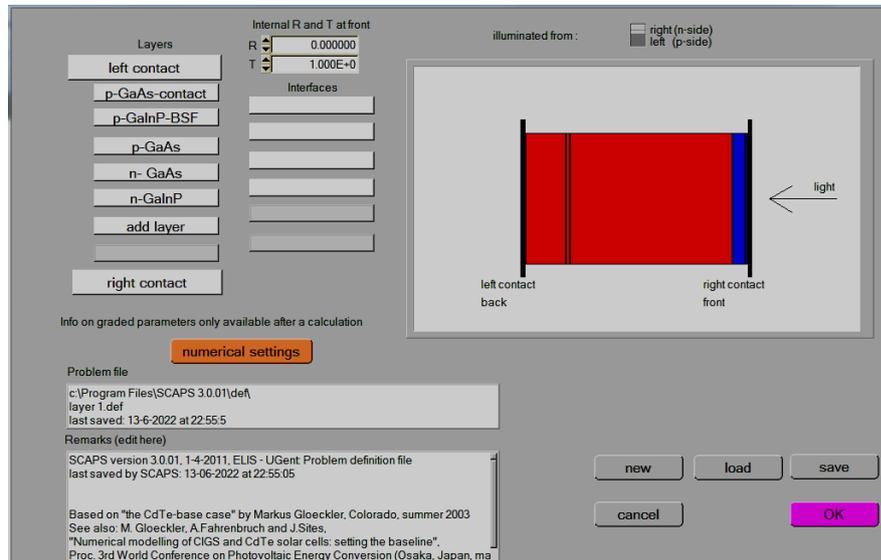


Figure III.12 : Schématisation des différentes couches d'une cellule.

Les données de chaque couches sont afficher dans la figure ci-dessous, cette dernière montre les données de base de la couche tel que (dopage, band gap, épaisseur, etc.). On peut également varier les défauts de chaque couche.

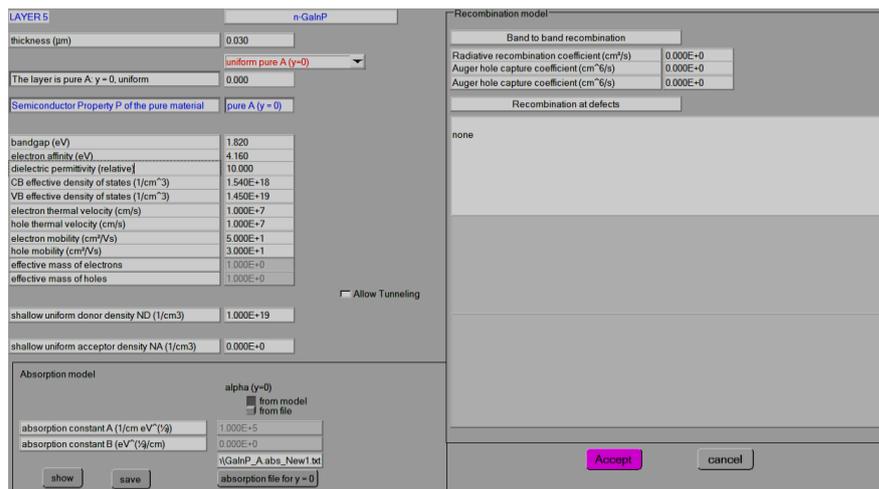


Figure III.13 : Les données d'entrées pour chaque couche.

### **III.6 Conclusion :**

Nous avons entrepris une simulation de trois différentes structures de cellules solaires à hétérojonctions en se basant sur plusieurs parties, outre la recherche des paramètres constituant les différentes couches de ses cellules telles que la mise en place des propriétés optique et électriques. Nous avons également présenté les différents phénomènes occurrents dans la simulation en incluant les équations de continuités et de poisson, d'autres phénomène tel que la génération et la recombinaison dans les semi-conducteurs, dans le but d'extrapoler les caractéristiques  $I(V)$  des différentes cellules solaires ainsi que l'effet des irradiations à électrons.

# **Chapitre IV**

---

## **Résultats et Discussions**

---

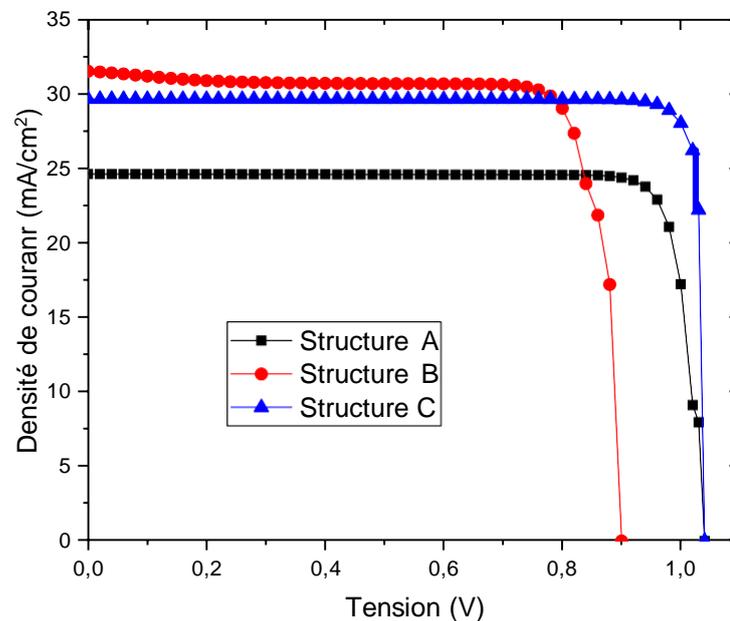
### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons exposer des résultats obtenus après simulation numérique des trois différentes structures, structure A (structure de base), structure B et structure C. Ensuite nous allons faire une étude comparative entre ces trois structures afin de choisir la cellule ayant les paramètres externes les plus optimaux. Puis une injection de défauts sera établie sur la structure choisie.

### IV.2. Simulations numériques des trois structures :

Afin d'optimiser les cellules solaires et de choisir la cellule idéale pour l'environnement radiatif, nous avons tout d'abord simulé les trois structures citées dans le chapitre précédent et on les a comparés avec d'autres de références.

La figure IV.1 présente les caractéristiques  $I(V)$  des trois cellules solaires A, B et C. Les paramètres externes, notamment la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), la densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), le facteur de remplissage (FF) et le rendement ( $\eta$ ) sont regroupés dans le tableau (IV.1)



*Figure IV.1 : Caractéristiques  $J(V)$  des trois structures.*

La structure de base A présente un rendement de 26.98 % avec un  $V_{oc}$ , un  $J_{cc}$  et un FF de 1.03 V, 24.62 mA/cm<sup>2</sup> et 0.87, respectivement. Les cellules solaires GaAs conventionnelles telles que la cellule A utilisent des couches de GaInP comme fenêtre avant et couches BSF, qui possède certains

avantages intrinsèques tels qu'une mobilité élevée, une large bande interdite et une correspondance de réseau avec le substrat GaAs, ses performances dites élevées sont également dû aux paramètres intrinsèques tels que l'absorptivité du spectre solaire. Le choix des matériaux dont l'énergie de gap est décroissante permet l'absorption du spectre solaire dans sa quasi-totalité.

La cellule B à hétérojonction avec n<sup>+</sup>-a-Si : H ainsi que une couche fenêtre en ITO à gap élevé à donner des résultats qui suit :

- Un rendement de 28.69 % pour un facteur de forme équivalent à 0.83 et une densité de courant de 31.83 mA/cm<sup>2</sup> et une tension à circuit ouvert de 0.89 V.
- Le J<sub>cc</sub> de la cellule B est plus élevé que celui de la cellule A, probablement en raison de l'épaisseur globale plus faible des empilements des couches de champ de la surface avant, ce qui réduit la perte d'absorption parasite.

L'utilisation de matériaux a-Si : H pour les cellules solaires GaAs présente deux avantages essentiels, à savoir, un traitement à plus basse température et une fabrication de cellules moins coûteuse que dans la fabrication conventionnelle de GaAs par croissance épitaxiale.

Une couche de fenêtre en ZnO sert de couche de passivation de surface de la couche d'absorption GaAs à large bande interdite de 3,3 eV peut améliorer davantage la transmission de la région à courte longueur d'onde dans l'absorbeur en GaAs et également améliorer le potentiel intégré, ce qui permet d'obtenir des J<sub>cc</sub> et des V<sub>oc</sub> plus élevés que ceux de la cellule A, respectivement, comme le montre les résultats obtenus où la structure C à donner un J<sub>cc</sub> de 27.40 mA/cm<sup>2</sup> et un V<sub>oc</sub> de 1.03 V.

Paramètres Externes	Structure A		Structure B		Structure C	
	simulée	référence	simulée	référence	simulée	référence
J <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	24.62	29.25	31.83	29.85	27.40	30.48
V <sub>co</sub> (V)	1.03	1.096	0.89	0.974	1.03	1.11
FF	0.879	0.886	0.832	0.86	0.881	0.886
η%	26.98 %	28.4 %	28.69 %	25 %	31.28%	30 %

*Tableau IV.1 : Les paramètres externes de nos structures et celles de référence [31].*

Notons que les structures ont été étudiée sous spectre solaire AM1.5, avec P=100 mW/cm<sup>2</sup>, et à température ambiante T=300°K.

### IV.3 Optimisation des cellules solaires :

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (duré de vie, mobilité, longueur de diffusion), de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation des différentes cellules dans notre se fait par l'influence de couches fenêtres sur les paramètres externes de chaque cellule solaire.

#### IV.3.1 Optimisation de la structure B :

Dans le cas de la structure B (voir structure détaillée dans le chapitre III), l'optimisation se fait en variant l'épaisseur de la couche transparente ITO. Le tableau IV.2 présente les variations des différents paramètres externes en fonction de l'épaisseur de la couche ITO.

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ ) ITO	Jcc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Vco (V)	FF	$\eta$ %
0.02	31.00	0.89	0.8363	27.71
0.05	31.50	0.89	0.8374	28.21
0.08	31.98	1.03	0.8384	28.70
0.10	32.29	0.89	0.8390	29.00
0.20	33.72	0.89	0.8418	30.43

*Tableau IV.2 : Les paramètres externes de la structure B en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ITO.*

La structure B optimisé avec une variation de l'épaisseur de l'ITO, présente une nette amélioration du rendement de conversion, on constate que le Vco reste constant ainsi que le facteur de forme. L'augmentation du rendement est due dans ce cas à l'amélioration de densité de courant de court-circuit allant de 31 à 33.72  $\text{mA}/\text{cm}^2$  pour des épaisseurs de 0.02 jusqu'à 0.2  $\mu\text{m}$ , cela est due à l'augmentation des porteurs de charges et une absorptivité plus élevées.

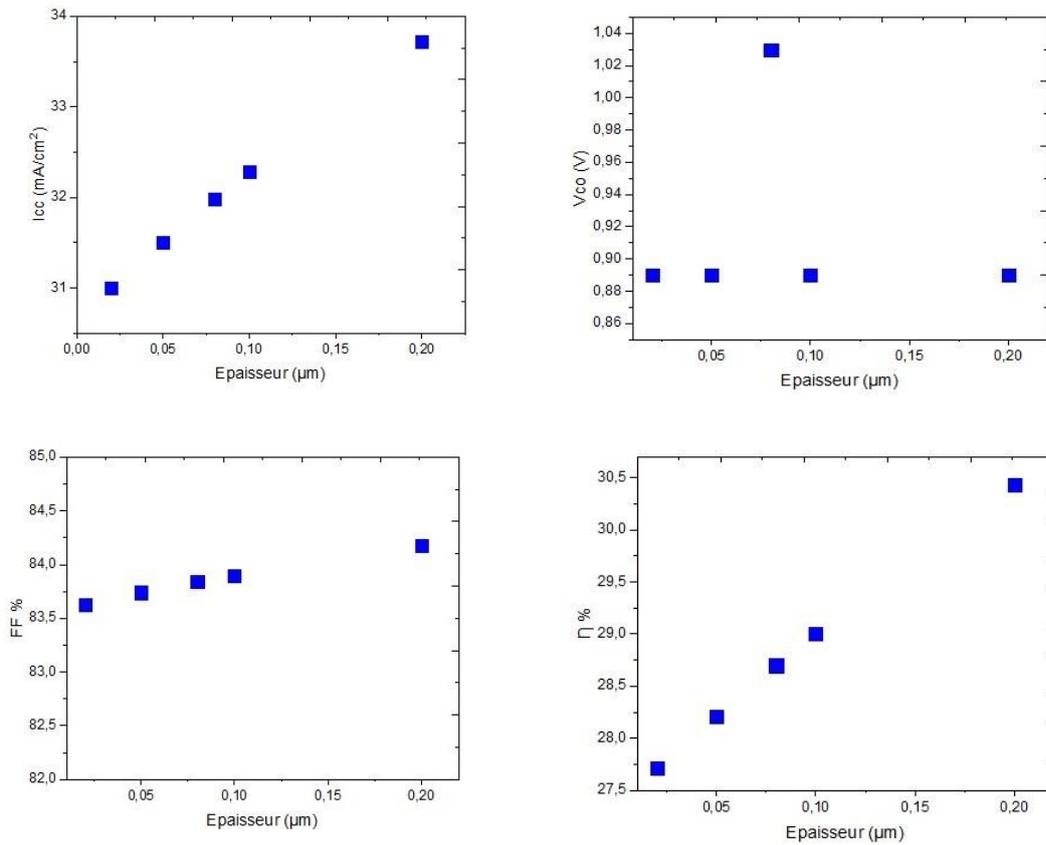


Figure IV.3 : Variations des paramètres externes en fonction de l'épaisseur d'ITO.

### IV.3.2 Optimisation de la structure C :

L'optimisation de la structure C se fait par la variation de l'épaisseur des différentes couches : ZnO, AZO et BSF.

#### IV.3.2.1 La couche transparente ZnO :

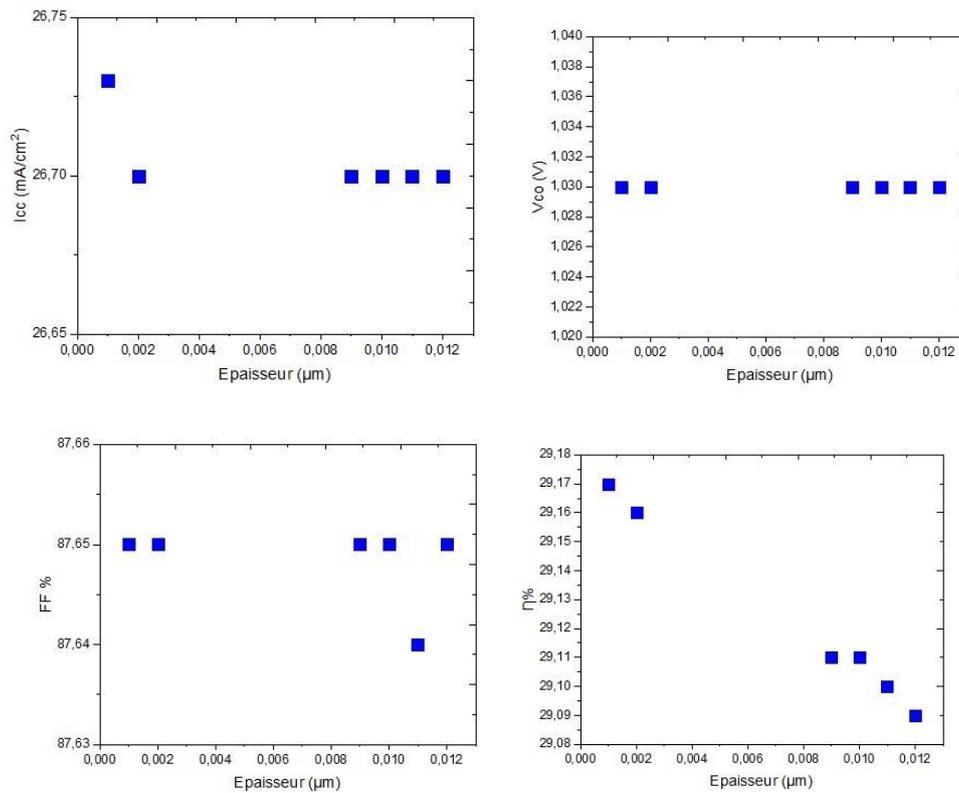
Pour la couche transparente ZnO les épaisseurs de cette dernière varient de 0.001 et 0.012 μm.

Les paramètres externes de la structure sont représentés dans le tableau IV.3.

Epaisseur (μm) ZnO	Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF	η %
0.001	26.73	1.03	0.8765	29.17
0.002	26.7	1.03	0.8765	29.16
0.009	26.7	1.03	0.8765	29.11
0.010	26.7	1.03	0.8765	29.11
0.011	26.7	1.03	0.8764	29.10
0.012	26.7	1.03	0.8765	29.09

Tableau IV.3 Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.

D'après les résultats obtenus et représentés dans la figure (IV.3), on remarque que tous les paramètres externes dont le  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement restent constant.



**Figure IV.4 :** Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur.

### IV.3.2.2 La couche transparente AZO :

Pour la couche transparente AZO les épaisseurs de cette dernière varient de 0.003 et 0.15  $\mu\text{m}$ .

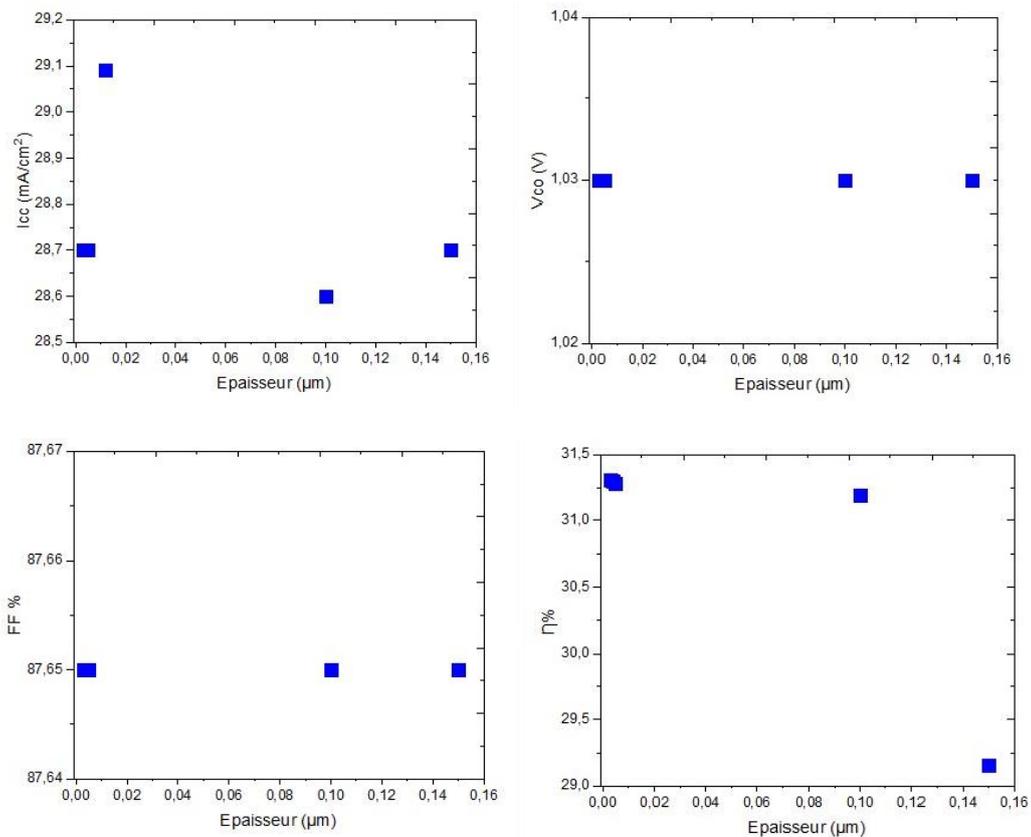
Les paramètres externes de la structure sont représentés dans le tableau IV.4.

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ ) AZO	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	FF	$\eta$ %
0.003	28.7	1.03	0.8765	31.31
0.004	28.7	1.03	0.8765	31.30
0.005	28.7	1.03	0.8765	31.28
0.10	28.6	1.03	0.8765	31.19
0.15	28.7	1.03	0.8765	29.16

**Tableau IV.4** Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre AZO.

Les résultats après variation de l'épaisseur de la couche fenêtre AZO, on remarque que le rendement de conversion augmente quand l'épaisseur de la couche fenêtre AZO diminue,

Probablement en raison de l'épaisseur globale plus faible des empilements des couches de champ de la surface avant, ce qui réduit la perte d'absorption parasite.



**Figure IV.5 :** Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur.

Comme un fait, le premier contact entre les photons et la cellule solaire est réalisée par la couche de fenêtre AZO. Par conséquent, l'épaisseur de la couche fenêtre affecte la création de paires électron-trou. Alors la valeur la plus élevée du rendement correspond à l'épaisseur égale à 3 nm.

### IV.3.2.3 La couche p-GaInP-BSF:

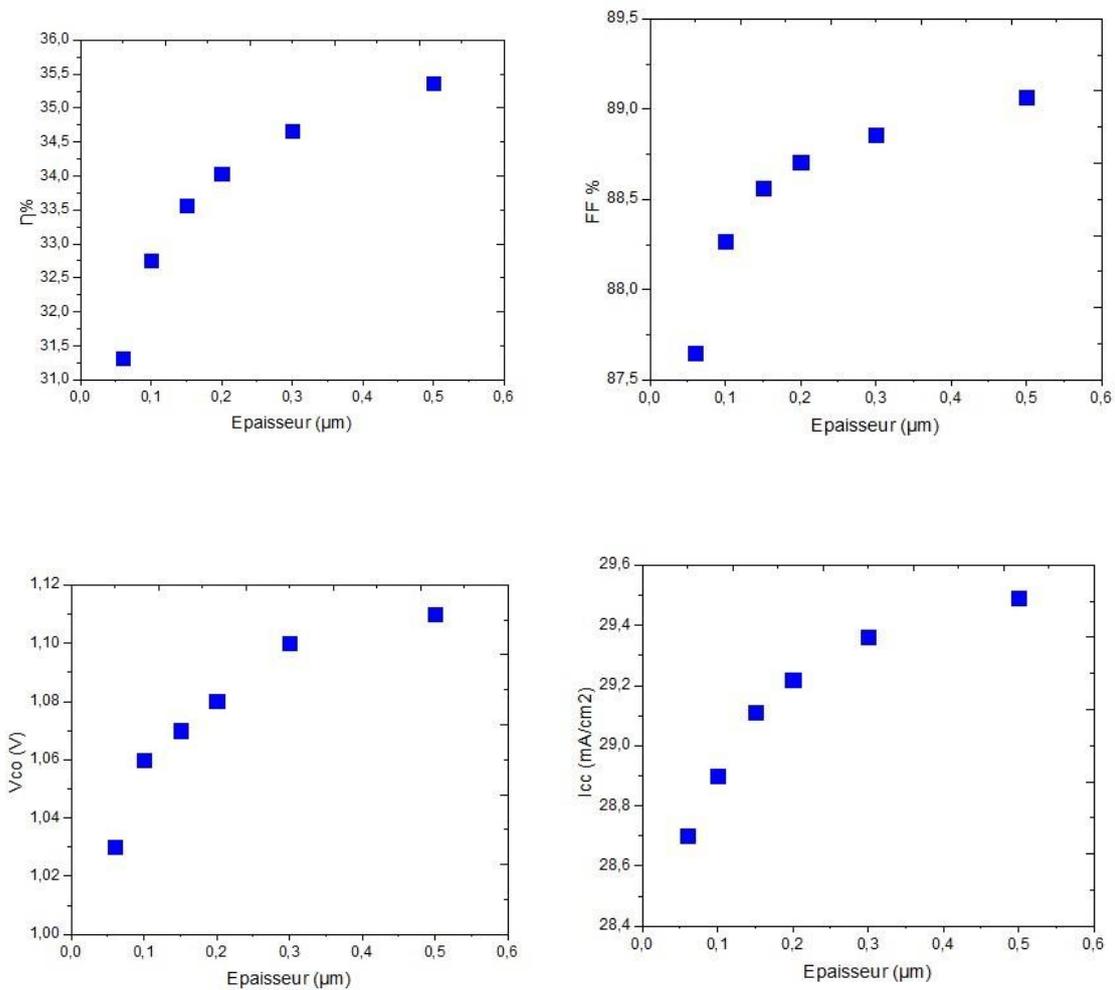
Pour la couche transparente ZnO les épaisseurs de cette dernière varient de 0.06 et 0.5 μm.

Les paramètres externes de la structure sont représentés dans le tableau IV.5.

Épaisseur ( $\mu\text{m}$ ) p-GaInP-BSF	Jcc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Vco (V)	FF	$\eta$ %
0.06	28.7	1.03	0.8765	31.31
0.1	28.9	1.06	0.8827	32.75
0.15	29.11	1.07	0.8856	33.56
0.2	29.22	1.08	0.8871	34.04
0.3	29.36	1.10	0.8886	34.67
0.5	29.49	1.11	0.8907	35.37

**Tableau IV.5** Les paramètres externes de la structure C en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre p-GaInP-BSF.

On constate que le rendement et la densité du courant court-circuit augmentent considérablement avec l'augmentation de la couche BSF



**Figure IV.6 :** Variations des paramètres externes en fonction d'épaisseur.

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. 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.

De ce fait plus l'épaisseur de la couche BSF est élevée plus les recombinaisons en face arrière seront réduites donc pour la structure C on remarque une nette amélioration des propriétés suite à l'augmentation de l'épaisseur dans notre cas de figure nous nous sommes arrêtés à une valeur de 0.5  $\mu\text{m}$ .

#### IV.4 Effet des irradiations à électrons :

Après l'optimisation des deux cellules solaires, on a choisi deux structures de cellules solaires. A noter que ces deux structures ne sont pas les structures optimales. Notre but maintenant est d'étudier la résistance de ces deux cellules aux irradiations à électrons de 1 MeV de différents flux (de  $10^{14}$  à  $10^{16}$   $\text{e}/\text{cm}^2$ ) afin de choisir la cellule la plus performante aux applications spatiales.

##### IV.4.1 Effet des irradiations sur la Structure B :

Pour la structure B, nous avons modélisé l'effet d'irradiation à électrons de 1 MeV pour des flux allant de  $10^{14}$  à  $10^{16}$   $\text{e}/\text{cm}^2$ .

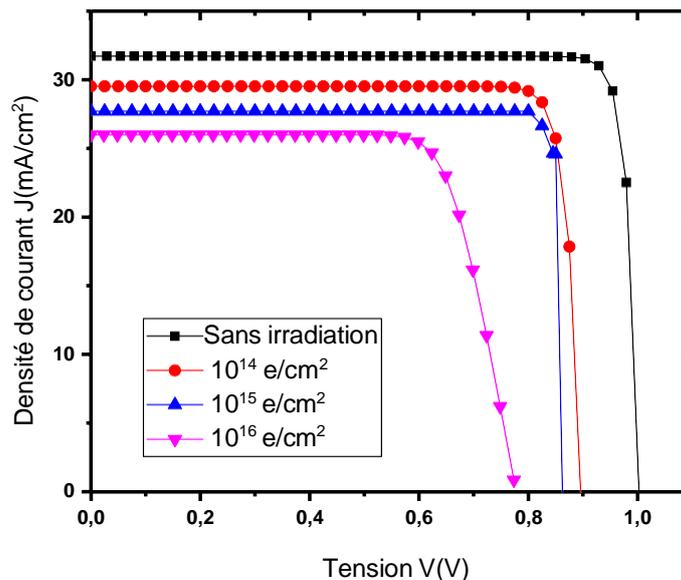


Figure IV.7 : Caractéristique  $I(V)$  de la cellule B après irradiation.

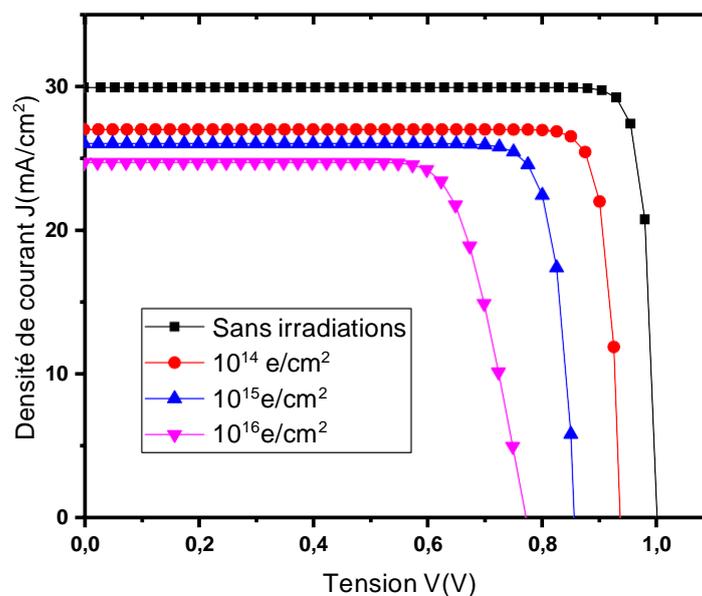
Paramètres	Sans irradiations	$10^{14}$ e/cm <sup>2</sup>	$10^{15}$ e/cm <sup>2</sup>	$10^{16}$ e/cm <sup>2</sup>
Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	28.58	26.19	25.41	23.07
Vco (V)	0.997	0.890	0.854	0.762
FF	0.90	0.89	0.89	0.778
$\eta\%$	25.90	20.78	19.51	13.69

**Tableau IV.7** Récapitulatif des paramètres externes de la structure B sans et avec irradiations.

On constate que les paramètres externes de la cellule solaire sont liés au flux d'irradiations. Plus le flux est élevé plus les performances de la cellule se dégradent, on note que le rendement diminue de 20% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 25% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup>, 47% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. Cette dégradation du rendement est due directement à la dégradation du courant de court-circuit, 9% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 12% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> et 20% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. Cette dégradation est due aux défauts profonds générés par le flux d'électrons, ces électrons agissent comme centre de recombinaison.

#### IV.4.2 Effet des irradiations sur la Structure C :

Pour la structure C, nous avons modélisé l'effet d'irradiation à électrons de 1 MeV pour des flux allant de  $10^{14}$  à  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>.



**Figure IV.6 :** Caractéristiques I(V) de la cellule C après irradiation.

Paramètres	Sans irradiations	$10^{14}$ e/cm <sup>2</sup>	$10^{15}$ e/cm <sup>2</sup>	$10^{16}$ e/cm <sup>2</sup>
Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	29.88	26.956	25.983	24.674
Vco (V)	1.001	0.936	0.857	0.774
FF	0.906	0.896	0.86	0.769
$\eta\%$	27.111	22.61	19.15	14.70

**Tableau IV.8** Récapitulatif des paramètres externes de la structure C sans et avec irradiations.

Les structures B et C subissent toutes les deux des dégradations liées aux irradiations d'électrons. Ses électrons agissent comme centre de recombinaison dans les cellules solaires. D'après l'analyse des résultats obtenus, on remarque que la structure C est plus résistante que la cellule B, on distingue que pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> une différence de 2% du courant de court-circuit de dégradations entre les deux structures donc la structure C est plus performante que la B. Pour des flux de  $10^{14}$  une différence de 3% de dégradations ce qui induit que la structure C est plus résistante.

Les cellules à base de GaAs avec AZO et ZnO comme couches fenêtres sont nettement plus performantes que les autres cellules du fait que les couches fenêtre servent de protection due à l'irradiation.

#### IV.5 Conclusion :

Les cellules solaires en hétérojonction à base de GaAs possèdent des performances très intéressantes. D'après l'analyse des résultats obtenus après simulation sur la cellule solaire à base de GaAs avec du GaInP comme couche fenêtre on obtient les résultats qui suit : une densité de courant de court-circuit de 24.62 mA/cm<sup>2</sup> et un Vco de 1.03 V, et un FF de 0.8797 et un rendement de 26.98 %.

Après optimisation des cellules solaires B et C, des rendements supérieurs à 30% ont été obtenus. Cela, en variant les épaisseurs des couches ITO, AZO, ZnO et la couche BSF. Une injection de défauts a été faite par la suite pour les deux structures sous un spectre AM0. Nous avons constaté une dégradation des performances des deux structures, Plus le flux est élevé plus les performances de la cellule se dégradent. On note que le rendement diminue de 20% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 25% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> et de 47% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. Le Jcc baisse de 9% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 12% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> 20% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. De même pour la structure C. Cette dernière a également présentée des dégradations considérables. Pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup> la dégradation est estimée à plus de 17 % des rendements d'avant irradiation et plus de 30 % et 46 % pour des flux de  $10^{15}$  et  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> respectivement, cette diminution du rendement est liée à

la dégradation du courant de court-circuit. On remarque que pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup> le Jcc diminue de plus de 10%, pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> on remarque une baisse de 14% et pour un flux de  $10^{16}$  une baisse notable de plus de 18%.

---

# **Conclusion Générale**

---

### *Conclusion Générale*

Le contexte actuel de recherche sur les nano matériaux comme le GaInP et le GaAs dans l'élaboration de cellules solaire à très haut rendement nous a incités à réaliser ce modeste travail. De nos jours les cellules solaires en couches minces sont de plus en plus utilisées essentiellement en raison de leurs faibles coûts. Durant ces dernières décennies les performances de ces cellules ont été nettement améliorées en mettant en place de nouveaux types de semi-conducteurs et également de nouvelles structures bien plus performantes tels que les multi-jonctions et les hétérojonctions pour diverses applications tel que les applications spatiales en raison de leur rendement assez élevé, supérieure à 26% mais également à leur grande résistivité.

Nous avons étudié les caractéristiques électriques des cellules à hétérojonctions à base de (GaInP / GaAs/) de structure p+ n- sous éclairage AM1.5 par le logiciel de simulation SCAPS. Dans l'optique d'étudier les performances des cellules à base de GaAs.

En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction, l'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel SCAPS compte parmi les outils de simulation les plus développés dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

En premier lieu nous avons présenté les technologies internes des cellules solaires à base de GaAs leurs paramètres ainsi que leurs modes de fonctionnement

Les cellules solaires à base de GaAs possèdent des performances très intéressantes, on a remarqué que les cellules avec du GaInP comme couche fenêtre et comme couche BSF ont donné des résultats intéressants : un  $J_{cc}$  de  $24.62 \text{ mA/cm}^2$ , un  $V_{co}$  de  $1.03 \text{ V}$  ajouter à cela un FF de  $0.8797$  et un rendement global de  $26.98\%$ , dans un autre cas de figure une structure B avec une couche d'ITO comme couche fenêtre nous a donné des résultats très concluants ou une nette amélioration du  $J_{cc}$  de  $31.83 \text{ mA/cm}^2$  pour un  $V_{co}$  égale à  $0.89 \text{ V}$  pour un rendement global de  $28.69\%$  et un facteur de forme de  $0.8322$ . Les performances les plus élevées ont été obtenues avec une cellule solaire avec du AZO et ZnO comme couche fenêtre.

Après optimisation des paramètres des cellules solaires B et C, des rendements supérieurs à  $30\%$  ont été obtenus. Cela en variant les épaisseurs des couches ITO, AZO, ZnO et la couche

BSF. Une injection de défauts a été faite par la suite pour les deux structures sous un spectre AM0. Nous avons constaté une dégradation des performances des deux structures, Plus le flux est élevé plus les performances de la cellule se dégradent. On note que le rendement diminue de 20% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 25% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> et de 47% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. Le Jcc baisse de 9% pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup>, 12% pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> 20% pour un flux de  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>. De même pour la structure C. Cette dernière a également présentée des dégradations considérables. Pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup> la dégradation est estimée à plus de 17 % des rendements d'avant irradiation et plus de 30 % et 46 % pour des flux de  $10^{15}$  et  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> respectivement, cette diminution du rendement est liée à la dégradation du courant de court-circuit. On remarque que pour un flux de  $10^{14}$  e/cm<sup>2</sup> le Jcc diminue de plus de 10%, pour un flux de  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> on remarque une baisse de 14% et pour un flux de  $10^{16}$  une baisse notable de plus de 18%.

---

# **Références Bibliographiques et Webographiques**

---

REFERENCE :

[1] AMINE YOUSRA, AMRANE TOUFIK , (modélisation et optimisation d'une cellules solaire n-c-AlGaAs/p-c-GaAs) mémoire de master, juillet 2021.

[2] [https://www.researchgate.net/figure/aMaille-elementaire-b-cellule-unitaire-de-la-structure-Zinc-Blende\\_fig1\\_340088593](https://www.researchgate.net/figure/aMaille-elementaire-b-cellule-unitaire-de-la-structure-Zinc-Blende_fig1_340088593)

Consulter le 09 janvier 2022.

[3] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/gallium-arsenide-GaAs>

Consulter le 14 janvier 2022.

[4] <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>

Consulter le 21 mars 2022.

[5] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Indium-gallium-phosphide>

Consulter le 02 mars 2022.

[6] <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInP/index.html>

Consulter le 21 mars 2022.

[7] [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-74832008000200010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832008000200010)

Consulter le 21 mars 2022.

[8] [https://www.ccea.fr/multimedia/Documents/infographies/solaire-heterojonction.pdf](https://www cea.fr/multimedia/Documents/infographies/solaire-heterojonction.pdf)

Consulter le 21 mars 2022.

[9] <https://www.ecinews.fr/fr/tout-le-spectre-solaire-avec-une-seule-led/>

Consulter le 11 février 2022.

[10] <https://www.solems.com/oxydes-transparents-conducteurs>

Consulter le 10 avril 2022.

[11] S. Khelifi et A. Belghachi 'Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs ' Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semi-conducteurs, Centre Universitaire de Béchar, 2015.

[12] Djelloul Abdelkader, (Elaboration et caractérisation d'une couche tampon ZnS Pour les applications cellules solaire) diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf –Oran. Soutenu en 2011.

[13] Melle Arras Aida, Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si, a UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN. Soutenu publiquement le 25 /06/2018.

[14] Foutem Fatima, (Etude de la contribution de la couche BSF sur les performances d'une cellule solaire en GaAs) mémoire pour l'obtention du diplôme de magister à UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN, 2016.

[15] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-cellules-solaires-a-contact-arriere-arrivent-10318/>

Consulter le 05 mars 2022.

[16] Alexandre Vauthelin, (Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires), THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR, L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIERLe 23 Novembre 2018

[17] MAZOUZ Halima, support de cours semi-conducteurs, 2021.

[18] <https://www.semanticscholar.org/paper/Le-proc%C3%A9d%C3%A9-HVPE-pour-la-croissance-de-nanofils-Lekhal/3e623d0731fa861fb8df26ce22e0303e5175b945>

Consulter le 05 mars 2022.

[19] Kevin L. Schulte, John Simon, and Aaron J. Ptak,(MultijunctionGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs Solar Cells Grown by Dynamic Hydride Vapor Phase Epitaxy)

[20] JakerHossain,(Design and simulation of double-heterojunction solar cells based on Si and GaAs wafers) 2021.

[21]Chen AQing, Zhu KaiGui,(Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency), department de physique de pekin .

[22] MazouzHalima , (*Dégradation des performances des cellules solaires sous l'effet de rayonnement*) these doctorat.

Soutenue le 24 janvier 2016.

[23] Mathieu Boutillier, (Approche méthodologique de l'impact de l'environnement radiatif spatial sur les propriétés intrinsèques d'une diode laser), publier le 5 Mar 2008.

[24] Khinechenassima, ( Effet d'irradiation par des protons dans une cellule solaire en  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ ), MÉMOIRE DE MASTER , Université Mohamed Khider de Biskra le jeudi 27 juin 2019

[25] Melle ZIANI Nora, (Effet de l'épaisseur de la couche antireflet à base d'un TCO sur les cellules solaires à hétérojonctions a base de silicium). MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, Soutenu le: 26/06/2013.

[26] <https://www.semanticscholar.org/paper/Modeling-wide-bandgap-GaInP-photovoltaic-cells-for-Sun-Montgomery/187d8e79a2ebd8a821f2ae1f66f4732aba52b34d/figure/2>

Consulter le 07 mars 2022.

[27] [https://www.researchgate.net/figure/Absorption-coefficient-of-GaAs-30\\_fig2\\_270081988](https://www.researchgate.net/figure/Absorption-coefficient-of-GaAs-30_fig2_270081988)

Consulter le 12 mars 2022.

[28] [https://www.researchgate.net/figure/Optical-absorption-spectra-for-as-deposited-ITO-before-laser-irradiation-and-the-PET\\_fig1\\_331019791](https://www.researchgate.net/figure/Optical-absorption-spectra-for-as-deposited-ITO-before-laser-irradiation-and-the-PET_fig1_331019791)

Consulter le 10 mars 2022.

[29] <https://www.semanticscholar.org/paper/Hetero-junction-%28HIT%29-silicon-solar-cell-model-for-Hernandez-Como-Morales-Acevedo/597a6dbd698ed7b489034d2a76591dcccdfb86bea/figure/3>

Consulter le 10 mars 2022.

[30] [https://www.researchgate.net/figure/Absorption-coefficient-of-a-seed-layer-b-AZO-and-c-ZnO-AZO-films\\_fig2\\_327060697](https://www.researchgate.net/figure/Absorption-coefficient-of-a-seed-layer-b-AZO-and-c-ZnO-AZO-films_fig2_327060697)

Consulter le 11 mars 2022.

[31] <http://www.elsevier.com/locate/physb>

Consulter le 11 mars 2022.

[32] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>

Consulter le 21 mars 2022.

[33] <https://scaps.elis.ugent.be/SCAPS%20introduction.pdf>

Consulter le 15 avril 2022.

[34] <https://dridk.me/newton-raphson.html>

Consulter le 13 mai 2022.

[35] [https://perso.limsi.fr/wietze/cours/MN/MN\\_chap3.pdf](https://perso.limsi.fr/wietze/cours/MN/MN_chap3.pdf)

Consulter le 13 mai 2022.

[36] <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap8b.htm>

Consulter le 25 mai 2022.

[37] <https://www.bodycote.com/fr/services/traitement-thermique/implantation-ionique/>

Consulter le 26 mai 2022.

[38] <https://www.meliad-sas.com/fr/technologies-laser/comment-fonctionne-l-ablation-laser>

Consulter le 30 mai 2022.

[39] <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/ch4c.htm>

Consulter le 01 juin 2022.

[40] <https://www.neyco.fr/fr/page/les-cibles-de-sputtering-pour-la-pulverisation-cathodique>

Consulter le 15 février 2022.

[41] <https://www.neyco.fr/fr/page/les-cibles-de-sputtering-pour-la-pulverisation-cathodique>

Consulter le 11 février 2022.

---

# Annexe

---

## I. Technique de dépôt des couches minces :

Il existe deux grandes méthodes de dépôt de films minces: la technique de dépôt en phase vapeur chimique (CVD : Chemical Vapor Déposition) et de dépôt en phase vapeur physique (PVD : Physical Vapor Déposition) dans l'industrie les méthodes de dépôt chimiques sont les plus utiliser, à cause de leur meilleur rendement et la qualité des films obtenus. Ce schéma représente la classification des techniques de dépôt :

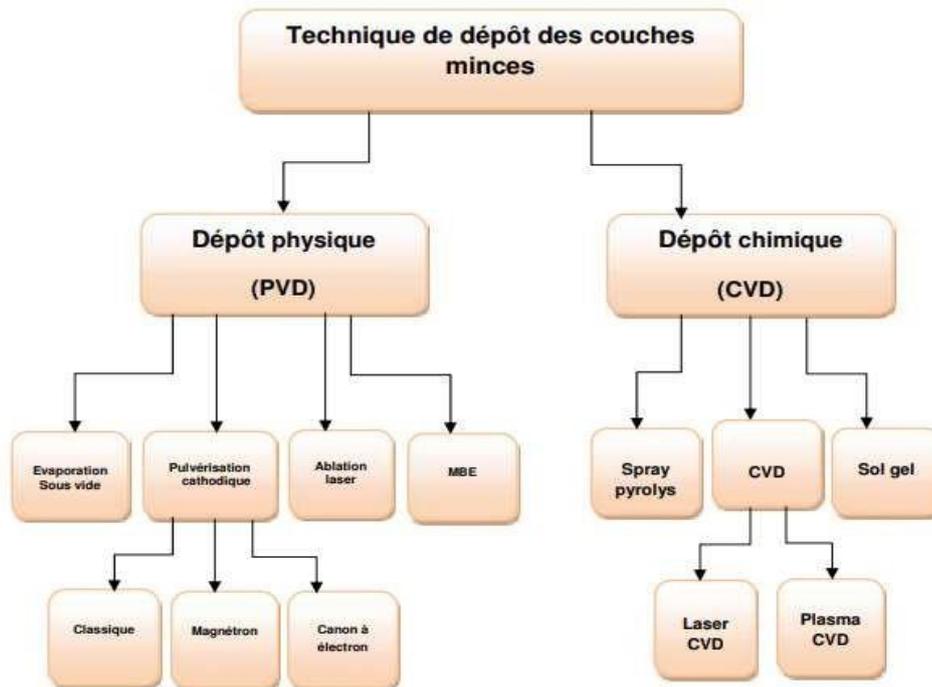


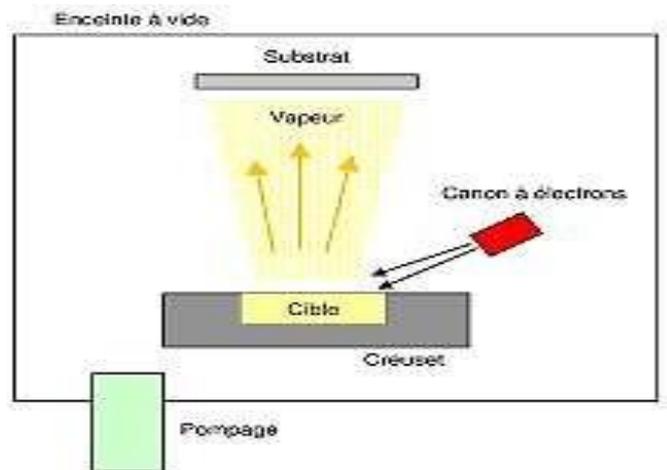
Figure I.1 : Techniques de dépôt dans les cellules solaires [36].

### I. 1 Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

#### L'évaporation thermique :

L'évaporation thermique est réalisée grâce à la sublimation du matériau qui est ensuite déposé dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température. Le matériau évaporé est déposé par condensation sur le substrat à recouvrir. Il existe plusieurs méthodes pour chauffer le matériau : à l'aide d'un filament réfractaire par effet Joule, par induction, et à l'aide d'un faisceau d'électrons intense et énergétique.

L'évaporation thermique est une méthode particulièrement appréciée car elle conduit à l'élaboration de matériaux très purs et d'autant plus que la pression pendant le dépôt est faible.

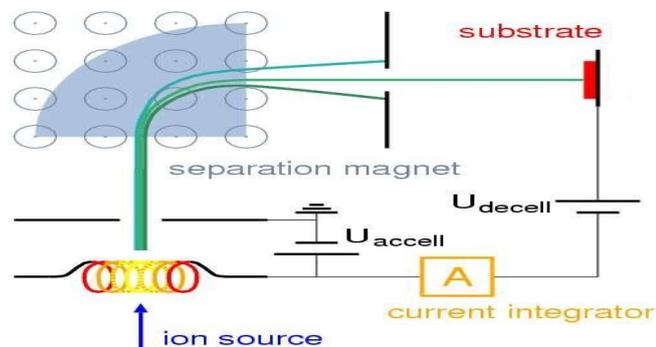


**Figure I.2 :** Schéma de principe du dépôt par évaporation L'évaporation est une technique très directive [37].

### Implantation d'ions :

C'est un procédé de haute énergie. Des espèces atomiques choisies sont ionisées puis accélérées dans un champ électrique à des énergies. Les principaux avantages de cette technique sont :

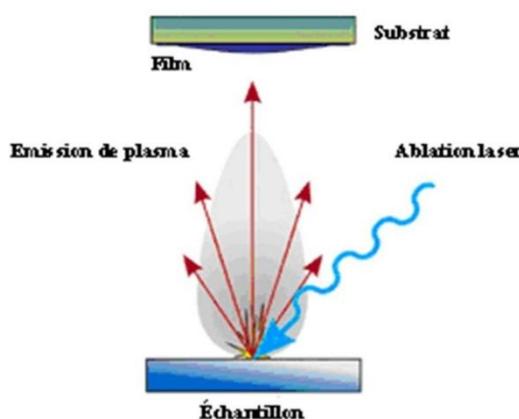
- Hautes températures non requises donc absence de distorsions thermiques.
- Absence d'interface donc pas de problème de décohésion.
- Espèces implantées finement dispersées.
- Peut être suivi et contrôlé électriquement pendant tout le traitement.



**Figure I.3 :** L'implantation ionique avec le séparateur de masse [38].

### **Ablation Laser :**

Il s'agit d'une évaporation sous vide, l'énergie étant apportée par l'impact d'un faisceau laser de forte intensité envoyé sur une cible constituée du matériau que l'on veut déposer sur le substrat. Un avantage considérable est de pouvoir utiliser des cibles de très petites dimensions, l'ablation se produisant sur une surface de quelques millimètres carrés, c'est un avantage très significatif pour les dépôts effectués dans un environnement ultravide. Comme le montre la figure qui suit :

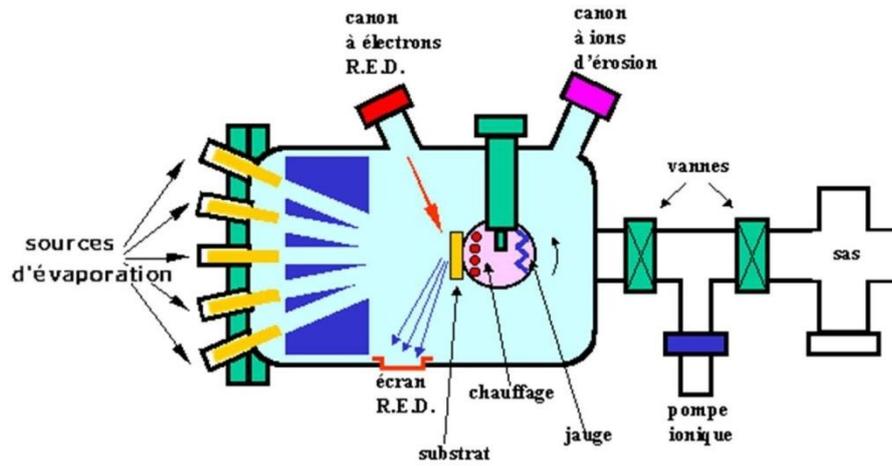


*Figure I.4 : schéma de l'ablation laser[39].*

### **Epitaxie par jets moléculaires (MBE: Moléculaire Beam Epitaxy) :**

La technique permet de réaliser des dépôts monocristallins et des homo-épitaxies (matériau A sur support A). Les basses températures d'épitaxie impliquent de travailler avec des vitesses lentes (quelques Å/s) afin de laisser le temps aux atomes arrivant à la surface de migrer par diffusion de la surface vers des sites cristallographiques.

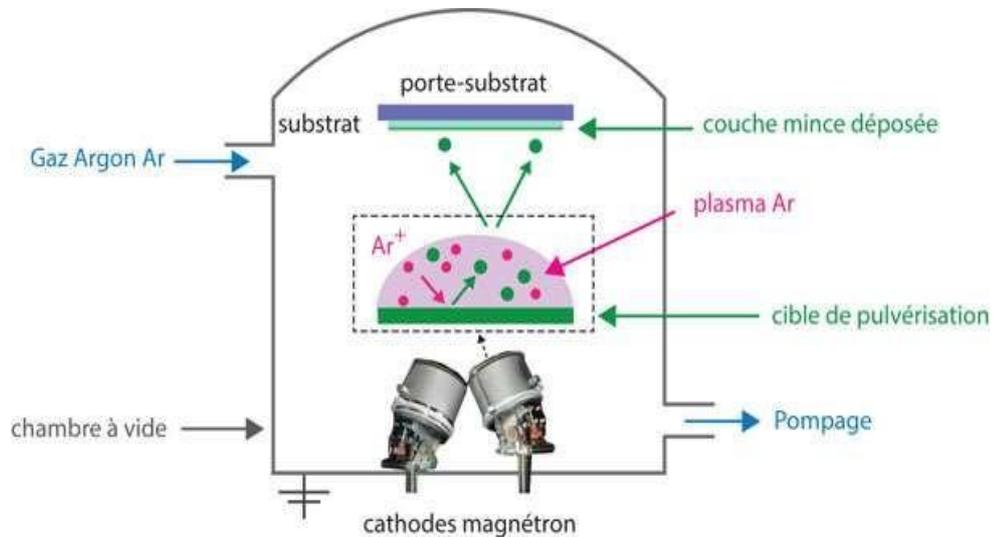
Néanmoins, cette technique permet de réaliser couramment des hétéro-épitaxies (dépôt B sur un support A différent), compte tenu des faibles températures d'épitaxie qui éliminent le mécanisme d'inter diffusion de A et B. De plus, elle présente l'avantage d'utilisation des techniques d'analyses afin d'obtenir des informations sur la structure, la topographie et la composition de la couche durant la croissance.



**Figure I.5:** schéma MBE Moléculaire Beam Epitaxy [40].

### **Pulvérisation cathodique (Sputtering) :**

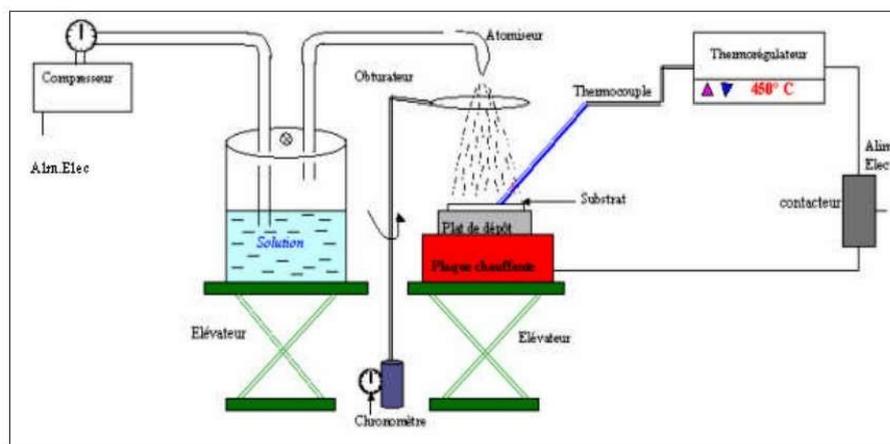
Le principe de base de la pulvérisation cathodique est de bombarder une cible (cathode) à l'aide d'un gaz neutre (en général l'argon) afin de pulvériser les atomes constituant la cible. Ces atomes pulvérisés vont alors se déposer sur le substrat qui joue le rôle d'anode. Une tension de quelques KV appliquée entre l'anode et la cathode entraîne une décharge électrique dans le gaz sous basse pression. Comme le montre la figure I.22 qui suit :



**Figure I.6 :** Système de pulvérisation cathodique [41].

### I. 1.6 Spray pyrolyse :

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais, Les revêtements en céramique et les poudres. A la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de films, le spray pyrolyse représente une méthode très simple et relativement rentable. C'est une technique extrêmement facile pour la préparation de couches de toute composition. La méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses, et la production de poudres, même des dépôts multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique.



*Figure I.24 : Figures de la technique de spray pyrolyse [41].*