

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université SAAD DAHLEB BLIDA-1

Faculté de Technologies
Département des énergies renouvelables



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique en :

Energies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Par :

- **BENMEBROUK Maria Sirine**
- **LEBOUALDJIA Iman**

Thème :

**Simulation et optimisation de la structure d'une cellule
solaire à base de GaInP par Comsol Multiphysics**

Soutenu devant le jury composé par :

Dr. AMROUCHE Badia	MCB	U. Blida	Présidente
Dr. BEDIA Asma	MCB	U. Blida	Examinatrice
Dr. MAZOUZ Halima	MCB	U. Blida	Promotrice

Juillet 2021



Dédicaces



À nos très chers parents, que Dieu les gardes et les protège.

A la famille BENMEBROUK

A la famille LEBOUALDJIA.

A tous ceux qui nous ont aidé, soutenu et conseillé tout en long des épreuves qui ont donné lumière à ce travail.



Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nos avoir donné la force et le courage. A la suite nous tenons à remercier vivement Dr. Halima MAZOUZ notre promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses informations, ses conseil et ses encouragements. Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Nos vifs remerciements à tous les enseignants du département des énergies renouvelables. Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Liste des tableaux	
Listes des figures	
Introduction général.....	1
Chapitre I : Etat De L'Art	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Etat de l'art.....	4
I.3 Jonction PN.....	13
I.4 Matériaux des IIIV.....	14
I.5 Description d'InGaP.....	15
I.5.1 Phosphore d'Indium (InP).....	15
I.5.2 Phosphore de Galium (GaP).....	16
I.6 Cellule photovoltaïque à base d'InGaP.....	16
I.7 Paramètres externes d'une cellule solaire.....	17
I.8 Conclusion.....	18
Chapitre II : Logiciel De Simulation COMSOL Multiphysics	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Aperçu sur le logiciel.....	20
II.3 Equation de base pour la simulation basé par le logiciel COMSOL Multiphysics	20
II.3.1 Equation de poisson.....	20
II.3.2 Equation de continuité.....	21
II.4 Etapes de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL.....	22
II.5 Présentation de la cellule étudier.....	27
II.5.1 Structure et dimension de la jonction.....	27
II.5.2 Paramètres de la structure.....	28
II.6 Conclusion.....	29
Chapitre III : Résultats et Discussion	
III.1 Introduction.....	31
III.2 Résultats et discussion.....	31
III.2.1 Effet de dopage sur la monojonction d'InGaP.....	32
III.2.1.1 Influence de variation de Nd.....	32
III.2.1.2 Influence de variation de Na.....	34
III.2.2 Effet d'épaisseur sur la monojonction d'InGaP.....	37
III.3 Conclusion.....	39
Conclusion général	41

Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base d'InGaP semble prometteur. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics-2D, pour étudier les performances des cellules solaires à base d'InGaP. Nous évaluons dans un premier temps, les paramètres externes pour une structure typique de jonction p-i-n. Par la suite nous nous intéressons au dopage et à l'épaisseur pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique de la structure.

Mots Clés: Cellule solaire, photovoltaïque, InGaP, simulation, COMSOL Multiphysics.

Abstract:

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to renewable energies and in particular the solar photovoltaic is increasing. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on InGaP seems promising. In this work of modeling and simulation, we use the software COMSOL Multiphysics-2D, to study the performances of the solar cells based on InGaP. We evaluate initially, the external parameters for a typical structure p-i-n junction. Thereafter we are interested by the doping and the thickness to investigate the influence of these ones on the electrical efficiency of the structure.

Keys Words: Solar cells, photovoltaic, InGaP, COMSOL Multiphysics.

ملخص:

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية، الرجوع الى الطاقة المتجددة و بالاحص الطاقة الشمسية الكهروضوئية اصبح اقوى، ولهذا تطوير جديد من الخلايا الضوئية القائمة على اساس زرنيخ غالسيوم الفوسفور تبدو واعدة.

في هذه النمذجة و المحاكاة، نستخدم برنامج كومسول متعدد الفيزياء، لدراسة اداء الخلايا الشمسية القائمة على زرنيخ غالسيوم الفوسفور. نقيم في البداية، تيار الدارة القصيرة، جهد الدارة المفتوحة، الطاقة القصوى، عامل الشكل والمردود الكهربائي للهيكال النموذجي. نهتم بعد ذلك بسمك و شوائب هذه الخلية الشمسية لدراسة مدى تأثير هذه الاخيرة على المردود الكهربائي.

كلمات مفتاحية: الخلايا الشمسية، الكهروضوئية، محاكاة، زرنيخ غالسيوم الفوسفور، كومسول متعدد الفيزياء

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
ac	Anode dimension
AM	Air mass (masse d'air)
ac	Anode dimension
As	Arséniure
α	Coefficient d'absorption
CFC	Cubique à faces centrées
CPV	Concentration Photovoltaïque
Dn	Coefficient de diffusion des électrons
Dp	Coefficient de diffusion des trous
Eg	Energie de gap
eV	Electron volte
ϵ_r	Permittivité relative
FF	Facteur de forme
G	Génération
Ga	Gallium
h	Constante de Planck
In	Indium
I _{cc}	Courant de court-circuit
J _{cc}	Densité de courant de court-circuit
J _n	La densité de courant d'électrons
J _p	La densité de courant des trous
j _u	Profondeur de jonction
k	Constante de Boltzmann
L _n	Longueur de diffusion des électrons
L _p	Longueur de diffusion des trous
λ	Longueur d'onde
MOCVD	Dépôt organique métallique en phase vapeur
μ_n	Mobilité électronique
μ_p	Mobilité des trous
NA _{pmax}	Dopage maximum de type p
ND _n	Dérive de type n de la couche dérive
ND _{nmax}	Dopage maximum de type n

n_i	Concentration intrinsèque
η	Rendement
p	Phosphore
PL	Photoluminescence
P_{max}	Puissance maximale
ρ	Densité de charge d'espace
Ψ	Potentiel électrostatique
q	Charge élémentaire
R	Recombinaison
R	Réfectivité contact métal
Si	Silicium
t	Température ambiante
τ	Durée de vie
τ_N	Durée de vie des électrons
τ_p	Durée de vie des trous
v_a	Tension appliquée
V_{co}	Tension à circuit ouvert
V_{thn}	Vitesse thermique des électrons
V_{thp}	Vitesse thermique des trous
ν	Fréquence de la lumière
X	Dimension de diode
x	Concentration de l'indium dans In_xGa_{1-x}
Y	Dimension de diode
ZCE	Zone de charge d'espace

Liste Des Figures

Fig I.1	Une section schématisée de la cellule d'InGaP.....	5
Fig I.2	Caractéristiques I-V.....	5
Fig I.3	Une section schématisée d'une cellule solaire InGaP/GaAs.....	7
Fig I.4	Caractéristique (I-V) d'une mono jonction In _{0.5} Ga _{0.5} P fabriqué dans un substrat de GaAs.....	7
Fig I.5	Courbe I-V de la cellule InP.....	8
Fig I.6	Caractéristique J-v résultats de la simulation.....	8
Fig I.7	Caractéristiques I-V sous une irradiation de 1000W/m ²	9
Fig I.8	Caractéristique I-V de la cellule GaAs mesuré à NERL.....	9
Fig I.9	structure schématisé d'une cellule solaire à base d'InGaP cultivée sur un substrat de GaAs.....	10
Fig I.10	Courbes I-V de cellules solaires InGaP cultivées à divers taux de croissance et températures. Les V _{co} diminuent à mesure que la température de croissance augmente et le taux de croissance diminue de 1.0 à 0.5µm/h.....	10
Fig I.11	La couche supérieure de la cellule.....	11
Fig I.12	La couche inférieure de la cellule.....	11
Fig I.13	La caractéristique I-V de model.....	12
Fig I.14	Structure optimisé de la cellule solaire à base d'InGaP.....	13
Fig I.15	Les courbes de (I-V) et (P-V) pour la structure optimisé d'InGaP.....	13
Fig I.16	Représentation d'une jonction PN.....	14
Fig I.17	Tableau périodique des éléments.....	15
Fig I.18	Structure cristalline d'InP.....	16
Fig I.19	Caractéristique I-V.....	18
Fig II.1	Explication schématique de l'équation de continuité dans l'état permanent pour les cellules solaires.....	21
Fig II.2	La fenêtre qui permette de choisir les modèles physiques.....	22
Fig II.3	Tableau d'expression liée au matériau InGaP.....	23
Fig II.4	Tableau des constants liée au matériau InGaP.....	23
Fig II.5	La structure et la géométrie proposée pour le matériau.....	24
Fig II.6	La fenêtre qui permet d'introduire les conditions aux limites.....	24
Fig II.7	La fenêtre qui permet d'introduire les conditions aux domaines.....	25
Fig II.8	La structure de la cellule après le maillage.....	25

Fig II.9	Logiciel entrain d'exécuter.....	26
Fig II.10	Intégration de température de la jonction après l'exécution.....	26
Fig II.11	La région P et N du modèle simulé.....	27
Fig III.1	La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule InGaP.....	31
Fig III.2	Influence de la variation de N_{Dn} sur la caractéristique I-V.....	33
Fig III.3	Influence de variation de dopage N_{Dn} sur le courant de court-circuit.	33
Fig III.4	Influence de la variation de N_{Apmax} sur la caractéristique I-V.....	35
Fig III.5	Influence de variation de dopage N_{Dn} sur le courant de court-circuit.	35
Fig III.6	Influence de la variation d'épaisseur sur la caractéristique I-V.....	37
Fig III.7	Caractéristique I-V de la cellule optimisée.....	39

Liste Des Tableaux

Tableau II.1	Paramètres de la cellule InGaP.....	28
Tableau III.1	Performances d'une cellule solaire à base d'InGaP.....	32
Tableau III.2	Caractéristiques de cellule solaire d'InGaP.....	34
Tableau III.3	Caractéristiques de cellule solaire d'InGaP.....	36
Tableau III.4	Caractéristiques de cellule solaire d'InGaP.....	37
Tableau III.5	Paramètres optimum ayant donné $\eta=15.99\%$	38

Introduction Général

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

Actuellement, la filière qui est largement dominée par la technologie est le silicium cristallin avec près de 93% de la production mondiale en 2016. La production des cellules solaires à base de silicium reste coûteuse et nécessite une importante quantité de matériau. En outre, ces cellules en silicium présentent actuellement en laboratoire un rendement maximal de 25,6%, ce qui est très proche de la limite théorique maximale pour une cellule simple jonction. Par conséquent, le besoin d'énergie photovoltaïque a poussé les travaux de recherche vers l'utilisation d'autres matériaux alternatifs, bien que cela ne signifie nullement l'arrêt des recherches dans la filière silicium.

Aujourd'hui, ces recherches sont très nombreuses et très variées et se focalisent principalement sur les technologies à couches minces, parmi lesquelles on peut trouver notamment celles à base des matériaux III-V, qui sont très prometteuses en termes d'efficacité. Mais, en laboratoire, les records de rendement sont enregistrés sur des cellules solaires multi-jonctions.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'alliage de Phosphore de Gallium Indium (InGaP). Ce matériau est devenu au cours de ces dernières années le plus prometteur pour les applications optoélectroniques, notamment photovoltaïques. En effet, l'InGaP possède de nombreux avantages, à savoir, une bande d'énergie interdite directe qui peut couvrir une grande partie du spectre solaire en modifiant le taux d'indium, un coefficient d'absorption élevé et une très bonne résistance aux radiations. D'où, nous avons la possibilité de concevoir, plus aisément, les cellules solaires à multi-jonction. Malgré ces nombreux avantages, les enjeux technologiques tels que le manque de substrat adapté au cours de la procédure de croissance épitaxiale, la difficulté de réaliser le dopage de type P, ou encore, une incorporation d'indium

relativement faible, sont autant des facteurs principaux qui font obstacle au développement de la filière InGaP. Notre attention s'est portée, tout particulièrement, sur le ternaire InGaP qui est plus performant que le silicium. Néanmoins, de nombreux problèmes sur ce dispositif restent encore à résoudre.

Notre but principal dans ce travail est l'identification des différents paramètres physiques et technologiques qui influent actuellement sur les cellules photovoltaïques à base d'InGaP en se focalisant surtout sur l'amélioration du rendement de conversion de ce dispositif. Pour cela, une étude de simulation et de conception d'une structure spécifique de cellule solaire à base de InGaP a été menée dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics, pour étudier les performances des cellules solaires à base d'InGaP.

Notre mémoire comporte trois chapitres. Nous avons commencé dans le premier chapitre par présenter un historique et un état de l'art des cellules photovoltaïques réalisées jusqu'à nos jours.

Le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une structure à monojonction InGaP sous environnement COMSOL Multiphysics, nous avons passé en revue les différentes étapes de simulation.

Dans le dernier et troisième chapitre nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics dans le but d'optimiser le rendement électrique d'une conception spécifique d'une structure à monojonction InGaP. Nous avons par la même occasion, déterminé l'influence des paramètres physiques et technologiques, tels que le dopage et l'épaisseur, sur les performances du dispositif.

Le travail a été terminé par une conclusion générale.

Chapitre I

ETAT DE L'ART

I.1.Introduction

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût.

Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps. Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à présenter quelques recherches et études sur les cellules solaires à base de matériaux « InGaP » pendant ces dernières années.

I.2. État de l'art

Les articles traités durant notre recherche bibliographique, nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des cellules binaires (GaAs), ternaires (InGaP) et les triples jonctions (GaInP/GaAs/Ge), qui sont les plus prometteurs dans le domaine spatial et le CPV, grâce à leur large utilisation du spectre solaire.

En 1994, Takamoto et al., ont tenté de fabriquer une cellule à mono-jonction $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ très efficace sur un substrat GaAs en utilisant un procédé de dépôt chimique en phase vapeur organométallique. Une durée de vie utile des porteurs minoritaires supérieure à 10 ns a été obtenue dans des meilleures conditions de croissance, et une efficacité de conversion maximale de 17,4% a été obtenue.

Des cellules solaires $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ avec des grandes bandes interdites d'environ 1,9 eV ont été utilisées pour les cellules supérieures des cellules solaires à multi-jonction. Les cellules solaires InGaP / GaAs ont été développées dans divers laboratoires et ont un rendement élevé de plus de 27%. Leur objectif est de développer une cellule solaire InGaP / Si qui devrait offrir un rendement de conversion élevé de plus de 35%. Où l'efficacité d'une cellule InGaP plus élevée dans des conditions AM1.5 est estimée à plus de 20%. Une cellule InGaP fabriquée sur un substrat GaAs a rapporté une efficacité de 15,3% dans des conditions AM0. Ils ont

essayé d'augmenter l'efficacité de conversion des cellules solaires InGaP avec une transition en améliorant la structure cellulaire. [1]

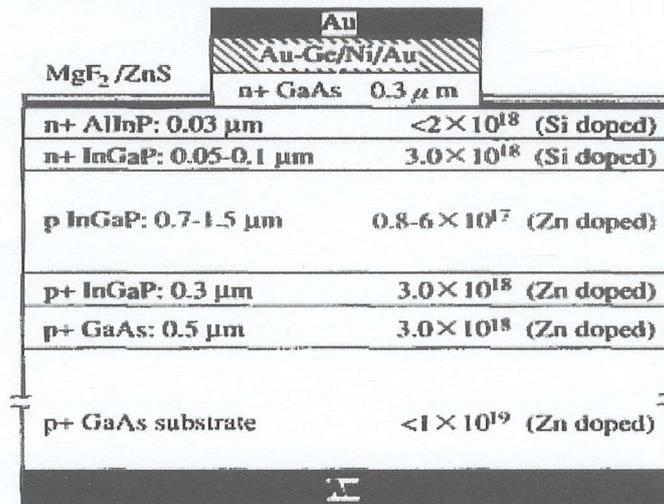


Fig.I.1 : Une section schématisée de la cellule d'InGaP. [1]

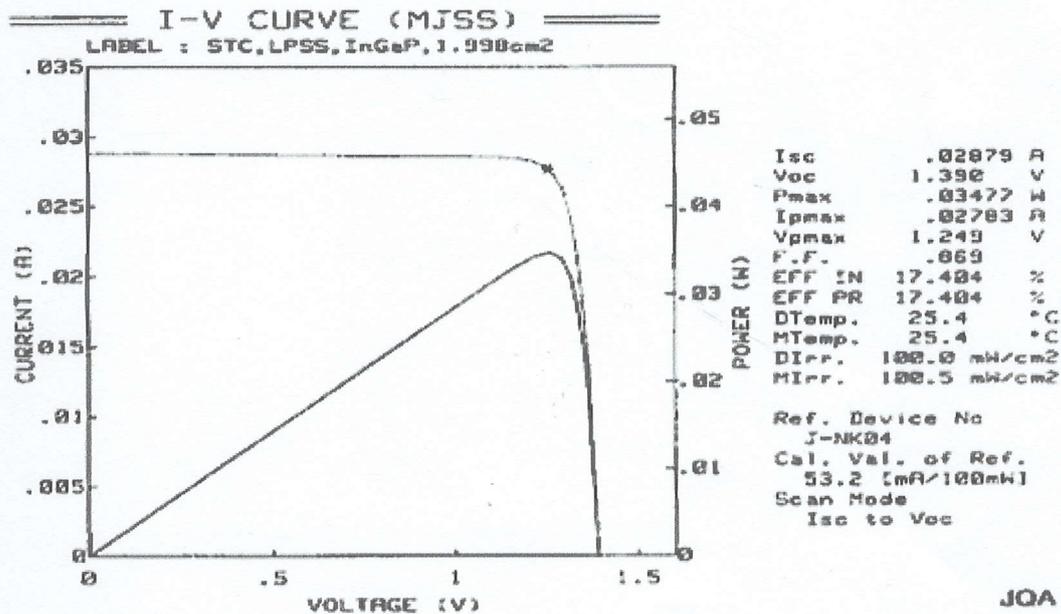


Fig.I.2 : Caractéristiques I-V [1]

En 1997, Ming-Ju Yang et autre, ont utilisé une façon d'évaluer la durée de vie des porteurs minoritaires consiste à utiliser la mesure de la photoluminescence (PL), qui comprend l'auto-absorption. L'intensité de PL à température ambiante est théoriquement analysée pour les (bulk crystals) et un dispositif avec une configuration de jonction N⁺-P, basé sur un modèle unidimensionnel. Des analyses de photoluminescence de cellules solaires In_{0.5}Ga_{0.5}P cultivée

sur substrats GaAs et Si ont été réalisées par MOCVD (dépôt organique métallique en phase vapeur) et comparées aux propriétés des cellules solaires $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, substrats GaAs avec un rendement de 18,5%.

L'InGaP avec une bande interdite d'environ 1,9 eV est le matériau le plus prometteur pour les cellules supérieures des cellules solaires à jonctions multiples avec une efficacité allant jusqu'à 35%. Une cellule solaire monolithique InGaP / GaAs avec 2 jonctions et un rendement de 29,5% a été rapportée, et des cellules InGaP / GaAs ont également été fabriquées avec succès sur des substrats de Ge poly-cristallin faible cout. Afin de produire des cellules InGaP / GaAs et InGaP / GaAs / Si avec un rendement élevé, il est important de caractériser le matériau de cellule InGaP supérieur et d'améliorer sa qualité. Le but de cette étude est de caractériser les cellules InGaP supérieures et d'utiliser les informations obtenues pour améliorer leur efficacité de conversion. L'efficacité d'une cellule solaire dépend fortement de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires « L », où « τ » est la durée de vie des porteurs minoritaires et « D » est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires. « τ » est le paramètre le plus sensible aux matériaux, qui varie considérablement. Cependant, « D » est structurellement insensible aux semi-conducteurs non dégénérés. Par conséquent, « L » est également un paramètre sensible au matériau. Les performances des cellules solaires sont principalement influencées par la durée de vie des porteurs minoritaires dans la couche active des cellules solaires. L'intensité « PL » en régime permanent d'un dispositif ou d'un matériau a été utilisée comme mesure de la qualité et de la durée de vie du dispositif, car l'intensité « PL » des couches actives d'une cellule solaire est sensible à la durée de vie utile des porteurs minoritaires. Pour la configuration de cellule solaire à homo-jonction n^+p , la région de type n, la région d'appauvrissement et la région de type p ont des réponses « PL » différentes.

Cet article a proposé un moyen d'évaluer la durée de vie des porteurs minoritaires dans la cellule InGaP supérieure en utilisant un modèle unidimensionnel. En comparant les propriétés des cellules InGaP supérieures avec l'analyse de photoluminescence, les corrélations entre la durée de vie des porteurs minoritaires et les propriétés des cellules InGaP fabriquées sur des substrats GaAs et Si ont été clarifiées. Des cellules solaires $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ ont été produites sur un substrat de GaAs très efficaces avec un rendement de 18,5%, ce qui améliore la durée de vie des porteurs minoritaires. [2]

Au-Ge/Ni/Au		
	n ⁺ -GaAs	MgF ₂ /ZnS AR
n ⁺ - AlInP	0.03 μm	3 × 10 ¹⁸ cm ⁻³
n ⁺ - InGaP	0.05 μm	3 × 10 ¹⁸ cm ⁻³
p - InGaP	1.5 μm	1.5 × 10 ¹⁷ cm ⁻³
p ⁺ - InGaP	0.3 μm	3 × 10 ¹⁸ cm ⁻³
p ⁺ - GaAs	0.5 μm	3 × 10 ¹⁸ cm ⁻³
p ⁺ - GaAs	Substrate	1 × 10 ¹⁹ cm ⁻³
Au		

Fig.I.3 : Une section schématisé d'une cellule solaire InGaP/GaAs [2]

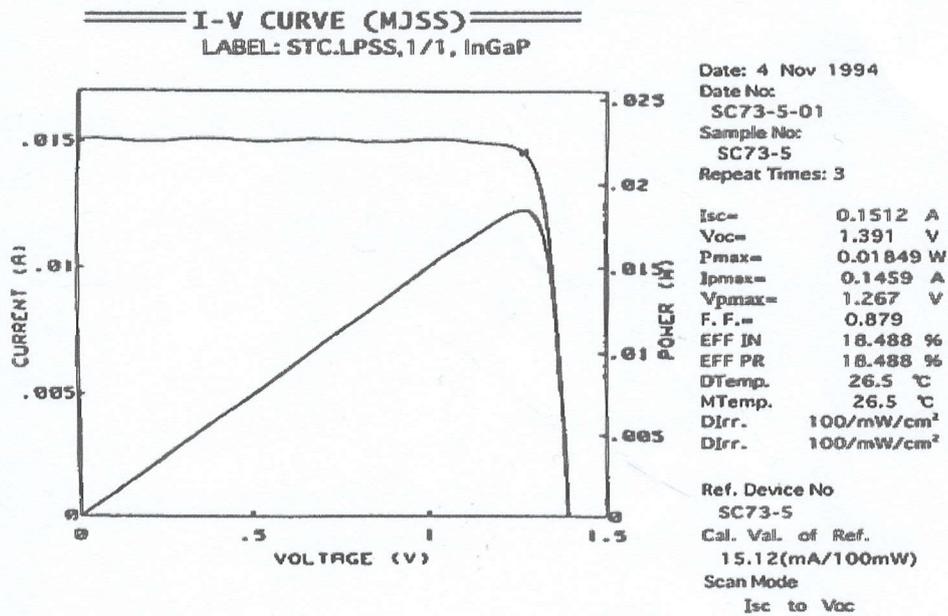


Fig.I.4 : Caractéristique (I-V) d'une mono jonction In_{0.5}Ga_{0.5}P fabriqué dans un substrat de GaAs [2]

En 1998, M.F. Vilela et autre, ont basé sur les problèmes que rencontrent les cellules InP dans l'espace et ont réalisé une cellule InP avec un substrat de Si, pour résoudre la résistance au rayonnement supérieur. [3]

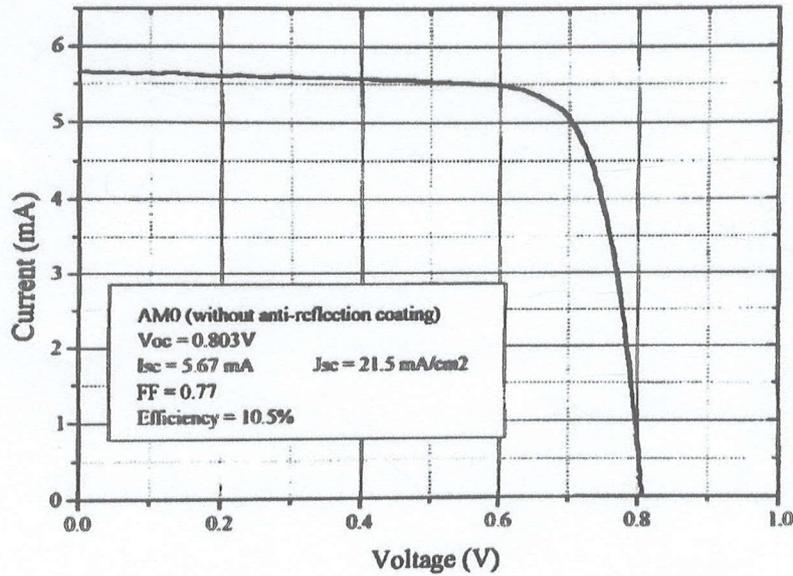


Fig.I.5 : Caractéristique I-V de la cellule InP. [3]

En 2003, une simulation numérique a été réalisée par King et autre, sous les conditions AM1.5, 1000W/m², 25°C. cette simulation sert à faire une comparaison entre deux différents structures : lattice mismatched (LMM) et lattice matched (LM) [King]. Les résultats de la simulation sont détaillés dans la figure.I.6.

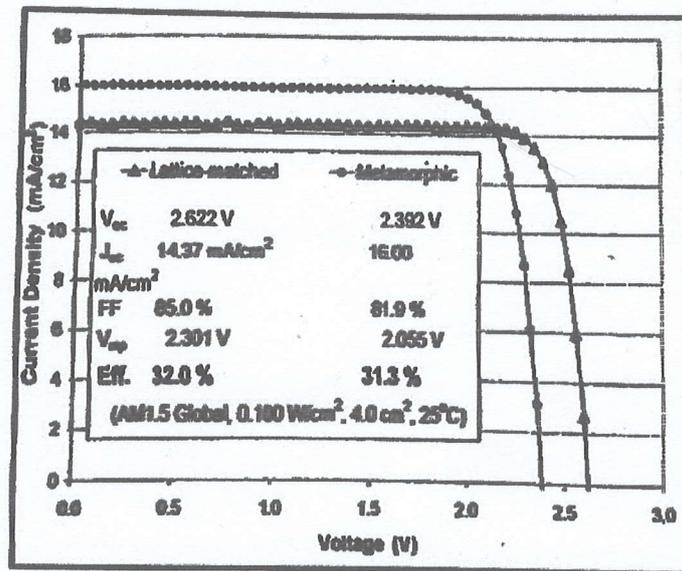


Fig.I.6 : Caractéristique J-V résultats de la simulation. [4]

En 2011, Brendan M. Kayes et autre, ont réalisé une cellule solaire mono-jonction GaAs, sous une température de 24.7°C et une irradiation de 1000W/m² et une surface de 0.9989

cm², ils ont obtenu un rendement de 2736%. [5]. La figure.I.7 présente la caractéristique I-V ainsi que les paramètres externes.

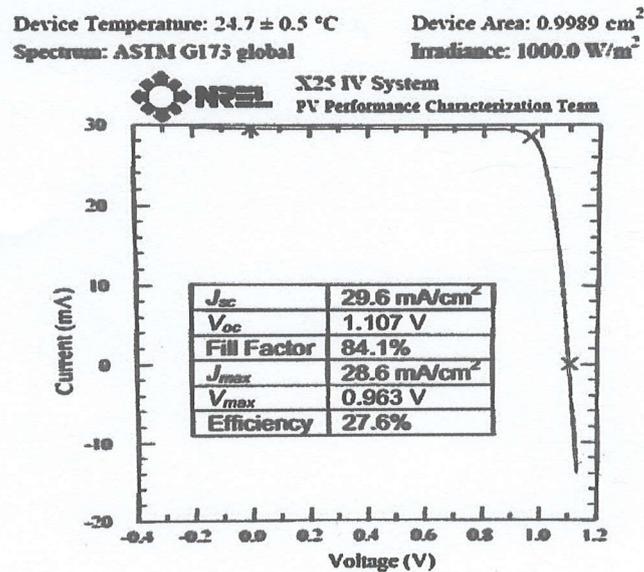


Fig.I.7 : Caractéristiques I-V sous une irradiation de 1000 W/m². [5]

En 2012, L.S. Mattos et autre, ont développé une technologie d'interconnexion sans fil, par laquelle ils forment une feuille ou une matrice de cellules interconnectées qui peuvent prendre pratiquement n'importe quelle taille, forme et caractéristiques électriques, cette technologie a été testé sue une cellule GaAs [6]. Les caractéristiques de la cellule sont présentées dans la figure.I.8.

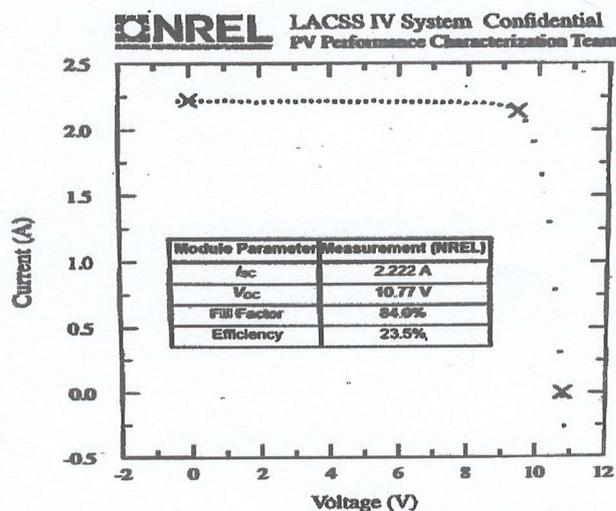


Fig.I.8 : Caractéristique I-V de la cellule GaAs mesuré à NREL. [6]

En 2012, T. Sugaya et autre, ont rapporté les conditions de croissance des films épitaxiaux InGaP et les caractéristiques de la cellules solaire InGaP sur un substrat GaAs fabriqué par faisceau moléculaire à source solide. Les mesures de photoluminescence et de diffraction des rayons X indiquent qu'une température de croissance de 480°C est appropriée pour réaliser une croissance épitaxiale InGaP de haute qualité avec une épitaxie par faisceau moléculaire à source solide. La tension en circuit ouvert des cellules solaires InGaP développées à 1.0µm/h est supérieure à celle de la cellule développée à 0.5µm/h. Le rendement de conversion le plus élevé est obtenu pour une cellule solaire InGaP cultivée à 480°C et un taux de croissance de 1µm/h. [7]

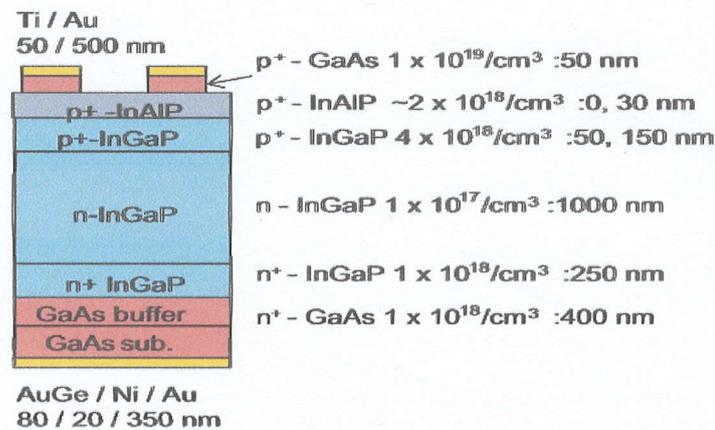


Fig.I.9 : Structure schématisé d'une cellule solaire à base d'InGaP cultivée sur un substrat de GaAs. [7]

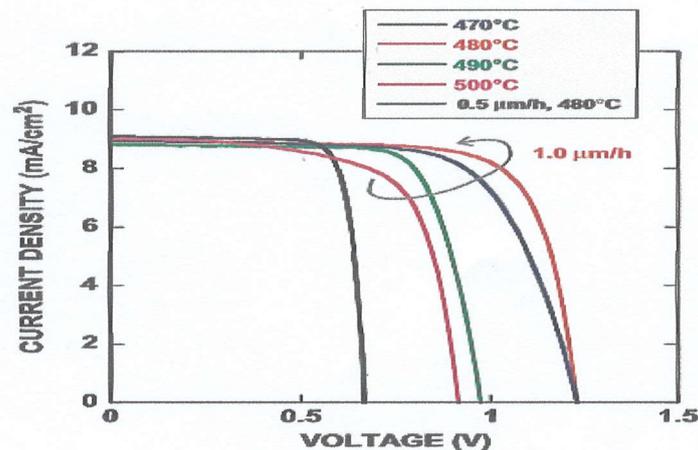


Fig.I.10 : Courbes I-V de cellules solaires InGaP cultivées à divers taux de croissance et températures. Les Vco diminuent à mesure que la température de croissance augmente et le taux de croissance diminue de 1.0 à 0.5µm/h. [7]

D'après J.P. Dutta et autre en 2016, la présence et la performance de la couche tunnel jonction et (BSF), sont la raison principale d'un rendement élevé de la cellule solaire multi-jonction.

Dans son expérience, il s'est focalisé sur la bonne sélection des matériaux pour la jonction tunnel qui va parallèlement avec l'introduction d'une nouvelle couche supérieure (BSF), tout en utilisant dans cette dernière, le programme de simulation ATLAS TCAD.

Une variété de paramètres comme la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{cc}), facteur de forme et rendement sont obtenus de la cellule proposée et comparés avec les résultats publiés pour évaluer l'exactitude de cette étude. D'autres paramètres, comme le taux de photo-génération, réponse spectrale, potentiel développé ainsi que le champ électrique sont déterminés. La courbe I-V et la courbe de puissance sont évaluées pour le modèle proposé. Pour cette structure proposée $V_{oc}= 2.668$ V, $J_{sc}=18.2$ mA/cm², FF=88.29% et $\eta=40.879\%$ sont obtenues sous un éclairage de 1000 W/m² dans des conditions AM1.5. Les résultats de simulation sont expliqués à partir de l'élaboration. [8]

Window	InAlGaP	p-type
Emitter	InGaP	p-type
Base	InGaP	n-type
BSF	InAlGaP	n-type
BSF	InAlGaP	n+ -type

Window	InGaP	p-type
Emitter	GaAs	p-type
Base	GaAs	n-type
BSF	InAlGaP	n-type

Fig.I.11 : La couche supérieure de la cellule Fig.I.12 : La couche inférieure de la cellule

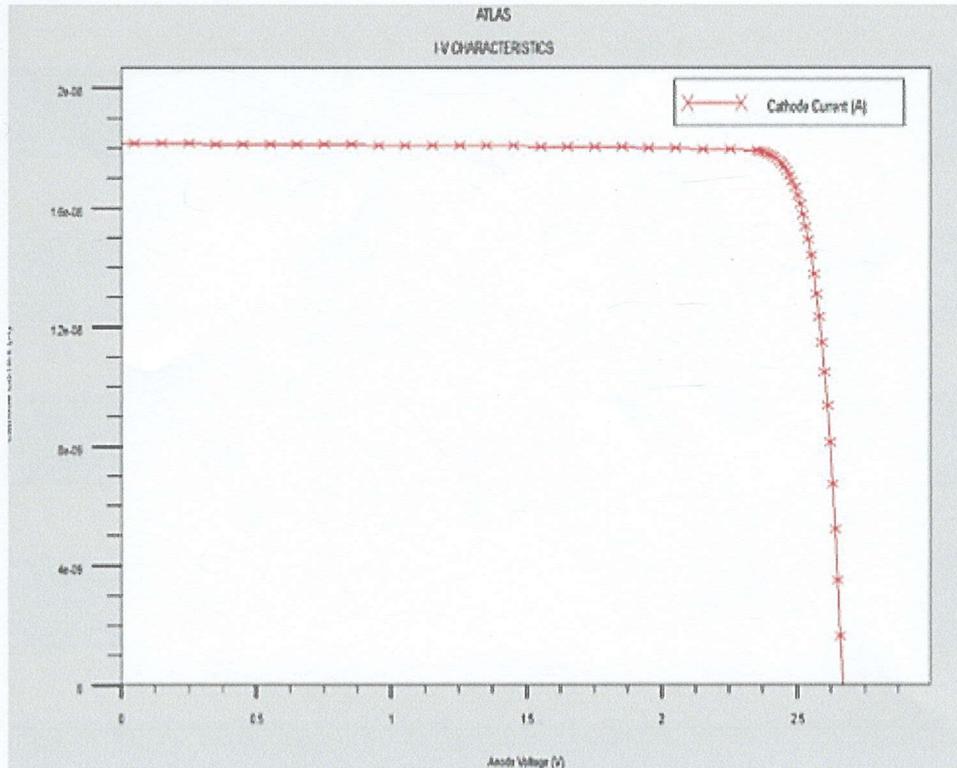


Fig.I.13 : La caractéristique I-V de model. [8]

D'après Ahmed Benlekhdim en 2018, pour optimiser une cellule solaire mono-jonction à base d'InGaP, des hautes caractéristiques photovoltaïques sont proposé. Les caractéristiques photovoltaïques obtenu par la simulation, inclus le graph de densité de courant (J-V), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le photocourant (I_{cc}), facteur de forme FF, rendement η , la réponse spectrale et le taux de photo génération, prenant sous considération des paramètres structurales différentes. Les résultats sont supérieurs aux expériences anciennes des cellules solaires multi jonction à base d'InGaP, en parlant des valeurs de η et FF. En commençant avec l'InGaP mono-jonction, les résultats sont potentiellement utiles pour des futurs renforcements des multi-jonctions à base des métaux des III-V qui implique l'InGaP sur la couche d'avant. Un rendement de 18.55% a été obtenue dans les conditions AM1.5 toute en utilisant le model numérique TCAD l'outil SILVACO ATLAS. [9]

Window	n+	AlGaAs	5e+019 /cm ³	0.01 um
Emitter	N	InGaP	4.64e+017 /cm ³	0.17 um
Base	P	InGaP	1e+017 /cm ³	0.63 um
BSF	p+	InGaP	5e+019 /cm ³	0.01 um
Buffer	p+	AlGaAs	1e+018 /cm ³	0.03 um

Fig.I.14 : Structure optimisé de la cellule solaire à base d'InGaP. [9]

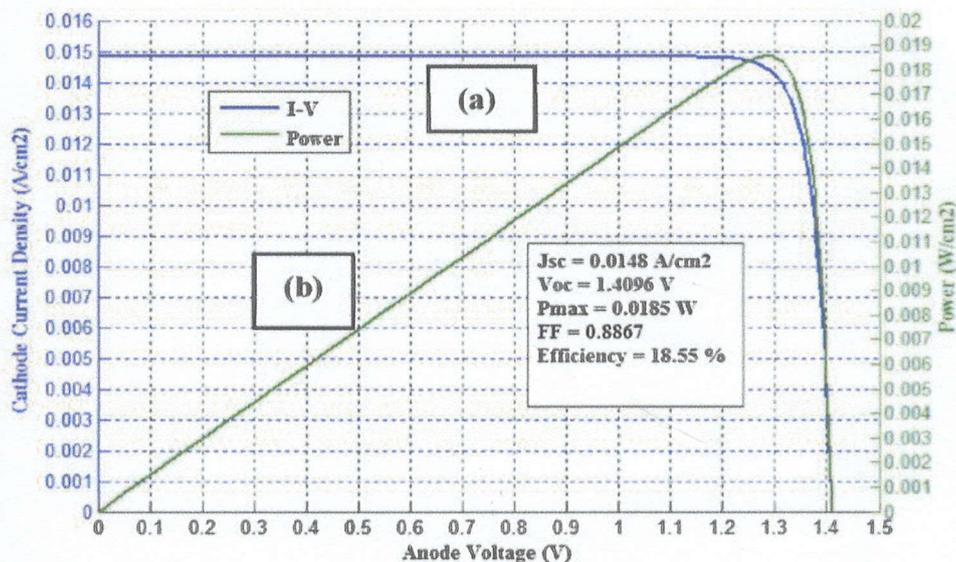


Fig.I.15 : Les courbes de (I-V) et (P-V) pour la structure optimisé d'InGaP. [9]

I.3 Jonction PN

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteur. Une jonction PN est constitué de deux zones respectivement dopées Pet N et juxtaposées d'une façon que nous supposerons abrupte (fig.16), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation

d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charge négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charge fixes positives et négatives, qu'on appelle la zone de charge d'espace (ZCE). Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. [10]

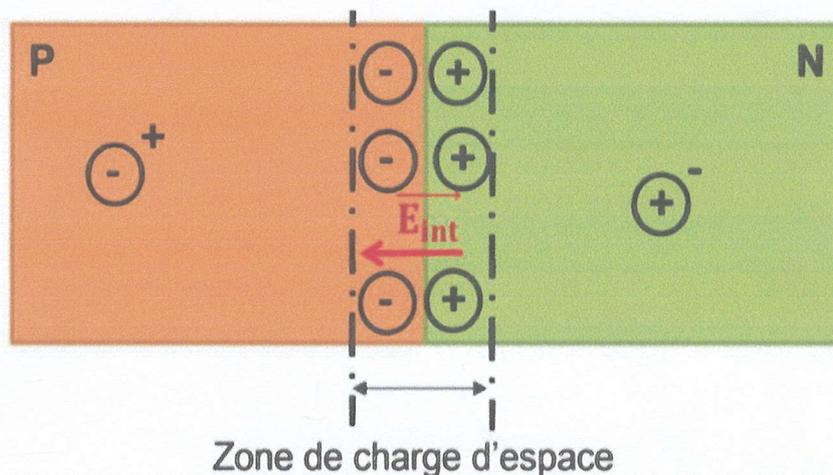


Fig.I.16 : Représentation d'une jonction PN.

I.4 Les Matériaux III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V de la classification périodique de Mendeleïev. Ils sont obtenus, soit par tirage de monocristaux massifs, soit par croissance épitaxiale de couches minces [11].

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

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en général) sont réalisés en

silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

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

Le tableau périodique des éléments est présenté ci-dessous, avec les groupes IIIA et VA soulignés par une ligne rouge pointillée. Les éléments sont classés par périodes (1 à 7) et groupes (1 à 18). Les lanthanides et actinides sont indiqués en bas.

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

Fig.I.17 : Tableau périodique des éléments.

I.5 Description d'InGaP

Le phosphure d'indium et de gallium, également appelé phosphure d'indium de gallium, est un matériau semi-conducteur composé de phosphore, de gallium et d'indium. C'est un alliage de phosphure de gallium et de phosphure d'indium. Le phosphure d'indium de gallium a tendance à se développer comme un matériau ordonné plutôt qu'un alliage vraiment aléatoire. [12]

I.5.1 Le phosphure d'indium (InP)

L'InP est un semi-conducteur binaire constitué d'une structure cubique à faces centrées (cfc), de chacun des deux composants imbriquées et décalées d'un vecteur $(1/4 : 1/4 : 1/4)$, autrement dit, une maille cfc de l'un des constituants dont quatre des huit sites tétraédriques

sont occupés par l'autre constituant. Il possède donc une géométrie tétragone où chaque ion d'indium est lié à quatre ions phosphore. Les propriétés physiques de l'InP telles que : l'énergie de gap 1,344 eV, la mobilité des électrons $5400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, la densité 4.81 g/cm^3 , le point de fusion 1062 C° , la conductivité thermique $0.68 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$, l'indice de réfraction (de 3,1 à 3,55), nous permettent de l'utiliser en optoélectronique, comme par exemple dans la fabrication des diodes laser. InP est aussi utilisé comme substrats pour la croissance par épitaxie de composés optoélectroniques à base d'arséniure d'indium-gallium (InGaAs) [13].

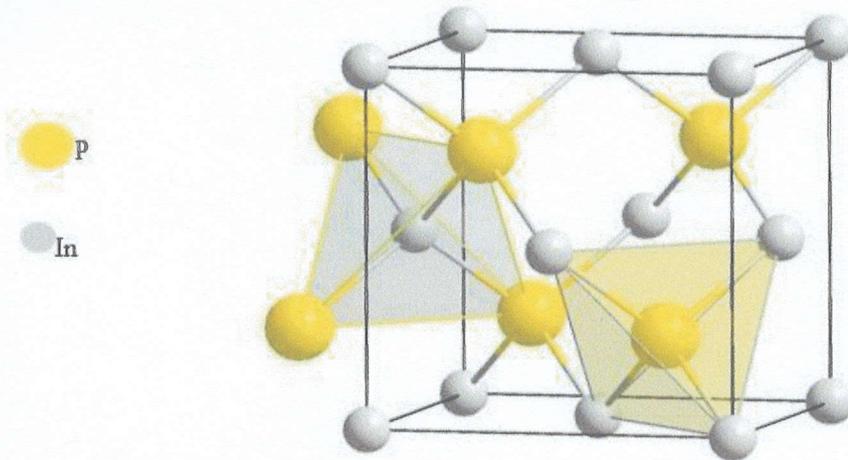


Fig.I.18 : Structure cristalline d'InP.

I.5.2 Le phosphore de gallium (GaP)

Le GaP est un matériau semi-conducteur composé de phosphore et gallium. Il est inodore et insoluble. Les propriétés essentielles de GaP sont en général : l'énergie de gap $2,26 \text{ eV}$, la masse molaire $100,697 \text{ g/mol}$ le point de fusion 1477 C° , la densité $1,138 \text{ g/cm}^3$, la mobilité des électrons $250 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, la conductivité thermique $1,1 \text{ W/k.cm}$ et l'indice de réfraction compris entre 3,02 et 3,45. le tellure est utilisé comme matériaux dopant pour produire phosphure de gallium de type N et le zinc comme dopant pour produire du phosphure de gallium de type P [14].

I.6 Cellule photovoltaïque à base d'InGaP

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multi-jonctions, sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaP, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut

rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire.

I.7 paramètres externe d'une cellule solaire

Le comportement des cellules solaires est caractérisé par ces paramètres externes et une caractéristique courant-tension :

- **La tension a circuit-ouvert V_{co}** : elle correspond à la tension en circuit ce qui veut dire $I=0$. Elle est liée aux caractéristiques de la jonction électronique et aux matériaux.
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : il correspond à l'intensité du courant de court-circuit c'est-à-dire $V=0$. Il est directement proportionnel à l'énergie du rayonnement, à la température ambiante et à la surface de la cellule.
- **La puissance maximal P_m** : c'est la puissance maximale de sortie correspondant au point dont lequel le produit de la tension et l'intensité du courant est maximal, elle est donnée par : $P_{max} = V_m \cdot I_m$ (1.1)
- **Le facteur de forme FF** : c'est le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule et le produit I_{cc} et V_{co} , il est exprimé par :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.2)$$

- **Le rendement η** : le rendement mesure le taux de conversion énergétique, il est donné par : $\eta = \frac{P_n}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}}$ (1.3)
- **La puissance crête P_c** : elle représente la puissance électrique maximale de sortie sous des conditions standard (STC : Standard Test Condition), une irradiation de $1000W/m^2$, une température de $25^\circ C$ et un spectre AM1.5.
- **Caractéristique I-V** : chaque cellule solaire est caractérisée par une caractéristique courant en fonction de tension ou densité de courant en fonction de la tension.

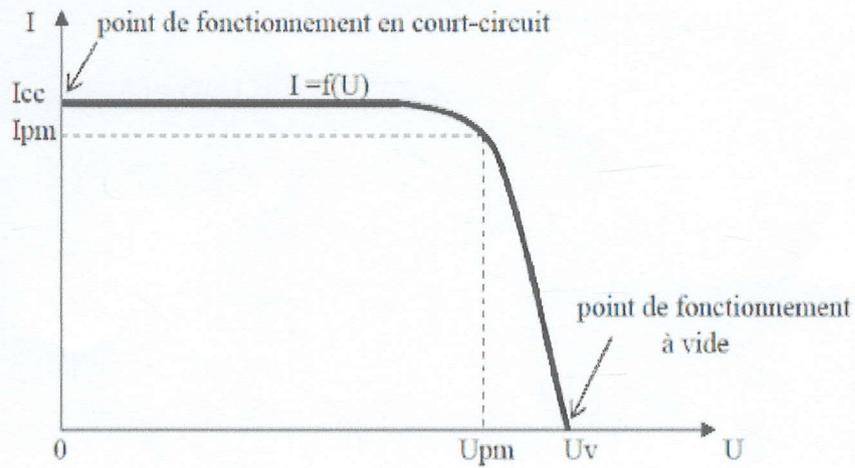


Fig.I.19 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire.

I.8 Conclusion

Ce chapitre résume le développement et l'avancement technologique dans le domaine photovoltaïque et plus précisément la technologie des mono-jonctions et multi-jonction, les informations collectées seront comparées aux résultats obtenus durant notre simulation dans le chapitre III.

Chapitre II

LOGICIEL DE MODELISATION NUMERIQUE COMSOL MULTIPHYSICS

II.1 Introduction

Avant de fabriquer une cellule solaire, il est utile de connaître au préalable l'ordre de grandeur des paramètres électriques et optiques des différentes couches la constituant, pour lesquelles on peut obtenir les meilleures performances, c'est-à-dire une conversion maximale d'énergie. La simulation a été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physique et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres qui influent sur le rendement.

C'est dans cette approche, et dans le cadre de nos recherches sur les cellules photovoltaïques, que nous nous sommes intéressés à optimiser un type particulier de cellules solaires à base des matériaux des III-V : La cellule mono-jonction InGaP. Le but de notre travail est de simuler cette cellule en utilisant le logiciel de simulation Comsol Multiphysique qui est bien adapté à ce genre de cellules.

II.2 Aperçu sur logiciel :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assure des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires de la suite de produits.

II.3 Equations de base pour la simulation par COMSOL Multiphysics

II.3.1 Equation de poisson

C'est l'équation qui relie le potentiel électrostatique (Ψ) à la densité de charge d'espace (ρ). En généralisant l'équation II.1 pour différentes dimensions on obtient :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{Où } \boldsymbol{\varepsilon} = -\nabla \Psi \quad (\text{II.1})$$

II.3.2 Equation de continuité

L'équation générale de continuité des électrons et des trous est donnée par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n + G_n + R_n \quad \text{Pour les électrons} \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p + G_p + R_p \quad \text{Pour les trous} \quad (\text{II.3})$$

Où n et p sont les concentrations d'électrons et des trous respectivement. \mathbf{J}_n et \mathbf{J}_p sont les densités du courant des électrons et des trous respectivement. G et R sont les taux de génération et recombinaison des porteurs. Pour la modélisation des cellules solaires, on travaille dans le régime permanent où la variation par rapport au temps est nulle. Alors, on peut écrire :

$$-\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n = G_n - R_n \quad (\text{II.4})$$

$$-\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p = G_p - R_p \quad (\text{II.5})$$

Physiquement cette équation veut dire que la variation de la densité du courant dans un volume donné est la différence entre le taux de génération et le taux de recombinaison, c'est-à-dire que le nombre de porteurs est conservé. La figure III.1 explique schématiquement cette équation pour 1D.

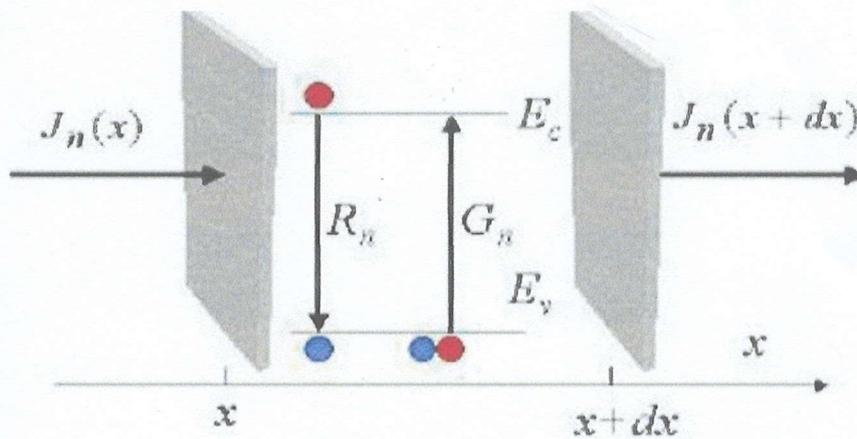


Fig.II.1 : Explication schématique de l'équation de continuité dans l'état permanent pour les cellules solaires.

II.4 Etapes de simulation d'une cellule solaire sous COMSOL :

Après le lancement de COMSOL, il nous permet de définir toutes les étapes de la modélisation. Ces étapes sont les suivantes :

Etape 1 : Choix des modèles physiques

- Mettre en place un environnement du modèle. On exécute l'assistant Modèle pour choisir le système de coordonnées, le modèle, la physique adaptée au problème et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).
- Définir les paramètres, les équations et les variables pour le modèle.

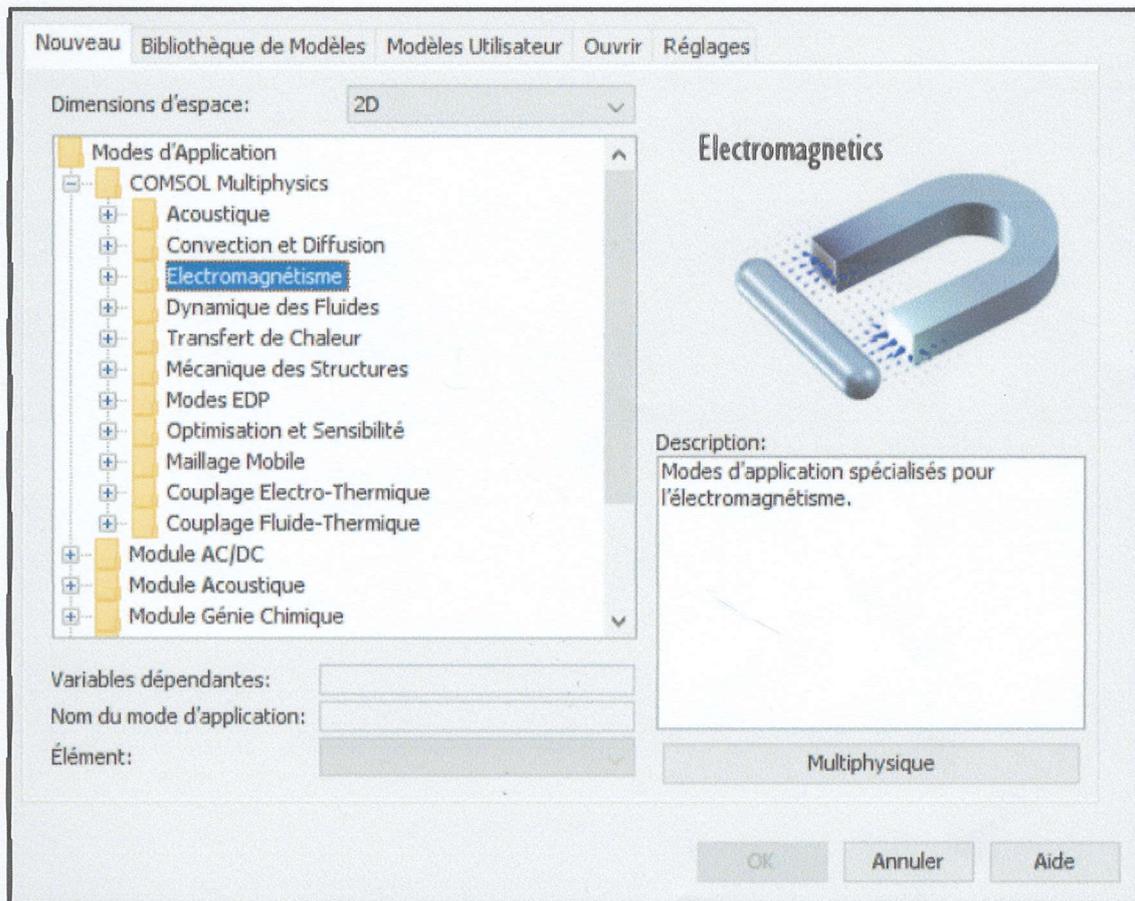


Fig.II.2 : La fenêtre qui permet de choisir les modèles physiques

Etape 2 : Insertion des constants et équations

Dans le menu « option » on introduire les constants et les équations liées au matériaux InGaP.

Nom	Expression	Unité	Description
N	$NDn + NDnmax * \exp(-((x+x1)/ch)^2) - NApmx * \exp(-((x+x1)/ch)^2)$	$1/m^3$	Doping concentration
n_init	$(\text{abs}(N)/2 + \sqrt{N^2/4 + ni^2}) * (N \geq 0) + ni^2 / (\text{abs}(N) + \sqrt{N^2/4 + ni^2}) * (N < 0)$	$1/m^3$	Charge neutrality electr...
p_init	$(\text{abs}(N)/2 + \sqrt{N^2/4 + ni^2}) * (N < 0) + ni^2 / (\text{abs}(N) + \sqrt{N^2/4 + ni^2}) * (N \geq 0)$	$1/m^3$	Charge neutrality hole c...
psi...	$1/c * (-\log(p_init/ni) * (N < 0) + \log(n_init/ni) * (N \geq 0))$	V	Charge neutrality voltage
alpha	$12000 * (((1.24/\text{lamda}) - 1.43))$		coefficient d'absorption
Rs	$Ic / (q * F)$		Reponse spectrale
G	$\text{alpha} * F * 1e19 * \exp(\text{alpha} * (-x))$		Generation

Fig.II.3 : Tableau d'expression liée au matériau InGaP

Nom	Expression	Valeur	Description
q	$1.602e-19 [C]$	$(1.602e-19 [C])$	Elementary charge
T	$300 [K]$	$300 [K]$	Room temperature
k	$1.38e-23 [J/K]$	$(1.38e-23 [J/K])$	Boltzmann constant
epsilonInr	11.6	11.6	Rel. permittivity for InGaP
ni	$1.46e10 [1/cm^3]$	$1.46e10 [1/cm^3]$	Intrinsic concentration for InGaP
mun	$1945 [cm^2/(V*s)]$	0.1945	Electron mobility for InGaP
mup	$141 [cm^2/(V*s)]$	0.0141	Hole mobility for InGaP
Dn	$k * T / q * \text{mun}$	$0.005026 [cm^2/s]$	Electron diffusivity
Dp	$k * T / q * \text{mup}$	$(3.64382e-05 [cm^2/s])$	Hole diffusivity
taun	$0.1 [us]$	$(1e-7 [s])$	Electron life time
taup	$0.1 [us]$	$(1e-7 [s])$	Hole life time
c	$q / (k * T)$	$38.695652 [1/V]$	Reciprocal thermal voltage
y1	$7 [um]$	$(7e-6 [m])$	Diode dimension
x1	$10 [um]$	$(1e-5 [m])$	Diode dimension
ju	$1 [um]$	$(1e-6 [m])$	Junction depth
ac	$4 [um]$	$(4e-6 [m])$	Anode dimension
NApmx	$5e18 [1/cm^3]$	$5e24 [1/m^3]$	Maximum p-type doping
NDn	$1e15 [1/cm^3]$	$10e20 [1/m^3]$	Drift layer n-type doping
NDnmax	$1e17 [1/cm^3]$	$10e22 [1/m^3]$	Maximum n-type doping
ch	$ju / \sqrt{\log(NApmx/NDn)}$	$(3.426508 [m])$	Doping fall-off constant
Va	$0 [V]$	$0 [V]$	Applied voltage
r	0.35	0.35	

Fig.II.4 : Tableau des constantes liée au matériau InGaP

Etape 3 : Création de la géométrie

- Définir la géométrie du model.
- Les dimensions de la structure doivent être inclus sur le tableau des constantes.

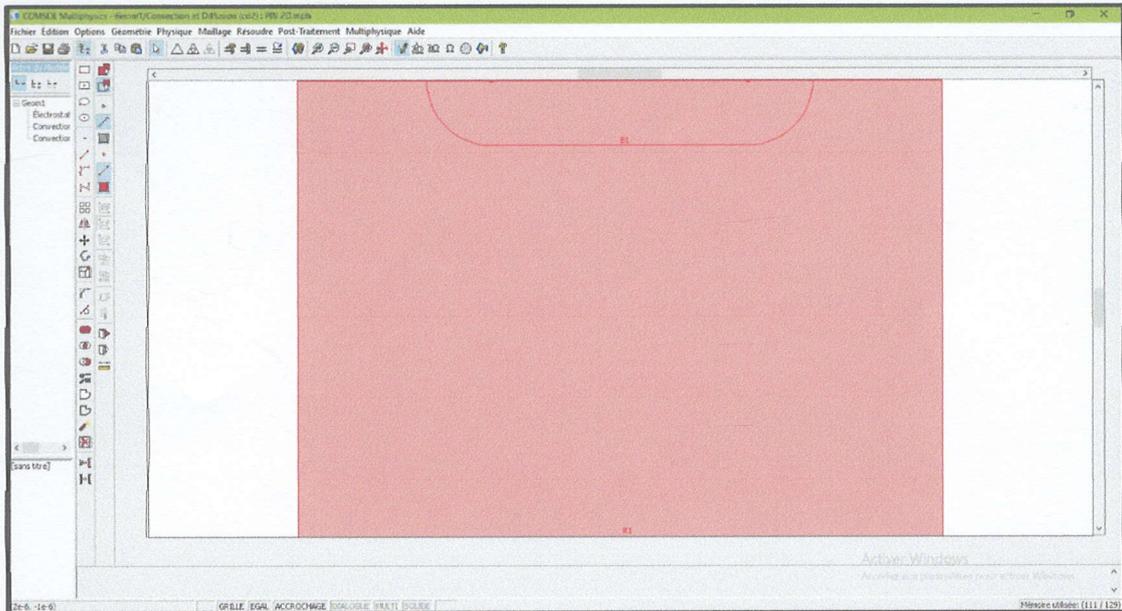


Fig.II.5 : La structure et la géométrie proposée pour la cellule solaire.

Etape 4 : Les conditions aux limites

Y a deux types de conditions à imposer, conditions aux frontières et conditions aux domaines.

➤ Conditions aux frontières :

Dans le mode électrostatique, on applique une tension V_a (potentiel électrique) pour la frontières supérieur et inférieur de la jonction, il s'agit de la collecte des porteurs. Pour le reste des frontières on fait une isolation électrostatique à charge nulle.

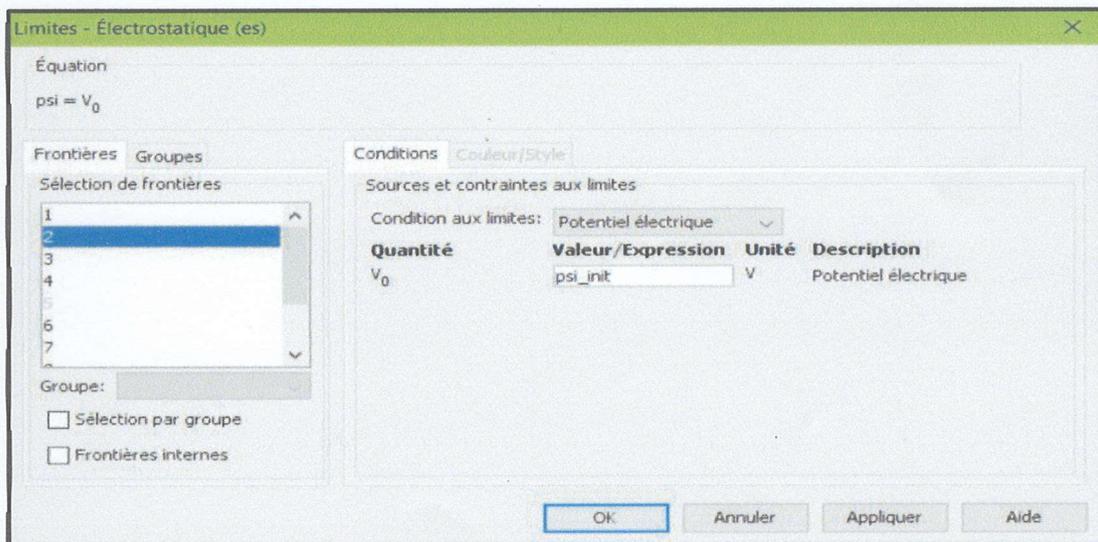


Fig.II.6 : La fenêtre qui permet d'introduire les conditions aux limites

➤ **Conditions aux domaines :**

Pour le mode électrostatique on définit les paramètres de la densité de charge d'espace, la permittivité relative et le potentiel électrique pour les deux domaines.

Pour le mode convection et diffusion on définit les paramètres de coefficient de diffusion, recombinaison RSRH et la diffusion selon x et y.

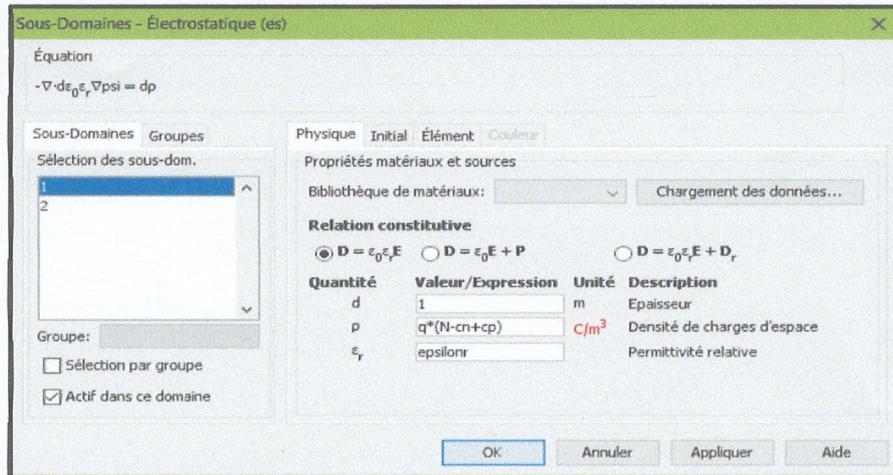


Fig.II.7 : La fenêtre qui permet d'introduire les conditions aux domaines.

Etape 5 : Génération de maillage

Pour les frontières de la jonction, on choisit un taux de maillage condensé pour une meilleure précision des résultats.

Taux de maillage totale de la jonction = 3018 éléments.

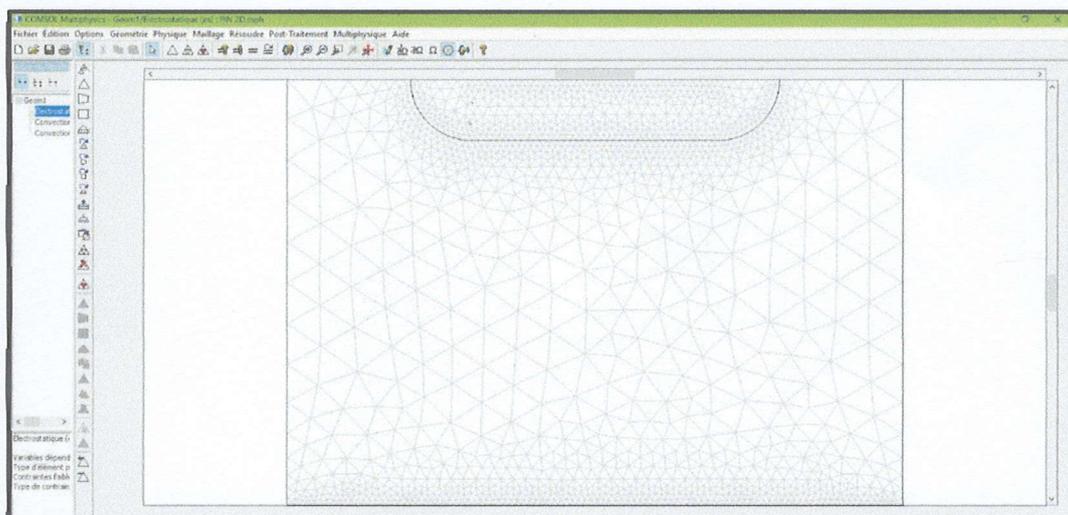


Fig.II.8 : Structure de la cellule après le maillage.

Etape 6 : Exécution de la simulation

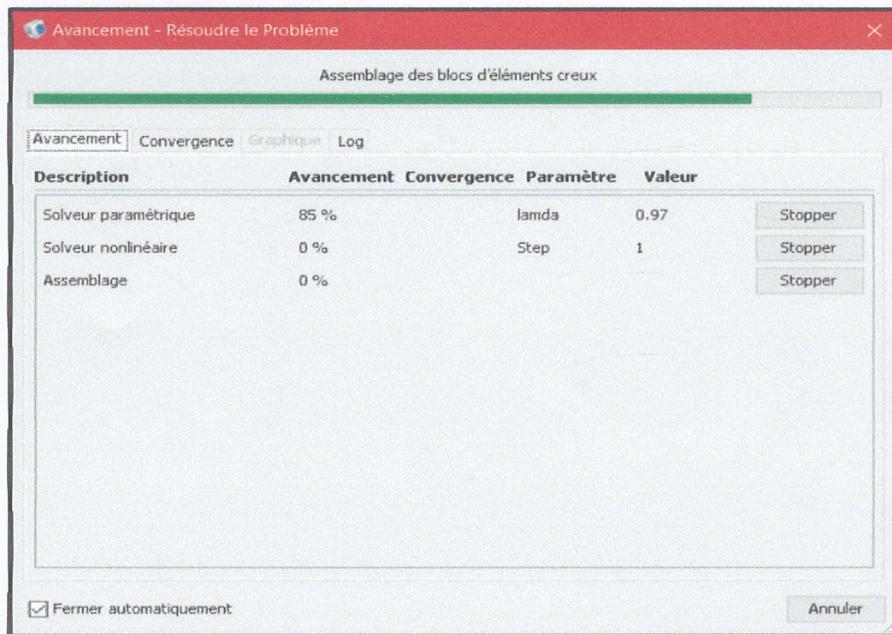


Fig.II.9 : Fenêtre d'exécution.

Etape 7 : Affichage des résultats

Comsol multiphysics fait la résolution du problème à l'aide des différents solveurs, ensuite on visualise les résultats.

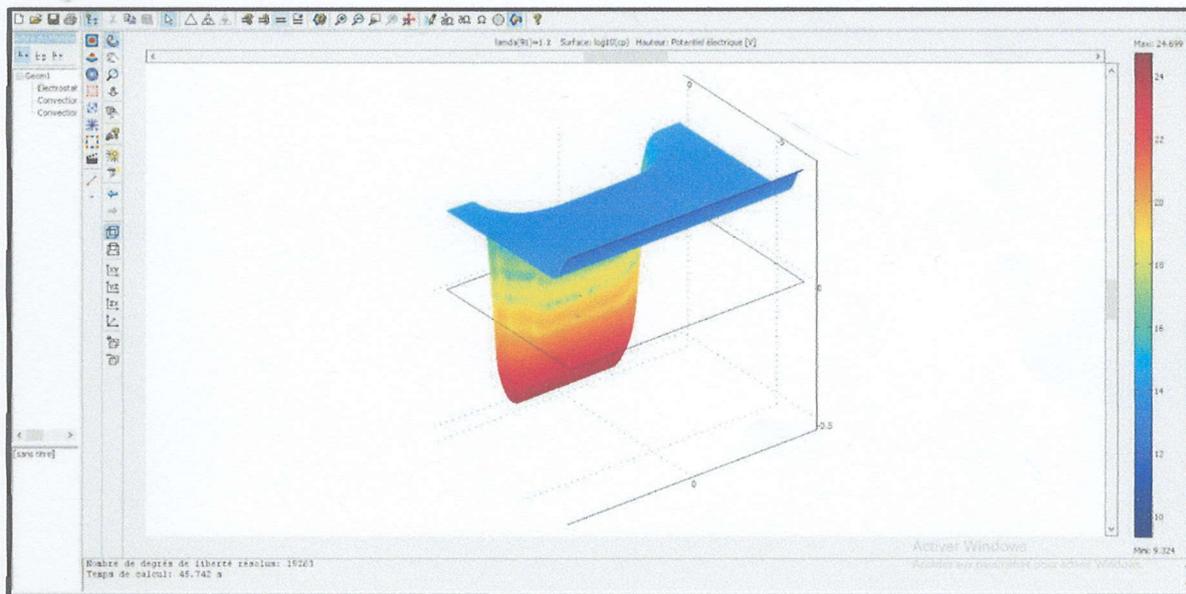


Fig.II.10 : Intégration de température de la jonction après l'exécution.

II.5 Présentation de la cellule étudiée

II.5.1 structure et dimensions de la jonction

La cellule solaire étudiée est une jonction P-i-N dont la structure est présentée dans la figure II.10. Cette jonction de cellule solaire InGaP est mobilisée, a des dimensions $7\mu\text{m}$ de largeur et $10\mu\text{m}$ de longueur.

- L'épaisseur de la région de type p est de $1\mu\text{m}$ et de $6\mu\text{m}$ de longueur avec une courbe de chaque côté
- L'épaisseur de la région de type N est de $7\mu\text{m}$ sur les côtés et de $6\mu\text{m}$ aux milieux et de $2\mu\text{m}$ à $3\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$ de longueur.

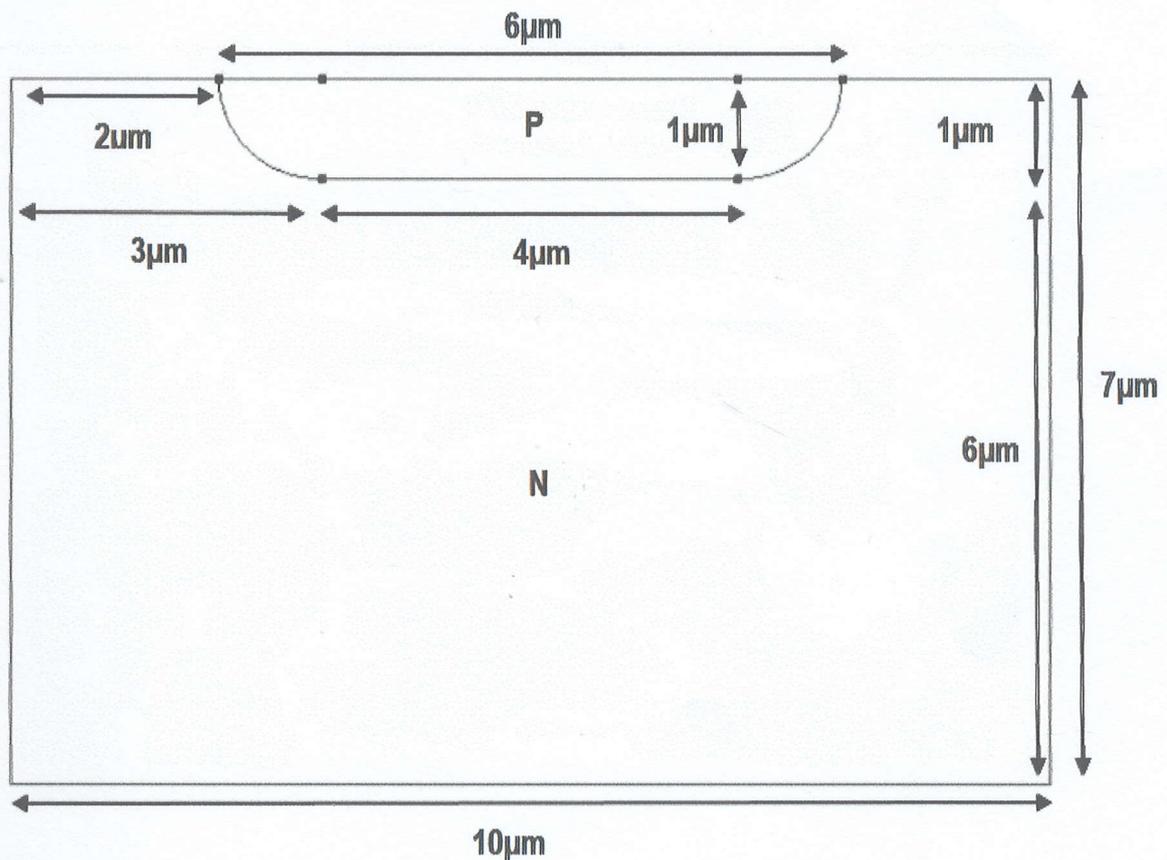


Fig.II.11 : Structure de la cellule solaire simulée.

II.5.2 paramètre de la structure

Les paramètres de la structure de la cellule utilisée pour la simulation sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : paramètres de la cellule InGaP

Symbol	Valeur [unité]	Paramètre
Y	7[μm]	Dimension de diode
X	10[μm]	Dimension de diode
ju	1[μm]	Profondeur de jonction
ac	4[μm]	Dimension anode
NApmax	$1 \cdot 10^{17}$ [1/cm ³]	Dopage maximum de type p
NDn	$2 \cdot 10^6$ [1/cm ³]	Dérive de type n de la couche dérive
NDnmax	$5 \cdot 10^{18}$ [1/cm ³]	Dopage maximum de type n
Va	0[V]	Tension appliquée
q	$1.602 \cdot 10^{-19}$ [C]	Charge élémentaire
T	300[K]	Température ambiante
k	$1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]	La constante de Boltzmann
ni	$2.12 \cdot 10^6$ [1/cm ³]	Concentration intrinsèque pour InGaP
μ_n	1945[cm ² /(V.s)]	Mobilité électronique pour InGaP
μ_p	141[cm ² /(V.s)]	Mobilité des trous de InGaP
Dn	28.42[cm ² /s]	Diffusions électronique
Dp	7.23[cm ² /s]	Diffusion des trous
Eg	1.9[eV]	Energie de gap pour InGaP
ϵ_r	11.6	Permittivité relative pour InGaP
V _{thn}	$4.4 \cdot 10^7$ [cm/s]	Vitesse thermique des électrons
V _{thp}	$1.8 \cdot 10^7$ [cm/s]	Vitesse thermique des trous
τ_n	0.1[us]	Durée de vie des électrons
τ_p	0.1[us]	Durée de vie des trous
R	0.8	Réfectivité contact métal

II.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le mode de fonctionnement de Comsol Multiphysics afin de bien maîtriser pour la simulation des cellules solaires. Les résultats de la simulation et les discussions seront présentés dans le chapitre III.

Chapitre III

RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Introduction

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'homojonction InGaP, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif tels que le dopage et l'épaisseur.

Dans le travail qui suit nous allons étudier l'effet de dopage et d'épaisseur sur les paramètres externes de la cellule solaire. Pour cela, dans notre simulation, nous avons fait varier les paramètres (épaisseur et dopage). Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

Dans toutes nos simulations nous avons pris une surface d'attaque de 1cm^2 avec un rayonnement d'intensité 1000W/m^2 . Par ailleurs les dimensions de notre cellule de référence [9] sont celles qui ont été données dans le tableau III.1.

III.2 Résultats et discussions

La figure III.1 représente la caractéristique courant-tension (I-V) simulée, du dispositif monojonction InGaP de référence [9].

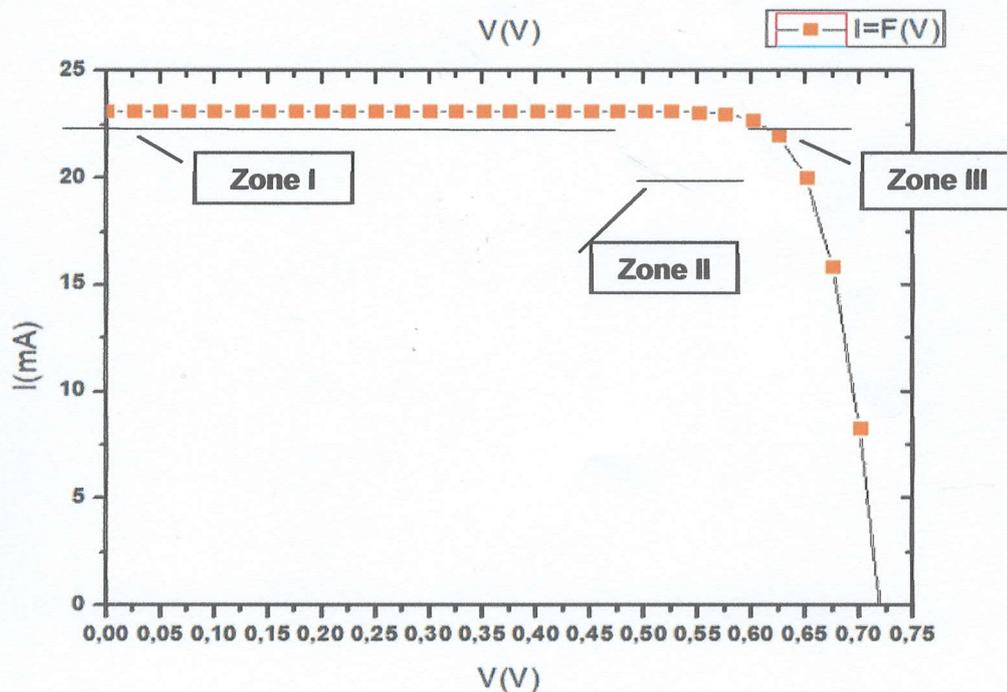


Fig.III.1 : Caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule InGaP simulée

La caractéristique de notre cellule solaire présente trois zones :

Zone I : la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{cc}), Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

Zone II : la cellule solaire se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{co} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

Zone III : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables (son comportement est aléatoire).

Les paramètres de la cellule solaire de référence [9], sont évalués à partir de la caractéristique (I-V) simulée. Ils sont représentés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau.III.1 : les performances d'une cellule solaire à base de InGaP.

Paramètres externes	Résultats de la simulation
$I_{cc}(mA)$	23.035
$V_{co}(V)$	0.717
$\eta(\%)$	13.73
FF(%)	83.17

En comparant nos résultats avec les résultats trouvés dans la référence [9], nous remarquons que les paramètres (V_{co} , FF et η) sont légèrement inférieurs à ceux de la littérature. A cet effet, nous allons essayer d'améliorer le rendement obtenu de 13.73% en optimisant les deux paramètres électrique (dopage) et technologique (épaisseur) de la cellule.

III.2.1 Effet de dopage sur la monojonction d'InGaP

III.2.1.1 Influence de variation de Nd

Les figures III.2 et III.3 représentent respectivement la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage allant de 1.10^{11} jusqu'à $1.10^{15}cm^{-3}$ et la variation du courant de court-circuit en fonction du dopage.

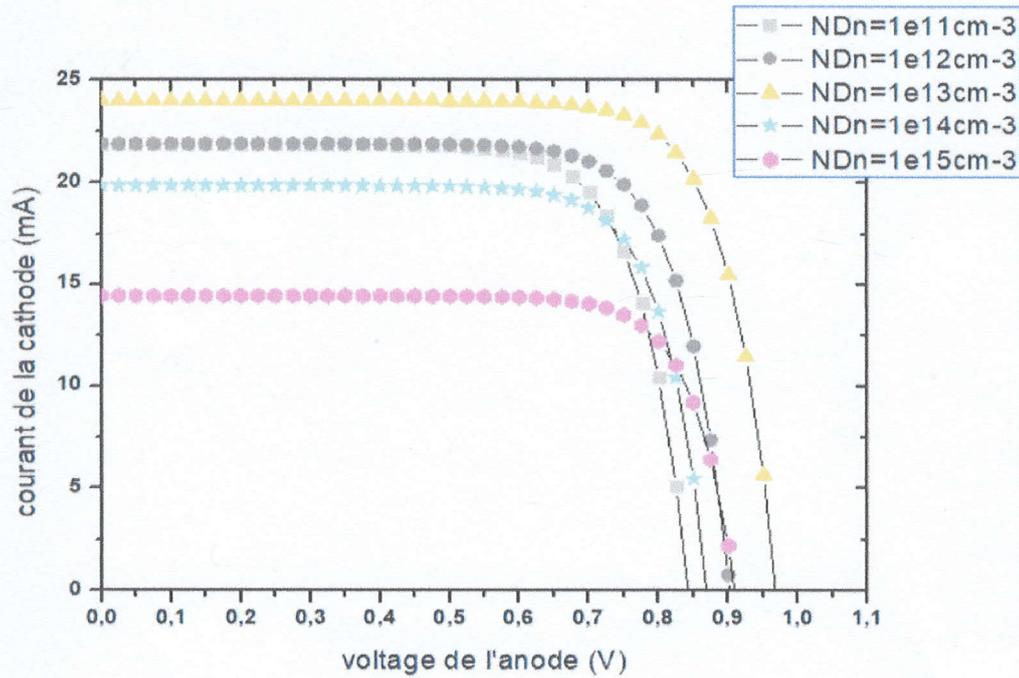


Fig.III.2 : Influence de la variation de ND_n sur la caractéristique I-V.

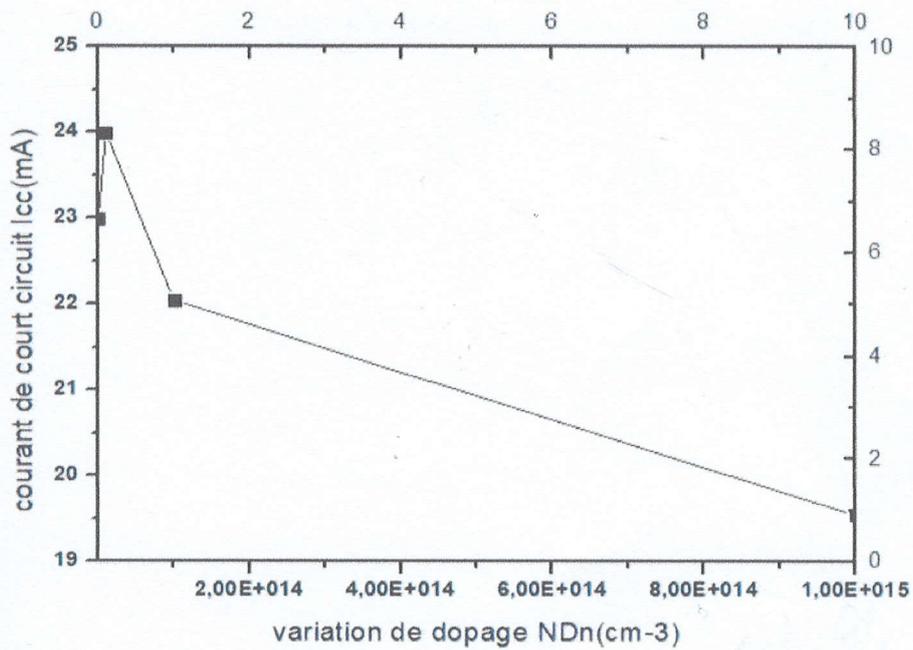


Fig.III.3 : Influence de variation de dopage ND_n sur le courant de court-circuit.

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le **tableau III.2**.

Tableau III.2 : Paramètres externes de cellule solaire simulé

$N_d(\text{cm}^{-3})$	$I_{cc}(\text{mA})$	$V_{co}(\text{V})$	$\eta(\%)$	FF(%)
1.10^{11}	21.847	0.841	13.71	74.59
1.10^{12}	21.863	0.900	14.91	75.78
1.10^{13}	24.000	0.967	17.86	76.94
1.10^{14}	29.836	0.867	15.64	90.08
1.10^{15}	14.438	0.906	11.93	91.13

Nous remarquons que le rendement subit une augmentation pour un dopage entre 1.10^{13}cm^{-3} et 1.10^{14}cm^{-3} mais, commence à diminuer quand on augmente la concentration du dopage au-delà de 1.10^{15}cm^{-3} . Le rendement le plus élevé est obtenue à la concentration de 1.10^{13}cm^{-3} .

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le photocourant et le rendement de conversion.

III.2.1.2 Influence de variation de N_a

Les figures III.4 et III.5 représentent respectivement la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage allant de 1.10^{18} jusqu'à 1.10^{23}cm^{-3} et la variation du courant de court-circuit en fonction du dopage.

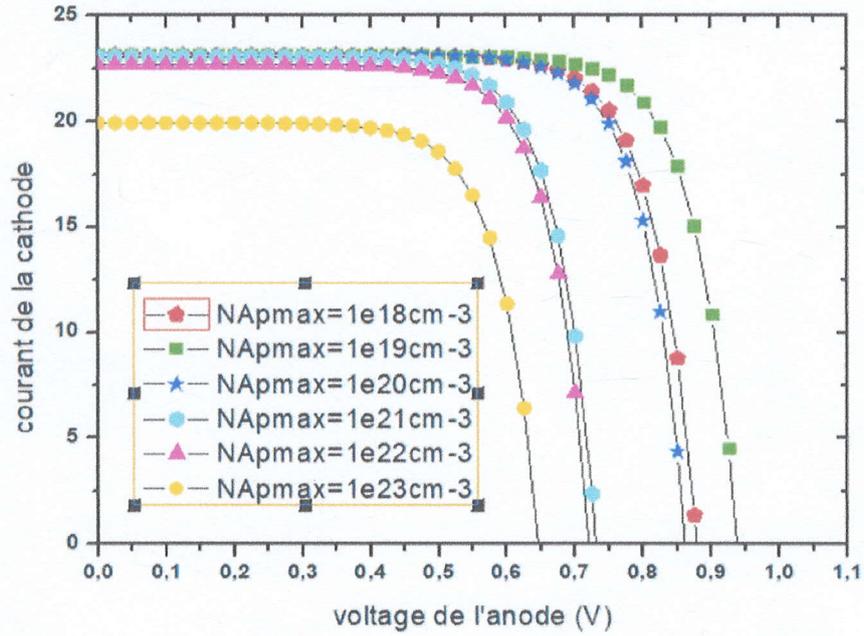


Fig.III.4 : influence de la variation de NApmx sur la caractéristique I-V.

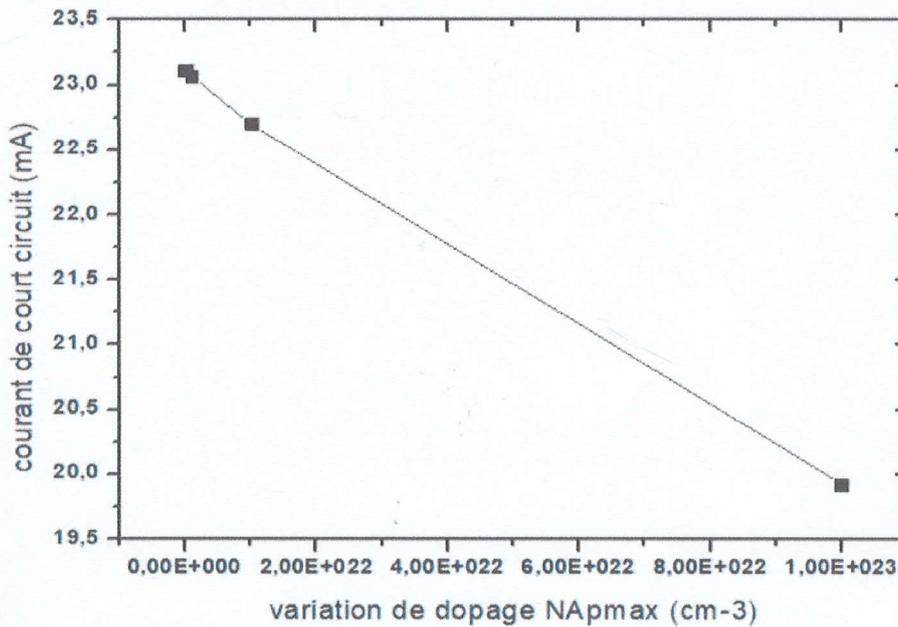


Fig.III.5 : Influence de variation de dopage Nd sur le courant de court-circuit.

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans le **tableau III.3**

Tableau III.3 : Caractéristiques de cellule solaire de InGaP

NA _{max}	I _{ph} (mA)	V _{co} (V)	η(%)	FF(%)
1.10 ¹⁸	23.113	0.878	18.42	90.76
1.10 ¹⁹	23.117	0.935	19.70	91.14
1.10 ²⁰	23.114	0.860	15.25	76.71
1.10 ²¹	23.067	0.728	12.52	74.49
1.10 ²²	22.701	0.720	12.12	74.15
1.10 ²³	19.927	0.645	9.31	72.43

Après variation du dopage NA_{max}, nous observons que l'élévation du dopage n'a pas une influence significative sur la caractéristique I-V jusqu'à une tension de l'anode de 0.6V, après cette dernière il y a eu un changement significatif au point de fonctionnement (le maximum de puissance).

Nous remarquons sur la figure III.5, que plus on augmente le dopage NA_{max} au-delà de 1.10²⁰cm⁻³, les différents paramètres et caractéristiques se diminuent (le courant de court-circuit se diminuent avec la concentration du dopage, figure III.5) d'où une dégradation remarquable du rendement électrique. Les meilleures caractéristiques sont obtenues pour une densité NA_{max}= 1.10¹⁹cm⁻³, un rendement de 19.70% et un facteur de forme de 91.10% (tableau III.3).

La tension de circuit ouvert V_{CO} diminue lorsque la concentration du dopage augmente. Ceci est dû à la diminution du courant de saturation puisque ce dernier est lié à la tension du circuit ouvert par la relation suivante :

$$V_{CO} = \frac{KB*T}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{CC}}{I_0}\right) \quad (III.1)$$

Et au dopage par la relation suivante :

$$I_0 = \frac{q D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{q D_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (III.2)$$

Suite à ces résultats, nous pouvons dire que pour avoir une amélioration des performances pour une structure à base de InGaP, la cellule doit être fortement dopée de type p.

III.2.2 Effet d'épaisseur sur la monojonction d'InGaP

L'effet de la variation de l'épaisseur de 0.5 μm à 2.5 μm sur la caractéristique I-V pour un dopage de $N_D=2.10^6\text{cm}^{-3}$, p-type doping= 1.10^{19}cm^{-3} et n-type doping= 5.10^{18}cm^{-3} .

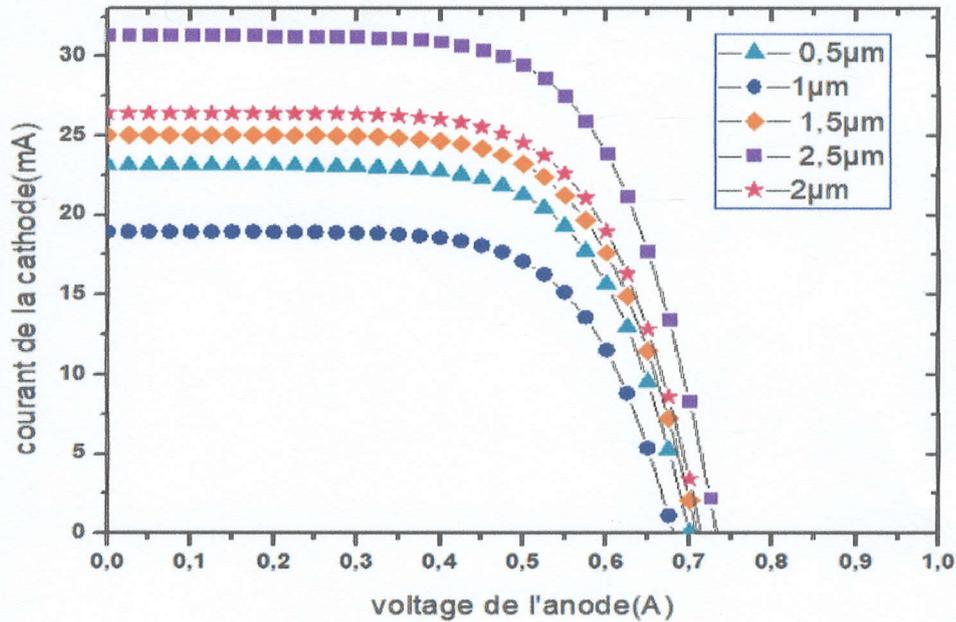


Fig.III.6 : Influence de la variation d'épaisseur sur la caractéristique I-V.

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs.

Tableau III.4 : Paramètres externes de cellule solaire d'InGaP.

Epaisseur (μm)	$I_{ph}(\text{mA})$	$V_{co}(\text{V})$	$\eta(\%)$	FF(%)
0.5	23.125	0.701	10.74	66.25
1	25.060	0.710	11.75	66.07
1.5	18.957	0.680	8.55	66.36
2	26.421	0.712	12.47	66.29
2.5	31.333	0.730	15.14	66.19

La figure III.6 montre qu'il y a une augmentation de photocourant avec l'augmentation de l'épaisseur, nous remarquons aussi que la valeur minimale de I_{ph} obtenu est lorsque l'épaisseur était à 1.5 μm .

Nous avons pu obtenir un rendement maximal de 15.14% avec une épaisseur de 2.5 μ m. Le rendement décroît lorsque l'épaisseur est réduite. Donc la probabilité de recombinaison des porteurs générés est plus importante au voisinage du contact avant, ce qui diminue la densité du courant photo-généré ce qui implique la diminution du rendement de conversion.

Les variations de l'épaisseur de la cellule influent sur les courbes I-V et sur le rendement. Ceci s'explique par une absorption considérable de photons ($E_{\text{photon}} > E_{g\text{InGaP}} = 1.9\text{eV}$). L'absorption dans la cellule diminue le nombre des photons incidents qui ont une énergie $h\nu > E_{g\text{InGaP}}$. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent pas générer de pair électron-trou et par conséquent, sont perdus. L'excès d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite est principalement dissipé sous forme de chaleur. Ceci influe sur la création des paires électron-trou contribuant à l'ensemble de photocourant d'où la diminution du rendement. La cellule d'InGaP son gap de 1.9eV agit de sorte que l'absorption soit dans le domaine de courtes longueurs d'ondes.

Nous concluons qu'il faudrait choisir une épaisseur idéale pour avoir le rendement électrique optimal. Dans notre cas, cette épaisseur est de 2.5 μ m.

Cette étude nous a permis dans une première étape, de trouver les paramètres optimums de la structure solaire InGaP qui donnent les meilleurs rendements. Ceci nous a permis dans une deuxième étape de concevoir la structure optimale de notre cellule solaire, en combinant les paramètres optimaux de la cellule. Ceci nous a permis d'obtenir la structure optimale, qui nous a donné un rendement de conversion de 15.99%.

Les caractéristiques optimales obtenus par la simulation sont récapitulées dans le tableau ci-dessous représenté.

Tableau III.5 : Paramètres optimum ayant donné $\eta=15.99\%$.

Nd (cm^{-3})	Na (cm^{-3})	Epaisseur(μm)	I _{cc} (mA)	V _{co} (V)	η (%)	FF(%)
1.10 ¹³	1.10 ¹⁹	2.5	25.690	0.827	15.99	75.26

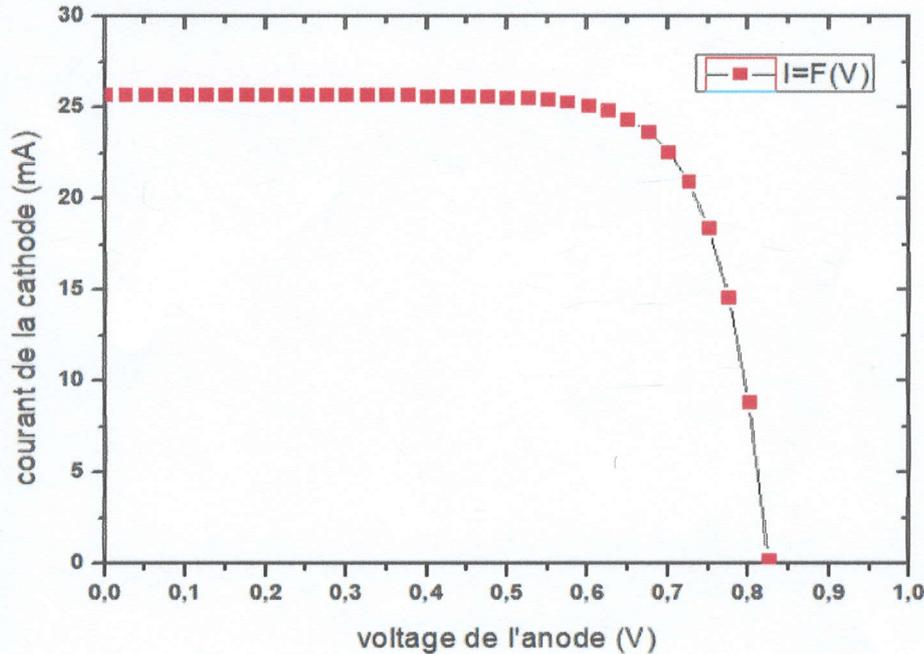


Fig.III.7 : Caractéristique I-V de la cellule optimisée.

III.3 Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié l'impact des paramètres électrique (dopage) et technologique (épaisseur) de la cellule dans le but de concevoir une structure optimale à mono-jonction qui donne le meilleur rendement électrique.

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base d'InGaP à mono-jonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet du dopage et de l'épaisseur de chaque couche sur la caractéristique I-V ainsi que sur le rendement électrique.

Nous avons constaté que les deux paramètres, dopage et épaisseur, ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique. En effet, la variation du dopage peut affecter les porteurs photogénérés. D'un côté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage dans la région p, car cette augmentation permet une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés. Par contre, au niveau de l'absorbeur, un dopage de l'ordre de 1.10^{13}cm^{-3} est suffisant pour donner un meilleur rendement. Du fait des largeurs de bandes interdites élevées, la cellule laisse passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couche fenêtre), qui est ensuite absorbé par l'absorbeur. Donc une concentration de dopage

élevée peut affecter le transport des porteurs au sein de l'absorbeur ce qui provoque une diminution du rendement.

Selon notre étude basée sur la simulation, l'amélioration du rendement de conversion est obtenue pour une concentration de dopage ($N_d=1.10^{13}\text{cm}^{-3}$ et $N_a=1.10^{19}\text{cm}^{-3}$)

De même la variation de l'épaisseur peut affecter la collecte des porteurs photogénérés. Nous avons, par ailleurs, pu optimiser cette dernière. Ce qui permet à la fois une meilleure absorption de porteur des photons de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface.

D'après notre étude, il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur pour avoir un rendement optimal, une épaisseur de $2.5\mu\text{m}$ de région « p » assure le meilleur transport des porteurs en réduisant leurs recombinaisons au niveau du contact avant.

En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure InGaP. Nous pouvons dire que les paramètres jouent un rôle très important vis-à-vis des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion. Effectivement, puisqu'ils affectent les propriétés électriques de la jonction.

Conclusion Général

L'objectif de notre travail était d'étudier la cellule solaire à mono jonction à base d'InGaP dans la technologie photovoltaïque et leur influence sur le rendement électrique. Ceci dans le but d'optimiser le temps et le coût de fabrication de ces cellules photovoltaïques à base d'InGaP. Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs. Nous avons aussi optimisé les paramètres physiques et électriques d'une structure spécifique de cellule solaire à base d'InGaP pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

La modélisation et la simulation ont été faites par le logiciel COMSOL Multiphysics-2D, pour étudier les performances des cellules solaires à base d'InGaP. Nous avons évalué, dans un premier temps, le courant de court-circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , la puissance maximale P_M , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique d'InGaP.

Dans la modélisation et la simulation nous avons utilisé les données d'une structure de référence développée par Benlekhdim [Benlekhdim]. Le rendement de la cellule solaire de référence a été évalué à partir de la caractéristique $I(V)$ simulée. Le rendement électrique optimal obtenu est de 13.73% avec un facteur de forme de 83.17%. Par la suite, nous sommes intéressés au dopage et à l'épaisseur de la cellule pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement électrique de la structure. Nous avons alors, fait varier les paramètres (épaisseur et dopage) de la cellule pour voir l'influence de ces deux paramètres sur le rendement électrique de la structure.

En faisant varier le dopage de type n de la couche dérive, un rendement optimal de 17.86% a été obtenu pour un dopage de $ND_n=1.10^{13}cm^{-3}$.

En faisant varier le dopage maximum de type p, un rendement optimal de 19.70% a été obtenus pour un dopage de $NA_{pmax}=1.10^{19}cm^{-3}$.

Et en faisant varier l'épaisseur de la région p, un rendement optimal de 15.14% pour une épaisseur de 2.5 μm .

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage), nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 15.99% avec un facteur de forme de 75.26%.

Les paramètres optimums de la structure optimale obtenus par notre simulation, sont présentés dans le tableau suivant.

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure InGaP. Nous pouvons dire que les paramètres physique et technologique jouent un rôle très important dans l'amélioration du rendement des cellules solaires à base d'InGaP.

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques des cellules dépendent étroitement des différents paramètres tels que le dopage et l'épaisseur.

Références

- [1]: Takamoto, "Structural optimization for single junction InGaP solar cells", 1994.
- [2]: Ming-Ju Yang, "Photoluminescence analysis of InGaP top cells for high-efficiency multi-junction solar cells", Toyota Technical Institute, 2-12-1 Hisakata, Tempaku, Nagoya 468, Japan, 1996.
- [3]: M.F. Vilela, "chemical beam epitaxy for high-efficiency InP solar cells", Space Vacuum Epitaxy Center, Journal of Crystal Growth 188 (1998) 311-316
- [4]: King, "lattice-matched and metamorphic gainpigainaslge concentrator solar cells" Spectrolab, Inc, National Renewable Energy Laboratory, 2003 Osaka, Japan.
- [5]: Brendan M. Kayes, "27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination" Alta Devices, Inc, IEEE, 2011
- [6]: L.S. Mattos, "New model efficiency record: 23.5% under 1-sun illumination using thin-film single-junction GaAs solar cells». Proceedings of the 38th IEEE photovoltaic Specialists Conference, 2012.
- [7]: T. Sugaya, "InGaP solar cells fabricated using solid-source molecular beam epitaxy" 2013.
- [8]: J.P. Dutta, " design and evaluation of ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with InGaP tunnel junction and optimized double top BSF layer", 2016.
- [9]: Ahmed Benlekhdim, "Efficiency improvement of single-junction InGaP solar cells by advanced photovoltaic device modeling" 2018.
- [10] : P. Chabloz, " Les couches épaisses en silicium amorphes, application comme détecteurs de rayons X ", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, 1996.
- [11] : Rachid Maraï, Livre : Cellules Solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque. EDSF
- [12] : SAYAH, C, " Etudes des Effets du Champ Electromagnétique sur les Propriétés des Composés III-V par la Méthode de Monte Carlo et l'Equation de Poisson Couplée ", Thèse de Doctorat en Electronique. Université Abou-Bekr Belkaid, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, 2010

[13] : GALLOO, "Composants nanométriques balistiques de type GaInAs/AlInAs/InP pour applications Térahertz", thèse de Docteur de l'université, Université des Sciences et Techniques de Lille, 2005

[14]: T. J. Coutts, and M. Yamaguchi, " Indium Phosphide based solar cells: a critical review of their fabrication, performance and operation ", in : T. J. Coutts, J. D. Meakin(Eds), current Topics in Photovoltaics, Vol. 3, p. 79, 1988.