

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur e de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES

## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

### **Master**

Option : photovoltaïque

---

Thème :

## **Simulation numérique d'une cellule solaire en couche mince à base d'InP**

Présenté par :

M<sup>elle</sup> REMATI Hayet

Encadreur :

Dr MAZOUZ Halima

Année universitaire 2015/2016

---

# *Remerciements*



*Au nom de Dieu le clément le miséricordieux*

*Le grand merci à notre Dieu le tout puissant qui m'a donné la force  
et la volonté pour finir mon mémoire.*

*Je saisi cette occasion pour remercier chaleureusement Mes parents,  
mon frère et ma sœur toutes les personnes qui ont par leur action et  
par leur soutien, participé à ce travail de près ou de loin,  
matériellement ou moralement.*

*Je souhaiterais remercier en particulier Dr **MAZOUZ Halima**,  
ma promotrice, pour son aide, sa gentillesse et sa disponibilité.  
Et j'espère avoir un jour l'opportunité de retravailler avec elle.*

## *Résumé*

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but d'améliorer le rendement énergétique.

L'objectif de ce travail est de faire une étude numérique d'une cellule solaire en couche mince à base d'InP dans le but de connaître l'influence des paramètres physiques qui sont « le dopage et l'épaisseur des différentes couches de la cellule » ainsi que les paramètres environnementaux « la température et l'éclairement » sur les paramètres externes de la cellule.

Grâce nos résultat numérique, nous avons obtenu les propriétés de cette cellule : courant-tension, ainsi nous pouvons calculer le facteur de forme et le rendement.

## *Abstract*

Solar cells are currently the subject of much research in order to improve energy efficiency.

The objective of this work is to make a numerical study of a solar cell thin layer based on InP in order to know the influence of the physical parameters that are " doping and thickness of the various layers of the cell " and the environmental parameters " temperature and illumination " on the external parameters of the cell.

With our numerical result , we obtained the properties of this cell : current-voltage , so we can calculate the form factor and yield.

## المخلص:

الخلايا الشمسية هي حاليا موضوع الكثير من الأبحاث من أجل تحسين كفاءة أدائها.

الهدف من هذا العمل هو تقديم دراسة لخلية شمسية ذات طبقة رقيقة مصنوعة من فوسفيد الإنديوم من أجل معرفة تأثير العوامل الفيزيائية " التضخم و سمك طبقات مختلفة من الخلية " و العوامل البيئية " درجة الحرارة و الإضاءة " على العوامل الخارجية للخلية.

بفضل النتائج المتحصل عليها, تحصلنا على خصائص هذه الخلية (كثافة التيار- توتر), حتى نتمكن من حساب عامل الشكل و المردود

## *Introduction générale*

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières années. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables non polluantes est donc d'actualité [1].

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire PV, etc... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m<sup>2</sup> [2].

Le photovoltaïque est la conversion de l'énergie solaire lumineuse en énergie électrique grâce aux cellules solaire photovoltaïque. Les cellules solaire à base d'InP marquent le record mondiale de la conversion photovoltaïque à cause de leur rendement élevé et cela pour les applications terrestre et spatiale.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation numérique d'une cellule solaire photovoltaïque, Dans le but de faire une étude sur l'influence du dopage et de l'épaisseur des différentes couches de la cellule solaire sur les paramètres externes de cette dernière ainsi que l'effet de la température et le flux lumineux. Ce mémoire contient trois chapitres

Le premier chapitre consiste des notions générales sur le phosphore d'indium (InP), et le photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation, numérique de la cellule avec le simulateur Comsol Multiphysiques.

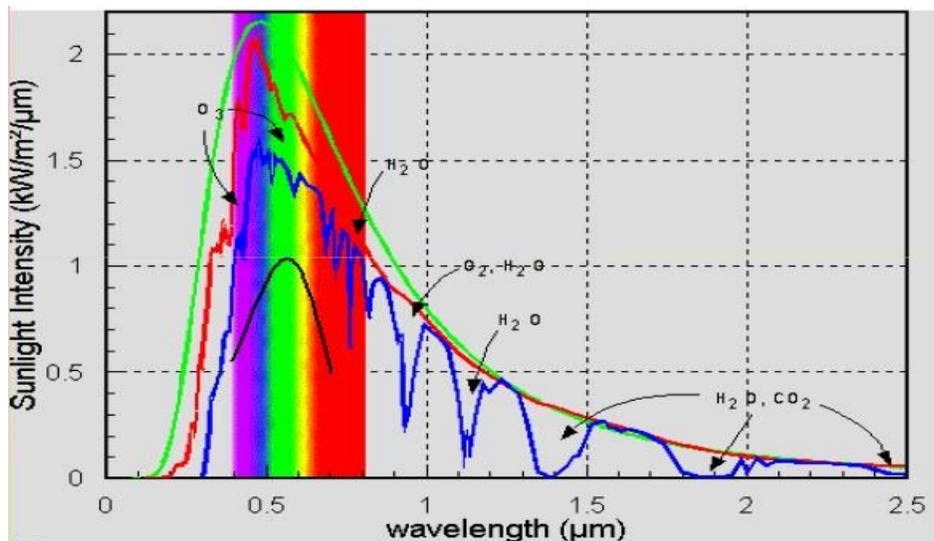
Dans le troisième et dernier chapitre, on va commenter et discuter les résultats, et par la suite déduire le model le plus pratique et le plus optimal.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui transforme la lumière en électricité. Le fonctionnement des cellules solaires est basé sur la physique des semi-conducteurs, le phénomène d'absorption et de génération de porteurs ainsi que le mécanisme de recombinaison des porteurs de charges seront traités dans ce chapitre, où nous allons identifier également les équations de base du fonctionnement d'une jonction PN, puis nous présenterons l'InP comme matériaux semi-conducteur pour les cellules solaire, sa structure et son élaboration.

### I.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

La surface du Soleil peut être vue comme un corps noir d'une température d'environ 5800 K, conduisant à un pic d'émission autour de la longueur d'onde de 0.5  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement moyen hors atmosphère terrestre est d'environ 1.36  $\text{kW/m}^2$  [3]. La traversée de celle-ci engendre une diminution de l'intensité solaire à cause notamment des conditions climatiques, de la latitude, de la saison et de l'absorption par les molécules présentes dans les différentes couches de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone, vapeur d'eau). Ces dernières absorbent les photons d'énergie proche de leur énergie de liaison, conduisant à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol (Figure I-1). Les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère induisent une baisse globale de la puissance incidente sur toute la gamme spectrale.



*Figure I.1 : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen, (rouge) AM0, (bleu) AM1*

Afin de définir une référence indépendante de la localisation sur Terre, la notion d'Air Masse (AM) est introduite : c'est la distance parcourue par la lumière à travers l'atmosphère normalisée par la plus petite distance possible (quand le soleil est au zénith). L'Air Masse donne la réduction de puissance due à la traversée de l'atmosphère. AM1 quand le soleil est au zénith et AM0 hors atmosphère. Le spectre standard est AM1.5G, correspondant à un rayonnement d'environ 1 kW/m<sup>2</sup> (G pour global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses). La partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la Terre concerne le domaine du visible (390-780 nm) et du proche infrarouge.

## I.2 Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien « photos » (lumière, clarté) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800. L'effet photovoltaïque repose sur trois grands principes : L'absorption, la génération et la collecte des charges.

### I.2.1 Absorption de la lumière

On appelle absorption de la lumière, le phénomène de diminution de l'énergie de l'onde lumineuse lors de sa propagation dans la substance, qui se produit par suite de la transformation de l'énergie de l'onde en énergie interne de la substance ou en énergie d'émission secondaire ayant autre composition spectrale et autres directions de propagation. L'absorption de la lumière dans la substance est décrite par la loi de Lambert-Bouguer [4]:

$$\alpha = K_{abs} \sqrt{\left(\frac{1.24}{\lambda} - E_g\right)} \quad (I.1)$$

Avec :

$\lambda$  : la longueur d'onde en  $\mu\text{m}$ .

$E_g$  : L'énergie gap du matériau

$K_{abs}$  : un coefficient lié au matériau à gap directe.

### I.2.2 Génération optique

Il existe deux types de génération : génération intrinsèque (bande à bande) et génération extrinsèque (par l'intermédiaire du niveau de dopage ou de piège). La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière : photo-génération. Les centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de la génération bande à bande [5].

En générale pour être efficace l'excitation d'un électron du sommet de la bande de valence dans la bande de conduction exige que l'énergie lumineuse soit supérieure à la largeur de la bande interdite [6].

$$G_{opt} = (1 - R) \cdot \alpha \cdot \exp(\alpha(-x)) \quad (I.2)$$

### I.2.3 Collecte des charges

Pour que les charges libérées par illumination circulent il faut les attirer hors le semi-conducteur. Pour cela on crée une différence de potentiel par un champ électrique qui entraîne les charges négatives d'un côté et les positives de l'autre côté.

### I.2.4 Recombinaison

Dans un semi-conducteur, il est possible d'exciter des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, on dit alors que l'on injecte des porteurs en excès  $\Delta n$  ou  $\Delta p$  par rapport à la concentration d'équilibre  $n_0$  ou  $p_0$ . Certains mécanismes interviennent alors pour ramener le cristal à son état d'équilibre : il s'agit des mécanismes de recombinaison.

#### 1.2.4.1 Recombination Shockley Read Hall (SRH)

Ce premier mécanisme a été décrit pour la première fois par Shockley et Read en 1952. Dans ce modèle, la recombinaison ne se fait pas par transition directe d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence mais par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison dont le niveau d'énergie est situé dans la bande interdite. Nous le décrirons ici avec un seul centre de

recombinaison monovalent c'est-à-dire un défaut ne pouvant avoir que deux états de charge. On écrit alors le taux de recombinaison SRH [7]

$$U_{\text{SRH}} = \frac{\sigma_p \cdot \sigma_n \cdot v_{\text{th}} \cdot N_T \cdot (n \cdot p - n_i^2)}{\sigma_p \cdot (n + n_1) + \sigma_n \cdot (p + p_1)} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$\sigma_n$  et  $\sigma_p$  : sections de capture centre de recombinaison des électrons et des trous.

$v_{\text{th}}$  : vitesse thermique des porteurs

$n_i$  : concentration de porteurs intrinsèques

$n_0$  et  $p_0$  les concentrations de porteurs à l'équilibre

$\Delta n$  et  $\Delta p$  : les concentrations de porteurs en excès

$N_T$  : la densité de centres de recombinaison

$n$  et  $p$  : les concentrations des porteurs tels que  $n = n_0 + \Delta n$  et  $p = p_0 + \Delta p$

$n_1$  et  $p_1$  : les concentrations décrites par les équations :

$$n_1 = n_i \cdot \exp \left( \frac{E_T - E_i}{kT} \right) \quad (\text{I.4})$$

$$p_1 = p_i \cdot \exp \left( \frac{E_i - E_T}{kT} \right) \quad (\text{I.5})$$

$E_T$  : l'énergie du piège

$E_i$  : l'énergie intrinsèque qui correspond à la position énergétique du niveau de fermi.

$K$  : la constance de Boltzmann

L'énergie libérée durant la recombinaison est transmise au réseau par l'émission d'un phonon. Ce mécanisme est illustré dans la figure I.3

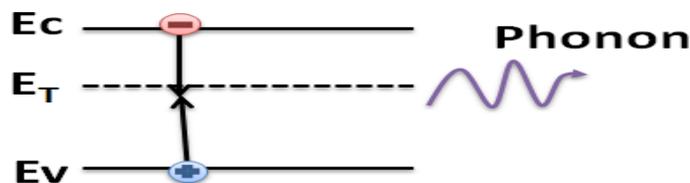


Figure I.2 : Recombinaison SRH via un défaut dans le gap.

### 1.2.4.2 Recombinaisons radiatives

La recombinaison des porteurs en excès peut également se faire directement bande à bande. Dans un matériau à gap direct ce type de transition est très probable et l'énergie résultant de la recombinaison est évacuée en totalité par l'émission d'un photon de fréquence  $\nu$  telle que  $h\nu \sim E_c - E_v$  (la différence d'énergie entre la bande de conduction BC et de valence BV). Dans un matériau à gap indirect, cela nécessite l'émission de phonons afin de conserver la quantité de mouvement. C'est le mécanisme inverse de l'absorption. Il est décrit par la relation suivante [8]:

$$U_{rad} = \beta \cdot (n \cdot p - n_i^2) \quad (I.6)$$

Avec

$U_{rad}$  : taux de recombinaison radiative

$\beta$  : coefficient de recombinaison radiative

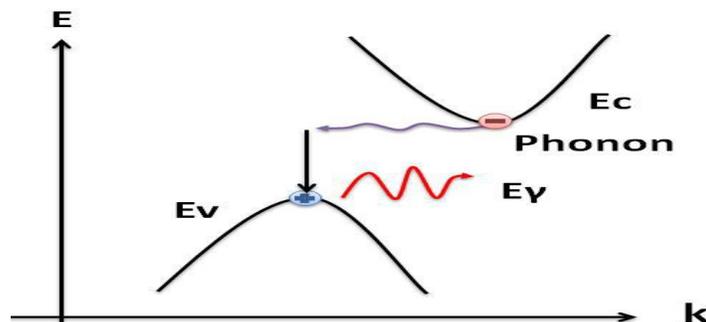


Figure I.3: Recombinaison radiative dans un semi-conducteur à gap indirect.

### 1.2.4.3 Recombinaisons Auger

Le dernier mécanisme de recombinaison est le mécanisme Auger. Les porteurs se recombinent bande à bande, mais contrairement à la désexcitation radiative, l'énergie libérée est transmise à un troisième porteur qui se retrouve excité dans un niveau supérieur de la bande de conduction dans le cas d'un électron ou un niveau plus profond de la bande de valence dans le cas d'un trou. Le troisième porteur se thermalise alors en émettant un ou plusieurs phonons.

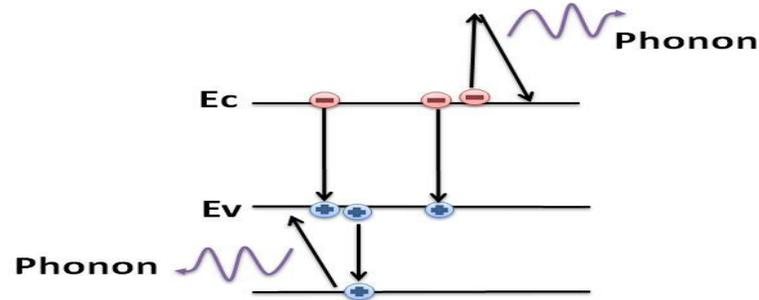


Figure I.4 : Recombinaison Auger .

Du fait de l'interaction à trois particules, c'est un mécanisme qui va dominer lorsque la concentration de porteurs va être importante (fort dopage ou forte injection). Il est décrit par l'équation :

$$U_{\text{auger}} = C_p \cdot p \cdot (n \cdot p - n_i^2) + C_n \cdot n \cdot (n \cdot p - n_i^2) \quad (\text{I.7})$$

### I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La structure d'une cellule solaire est équivalente à une diode à jonction, sous illumination c'est une diode polarisée en direct. La figure I.10 représente une cellule solaire sous illumination débitant une charge. Nous pouvons diviser cette cellule en trois parties différentes [9] :

- La zone de quasi-neutralité (ZQN) de l'émetteur
- La zone de charge d'espace (ZCE)
- La zone de quasi-neutralité (ZQN) de la base

Les photons incidents  $h\nu$  créent des porteurs dans chacune des régions et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés.

Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace ou zone intrinsèque I sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement, vers la région où ils deviennent majoritaires [10]

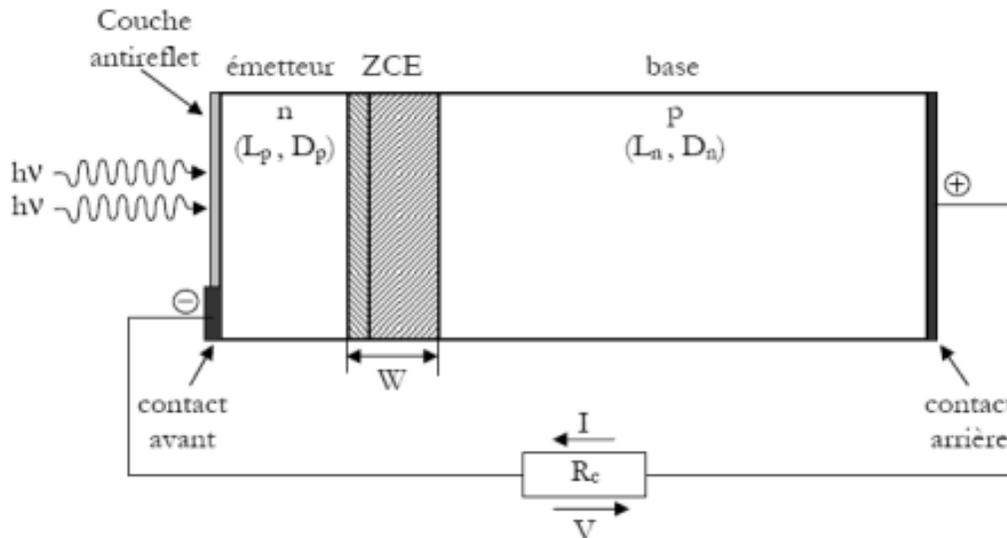


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire sous illumination.

### I.3.1 Niveau de Fermi et quasi-niveaux de Fermi

Le *Niveau de fermi*  $E_F$  dans un semi-conducteur à l'équilibre se réfère à la fonction de distribution statique des électrons dans les états de la bande de conduction s'écrit :

$$f_n(E) = f(E) \quad (\text{I.8})$$

$f(E)$  : est la fonction de distribution de Fermi-Dirac. La fonction de distribution statique des trous dans les états de la bande de valence vaut :

$$f_p(E) = 1 - f(E) \quad (\text{I.9})$$

A l'équilibre, le niveau de Fermi  $E_F$  est donc identique pour les électrons dans la bande de conduction et pour les trous dans la bande de valence. Sa position est étroitement liée aux nombres

volumiques de porteurs de charge. Elle peut être fixée par les niveaux d'impuretés qui fournissent les porteurs majoritaires.

L'identité des niveaux de Fermi des électrons et des trous correspond à la condition d'équilibre exprimée sous forme de la loi d'action de masse

$$n_o p_o = n_i^2 \quad (\text{I.10})$$

Un semi-conducteur est hors équilibre lorsqu'il y a excès ou défaut de porteurs par rapport aux concentrations d'équilibre. Dans les équations

$$n = n_o + \Delta n \quad (\text{I.11})$$

$$p = p_o + \Delta p \quad (\text{I.12})$$

$\Delta n$  et  $\Delta p$  peuvent être positives ou négatifs, le déséquilibre se manifeste par un découplage thermodynamique des électrons et des trous.

Les *quasi-niveaux de Fermi* sont définis par rapport aux nombres volumiques de porteurs hors équilibre  $n$  et  $p$ . en décrivant  $E_F^n$  et  $E_F^p$  pour les quasi-niveaux de Fermi, il vient pour un semi-conducteur non dégénéré, hors équilibre

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F^n - E_c}{kT}\right) \quad (\text{I.13})$$

Avec  $N_c = 2.5 \cdot 10^{25} \left(\frac{m_n^*}{m_o}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F^p}{kT}\right) \quad (\text{I.14})$$

Avec  $N_v = 2.5 \cdot 10^{25} \left(\frac{m_p^*}{m_o}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$

### I.3.2 Caractéristiques d'une cellule solaire en InP

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) (figure I.6) qui représente la variation du courant produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule et par des paramètres externes qui sont : la tension à circuit-ouvert , le courant de court-circuit , le facteur de forme et le rendement de la conversion .

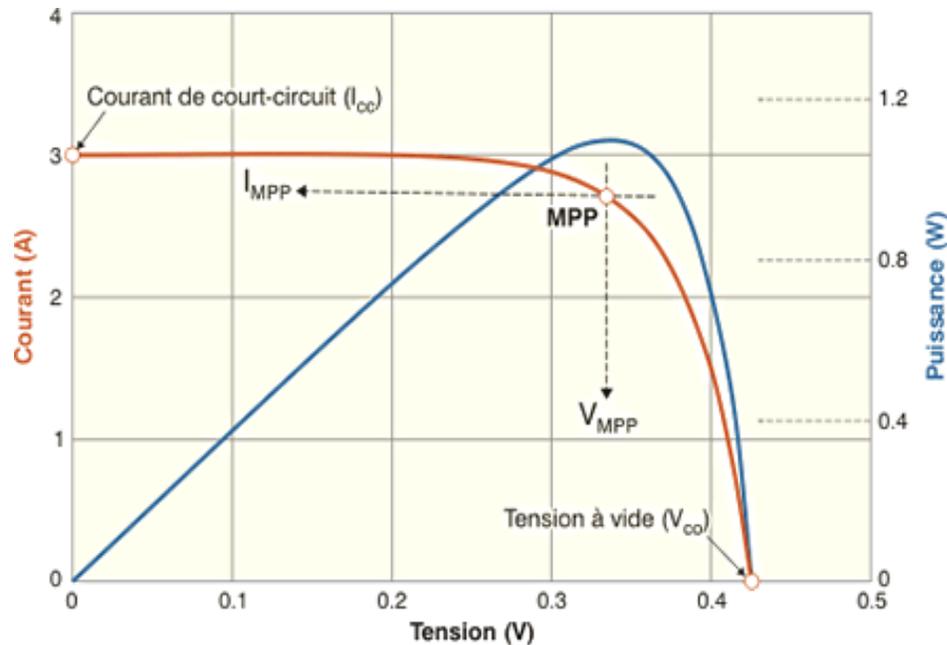


Figure I.6 : Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire sous éclairage

### I.3.2.1 Le courant court-circuit ( $I_{cc}$ )

Il s'agit du courant obtenu avec une différence de potentiels nulle aux bornes de la cellule ( $V=0V$ ). C'est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît avec l'intensité d'illumination et dépend de la surface de la cellule, du spectre d'excitation, de la mobilité des porteurs et de la température [11].

### I.3.2.2 La tension à circuit-ouvert ( $V_{co}$ )

La tension de circuit ouvert est la différence du potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire :  $V_{co} = V (I=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.15)$$

$\frac{KT_c}{q}$ : Représentant la potentielle thermodynamique.

### I.3.2.3 La puissance maximale ( $P_{max}$ )

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit Tension-Courant est maximum.

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (\text{I.16})$$

### I.3.2.4 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est un indicateur de la qualité de la diode. On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{I.17})$$

### I.3.2.5 Rendement de conversion ( $\eta$ )

Le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{I.18})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [12].

## I.4 Phosphure d'indium

Le phosphure d'indium est un composé binaire III-V utilisé principalement dans la fabrication des diodes LED, des diodes lasers et des transistors FET (Field-effet transistors). De tous les composés III-V, c'est le GaAs qui a fait l'objet de premières recherches en raison de ses applications importantes. La technologie développée ensuite a été appliquée à l'InP et ces composés.

### I.4.1 Quelques dates importantes dans l'histoire d'InP dans le photovoltaïque

**En 1988** Christopher Keavney, Stanley M. Vernon et Victor E. Haven ont fabriqué La 1<sup>ère</sup> cellule solaire par la technique MOCVD et l'implantation ionique,  $\eta = 18.8\%$  [13].

**En 1993** La 1<sup>ère</sup> modélisation numérique d'une cellule en InP avec le logiciel ADEPT [14] donne un rendement  $\eta = 21.2\%$

**En 1995** Fabrication d'une cellule solaire d'InP à homojonctions n+p d'un rendement de conversion  $\eta = 18.05$  [15].

**En 1996** P. R. Sharps et M. L. Timmons ont développé des cellules solaires InP de types n/p et p/n à émetteurs épais avec la méthode (MOCVD), ont obtenu comme résultat, des rendements de 14.1% et 13.9% respectivement [16].

**En 1998** M.F. Vilela, A. Freundlich, C. Monier, F. Newman et L. Aguilar ont étudié l'influence de l'émetteur sur le rendement et le résultat  $n=10.5$  [17].

**En 2008** Le 1<sup>er</sup> dispositif photovoltaïque à base d'InP avec Jonction Schottky en utilisant la quercétine donne  $\eta = 3.2\%$  [18].

**En 2013** La double jonction périphérique InP / Ge relativement mince a atteint une puissance remarquablement élevée, et un rendement  $\eta = 26,79\%$  [19].

### I.4.2 Structure cristalline d'InP

L'InP est un semi-conducteur composé qui contient deux éléments distincts, un élément du groupe III : l'indium (In) et un élément du groupe V : le phosphore (P). La liaison entre l'In et le P est covalente. L'InP se cristallise dans le système blende (ZnS) qui consiste à interpénétrer par une translation de vecteur  $r = (a/4, a/4, a/4)$  du quart de la diagonale de cube de deux réseaux cubiques à faces centrées (CFC), l'un de l'In et l'autre de P (figure I-1).

La maille élémentaire est un tétraèdre régulier, un atome d'In est en son centre et quatre atomes P sont aux sommets du tétraèdre (et vice versa). Ces liaisons forment entre elles un angle de  $109,47^\circ$ , le réseau réciproque de l'InP est un réseau cubique à faces centrées [20]

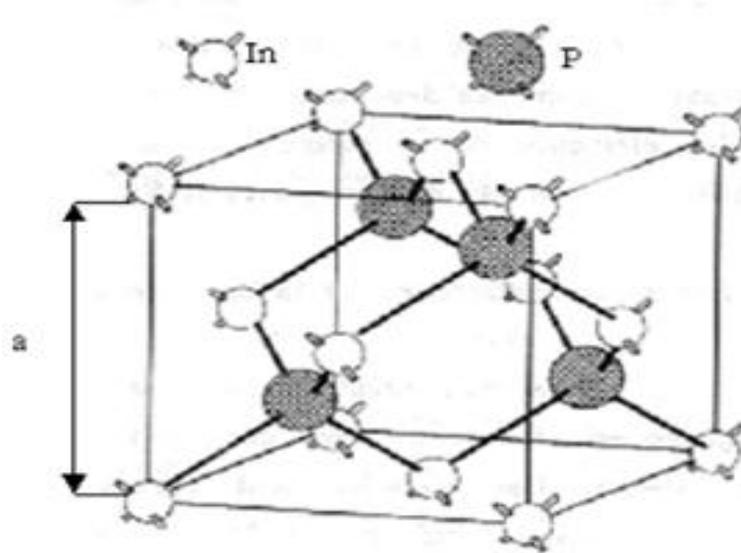


Figure I.7: Structure de Zinc-Blende

#### I.4.3 Structure de bande d'énergie d'InP

L'InP est un composé III-V à transition directe. Cela signifie que l'énergie minimale ( $\Gamma_{15}$ ) de la bande de conduction et l'énergie maximale ( $\Gamma_{15}$ ) de la bande de valence sont localisées au centre de la zone de Brillouin. Ceci a des conséquences importantes du point de vue des propriétés électroniques et optiques. La bande de conduction présente par ailleurs une courbure généralement très accentuée au voisinage de son minimum ( $\Gamma$ ). La masse effective des électrons étant inversement proportionnelle à cette courbure, ceci explique pourquoi dans les semi-conducteurs III-V à bande interdite directe comme InP et GaAs, la masse effective des électrons en ( $\Gamma$ ) est très faible, et par conséquent, la mobilité électronique élevée [21].

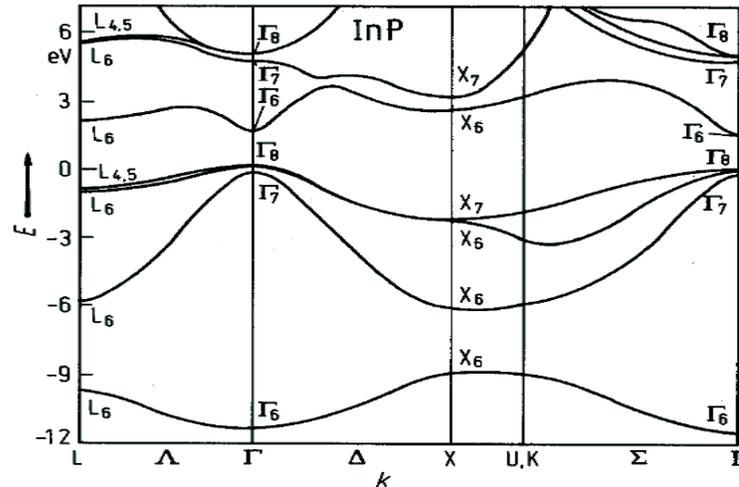


Figure I.8 : Structure de bande d'énergie d'InP.

#### I.4.4. Elaboration d'InP en couche mince

##### I.4.4.1 purification d'InP

Pour l'InP, la méthode consiste à réaliser un lingot poly cristallin très pur et hautement stœchiométrique par refroidissement d'un mélange d'Indium et de Phosphore, obtenu par réaction entre de l'Indium liquide et une vapeur de Phosphore à environ 30 atm.

##### 1.4.4.2 Obtention des lingots

Cette charge de matériau poly cristallin est par la suite fondue et recristallisée suivant la structure cristalline d'un germe InP monocristallin qui est tiré progressivement du bain fondu. Cette technique de tirage dite « Czochralski » permet d'obtenir des lingots de bonne qualité cristallographique

##### I.4.4.3 Réalisation des couches wafer

Les lingots sont découpés des substrats, tranches de faible épaisseur d'environ 300  $\mu\text{m}$  présentant des taux de dislocations inférieurs à  $10^5 \text{ cm}^{-2}$ . Aujourd'hui, l'état de l'art est suffisamment avancé pour que les différentes techniques d'épitaxie ait su trouver ses applications privilégiées et en particulier la MOCVD pour la réalisation des couches d'InP de haute pureté ( les wafers) [22].

En technique MOCVD , des couches d'InP de haute pureté sont déposées par réaction chimique du triethyl-indium ( $C_2H_5)_3In$  avec le phosphine  $PH_3$ . Le gaz porteur est un mélange de  $H_2$  et de  $N_2$ , la croissance s'effectue entre 500 et 650  $C^\circ$  à la pression de  $10^4$  Pa et un taux compris entre 10 et 22 nm/min. En plus des couches très pures , des couches dopées de type p sont réalisés en ajoutant le Zn sous forme de diethyl-zinc ( $C_2H_5)_2Zn$  dans le réacteur .Le dopage de type n s'obtient par l'incorporation d'impuretés S et Si induites sous forme gazeuse ( $H_2S$  ou  $SiH_4$ ) en cours de déposition .Le soufre convient aux niveau de dopage élevée ( $10^{24} m^{-3}$ ) tandis que le Si qui présente un coefficient de diffusion moindre convient aux structures modulées.[23]

La simulation numérique est un outil puissant qui permet d'analyser et expliquer les différents processus physiques qui régissent le fonctionnement de n'importe quel type de matériau. Elle se base sur un modèle physique qu'on essaye de le concrétiser par le logiciel de simulation Comsol Multiphysiques [24].

Dans ce travail, la modélisation numérique est utilisée comme un moyen de simulation du mode de fonctionnement d'une cellule solaire en InP pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique. La structure de la cellule choisie est de type p n. La modélisation numérique est utilisée aussi comme un outil prédictif des facteurs qui peuvent influencer le mode de fonctionnement de la cellule.

## **II.1 Comsol Multiphysiques**

### **II.1.1 Définition**

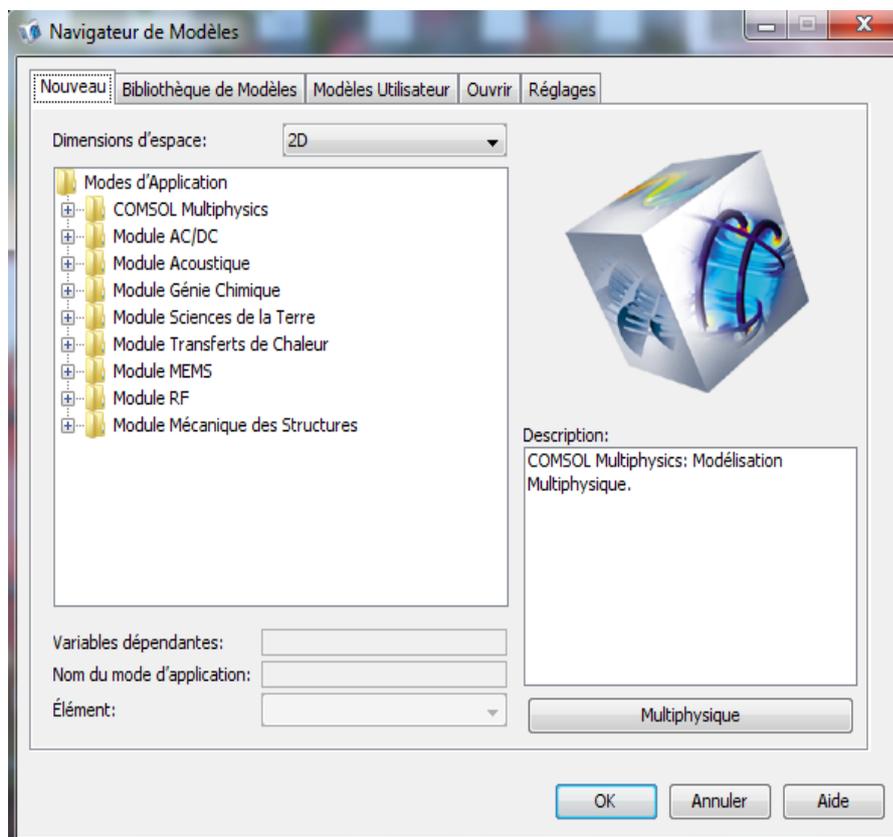
Le logiciel Comsol Multiphysiques, anciennement appelé FEMLab, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux.

Développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

La méthode d'éléments finis (FEM) résout de manière discrète des équations aux dérivées Partielles et donne une solution approchée. Pour discrétiser le problème, il convient de découper les différents objets ou « domaines » en fragments (généralement de forme triangulaire ou rectangulaire) appelés éléments finis. Cette étape de pavage est appelée le maillage.

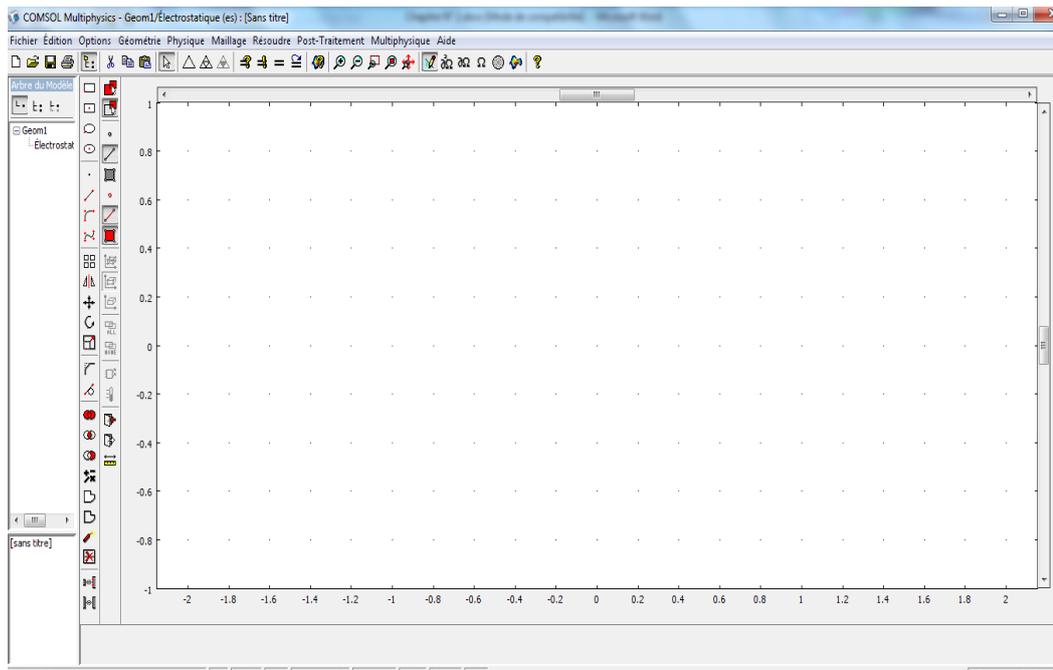
### II.1.2 Présentation générale du logiciel

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît (figure II.1). C'est lui qui permet de définir le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie (2D, 2D axisymétrique, 3D,...). Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables, et quel est le suffixe propre à ce modèle. En effet, Comsol crée automatiquement des variables pour chaque modèle. Ces variables sont toujours suffixées par le nom du modèle auquel elles sont rattachées. Par exemple Ex\_es est la composante en x du champ électrique dans le modèle « électrostatique ». Il y a lieu de faire attention à la casse lorsqu'on fait référence à ces variables.



*Figure II.1* Navigateur de Modèles de Comsol Multiphysiques.

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général de Comsol apparaît (figure II.2).



*Figure II.2 Fenêtres générale de Comsol Multiphysiques.*

D'une manière générale, lors de la création d'un projet, il faut parcourir le menu allant de gauche à droite. Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème.

On définit ensuite le comportement des domaines en leur associant des propriétés. Ensuite, on impose des conditions sur certaines frontières, et éventuellement sur certains points. Cette opération est à refaire pour chaque modèle utilisé dans le projet.

Une fois la physique du problème posée, il faut effectuer le maillage de la géométrie, Il est possible de faire un raffinement local du maillage. Il ne reste ensuite plus qu'à simuler le projet.

Toutes les inconnues sont alors déterminées. Il est possible de les afficher dans la fenêtre de poste processeur. L'utilisateur peut choisir quelles variables il désire représenter, et sous quelle forme.

## **II.2 Simulation numérique de la cellule solaire**

Au cours de ce travail, on a tenté de simuler numériquement le comportement d'une cellule solaire à base d'InP pour faire une étude sur l'influence du dopage et de l'épaisseur des différentes couches de la cellule solaire sur les paramètres externes de cette dernière. Pour cela nous allons dessiner le model choisi de la cellule et par la suite inclure les paramètres initiales et les équations fondamentales.

**Choix du model numérique :** Une cellule solaire de structure pn à base d'InP est choisi et modélisé afin de la simuler. Un model numérique a une dimension (2D) est réalisé.

**Equations :** Dans cette étude une résolution numérique en régime permanent est réalisée par la résolution de l'équation de poisson et les équations de continuité, des électrons et des trous, en 2D par la méthode des différences finies.

L'équation de Poisson est donnée par la relation suivante :

$$\nabla^2 \mathbf{v} = \frac{-\rho}{\epsilon_s} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V : Le potentiel électrostatique.

$\rho$  : La densité de charge d'espace.

$\epsilon_s$  : La permittivité diélectrique du semi-conducteur.

La densité de charge d'espace est définie comme :

$$\rho = p - n + N_D - N_A \quad (\text{II.2})$$

Avec :

n et p : sont les densités d'électrons et de trous libres.

$N_D$  et  $N_A$  : sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés

les équations de continuité pour les électrons et pour les trous sont données par les relations suivantes :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \mathbf{div} (\mathbf{J}_n) + G_n + R_n \quad (\text{II.3a})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \mathbf{div} (\mathbf{J}_p) + G_p + R_p \quad (\text{II.3b})$$

Avec

$R_n, R_p$  : les taux de recombinaison des électrons et trous.

$G_n, G_p$  : génération des électrons et trous.

$J_n, J_p$  : les densités de courant des électrons et trous.

$e$  : la charge électrique élémentaire.

Les densités de courant des électrons et trous sont définies comme suite :

$$\mathbf{J}_n = -en\mu_n\nabla V + eD_n \nabla n \quad (\text{II.4a})$$

$$\mathbf{J}_p = -ep\mu_p\nabla V + eD_p \nabla p \quad (\text{II.4b})$$

Avec :

$\mu_n, \mu_p$  : mobilités d'électrons et trous.

$D_n, D_p$  : coefficients de diffusion des électrons et trous reliés par la relation d'Einstein :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e} \quad (\text{II.5a})$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \quad (\text{II.5b})$$

Avec

$k$  : la constante de Boltzmann.

**Géométrie du model** : la cellule solaire à base d'InP créé est d'une épaisseur de  $1 \mu\text{m}$  dopée initialement de type N dont  $N_d = 1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Nous avons par la suite créé deux régions n et p. Une base de type n d'une épaisseur  $d_b = 0.96\mu\text{m}$  est dopée  $N_d = 1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , et un émetteur de type P d'épaisseur de  $D_e = 0.04\mu\text{m}$  dopé de  $N_a = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

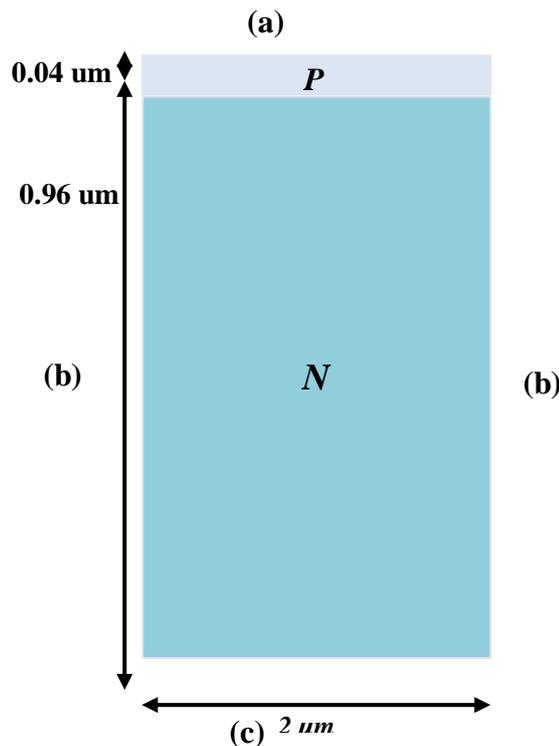


Figure II.3 Structure et dimensions de la cellule solaire.

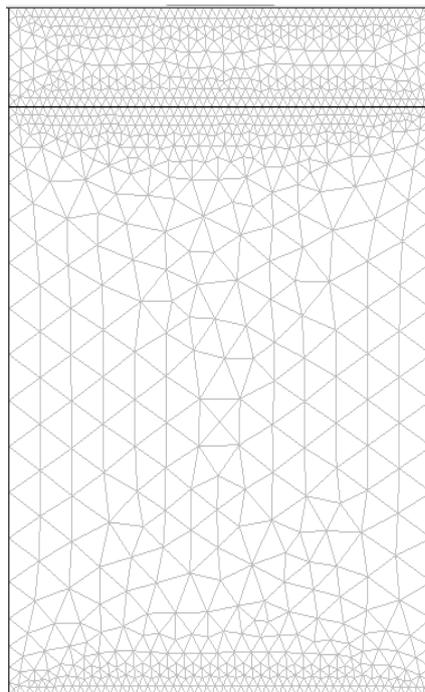
**Conditions aux limites :** Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes.

Les équations (II.1), (II.3.a) et (II.3.b) sont résolus en supposant la continuité du potentiel électrique et du champ électrique en toutes les frontières intérieures entre les couches (voir figure II. 3). Pour les frontières loin des zones actives, la composante du champ électrique normale et les densités de porteurs sont tous pris égal à zéro.

Aux contacts ohmique (limite (a) en contact avec le métal) le potentiel électrique est fixé à la valeur 0,5 V et nous supposons une vitesse de recombinaison infini sur ces surfaces.

Une condition symétrique à la charge nulle est considérée pour les parois latérales et l'arrière de la jonction pn (frontières (b) et (c)).

**Maillage de la structure :** le maillage généré de la structure est présenté dans la figure II.4. On a adopté un maillage non-uniforme. Nous avons généré un maillage plus dense autour de la jonction, à l'anode et la cathode. La maille à 860 nœuds et 1592 éléments. La qualité minimale des éléments est 0,8308.



**Figure II.4** Maillage de la structure.

**Simulation numérique :** La cellule est exposée à la lumière du soleil en dehors de l'atmosphère (AM0). AM0 correspond à la puissance de  $1.35 \text{ KW/m}^2$  et représente le spectre

solaire dans l'espace (hors atmosphère) et est utilisé pour évaluer les performances des cellules solaires pour les applications spatiales [25].

Les Paramètres initiales utilisée dans la simulation numérique sont indiqués dans le tableau suivant :

<b>Symbol</b>	<b>Designation</b>	<b>Valeur ( InP )</b>
q (°C)	Charge d'électron	$1.602 \cdot 10^{-19}$
T (K)	Temperature ambiante	300
K (v)	Constante de Boltzmann	$1.38 \cdot 10^{-23}$
Eg (v)	Energie de bandegap	1.344
$\epsilon_r$	Relative permittivité	12.5
$n_i$ (v)	Concentration intrinsèque	$1.3 \cdot 10^7$
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	Densité effective d'états a Ec	$5.7 \cdot 10^{17}$
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	Densité effective d'états a Ev	$1.1 \cdot 10^{19}$
$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	Mobilité des électron	5400
$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	Mobilité des trous	200

**Tableau II.1: Paramètres initiales utilisées dans la simulation numérique**

Ce chapitre constitue une étude prédictive de la sensibilité de la cellule solaire PN en InP aux paramètres physiques de la structure, qui sont : le dopage des régions  $p$  et  $n$ , et les épaisseurs des deux régions de la structure émetteur et base. Et aux paramètres environnementaux qui sont la température et l'éclairement. D'après cette étude il est possible de déduire les paramètres optimums de la cellule pour avoir un bon rendement de conversion.

### III.1 Effet des paramètres liés au matériau et à la structure sur les caractéristiques électriques de la cellule

#### III.1.1 Effet de la variation du dopage $N_a$ dans l'émetteur type P

Pour la cellule dans cette section on a utilisé comme paramètre fixe le dopage de la base à  $N_d = 5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et on varie le dopage de l'émetteur  $N_a$  de  $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , l'épaisseur choisi pour l'émetteur est  $X_p = 0.04 \mu\text{m}$  et pour la base  $X_n = 0.96 \mu\text{m}$ .

Le tableau III.1 englobe L'effet de la variation de l'épaisseur de base sur les paramètres externes de la cellule :

$N_a \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$J_{cc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{co} \text{ (V)}$	FF	$\eta \text{ (\%)}$
$5.10^{15}$	37.10	0.893	0.850	20.86
$1.10^{16}$	37.15	0.911	0.853	21.39
$5.10^{16}$	37.23	0.933	0.859	22.12
$1.10^{17}$	37.28	0.935	0.861	22.44
$5.10^{17}$	37.34	0.937	0.861	22.71
$1.10^{18}$	37.37	0.939	0.859	23.03

*Tableau III.1: L'effet du dopage  $N_a$  sur les paramètres externes de la cellule.*

Dans le but de détailler les résultats du tableau III.1, nous avons tracé la variation de la densité de courant en fonction de la tension dans la figure III.1.

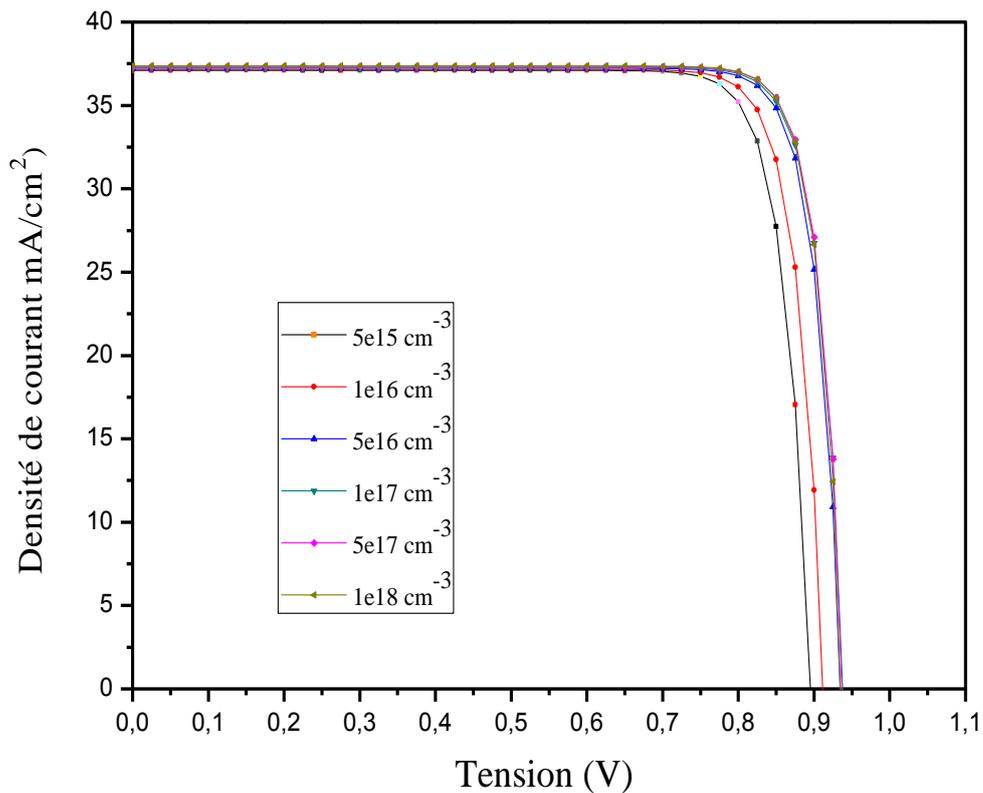


Figure III.1 La variation de la densité de courant en fonction de la tension.

D'après les résultats du tableau III.3, on voit bien que

- $J_{cc}$  varie de 37.10 à 37.37 mA/cm<sup>2</sup>,
- $V_{co}$  Augmente de 0.893 à 0.939V,
- FF présente une variation négligeable de 0.850 à 0.859
- $\eta$  augmente de 20.86% à 23.03%.

Avec l'augmentation de  $N_a$  les porteurs majoritaires (trous) augmentent alors que les minoritaires (électrons) diminuent suite à la recombinaison avec les porteurs majoritaires au niveau de la face frontale de la structure (région  $P$ ), ce qui accélère le déplacement des électrons minoritaires et cela implique une faible augmentation dans le composant  $J_{cc}$ . D'autre part,  $V_{oc}$  donné analytiquement par la relation suivante :  $V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right)$ , La faible augmentation du  $V_{co}$  est liée principalement au courant  $J_{cc}$ .

### III.1.2 Effet de la variation du dopage $N_d$ dans la base type N

Les paramètres de la cellule sont identiques à ceux de la section précédente en variant dans ce cas le dopage de la région N, On fixe le dopage de l'émetteur à  $N_a = 1.10^{18}$  et on varie le dopage de l'émetteur  $N_d$  de  $1.10^{15}$  à  $1.10^{17}$ , l'épaisseur choisi pour l'émetteur est  $X_p = 0.04\mu\text{m}$  et pour la base  $X_n = 1\mu\text{m}$ . Le tableau III.2 résume l'effet du dopage  $N_d$  sur les paramètres externes de la cellule.

$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{m/cm}^2$ )	$V_{co}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
$1.10^{15}$	37.37	0.939	0.859	22.33
$5.10^{15}$	37.39	0.959	0.866	23.07
$1.10^{16}$	37.41	0.974	0.866	23.35
$5.10^{16}$	37.42	0.983	0.867	23.61
$1.10^{17}$	37.43	0.998	0.856	23.79

Tableau III.2: L'effet du dopage  $N_d$  sur les paramètres externes de la cellule.

La figure III.2 représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension.

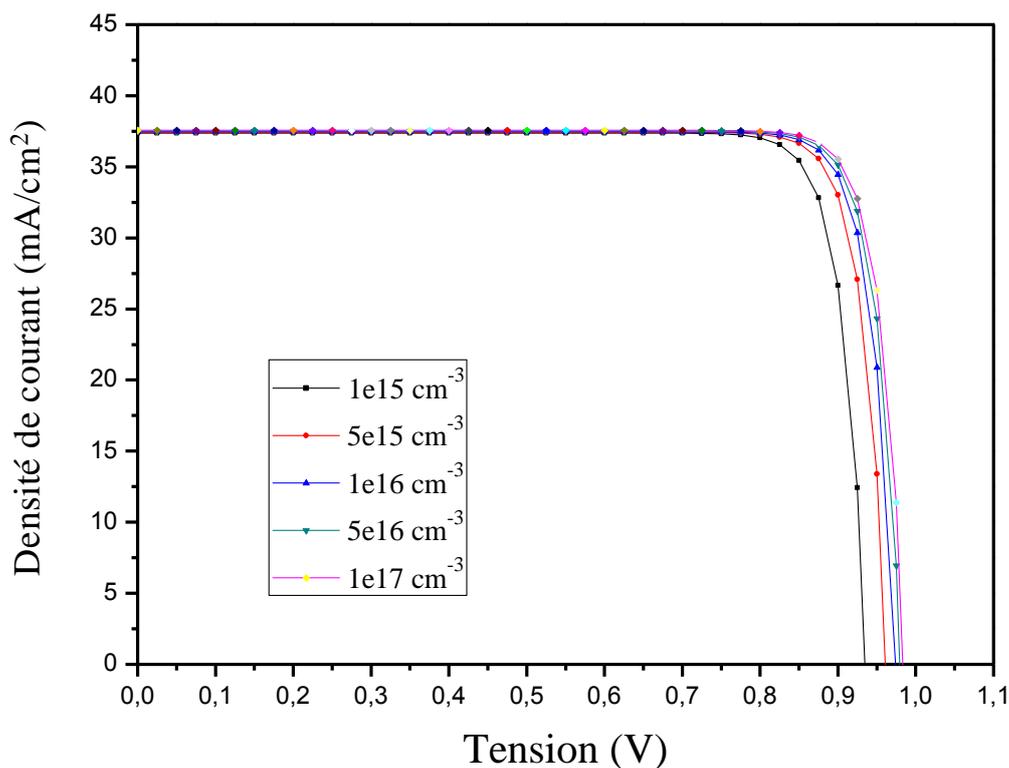


Figure III.2 La variation de la densité de courant en fonction de la tension

Pour les résultats du tableau III.2 on voit que  $J_{sc}$ , FF, et  $\eta$  ne présentent pas de variations notables.  $V_{oc}$  est le seul paramètre qui varie légèrement (de 0.93 à 0.99 V).

Dans ce cas ont à un comportement analogue à celui dans le cas précédant mais en s'inversant les rôles. Les électrons sont les majoritaires alors que les trous sont les minoritaires dans la face arrière de la structure (région n).  $J_{cc}$  contrairement à la section précédente, ne présente pas une variation notable puisque l'accélération des électrons par le champ électrique se produit dans la région n de la cellule là ou les électrons sont majoritaires. L'effet de cette accélération n'apparaît pas puisque la densité des électrons est élevée.

Comme conclusion, l'augmentation de  $N_d$  de  $5 \times 10^{15}$  à  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  n'a pas d'effet considérable sur les paramètres externes de la cellule.

### III.1.3 Effet de la variation d'épaisseur de l'émetteur type P

Pour la cellule dans cette section nous avons fixé l'épaisseur de la base à  $X_n = 0.96 \mu\text{m}$  et on varie l'épaisseur de l'émetteur de  $0.02 \mu\text{m}$  à  $0.1 \mu\text{m}$ , le dopage choisi pour l'émetteur est  $N_a = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et pour la base  $N_d = 1.10^{15}$ .

L'effet de l'épaisseur d'émetteur sur les paramètres externes de la cellule est donné dans le tableau III.3 :

<b>Xp (μm)</b>	<b>J<sub>cc</sub> (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>co</sub> (V)</b>	<b>FF</b>	<b>η (%)</b>
<b>0.02</b>	38.10	0.941	0.864	22.8
<b>0.04</b>	37.37	0.939	0.859	22.33
<b>0.06</b>	37.00	0.937	0.861	22.07
<b>0.08</b>	36.63	0.935	0.862	21.88
<b>0.1</b>	35.89	0.932	0.861	21.42

### III.3 Tableau : L'effet de l'épaisseur d'émetteur sur les paramètres externes de la cellule

La variation de la densité de courant en fonction de la tension est représentée dans la figure III.3 :

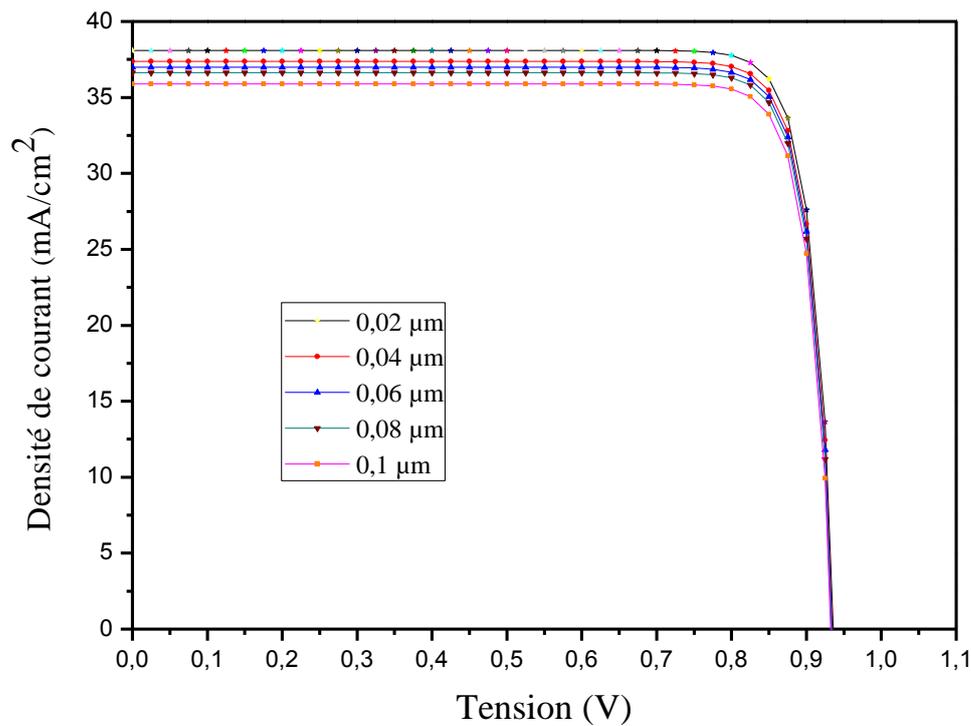


Figure III.3 la variation de la densité de courant en fonction de la tension.

On remarque que l'augmentation de l'épaisseur d'émetteur cause une diminution du rendement  $\eta$  qui est lié beaucoup plus à la diminution du photo-courant  $J_{cc}$ . Le  $J_{cc}$  dépend principalement de l'épaisseur des couches de la cellule, avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur le  $J_{cc}$  décroît.

Le gap direct du phosphore d'indium lui permet de capter le maximum d'électrons avec une mince couche d'émetteur.

#### III.1.4 Effet de la variation d'épaisseur de base type N

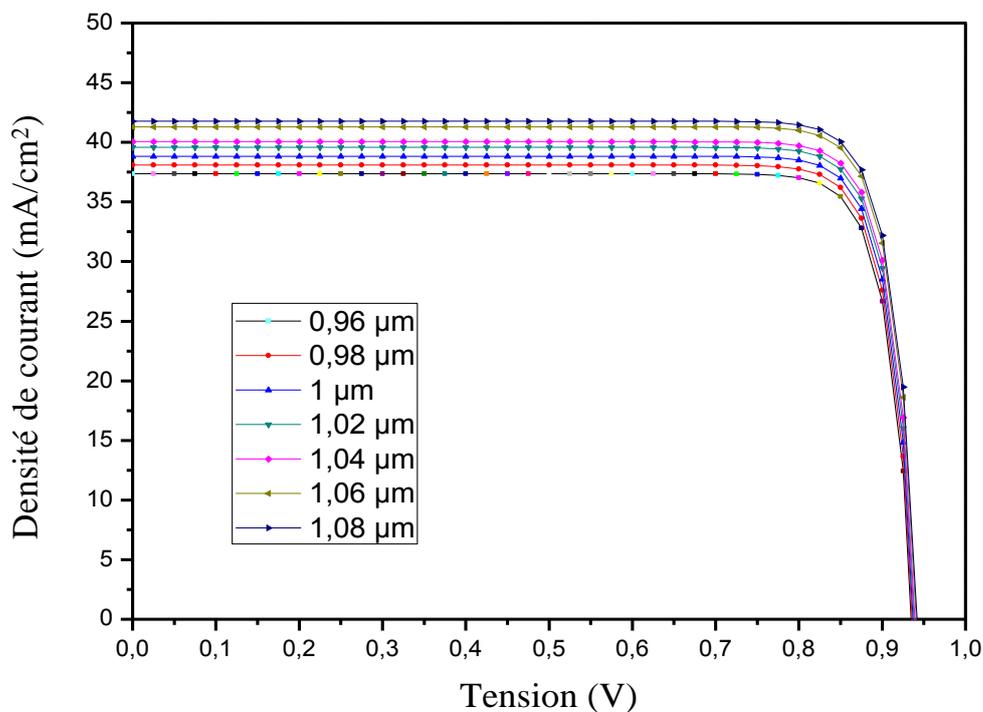
On fixe l'épaisseur de l'émetteur à  $X_p = 0,04 \mu\text{m}$  et on varie l'épaisseur de la base de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $0,2 \mu\text{m}$ , le dopage choisi pour l'émetteur est  $N_a = 1,10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et pour la base  $N_d = 1,10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

L'effet du dopage  $N_a$  sur les paramètres externes de la cellule est résumé dans le tableau III.4:

$X_n$ ( $\mu\text{m}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{co}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.96	37.37	0.939	0.859	22.33
0.98	38.10	0.939	0.860	22.80
1	38.84	0.939	0.862	23.03
1.02	39.58	0.939	0.863	23.69
1.04	40.05	0.939	0.864	24.08
1.06	41.31	0.939	0.866	24.82
1.08	41.78	0.939	0.867	25.22

**Tableau III.4 : L'effet de l'épaisseur de la base sur les paramètres externes de la cellule**

La figure suivante représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension.



**Figure III.4 La variation de la densité de courant en fonction de la tension.**

Comme conclusion, l'augmentation de l'épaisseur de base présente une augmentation remarquable du courant  $J_{cc}$  et du rendement  $\eta$ .

## III.2 Effets des paramètres environnementaux sur la caractéristique électriques de la cellule solaire

### III.2.1 Influence de la température

L'effet de la température sur les paramètres externes de la cellule est résumé dans le tableau III.5:

T (K)	$J_{cc}$ (m/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	P(W)	FF (%)	$\eta$ (%)
50	37.30	0.153	4.65	0.814	3.44
100	37.32	0.321	10.18	0.849	7.54
150	37.34	0.494	16.10	0.872	11.92
200	37.36	0.655	21.19	0.865	15.69
250	37.36	0.813	26.42	0.869	19.57
300	37.37	0.939	30.16	0.859	22.33
350	37.37	0.932	29.63	0.850	21.94
400	37.37	0.883	26.73	0.810	18.79
450	37.37	0.855	26.48	0.828	18.61

**Tableau III.5 : L'effet de la température sur les paramètres externes de la cellule**

Les relevés des caractéristiques I-V d'une cellule solaire pour différentes valeurs de la température de la cellule montrent une légère variation du courant de court-circuit. Par contre, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert et, par conséquent, une diminution de la puissance maximale disponible (figure III.5).

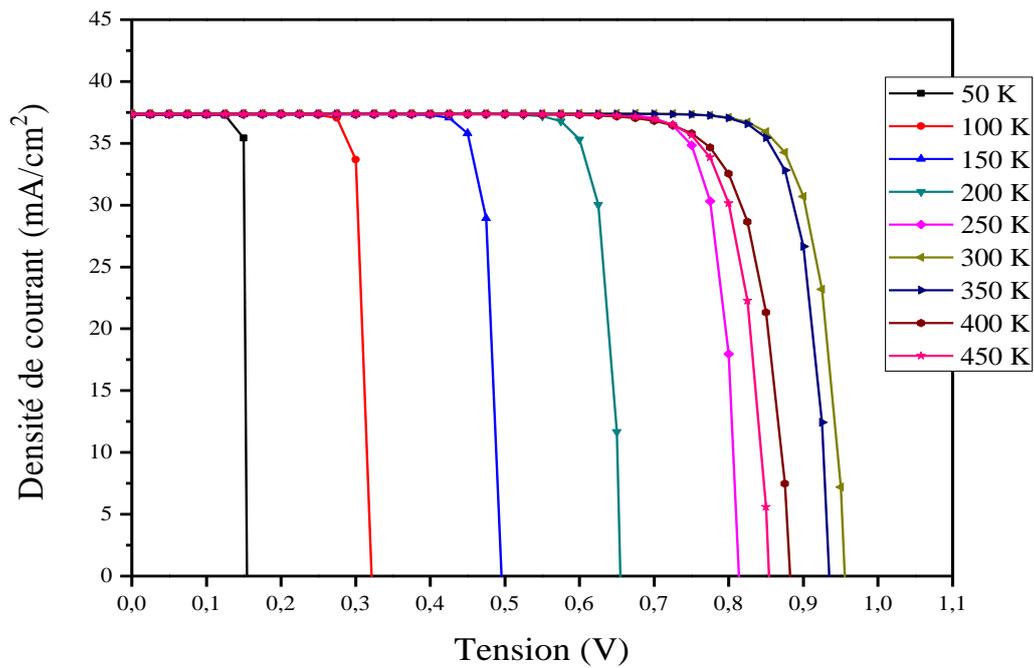


Figure III.5 La variation de la densité de courant en fonction de la tension.

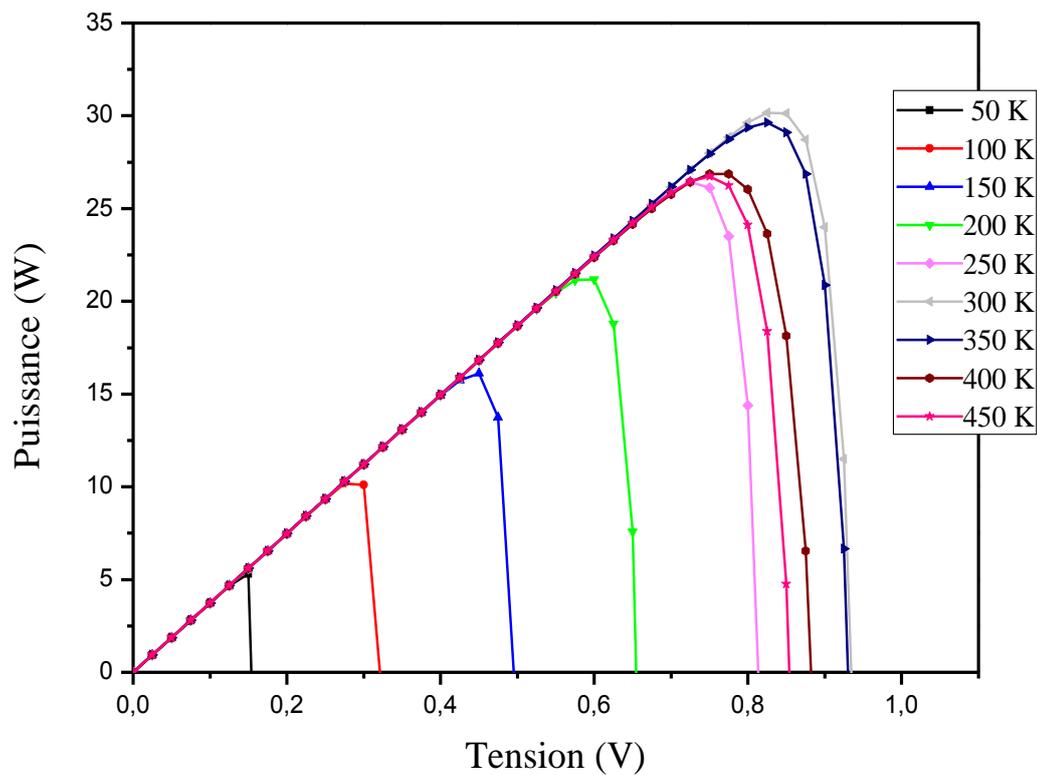


Figure III.6 La variation de la puissance en fonction de la tension

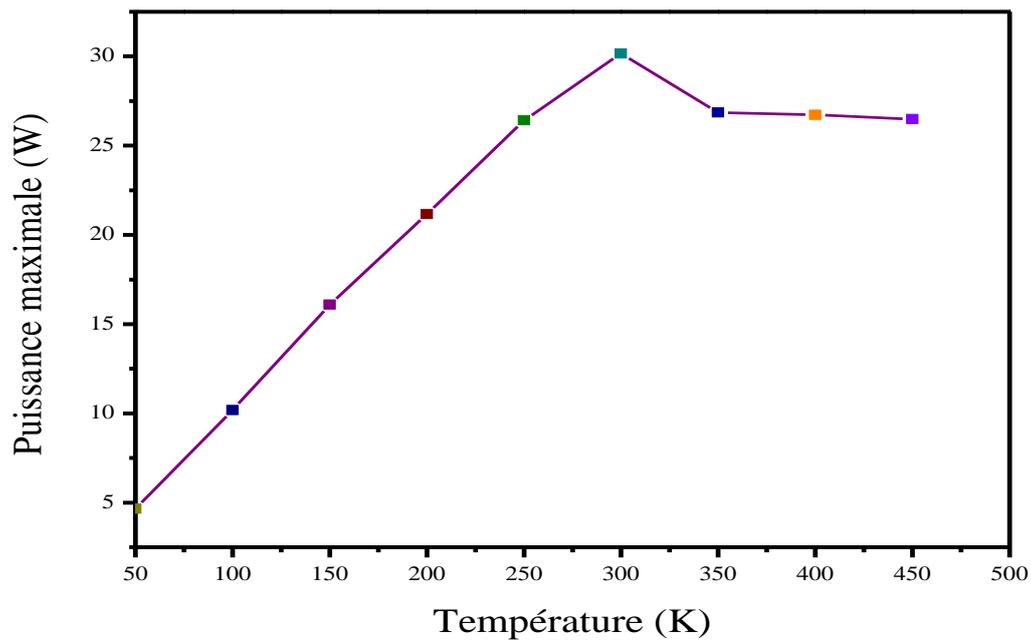


Figure III.7 La variation de la puissance maximale en fonction de la température.

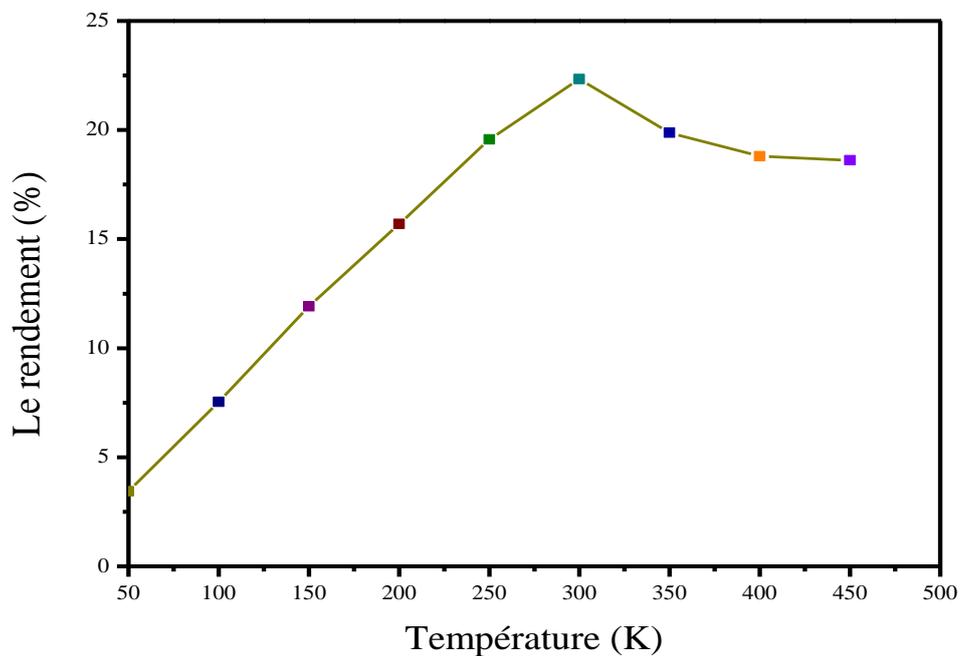


Figure III.8 La variation du rendement en fonction de la température.

D'après les résultats obtenus et les références bibliographiques traitant la physique des cellules solaires, le courant de saturation à l'obscurité ( $I_s$ ) dû à la recombinaison dans les régions quasi-neutres est proportionnel au carré de la concentration intrinsèque  $n_i$ . Le courant

de recombinaison dans la zone de charge d'espace varie, à son tour, proportionnellement avec cette concentration.

Une augmentation de la concentration intrinsèque augmente le courant de saturation (recombinaison) et par conséquent aboutit à une diminution de la tension en circuit ouvert. D'autres facteurs liés à la température agissent sur le courant  $I$  mais celui de la concentration intrinsèque est le plus dominant. La densité intrinsèque est exprimée par la relation:

$$n_i = 2(m_n^* m_p^*)^{3/4} \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

L'énergie du gap diminue peu avec la température. Cette diminution a été modélisée par une expression suggérée, initialement, par la relation :  $E_g \doteq E_0 - \frac{\alpha T^2}{(T+\beta)}$

Il est clair que plus la température n'augmente, plus la concentration intrinsèque  $n$  augmente, donc le courant de recombinaison augmente et la performance de la cellule sera affaiblie (principalement à cause de la diminution de la tension en circuit ouvert. En effet, des combinaisons mathématiques permettent de vérifier qu'approximativement, la tension en circuit ouvert varie linéairement avec la température. En outre, la diminution de cette tension est accompagnée par une très faible augmentation du photo-courant à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite. L'augmentation de photo courant avec la température est de l'ordre de 25mA/cm.K (soit une variation de +0.1%/K). La puissance maximale se dégrade rapidement avec la température. Cette forte dépendance de la température est la raison pour laquelle, une température fixe est choisie dans les tests de fonctionnement standards.

### III.2.2. Influence de l'éclairement

Le tableau III.6 résume l'effet de l'éclairement sur les paramètres externes de la cellule.

Flux (w/m <sup>2</sup> )	J <sub>cc</sub> (m/cm <sup>2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	P(W)	FF (%)	η (%)
Φ <sub>1</sub>	9.93	0.897	7.57	0.849	5.60
Φ <sub>2</sub>	19.80	0.918	15.67	0.806	11.60
Φ <sub>3</sub>	25.59	0.920	20.44	0.868	15.14
Φ <sub>4</sub>	37.37	0.939	30.16	0.859	22.33

**Tableau III.6: L'effet de l'éclairement sur les paramètres externes de la cellule**

La variation de la densité de courant en fonction de la tension est représentée dans la figure III.3 :

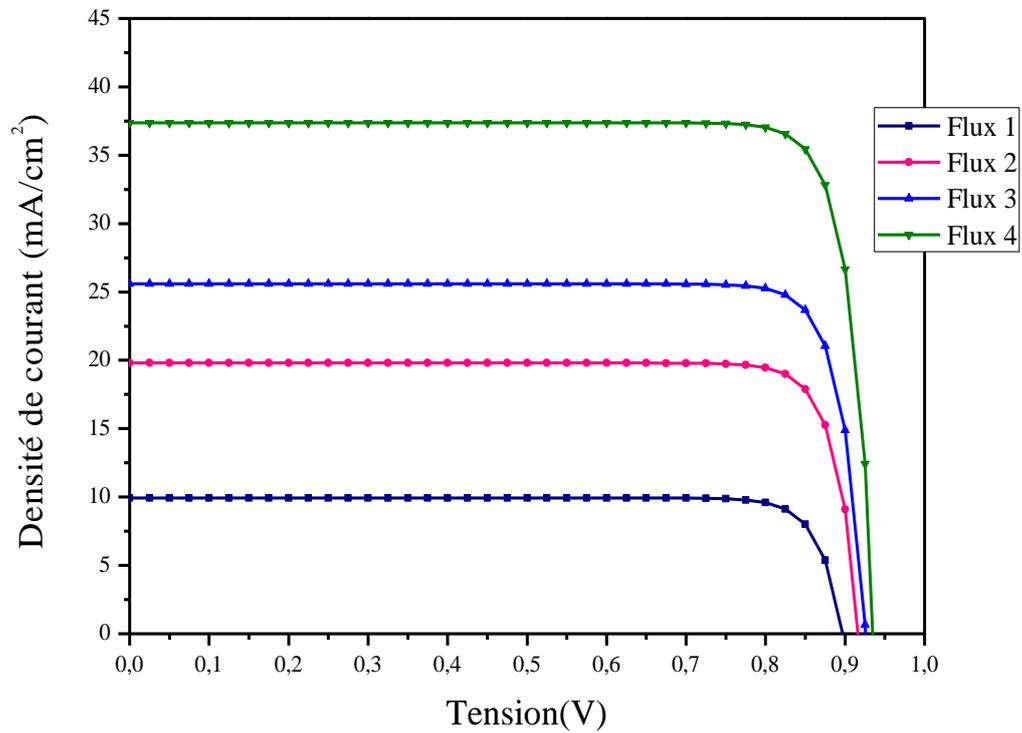


Figure III.9 La variation La variation de la densité de courant en fonction de la tension.

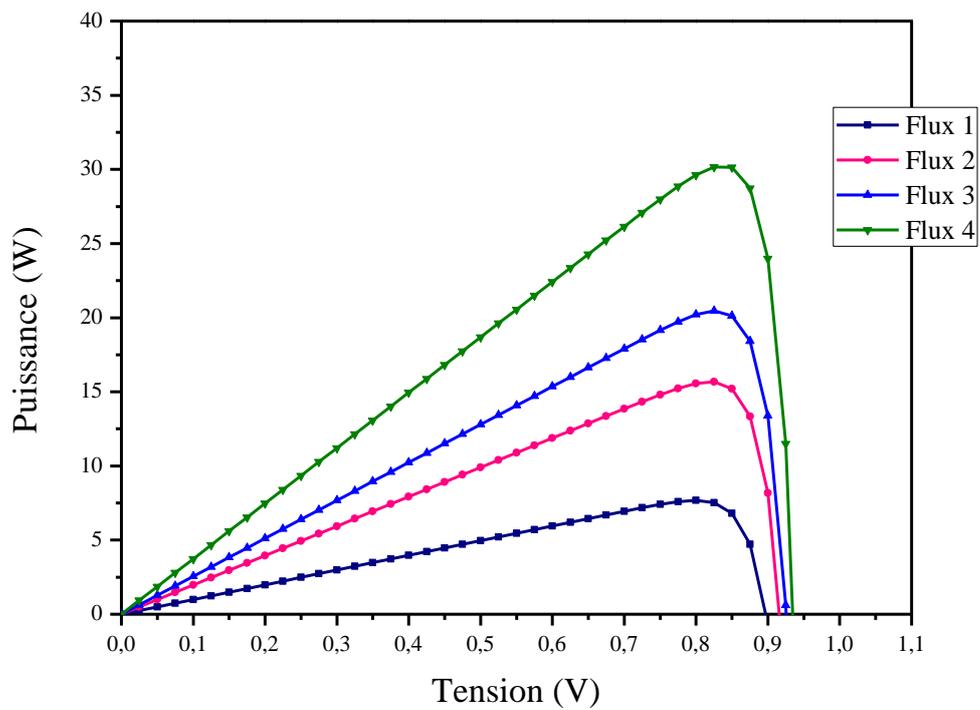


Figure III.10 La variation La puissance en fonction de la tension.

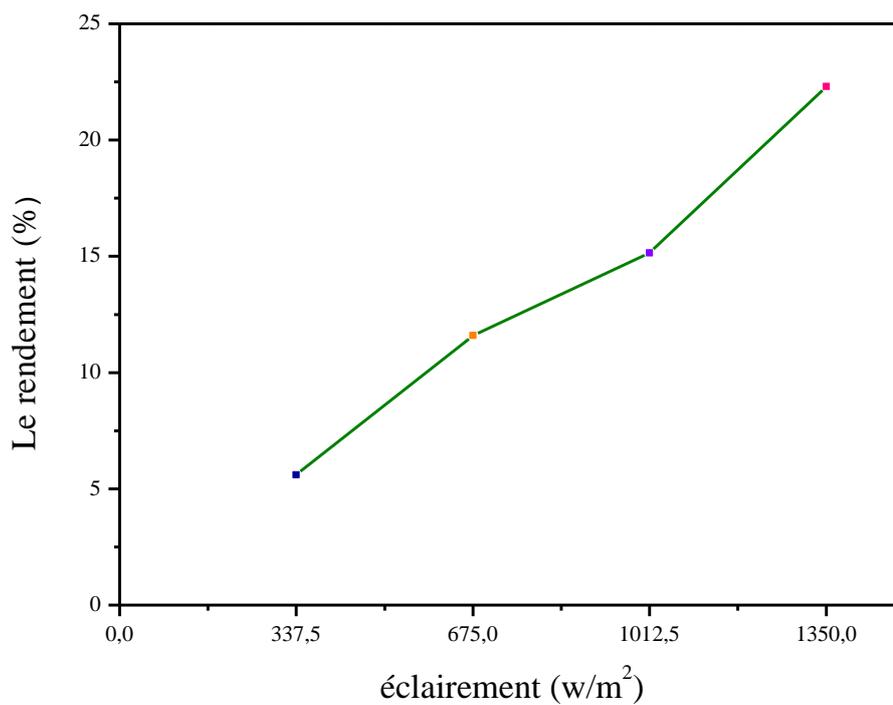
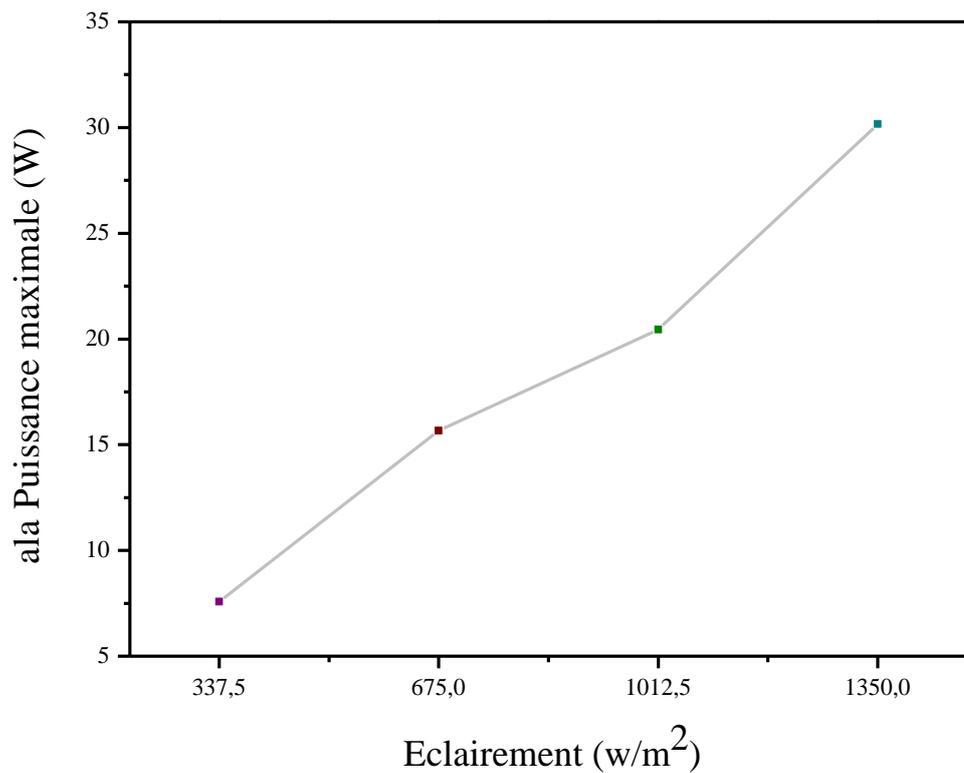


Figure III.11 La variation du rendement en fonction de l'éclairage.



**Figure III.12** La variation de la puissance maximale en fonction de l'éclairement.

Le courant de court-circuit augmente proportionnellement avec le niveau d'éclairement incident alors que la tension du circuit ouvert augmente de façon logarithmique avec l'éclairement. Par conséquent, il est constaté une forte influence de l'éclairement sur le courant délivré par la cellule solaire. Une telle influence se traduit par une augmentation de la puissance délivrée quand l'éclairement augmente, donc une augmentation de la puissance maximale de la cellule,

## *Les listes des figures et des tableaux*

### *❖ La liste des figures*

Figure I.1 :Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen, (rouge) AM0, (bleu) AM1	3
Figure I.2 : Recombinaison SRH via un défaut dans le gap	6
Figure I.3: Recombinaison radiative dans un semi-conducteur à gap indirect	7
Figure I.4 : Recombinaison Auger	8
Figure I.5- Principe de fonctionnement d'une cellule solaire sous illumination	9
Figure I.6- Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire sous éclairment	11
Figure I.7 Structure de Zinc-Blende	14
Figure I.8 Structure de bande d'énergie d'InP	15
Figure II.1 Navigateur de Modèles de Comsol Multiphysiques	19
Figure II.2 Fenêtres générale de Comsol	20
Figure II.3 structure et dimension de la jonction p/n	22
Figure II.4 Maillage de la structure	23
Figure III.1 La variation de la densité de courant en fonction de la tension	27
Figure III.2 La variation de la densité de courant en fonction de la tension	28
Figure III.3 la variation de la densité de courant en fonction de la tension	30
Figure III.4 La variation de la densité de courant en fonction de la tension	31
Figure III.5 La variation de la densité de courant en fonction de la tension	33
Figure III.6 La variation de la puissance en fonction de la tension	34
Figure III.7 La variation de la puissance maximale en fonction de la température	34

Figure III.8 La variation du rendement en fonction de la température	35
Figure III.9 La variation La variation de la densité de courant en fonction de la tension	36
Figure III.10 La variation La puissance en fonction de la tension	37
Figure III.11 La variation du rendement en fonction de l'éclairement	37
Figure III.12 La variation de la puissance maximale en fonction de l'éclairement	38

### ❖ *La liste des tableaux*

Tableau II.1 : Paramètres initiales utilisées dans la simulation numérique	24
Tableau III.1: L'effet du dopage Na sur les paramètres externes de la cellule	26
Tableau III.2: L'effet du dopage N <sub>d</sub> sur les paramètres externes de la cellule	26
Tableau III.3 : L'effet de l'épaisseur d'émetteur sur les paramètres externes de la cellule	27
Tableau III.4 : L'effet de l'épaisseur de la base sur les paramètres externes de la cellule	31
Tableau III.5 : L'effet de la température sur les paramètres externes de la cellule	33
Tableau III.6: L'effet de l'éclairement sur les paramètres externes de la cellule	35

# Sommaire

Résumé	i
Listes	ii
Sommaire	iii
Introduction générale	1
<i>Chapitre 1 : Notions générales.</i>	
I.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	3
I.2 Effet photovoltaïque	4
I.2.1 Absorption de la lumière	4
I.2.2 Génération optique	5
I.2.3 Collecte des charges	5
I.2.4 Recombinaison	5
1.2.4.1 Recombination Shockley Read Hall (SRH)	5
1.2.4.2 Recombinaisons radiatives	7
1.2.4.3 Recombinaisons Auger	7
I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	8
I.3.1 Niveau de Fermi et quasi-niveaux de Fermi	9
I.3.2 Caractéristiques d'une cellule solaire en InP	10
I.3.2.1 Le courant court-circuit ( $I_{cc}$ )	11
I.3.2.2 La tension à circuit-ouvert ( $V_{co}$ )	11
I.3.2.3 La puissance maximale ( $P_{max}$ )	12
I.3.2.4 Facteur de forme (FF)	12
I.3.2.5 Rendement de conversion ( $\eta$ )	13
I.4 Phosphore d'indium	13
I.4.1 Quelques dates importantes dans l'historique d'InP dans les cellules solaires	13
I.4.2 Structure cristalline d'InP	13
I.4.3 Structure de bande d'énergie d'InP	14
I.4.4. Elaboration d'InP en couche mince	15

I.4.4.1 purification d'InP	15
1.4.4.2 Obtention des lingots	15
I.4.4.3 Réalisation des couches wafer	15

*Chapitre 2 : Simulation numérique d'une cellule solaire p/n en InP*

II.1 comsol multiphysics	18
II.1.1 Définition	18
II.1.2 Présentation générale du logiciel	19
II.2 Simulation numérique de la cellule solaire	20

*Chapitre 3 : Résultats et discussions*

III.1 Effet des paramètres liés au matériau et à la structure sur les caractéristiques électriques de la cellule	26
III.1.1 Effet de la variation du dopage $N_a$ dans l'émetteur type P	26
III.1.2 Effet de la variation du dopage $N_d$ dans la base type N	28
III.1.3 Effet de la variation d'épaisseur de l'émetteur type P	29
III.1.4 Effet de la variation d'épaisseur de base type N	30
III.2 Effets des paramètres environnementaux sur la caractéristique électriques de la cellule solaire	32
III.2.1 Influence de la température	32
III.2.2. Influence de l'éclairement	35
Conclusion générale	39

## *Conclusion générale*

Dans ce présent travail, on s'est intéressé à faire une étude par simulation numérique du fonctionnement d'une cellule solaire en couche mince d'une structure p/n à base d'InP.

Dans un premier temps, on a fait connaître le phosphore d'indium, sa structure cristalline, et la technologie de fabrication des films InP. Des notions de base sur les cellules solaire ont été aussi évoquées en présentant leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs caractéristiques électriques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF, ...).

Dans le deuxième chapitre, on a présenté le logiciel de simulation et le modèle numérique de la cellule solaire p/n choisie pour l'étude.

Le troisième et dernier chapitre, du présent travail, aborde la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure p/n à base d'InP. Les résultats obtenus sont présentés et commentés.

Ce travail de simulation a été réalisé à l'aide du logiciel de simulation Comsol multiphysics. Le programme de la simulation a été utilisé comme un moyen pour prédire les paramètres optimums de la cellule, et comme conclusion, on a trouvé que pour aboutir à ceci il faut :

- Augmenter le dopage de la région p  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- Diminuer l'épaisseur de la région p
- Augmenter l'épaisseur de la région n.
- Une température ambiante d'environ de 300K
- Irradiation AM0 c'est-à-dire  $1350 \text{ w/m}^2$

Comme perspective à ce travail, il est souhaitable de faire une étude comparative entre les Performances de la cellule solaire de structure p-i-n et une autre de structure n-i-p.



## *Références bibliographiques*

- [1] Nichiporuk Oleksiy , Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, institut national des sciences appliquées de Lyon,2005.
- [2] Z. Swiatek, E. Beltowska, W. Maziarz and F. Krok. Characterization and properties of modified Si solar cell emitter by a porous Si layer. Mat. Science & Engineer. B, 2003, Vol. 101, pp. 291-296.
- [3] SAHOUANE Nordine, Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel, universite aboubekr belkaid – Tlemcen
- [4][5] BAGHDADLI Nawel , Évolution Du paramètre exciton de BOHR EN FONCTION DES Propriétés Optoélectroniques des semi-conducteurs III-V, Université abou bakr belkaid – Tlemcen-.
- [6] Benaïcha Mouna, Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque, université colonel hadj lakhdar –Batna.
- [7] [8] Mehdi Daanoune, Mesure de durée de vie de porteurs minoritaires dans les Structures semi-conductrices de basse dimensionnalité, l'École Doctorale EEATS 2006.
- [9]Francis Lévy « 18 physique et technologie des semi-conducteurs prof à l'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [10] ZEGHDAR Kamal, Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP, Université Mohamed Khider – Biskra-.
- [11] [12] MAZOUZ Halima, Dégradation des performances des cellules solaires sous l'effet de rayonnement, Université de Tahri Mohamed Béchar ;2016
- [13] Christopher Keavney, Stanley M. Vernon, Victor E. Haven , Spire Corporation, Patriots Park, Bedford, Mass. 01730, 1988.
- [14] S.M. Durbin and J.L. Gray, difficulties encountered in developing Numerical inp solar cell models, Purdue University 1993.
- [15] R. J. Walters, S. R. messenger, H. L. Cotal, G. P. summers and E. A. burke, Electron and proton irradiation-induced degradation of epitaxial InP solar cells, Solid-State Electronics Vol. 39, 1995.

- [16] P. R. Sharps and M. L. Timmons, development of p/n and n/p thick emitter InP solar cells, Research Triangle Institute, 1996.
- [17] M.F. Vilela\*, A. Freundlich, C. Monier, F. Newman, L. Aguilar, Chemical beam epitaxy for high-efficiency InP solar cells, University of Houston, 1998.
- [18] O. Gullu, A.Turut, Photovoltaic and electronic properties of quercetin/p-InP solar cells, Department of Physics, Ataturk University, Turkey, 2008.
- [19] B. Dennai\*, H. Ben Slimane, A. Helmaoui and M. N. Tandjaoui, Modeling of tandem solar cell InP / Ge using AMPS-1D, Physics Laboratory in Semiconductor Devices, Department of Physics, University of Bechar, Algeria, 2013.
- [20] ZEGHDAR Kamal, Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphore d'indium InP, Université Mohamed Khider – Biskra-.
- [21] Benaïcha Mouna, Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque, université colonel hadj lakhdar –Batna.
- [22] S. Gouraud , Croissance sélective d'InP dopé Fer par MOVPE assistée par Tertio-Butyle de Chlore (TBCl). Application à la réalisation de modulateurs électro-optiques à base de GaInAsP et d'AlGaInAs sur substrat InP, Thèse de doctorat d'université Blaise Pascal - Clermont II, 2005.
- [23] Francis Levy, Traité des matériaux - Tome 18, Physique et technologie des semi-conducteurs, Presse polytechnique et universitaire romandes, 1995-07-21
- [24] Laiadi Widad, Prédiction par simulation numérique des paramètres optimums, liés au matériau et à la structure, d'une cellule solaire en GaAs, Université de Biskra, 2008
- [25] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/>, 2012.