

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLEB BLIDA  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de technologie  
قسم الإلكترونيك  
Département d'électronique



## Mémoire de Master

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme

Master en Electronique

Spécialité Microélectronique

Présenté Par

**Aouni Sidahmed**

&

**Boudali Roumaissa**

---

# Etude et simulation d'une cellule solaire à 3 électrodes

---

Proposé par : Mr Said Nacer

Année universitaire : 2021/2022.



## **Remerciement**

Nous sommes reconnaissants à ALLAH pour la bonne santé et le bien-être qui nous a aidés à compléter ce travail.

Nous remercions messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Said Nacer pour la qualité de son encadrement, son soutien, sa patience, ses conseils avisés, et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous nos professeurs durant ces cinq années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur soutien.

Enfin nous en profitons pour remercier tous nos collègues pour tout le plaisir que nous avons eu au cours des cinq dernières années.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A Allah d'abord qui nous a donné le courage pour finir ce travail

A ma mère

A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, son affection, ....

A mon père

A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands Hommes.

A ma chère Grand-mère

Que DIEU le prit dans ses vastes paradis,

A mes sœurs.

A mes chers amis chacun par son nom.

Abdellah, Amine, Walid, Cherif, Farid, Racim, Mohamed-nour.....,

A tous mes enseignants.

Mon cher promoteur monsieur (Nacer Said),

A toute ma famille.

A ma chère binôme Boudali Roumaïssa.

Finalement à toute la promo du master spécialité : « Micro-électronique ».

Aouni Sidahmed.

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher Grand père (Bedira Mohamed Taher), que DIEU le prit dans ses vastes paradis,

Mes Parents,

Mes Frères et Ma Sœur,

Ma Grande mère,

Ma famille,

Mon Binôme,

Mon cher promoteur monsieur (Nacer Said),

Mes amis proches, et A tous ceux qui me sont chers,

A tous les professeurs qui m'ont enseigné durant toutes les étapes

Scolaires de ma vie, un grand merci.

Boudali Roumaissa.

## الملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة و محاكاة خلية نسيبية ثلاثية الوصل InGaP/InGaP/GaAs باستخدام نموذج برنامج COMSOL Multiphysics وأداة المحاكاة. تم النظر في العديد من التكوينات : تم إجراء الدراسة عن طريق تغيير سمك الطبقات (WE) و (WB) و (WC) مع ملاحظة الاختلاف في معالماتها المميزة ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$ ) سماكة الخلية المثلى هي  $0.05\mu m$  للطبقة الأولى (WE) و  $0.1\mu m$  للطبقة الثانية (WB) و  $5\mu m$  للطبقة الثالثة (WC) الهيكل الأمثل له عائد 25%:

**كلمات المفاتيح :** الكهروضوئية, الخلية الشمسية , ثلاثة أقطاب كهربائية , كومسول.

## Résumé

Dans ce travail nous avons étudié et simulé une cellule solaire multi-jonction à trois électrodes à base de couches minces InGaP/InGaP/GaAs en utilisant l'outil de modélisation et de simulation le logiciel COMSOL Multiphysics. L'étude s'est faite en variant les épaisseurs des couches de la cellule tout en observant la variation de ses paramètres caractéristiques (courant de court-circuit, tension de circuit-ouvert et rendement de conversion). Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure dans cette configuration sont obtenues pour une épaisseur de l'émetteur  $WE= 0.05\mu m$ , une épaisseur de la base  $WB= 0.1\mu m$  et une épaisseur du collecteur  $WC=5\mu m$ . Un rendement de conversion optimal de l'ordre de 25% a été obtenu.

**Mots clés :** photovoltaïque ; cellule solaire ; bipolaire ; trois électrodes ; comsol.

## Abstract

In this work we have studied and simulated a multi-junction solar cell with three electrodes based on thin layers InGaP/InGaP/GaAs using the modeling and simulation software COMSOL Multiphysics. The study was done by varying the thicknesses of the layers of the cell while observing the variation of its characteristic parameters (short-circuit current, open-circuit voltage and conversion efficiency). The results obtained in this study have shown that the optimal performance of our structure in this configuration is obtained for a thickness of the emitter  $WE= 0.05\mu m$ , a thickness of the base  $WB= 0.1\mu m$  and a thickness of the collector  $WC=5\mu m$ . An optimum conversion yield of around 25% was obtained.

**Keywords:** photovoltaic; solar cell; bipolar; three electrodes; comsol.

## Listes des Symboles et Abréviations

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

**AM** : masse d'air.

**AM 1.5** : Spectre de la lumière solaire.

**q**: Charge de l'électron.

**k** : la constante de Boltzmann.

**Rs** : Rayon du soleil.

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

**Jcc** : courant de court-circuit.

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

**η**: Le rendement.

**Pmax** : La puissance maximale.

**FF** : Le facteur de forme.

**EF** : le niveau de fermi.

**n,p** : Les densités des porteurs.

**α** : Le coefficient d'absorption.

**G** : Le taux de génération.

**Rn** : Taux de recombinaison.

**E** : le champ électrique.

**Jn** : densité de courant des électrons.

**Jp** : densité de courant des trous.

**$\mu_n$  et  $\mu_p$**  : mobilités des électrons et des trous.

**$\lambda$** : la longueur d'onde.

**$h$**  : la constante de Planck.

**WE** : épaisseur de la couche émetteur.

**WB** : épaisseur de la couche base.

**WC** : épaisseur de la couche collecteur.

**E** : énergie du photon.

**Nd** : Concentration en impuretés ionisées de type donneur.

**Na** : Concentration en impuretés ionisées de type accepteur.

**$\rho$**  : la densité de charges spatiale.

**I** : Courant fourni par la cellule.

**V** : Tension aux bornes de la cellule.

**Is** : Courant de saturation de la diode.

**T** : Température effective de la cellule.

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

**R<sub>s</sub>** : résistance série.

**R<sub>sh</sub>** : résistances shunt.

**n** : est le facteur d'idéalité de la diode.

**N<sub>c</sub>** : La densité d'états équivalente dans la BC.

**N<sub>v</sub>** : La densité d'états équivalente dans la BV.



# Table de matière

Remerciement.....	II
Dédicaces .....	III
Résumé .....	V
Listes des Symboles et Abréviations.....	VI
<b>Table de matière</b> .....	VIII
Table des figures .....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Introduction Générale.....	1
Chapitre 01.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Le rayonnement solaire.....	2
1.3 Le spectre solaire.....	3
1.4 Matériaux semi-conducteurs.....	5
1.4.1 Les semi-conducteurs intrinsèques .....	5
1.4.2 Semi-conducteur extrinsèque : (dopage).....	6
1.5 L'absorption.....	7
1.6 Génération optique .....	8
1.7 Recombinaison .....	8
1.8 Equation de transport dans les semi-conducteurs .....	9
1.8.1 Equation de poisson .....	9
1.8.2 Les deux équations de continuité .....	9
1.8.3 Les densités de courant des électrons et des trous .....	10
1.9 La jonction PN.....	10
1.10 L'effet photovoltaïque .....	12
1.11 Cellule solaire .....	12
1.12 Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	13
1.13 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque .....	15
1.14 Caractéristique courant tension .....	17
1.15 Paramètres électriques d'une cellule solaire.....	20
1.15.1 Le courant de court-circuit <b><i>I<sub>cc</sub></i></b> .....	20
1.15.2 La tension en circuit ouvert .....	20
1.15.3 Facteur de forme .....	20
1.15.4 Rendement de conversion.....	21
1.16 Conclusion .....	21

2	Chapitre 02 .....	22
2.1	Introduction.....	22
2.2	Les cellules multi-jonctions.....	22
2.3	Structure d'une cellule multi-jonction .....	22
2.4	Principe de base .....	23
2.5	Utilité des cellules multi jonctions.....	24
2.6	Configuration des cellules multi jonctions.....	25
2.6.1	Cellule monolithique tandem à deux terminals.....	25
2.6.2	Cellule monolithique tandem à trois terminals .....	26
2.6.3	Cellule tandem à quatre terminals .....	27
2.7	Les matériaux utilisés .....	28
2.7.1	Le matériau GaAs.....	29
2.7.2	Le matériau GaInP .....	29
2.8	Conclusion .....	30
3	Chapitre 03.....	31
3.1	Introduction.....	31
3.2	Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics .....	31
3.3	Présentation de la cellule à étudier .....	32
3.4	Paramètres de simulation.....	33
3.5	Variation de l'épaisseur de l'émetteur WE .....	33
3.5.1	Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la jonction BE de la cellule .....	33
3.5.1.1	Caractéristiques courant tension $J_E(VE)_{WE}$ .....	33
3.5.1.2	Caractéristiques puissance tension $P_E(VE)_{WE}$ .....	34
3.5.1.3	Densité de courant de court-circuit $J_{Ecc}(WE)$ .....	35
3.5.1.4	Tension de circuit ouvert $V_{co}(WE)$ .....	35
3.5.1.5	Puissance maximale $P_{Emax}(WE) = \text{Rendement } \eta(WE)$ .....	36
3.5.2	Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la jonction BC de la cellule .....	37
3.5.2.1	Caractéristiques courant tension $J_C(VC)_{WE}$ .....	37
3.5.2.2	Caractéristiques puissance tension $P_C(VC)_{WE}$ .....	37
3.5.2.3	Densité de courant de court-circuit $J_{Ccc}(WE)$ .....	38
3.5.2.4	Tension de circuit ouvert $V_{co}(WE)$ .....	39
3.5.2.5	Puissance maximale $P_{C_{max}}(WE) = \text{Rendement } \eta(WE)$ .....	39
3.6	Rendement total $R_{tot}(WE)$ .....	39
3.7	Variation de l'épaisseur de la base WB.....	40
3.7.1	Effet de l'épaisseur de la base sur la jonction BE de la cellule .....	40
3.7.1.1	Caractéristiques courant tension $J_E(VE)_{WB}$ .....	40

3.7.1.2	Caractéristiques puissance tension PE(VE)_WB.....	41
3.7.1.3	Densité de courant de court-circuit JEcc (WB).....	42
3.7.1.4	Puissance maximale PE <sub>max</sub> (WB) = Rendement $\eta$ (WB).....	42
3.7.2	Effet de l'épaisseur de la base sur la jonction BC de la cellule.....	43
3.7.2.1	Caractéristiques courant tension JC(VC)_WB.....	43
3.7.2.2	Caractéristiques puissance tension PC(VC)_WB.....	43
3.7.2.3	Densité de courant de court-circuit JCcc (WB).....	44
3.7.2.4	Puissance maximale PC <sub>max</sub> (WB) = Rendement $\eta$ (WB).....	45
3.8	Rendement totale R <sub>tot</sub> (WB).....	45
3.9	Variation de l'épaisseur du collecteur WC.....	46
3.9.1	Effet de l'épaisseur du collecteur sur la jonction BC de la cellule.....	46
3.9.1.1	Caractéristiques courant tension JC(VC)_WC.....	46
3.9.1.2	Caractéristiques puissance tension PC(VC)_WC.....	47
3.9.1.3	Densité de courant de court-circuit JCcc (WC).....	47
3.9.1.4	Tension de circuit ouvert V <sub>co</sub> (WC).....	48
3.9.1.5	Puissance maximale PC <sub>max</sub> (WC) = Rendement $\eta$ (WC).....	48
3.10	Structure optimisée.....	49
3.10.1	JE/PE(VE) optimisée.....	49
3.10.2	JC/VC(VC) optimisée.....	49
3.11	Conclusion.....	50
	Conclusion générale.....	51
	Références.....	XV

## Table des figures

Figure 1-1. Flux d'énergie solaire reçu par la terre [2].	3
Figure 1-2 Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.	4
Figure 1-3 Spectre solaire [4].	5
Figure 1-4 Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes [7].	6
Figure 1-5 Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes [7].	7
Figure 1-6 Représentation d'une jonction PN [12].	11
Figure 1-7 Coupe transversale d'une jonction PN.	11
Figure 1-8 Schéma de la cellule solaire à homo jonction PN.	13
Figure 1-9 Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule solaire.	14
Figure 1-10 Schéma équivalent de la cellule solaire idéale.	16
Figure 1-11 Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.	17
Figure 1-12 Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.	18
Figure 1-13 Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée.	19
Figure 1-14 Les différentes zones de la caractéristique I (V).	19
Figure 2-1 Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge.	24
Figure 2-2 Principe de la cellule multi-jonction.	24
Figure 2-3 Structure d'une cellule solaire monolithique tandem à deux terminals : Schéma de principe.	26
Figure 2-4 Structure d'une cellule solaire monolithique tandem à trois terminals.	27
Figure 2-5 Structure des cellules solaires tandem à quatre terminaux.	27
Figure 2-6 Structure cristalline des deux matériaux utilisés (a) InGaP [23], (b) GaAs [24].	28
Figure 3-1 Schéma de la structure de la cellule solaire a trois électrodes (InGaP/InGaP/GaAs).	32
Figure 3-2 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs WE	34
Figure 3-3 Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs WE.	34
Figure 3-4 Variation du courant de court-circuit $J_{Ecc}$ en fonction de WE	35
Figure 3-5 Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de WE	36
Figure 3-6 Variation de la puissance maximale et du rendement en fonction de WE	36
Figure 3-7 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs WE.	37
Figure 3-8 Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs WE.	38
Figure 3-9 Variation du courant de court-circuit $J_{Ccc}$ en fonction de WE.	38
Figure 3-10 Variation de la puissance maximale et du rendement en fonction de WE.	39
Figure 3-11 Variation du rendement total en fonction de WE.	40
Figure 3-12 Caractéristiques courant tension $J_E(V_E)$ pour différentes épaisseurs WB.	41
Figure 3-13 Caractéristiques puissance tension $P_E(V_E)$ pour différentes épaisseurs WB.	41
Figure 3-14 Variation de la densité de courant de court-circuit $J_{ECC}$ en fonction de WB	42
Figure 3-15 Variation de la puissance maximale $P_{E_{max}}$ en fonction de la couche WB.	42
Figure 3-16 Caractéristiques courant tension $J_C(V_C)$ pour différentes épaisseurs WB.	43
Figure 3-17 Caractéristiques puissance tension $P_C(V_C)$ pour différentes épaisseurs WB.	44
Figure 3-18 Variation de la densité de courant de court-circuit $J_{CCC}$ en fonction de WB.	44
Figure 3-19 Variation de la puissance maximale $P_{C_{max}}$ et du rendement en fonction de WB.	45
Figure 3-20 Variation du rendement total en fonction de WB.	46
Figure 3-21 Caractéristiques courant tension $J_C(V_C)$ pour différentes épaisseurs WC.	46
Figure 3-22 Caractéristiques puissance tension $P_C(V_C)$ pour différentes épaisseurs WC.	47
Figure 3-23 Variation de la densité de courant de court-circuit $J_{CCC}$ en fonction de WC.	47

Figure 3-24 Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de $WC$ . .....	48
Figure 3-25 Variation de la puissance maximale $PC_{max}$ en fonction de $WC$ . .....	48
Figure 3-26 Caractéristiques courant/puissance-tension optimisées JE/PE(VE). .....	49
Figure 3-27 Caractéristiques courant/puissance-tension optimisées JC/PC(VC).....	50

## Liste des tableaux

Tableau 2-1 Extrait du tableau périodique des éléments [22]. .....	28
Tableau 3-1 Paramètres de la structure simulée.....	33
Tableau 3-2 les épaisseurs optimisées pour notre structure. ....	49

# *Introduction Générale*

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

Plusieurs technologies existent pour capter et convertir l'énergie solaire. Elles sont basées sur la captation de l'énergie des photons, particules énergétiques qui composent la lumière. Les technologies développées permettent de convertir leur énergie en chaleur ou en électricité. L'énergie solaire est une énergie renouvelable dont l'utilisation ne produit pas de CO<sub>2</sub>. Celle-ci apparaît donc comme une solution possible aux problèmes posés par la raréfaction de certaines sources d'énergie, à leur coût et à leur impact sur l'environnement.

Cette technologie convertit directement l'énergie solaire en électricité. Le matériau des capteurs, souvent à base de silicium (Si), est un semi-conducteur. Les photons vont exciter des électrons dans ce matériau, en leur transférant une partie de leur énergie et en les rendant mobiles. Ces électrons mis en mouvement vont ainsi produire un courant continu, pouvant alimenter un réseau électrique. Un onduleur convertit ce courant continu en courant alternatif, qui pourra être utilisé par des appareils électriques.

Les cellules solaires multi-jonctions promettent à la fois une augmentation des rendements énergétiques et aussi une réduction des coûts de production.

Les cellules solaires multi-jonctions existent sous différentes configurations : à deux électrodes, à trois électrodes et à quatre électrodes.

Dans ce sens, nous nous sommes intéressés à la simulation des cellules solaires à trois électrodes à base de semi-conducteurs III-V dans le but d'améliorer leurs performances photovoltaïques. Les matériaux qui composent nos cellules sont : InGaP et GaAs.

Pour ce faire notre manuscrit se décompose de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques généralités sur la conversion photovoltaïque et sur les matériaux et leurs propriétés (optiques, électriques...etc).
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la cellule à trois électrodes et ses caractéristiques.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation obtenus et leurs interprétations.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.



# ***CHAPITRE 1***

## ***Notions fondamentales sur les cellules solaires***

## **Chapitre 01**

### **1.1 Introduction**

Dans le domaine photovoltaïque, l'un des buts importants des chercheurs est l'amélioration du rendement des cellules solaires. La cellule solaire est l'élément essentiel qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur dans une cellule solaire s'accompagne de différents phénomènes physiques telles que la génération et la recombinaison. Cette dernière dépend fortement du matériau semi-conducteur choisi. Dans ce chapitre nous présenterons quelques notions générales sur le rayonnement solaire et sur les semi-conducteurs, puis dans la seconde partie nous présenterons quelques notions générales sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque.

### **1.2 Le rayonnement solaire**

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le Système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367\text{W/m}^2$  [1].

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

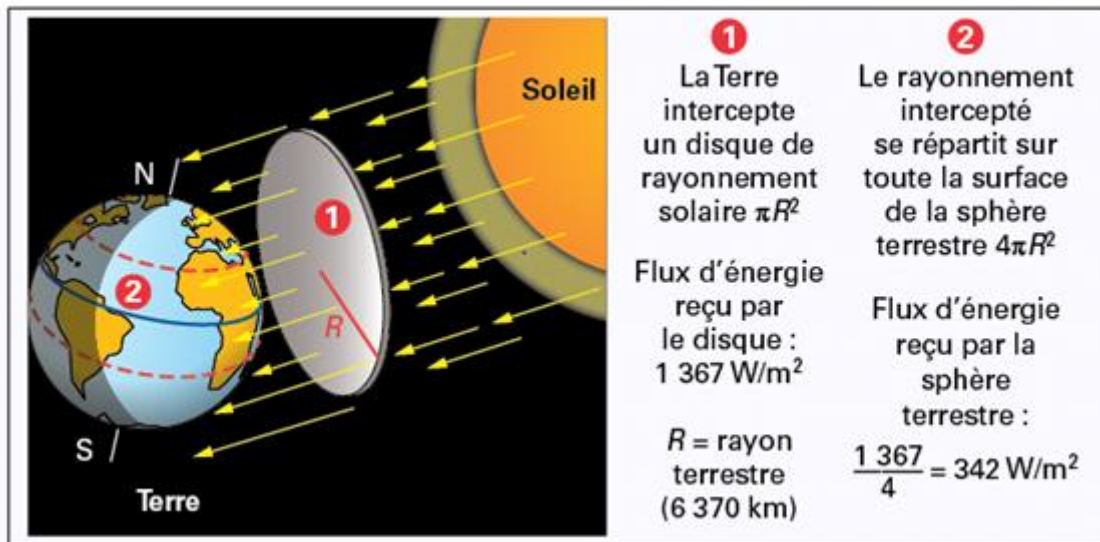


Figure 1-1. Flux d'énergie solaire reçu par la terre [2].

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\ \text{W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000\ \text{W/m}^2$ .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

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

## 1.3 Le spectre solaire

La décomposition en longueurs d'onde ou (couleurs) est le spectre du soleil. La lumière solaire est en effet composée de toute sorte de rayonnements de couleurs, caractérisées par leur gamme de longueurs d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

d'onde par la relation :

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

$h$  : La constante de Planck,

$\lambda$  : La longueur d'onde.

$c$  : La célérité (vitesse de la lumière).

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- Ultraviolet UV :  $0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$ , 6,4%
- Visible :  $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ , 48%
- Infrarouge IR :  $0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ , 45,6%

La relation directe entre l'énergie d'un photon s'exprime en électron-Volt et sa longueur d'onde exprimée en micromètre :

$$E(\text{ev}) = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (1.2)$$

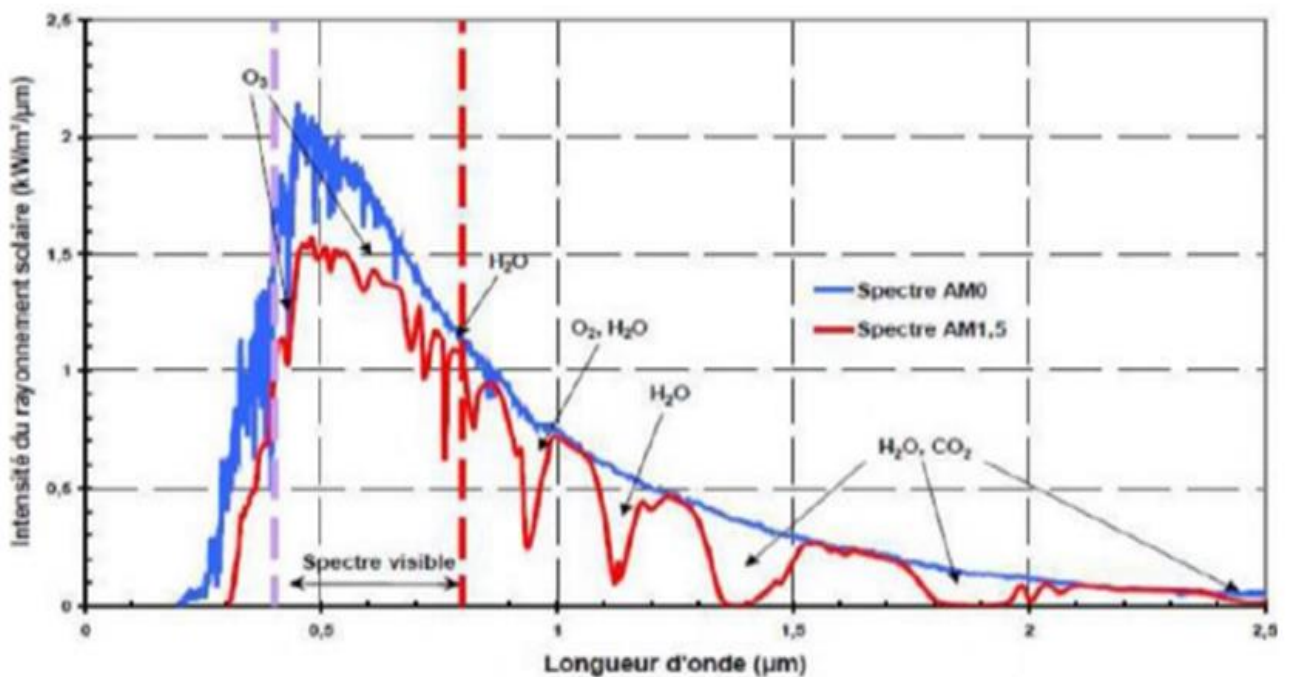


Figure 1-2 Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère

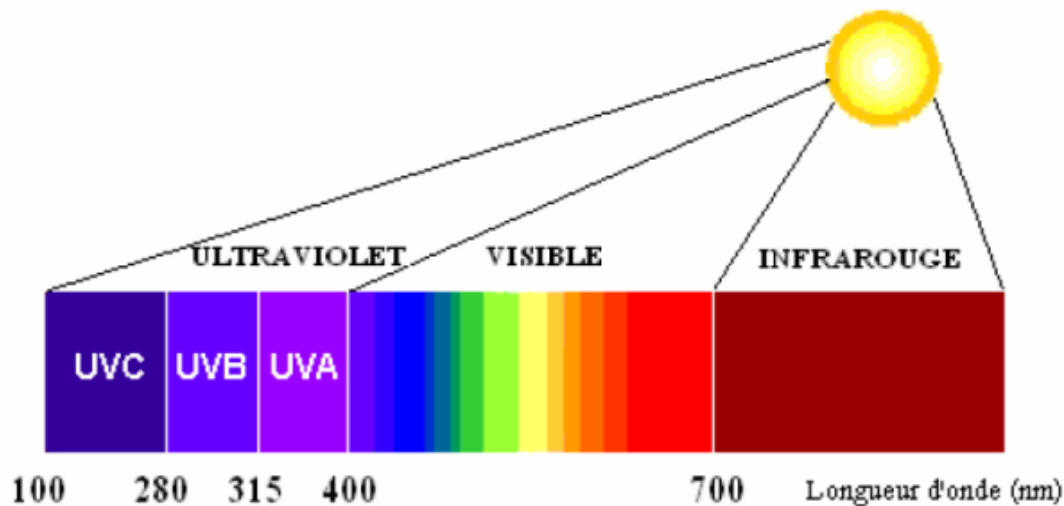


Figure 1-3 Spectre solaire [4].

## 1.4 Matériaux semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont les matériaux utilisés pour la fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques. Parmi les différents types de ces derniers le diamant qui se distingue des autres semi-conducteurs, notamment le silicium et le germanium, par sa capacité à supporter des environnements extrêmes en pression, température et puissance dissipée. La plus grande partie des composants (transistors, diodes et puce en général) sont réalisés en silicium [5].

### 1.4.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les semi-conducteurs intrinsèques sont des matériaux, en principe chimiquement purs et structurellement parfaits. Leur caractéristique principale est qu'à toute température, les concentrations d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont égales (une égalité entre les concentrations  $n$  et  $p$ ). Pour ce cas particulier, on définit une concentration intrinsèque  $n_i$  (égale aux concentrations  $n$  et  $p$ ) pour laquelle on montrera plus loin qu'elle est donnée par la relation :

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (1.3)$$

Où  $A$  est une constante spécifique du matériau [6].

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

## 1.4.2 Semi-conducteur extrinsèque : (dopage)

Les Semi-conducteurs extrinsèques, au contraire sont des matériaux dopés par des impuretés, dont la nature et la concentration de ces impuretés provoquent un déplacement du niveau de Fermi. Selon le porteur de charge majoritaire nous aurons un semi-conducteur de type :

- N, si ce sont des électrons(e) dans la bande de conduction.
- P, si ce sont des trous (p) dans la bande de valence.

### - Semi-conducteur dopé n

Pour un tel matériau, des atomes (ou impuretés) de type donneur (d'électrons) ont été introduits (en général en faible quantité) afin de privilégier la conduction par électrons plutôt que par trous. Les atomes peuvent être de la colonne V si le cristal initial est constitué d'atomes de la colonne IV. Prenons par exemple le cas du silicium dans lequel on introduit de phosphore. On associe au phosphore un niveau donneur  $E_d$  dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour  $T=0K$ , les atomes de phosphore sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ( $N_d > N_a$ ) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé N. A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés ; la densité de porteurs libres du semi-conducteur est représentée sur la figure 1.4 :

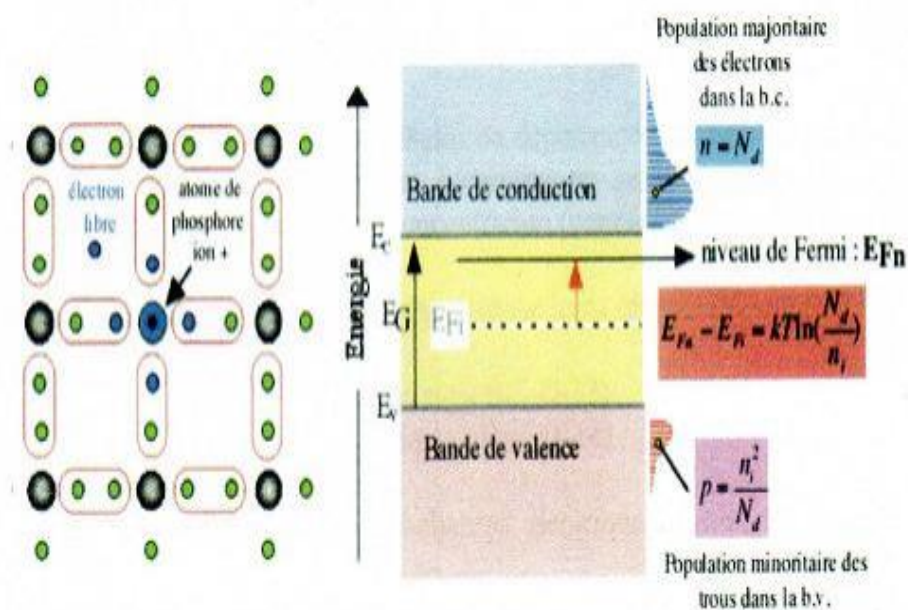


Figure 1-4 Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes [7].

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

## -Semi-conducteur dopé p :

Cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV. La figure 1.5 donne un aperçu de ce qui se passe pour un cristal de silicium dans lequel on a introduit des atomes de bore. L'association avec ses quatre voisins confère à l'atome de bore sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin qui lui-même peut en prendre un à un de ses voisins et ainsi de suite. La densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

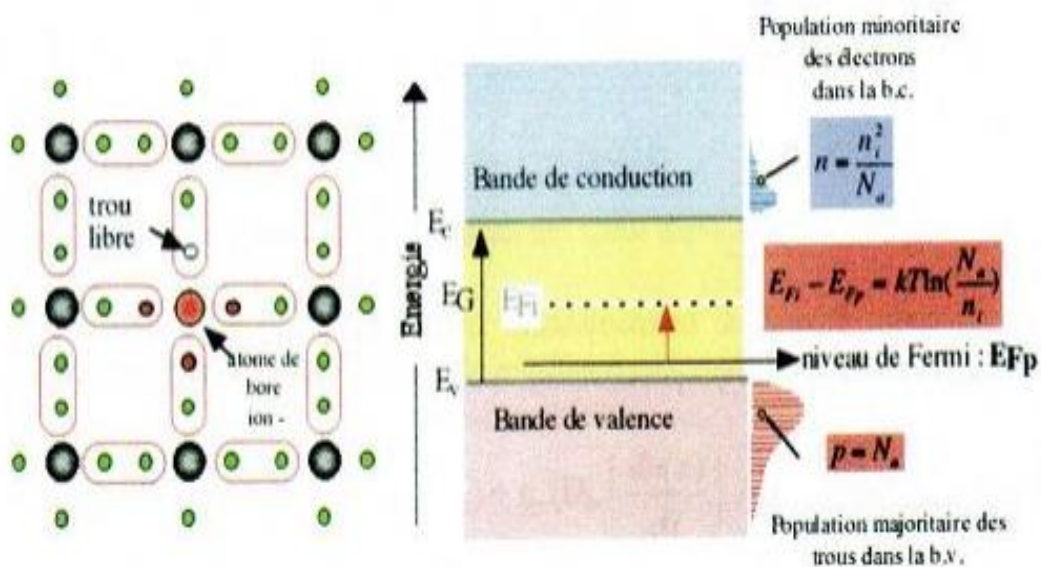


Figure 1-5 Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes [7].

## 1.5 L'absorption

La lumière absorbée par le matériau photovoltaïque est restituée sous forme d'énergie électrique. Les spectres solaires sont utilisés différemment par le matériau d'où l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique dépend essentiellement des caractéristiques du matériau.

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par le matériau, et peut être exprimé par :

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.4)$$

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

---

Avec :

- $\alpha_0$  : constante qui dépend du matériau.
- $E$  : énergie du photon.
- $E_g$  : Gap.

## 1.6 Génération optique

Il existe deux types de générations : 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 passe 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 génération bande à bande.

En général 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.

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

$$G_{opt} = (1 - R). \alpha. \exp(-\alpha x) \quad (1.5)$$

Avec :

- $R$  : est le coefficient de réflexion.
- $x$  : est la distance de la surface.
- $\alpha$  : est le coefficient d'absorption.

## 1.7 Recombinaison

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $<10^{-8}$  s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons [8] :



# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

---

Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trous, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par [9] :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau n,p} \quad (1.6)$$

Où :

-  $\Delta n, p = n, p - n_e, p_e$  : la densité des porteurs générés.

-  $n_e, p_e$  : la densité des porteurs à l'équilibre.

-  $\tau n, p$  : la durée de vie de ces porteurs.

## 1.8 Equation de transport dans les semi-conducteurs

Trois équations aux dérivées partielles, non linéaires, décrivant le comportement électrique des semi-conducteurs dans un état stationnaire sont présentées ci-dessous pour le cas de l'analyse d'une structure homogène unidimensionnelle [10].

### 1.8.1 Equation de poisson

$$\frac{\partial(\epsilon E)}{\partial(x)} = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.7)$$

Avec :

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

### 1.8.2 Les deux équations de continuité

Pour les électrons

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = q(R - G) \quad (1.8)$$

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

---

**Pour les trous**

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = -q(R - G) \quad (1.9)$$

Avec :

- R : est le taux de recombinaison.
- G : est le taux de génération.
- $J_{n,p}$  : la densité de courant des porteurs

## 1.8.3 Les densités de courant des électrons et des trous

**Pour les électrons**

$$J_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial x} \quad (1.10)$$

**Pour les trous**

$$J_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial x} \quad (1.11)$$

- $\mu_n$  et  $\mu_p$  : mobilités des électrons et des trous.
- $n$  et  $p$  : concentrations des électrons et des trous.
- $E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$  : quasi niveaux de Fermi des électrons et des trous.

## 1.9 La jonction PN

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte figure 1.7, c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît ainsi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

créent un champ électrique  $E$  qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [11].

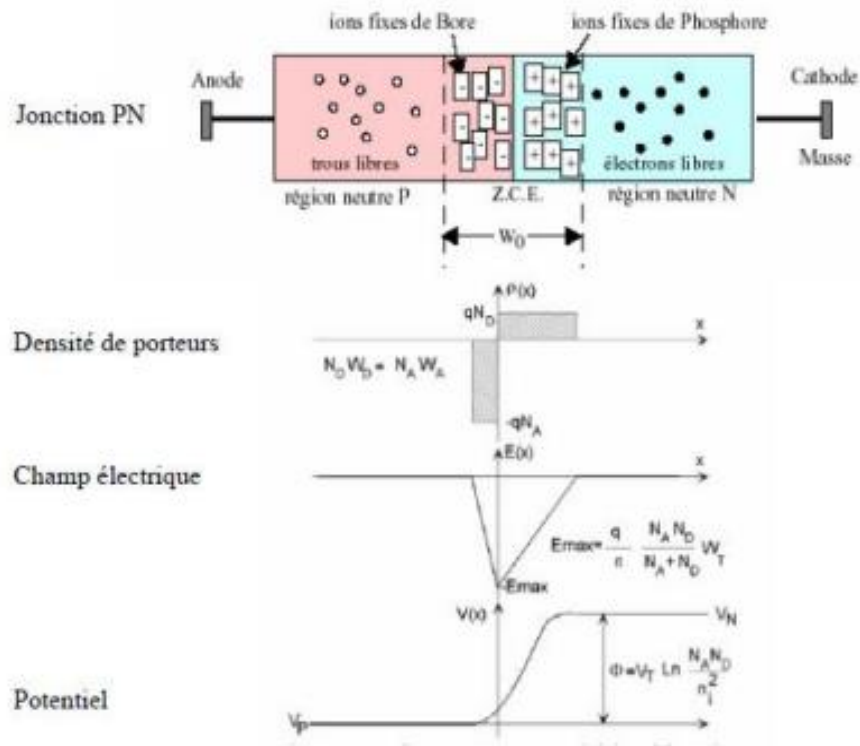


Figure 1-6 Représentation d'une jonction PN [12].

$\rho$  : la densité de charges spatiale.

$E$  : la courbe de champ électrique.

$V$  : potentiel d'une jonction PN.

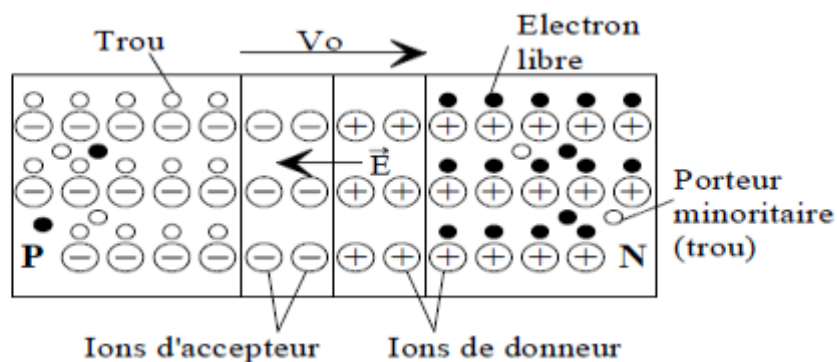


Figure 1-7 Coupe transversale d'une jonction PN.

## **1.10 L'effet photovoltaïque**

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot du grec ancien "Photos" (lumière) et du nom du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique, qui donna son nom au Volt

L'effet photovoltaïque désigne la capacité qu'ont certains matériaux, à convertir l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cet effet a été découvert en 1839 par le français Alexandre Edmond Becquerel.

Les photons heurtent la surface du matériau semi-conducteur disposé sur la cellule solaire. Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. Il en résulte la création de paires "électron-trou" qui sont séparés par le champ électrique d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur.

Autrement dit, l'effet photovoltaïque traduit l'apparition d'une différence de potentiel dans la jonction créée dans le semi-conducteur suite à l'absorption des photons par le matériau constituant le dispositif.

La conversion photovoltaïque est la manière la plus propre de produire de l'électricité, elle se fait sans bruit, sans partie mécanique et sans que des produits toxiques ne soient libérés [12].

## **1.11 Cellule solaire**

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de la cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives.

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

- La couche active ou l'absorbeur constitué d'une mise en contact d'un premier matériau semi-conducteur accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, l'un de type N, l'autre de type P, formant ainsi une jonction PN.
- Les contacts métalliques avant et arrière constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré.
- Des couches supplémentaires comme une couche antireflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau... etc. Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur.

De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (antireflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes...etc.

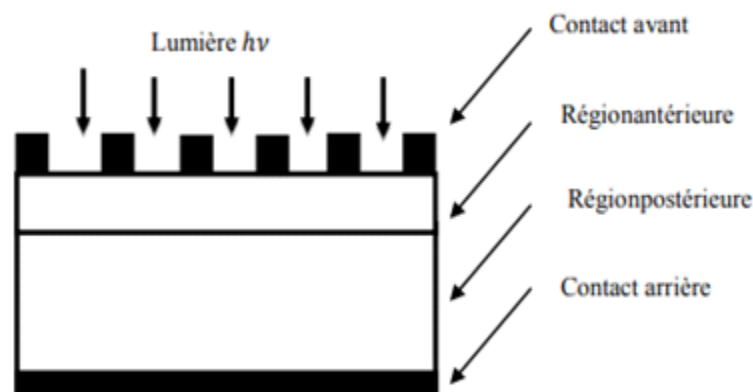


Figure 1-8 Schéma de la cellule solaire à homo jonction PN.

## 1.12 Principe de fonctionnement de la cellule solaire

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil

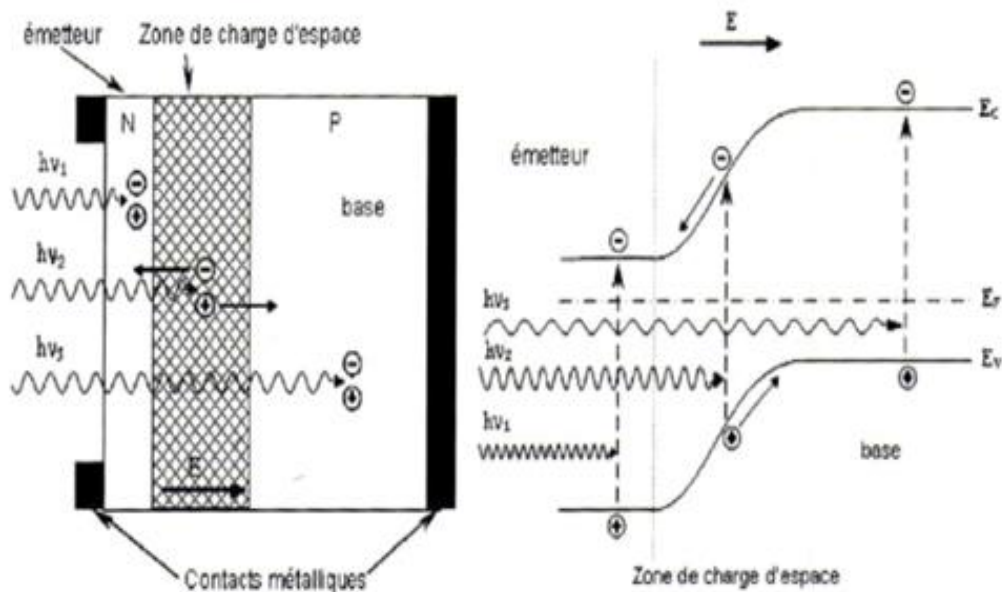
# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique.

La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 1.9.



Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type N et P et dans la zone de charge d'espace. Les paires électron-trou générés se comportent différemment suivant la région :

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

---

- Dans la zone N et P, les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la zone P (pour les trous) et vers la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Ce transport de porteurs de charges engendre un photo-courant de diffusion.

- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photo générées vont être entraînées par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous).

Ce déplacement des porteurs donne naissance à un photo-courant de génération.

Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo-courant total  $I_{ph}$ .

C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

## 1.13 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, la diode est passante si la tension appliquée est supérieure à une tension de seuil. Le courant dans la diode suit l'équation :

$$I = I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.12)$$

I : Courant fourni par la cellule ;

V : Tension aux bornes de la cellule ;

$I_s$  : Courant de saturation de la diode, dépendant de la température ;

q : Charge de l'électron ;

k : Constante de Boltzmann ;

n : Facteur d'idéalité de la diode,  $0 < n < 1$ , dans le cas idéal  $n = 1$ .

T : Température effective de la cellule (en Kelvin).

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale avec éclairage comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairage et une diode en parallèle qui modélise la

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

jonction PN figure 1.10

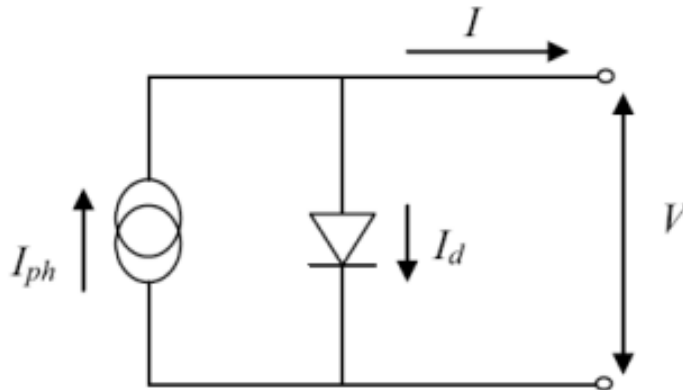


Figure 1-10 Schéma équivalent de la cellule solaire idéale.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.13)$$

En remplaçant (1.12) dans (1.13), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.14)$$

Avec :

$I_{ph}$  : courant photo-généré

Le schéma électrique équivalent dans le cas où la cellule solaire est réelle et sous éclairage est présenté sur la figure 1.10 Il tient compte des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$ . [13].

Le courant est déduit du circuit électrique équivalent de la figure 1.11.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.15)$$

L'équation déterminant le courant pour une diode réelle est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{q(V+I.R_S)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V+I.R_S}{R_{sh}} \quad (1.16)$$

Avec :

$R_s$  : résistance série qui dépend de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact métal-semi-conducteur ;



# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

$R_{sh}$  : résistances shunt qui correspond à la présence de courant de fuite dans la cellule.

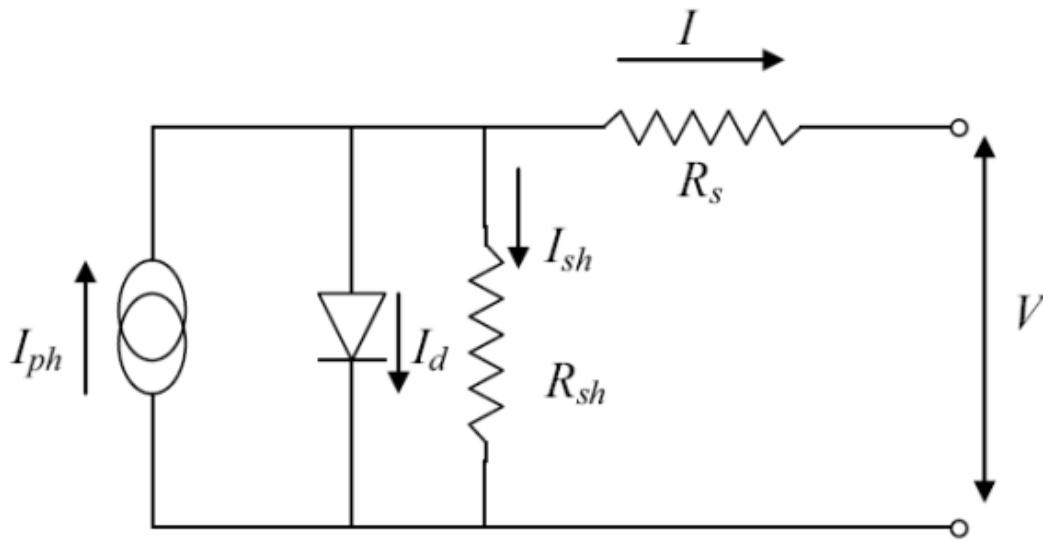


Figure 1-11 Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.

## 1.14 Caractéristique courant tension

Le photo-courant résultant est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type P, le courant de photo-génération dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion des photo-trous de la région de type N. Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant  $I_{ph}$ , c'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité  $I_{obsc}$ , qui résulte de la polarisation du composant.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{PH} - I_{obsc}(V) \quad (1.17)$$

$$I_{OBSC}(V) = I_S \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.18)$$

$V$  : tension aux bornes de la jonction

$I_s$  : est le courant de saturation de la diode.

$n$  : est le facteur d'idéalité de la diode

## CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

Le courant  $I(V)$  est en général rapporté à une surface : la densité de courant  $J$  s'exprime en  $\text{mA.cm}^{-2}$ .

La cellule photovoltaïque n'est autre qu'une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure et débite son photo-courant dans une charge. Sous éclaircissement la caractéristique  $I(V)$  de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées, il existe une région dans laquelle le produit  $I \cdot V$  est négatif figure 1.12, la diode fournit de l'énergie [14].

La figure 1.12 représente une caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclaircissement.

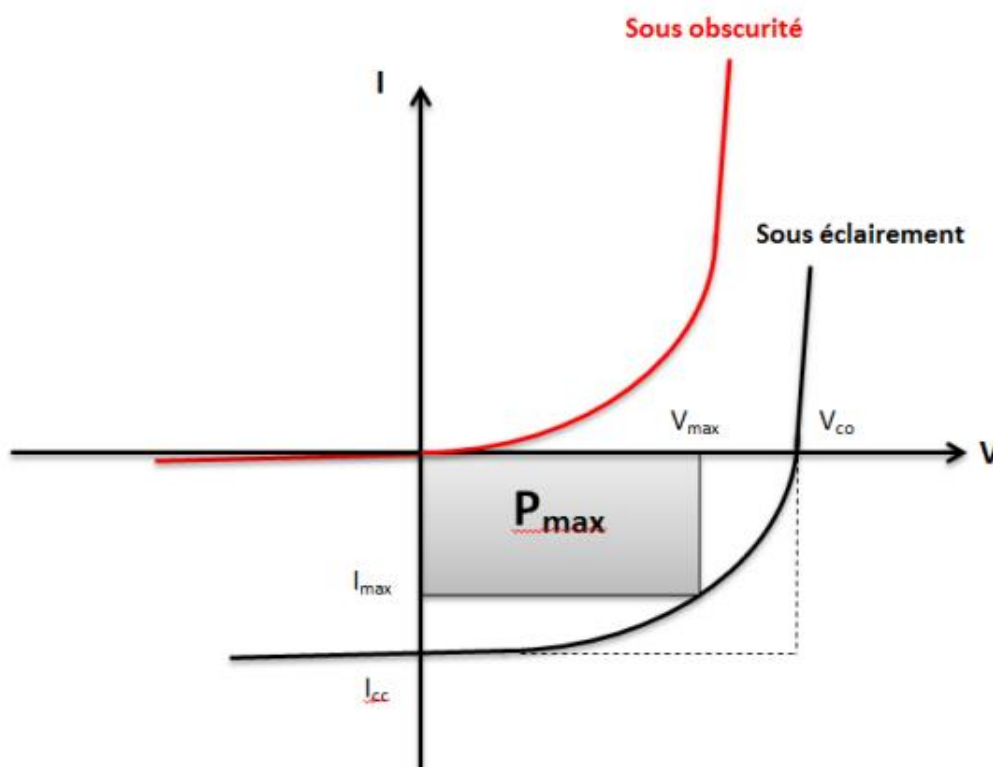


Figure 1-12 Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure 1.12 se ramène à la figure 1.13

# CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

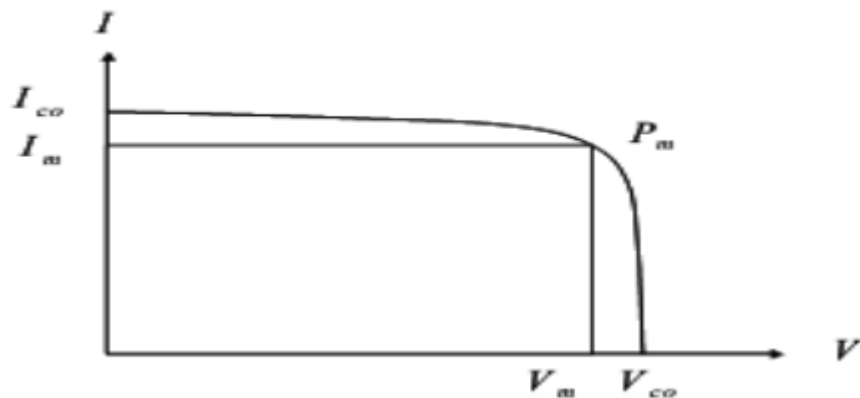


Figure 1-13 Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée.

Nous pouvons décomposer la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

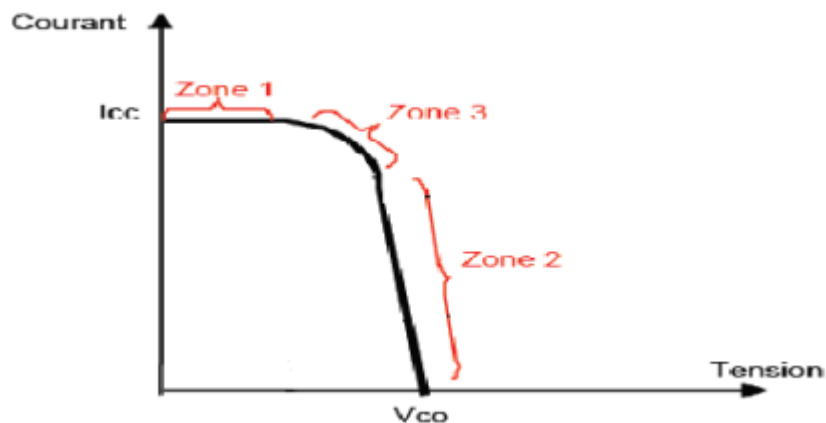


Figure 1-14 Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$ .

La zone 1 : Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par  $1/R_{sh}$

La zone 2 : Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$  d'impédance interne équivalente à la résistance série  $R_s$ .

La zone 3 : Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  à  $R_{sh}$ . C'est dans cette zone qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale [15].

## 1.15 Paramètres électriques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique de la cellule photovoltaïque, on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir : la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, la puissance maximale, le facteur de forme, et le rendement. De brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

### 1.15.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Le courant de court-circuit est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage en court-circuitant la sortie ( $I_{cc} = I(V = 0)$ ). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [13].

$$I_{CC} = I(V = 0) = I_{ph} \quad (1.19)$$

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant de photo-génération  $I_{ph}$ .

### 1.15.2 La tension en circuit ouvert

La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ( $I=0$ ) ou la tension mesurée en l'absence de débit. Elle est exprimée comme suit :

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1.20)$$

### 1.15.3 Facteur de forme

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique pour qualifier la qualité d'une cellule photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage qui représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_m$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{co}$ . Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (1.21)$$

## CHAPITRE 1 : Notions fondamentales sur les cellules solaires

---

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (1.22)$$

### 1.15.4 Rendement de conversion

Le rendement de conversion exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.23)$$

### 1.16 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur le rayonnement solaire et sur les semi-conducteurs, puis dans la seconde partie nous avons expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

## ***CHAPITRE 2***

### ***Les cellules multi-jonctions***

## 2 Chapitre 02

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes configurations des cellules multi-jonctions, tout en décrivant leurs structures, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous présenterons les matériaux utilisés dans ces structures.

### 2.2 Les cellules multi-jonctions

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi jonction III-V dites de troisième génération répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisé pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De par le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée.

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales [16].

### 2.3 Structure d'une cellule multi-jonction

Le concept des cellules solaire multi-jonction est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maîtrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons sont assurées par des diodes Tunnel. En

## CHAPITRE 2 : Les cellules multi-jonctions

---

effet, vu que les tensions de circuit ouvert  $V_{CO}$  s'ajoutent, les courants de court-circuit ICC doivent être ajustés, car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbent ni trop ni moins de rayonnement.

### 2.4 Principe de base

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

L'expérience des cellules solaires multi-jonctions a une limitation fondamentale relative à la disponibilité des matériaux possédant des bandes interdites optimales qui permettent simultanément une grande efficacité grâce à leur faible densité de défauts. Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules.

Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité a des bandes interdites directes, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [17].

La figure 2.2 montre l'énergie solaire pouvant être théoriquement utilisée par une cellule triple jonction III-V.



## CHAPITRE 2 : Les cellules multi-jonctions

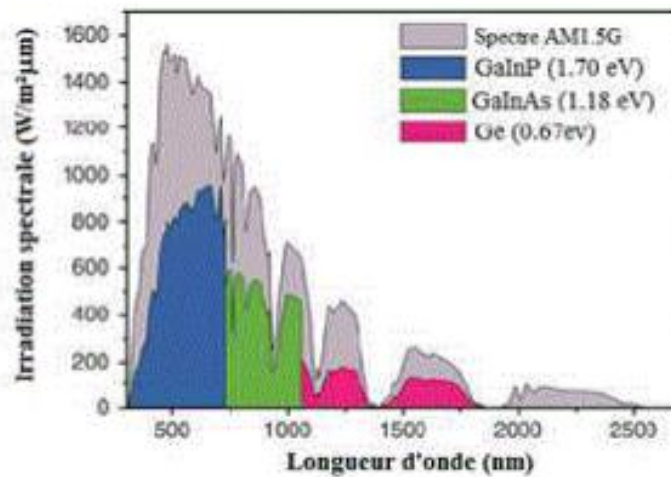


Figure 2-1 Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge.

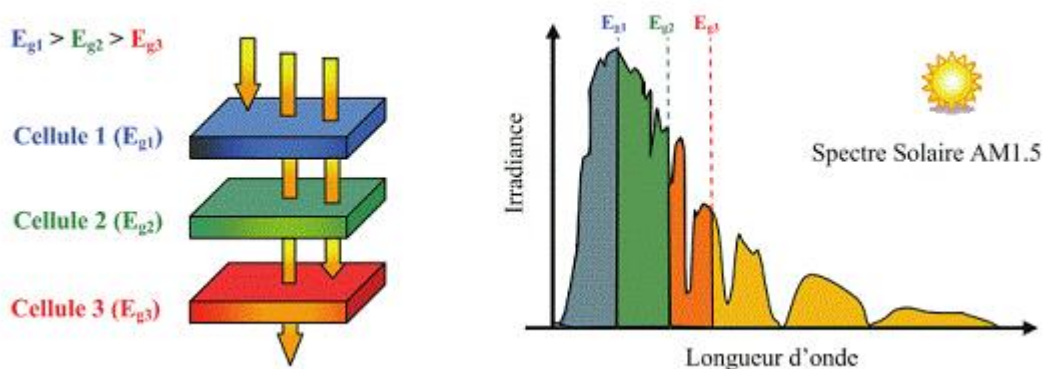


Figure 2-2 Principe de la cellule multi-jonction.

### 2.5 Utilité des cellules multi jonctions

Le développement des cellules solaires multi-jonctions a été initié afin d'obtenir des rendements plus élevés non seulement dans l'état initial, mais, plus en particulier dans l'état stabilisé.

Ceci est obtenu par la réduction des deux principales causes de pertes résultantes de la non absorption des photons d'énergie ( $h\nu < E_g$ ) et aussi des pertes thermique associées à la thermalisation des photos porteurs chauds créés par les photons d'énergie  $h\nu > E_g$ .

## **CHAPITRE 2 : Les cellules multi-jonctions**

---

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gap assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semi-conducteurs (III-V), ainsi que leurs alliages, est plus adéquate pour certaines raisons à savoir : Leur gap direct et sa valeur qui est proche de la valeur optimum. Ainsi, ils sont mieux résistifs au rayonnement cosmique et aux températures de fonctionnement en orbites.

### **2.6 Configuration des cellules multi jonctions**

Les cellules solaires à multi jonctions peuvent augmenter le rendement de la cellule en introduisant un autre semi-conducteur capable de réduire une partie des pertes par thermalisation ou par transmission. Dans cette approche trois configurations existent : les cellules solaires à quatre terminals, les cellules solaires monolithiques à deux terminals et à trois terminals [18].

#### **2.6.1 Cellule monolithique tandem à deux terminals**

La configuration de la cellule solaire tandem monolithique à deux terminales est basée sur l'empilement de cellules (supérieure et inférieure) en série et sur le même trajet optique avec un ordre décroissant des différents gaps figure 2.3. Cette configuration nécessite que les sous cellules soient de la même polarité et que le photo-courant des sous-cellules soit le même (Current-matching), car les performances de toute la cellule tandem sont limitées par la cellule qui débite le moins de courant. En plus de la condition imposée sur l'égalité des courants, le choix du gap de chaque cellule doit être précis pour avoir un maximum de rendement. La croissance de toutes les couches sur un seul substrat et la couche conductrice transparente (TCO) est remplacée par une jonction tunnel ou par une jonction de recombinaison (pour assurer une bonne connexion électrique entre les couches).

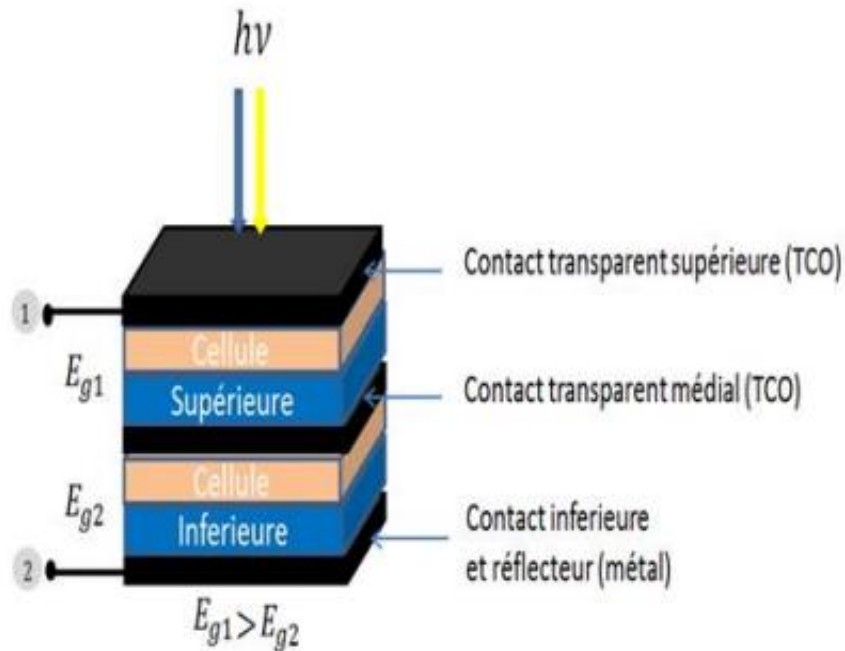


Figure 2-3 Structure d'une cellule solaire monolithique tandem à deux terminaux : Schéma de principe.

### 2.6.2 Cellule monolithique tandem à trois terminaux

Dans la configuration de la cellule solaire tandem monolithique à trois électrodes, les sous-cellules solaires (supérieure et inférieure) du tandem ne sont pas électriquement isolées, le fond de la cellule supérieure est électriquement connecté à la partie supérieure de la cellule inférieure Figure 2.4.

La fabrication d'un dispositif monolithique à trois électrodes est relativement simple, bien que plus complexe que la fabrication d'un dispositif à deux électrodes. La structure semi-conductrice doit être conçue pour fournir une couche de contact à l'électrode intermédiaire, et accueillir les étapes de traitement nécessaires pour mettre en place d'électrode intermédiaire. Avec le contact (électrode) intermédiaire, les différentes sous-cellules de tandem ne doivent pas avoir le même photo-courant. De plus, dans cette configuration, les différentes sous-cellules peuvent avoir des polarités différentes, par exemple, (p/n) pour la cellule supérieure et (n/p) pour la cellule inférieure [19].

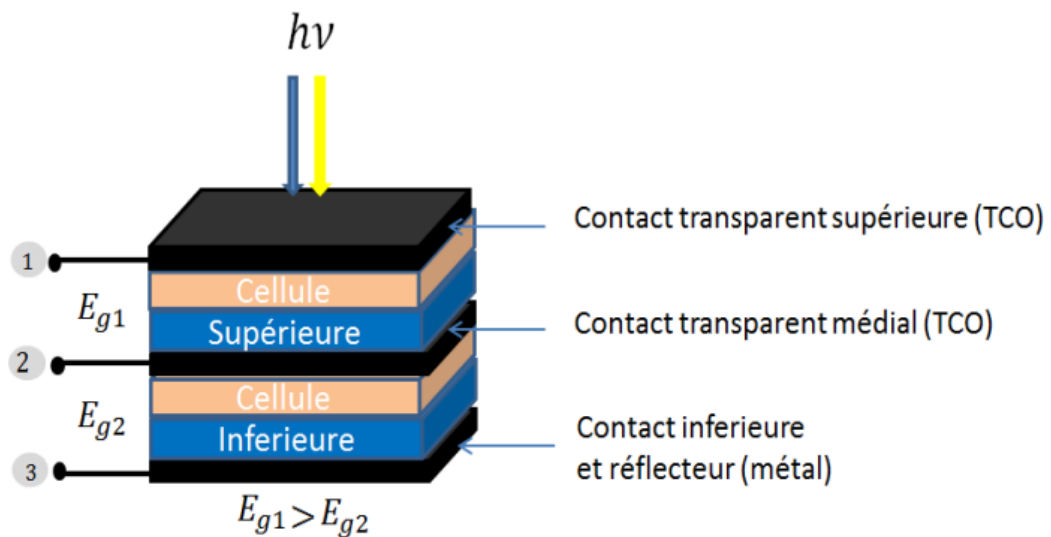


Figure 2-4 Structure d'une cellule solaire monolithique tandem à trois terminaux.

### 2.6.3 Cellule tandem à quatre terminaux

Les cellules sont placées sur le même trajet optique mais sont indépendantes les unes des autres. Pour séparer les cellules, on utilise une matière adhésive (matériau isolant) par exemple : le verre, du plastique ou du SiNx qui assure une bonne isolation électrique ainsi qu'un bon couplage optique et thermique entre les couches [20-21]. Chaque cellule devient électriquement isolée des autres figure 2.5. La connexion et l'isolation électrique entre les couches ajoutent une étape supplémentaire à sa technique de fabrication (interconnexions électriques, le couplage optique et l'emboîtement de la cellule) et augmente les pertes d'ombre.

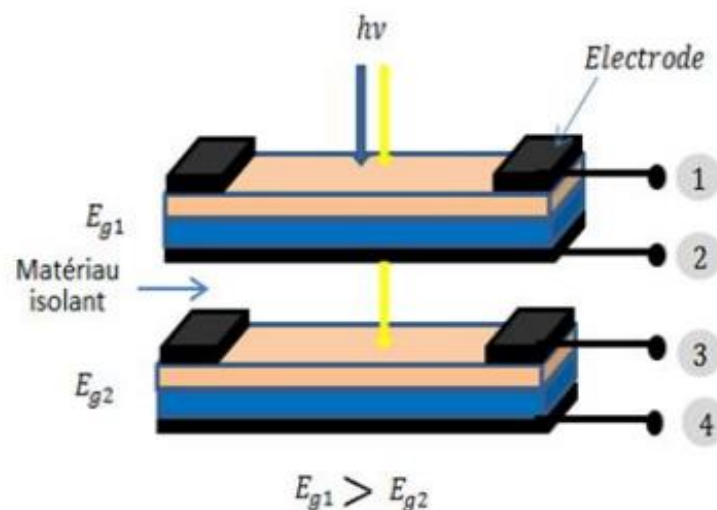


Figure 2-5 Structure des cellules solaires tandem à quatre terminaux.

## CHAPITRE 2 : Les cellules multi-jonctions

### 2.7 Les matériaux utilisés

La plupart des semi-conducteurs III-V cristallisent en un réseau Zinc-blende ; ce dernier est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées imbriqués, l'un d'éléments de la colonne III et l'autre d'éléments de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale figure 2.6.

Colonne III	Colonne IV	Colonne V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Tableau 2-1 Extrait du tableau périodique des éléments [22].

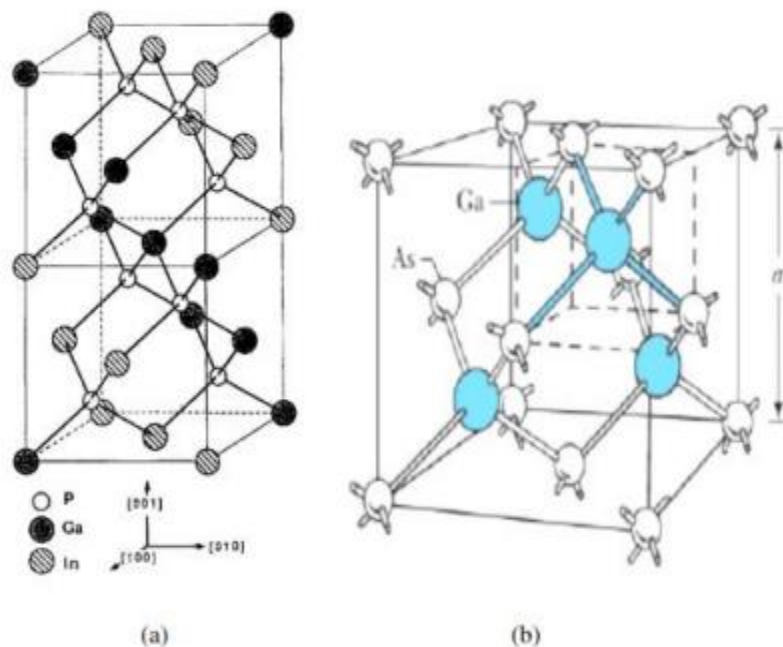


Figure 2-6 Structure cristalline des deux matériaux utilisés (a) InGaP [23], (b) GaAs [24].

### 2.7.1 Le matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un matériau à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. Il est utilisé dans un large domaine d'applications en électronique (LED infrarouge, Laser, Fibre optique et cellules solaires) [25]. En comparaison avec le Si, il possède un fort coefficient d'absorption (90% des photons sont absorbés dans une épaisseur de  $3\mu\text{m}$ ) [29], une forte mobilité des électrons, une forte résistance à la radiation solaire, ainsi qu'une forte stabilité à température élevée et peut être facilement transformé en semi-conducteur ternaire. D'un autre côté, le Si a quelques avantages par rapport au GaAs : Il est moins cher, il se fabrique sur des grandes plaquettes (jusqu'à 12 pouces) et la durée de vie des porteurs minoritaires est plus longue qu'avec le GaAs [26].

Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite directe, de valeur  $1.42\text{eV}$ , qui s'adapte bien au spectre solaire. La valeur de sa bande interdite est proche de la valeur idéale d'une cellule solaire mono-jonction ( $1.4\text{ eV}$  pour le spectre solaire AM1.5G ( $1.6\text{ eV}$  pour AM0)) [27].

La première cellule solaire fabriquée à base du semi-conducteur GaAs avait un rendement de 3%. Elle fut développée en Russie en 1960 dans l'institut technologique de physique PTI (Physico Technical Institute). Le rendement de la cellule GaAs a subi une forte évolution avec l'introduction de la couche fenêtre, en utilisant le matériau AlGaAs. Ce dernier permet de minimiser les recombinaisons au niveau de la surface de la cellule GaAs et de rendre la cellule solaire très sensible aux photons de forte énergie.

### 2.7.2 Le matériau GaInP

Le  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  est un matériau ternaire, composé à partir des deux semi-conducteurs binaires : GaP ( $x=1$ ,  $E_g=2.26\text{ eV}$ ) et InP ( $x=0$ ,  $E_g=1.344\text{ eV}$ ). Il a un gap direct pour une fraction molaire du Gallium inférieure à 0.74 et un gap indirect sinon. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour

$x = 0.516$ . En lui ajoutant l'Aluminium, on obtient l'alliage AlInGaP qui possède un gap variant entre  $1.43$  et  $2.2\text{ eV}$  et qui maintient toujours une bonne interface avec le GaAs. Ceci donne plusieurs combinaisons dans la conception des cellules solaires monolithiques. En plus, pour la réalisation des couches fenêtres, le matériau GaInP a des propriétés excellentes par rapport au matériau AlGaAs [28,29]. Il ne présente pas de défauts liés à l'incorporation de l'oxygène lors de sa croissance et il possède une faible vitesse de recombinaison à la surface.

## **CHAPITRE 2 : Les cellules multi-jonctions**

---

Avec la possibilité d'utiliser le Ge comme une couche substrat pour la cellule tandem GaInP/GaAs, l'addition d'une troisième cellule devient possible.

### **2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les cellules multi-jonctions avec leurs différentes configurations. La constitution, le principe de fonctionnement et les caractéristiques de ces cellules ont été décrits ainsi que les matériaux utilisés.

***CHAPITRE 3***  
***Résultats de simulation et***  
***discussion***



### **3 Chapitre 03**

#### **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique, par le logiciel COMSOL Multiphysics, de la cellule solaire InGaP/InGaP/GaAs à trois électrodes et l'interprétation des résultats trouvés. Nous allons d'abord étudier la variation des paramètres caractéristiques (courant de Court-circuit  $J_{cc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , puissance maximale  $P_{max}$  ainsi que le rendement  $\eta$ ) en fonction des épaisseurs des couches pour les deux cellules séparément, ensuite, nous allons déduire les caractéristiques de la cellule photovoltaïque à double jonction optimisée.

#### **3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics**

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent le logiciel COMSOL Multi physiques pour simuler des conceptions, des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche scientifique. COMSOL Multiphysics est une plateforme de simulation qui offre des capacités de modélisation multiphysique et monophysique entièrement couplées.

Les principales étapes pour faire la simulation avec ce logiciel sont :

- Mettre en place l'environnement modèle.
- Construire la géométrie.
- Spécifier les propriétés des matériaux.
- Définir les conditions limites de la physique.
- Créer le maillage.
- Exécuter la simulation.
- Post-traiter les résultats.

### 3.3 Présentation de la cellule à étudier

La structure à étudier est constituée de trois couches, la première couche en InGaP avec une large bande interdite ( $E_g=1.9\text{eV}$ ), la deuxième couche aussi en InGaP avec la même bande interdite que la première, et la troisième couche en GaAs avec une faible bande interdite ( $E_g=1.42\text{eV}$ ), les trois couches ont des épaisseurs variables. L'objectif de cette structure à trois électrodes est de convertir une large gamme de photons incidents sur la cellule pour qu'elle génère plus de puissance. La figure (3.1) ci-dessous indique la structure de la cellule InGaP/InGaP/GaAs. La cellule est soumise à un éclairage de spectre solaire AM1.5 d'une densité de puissance de  $1000\text{ W/m}^2$ , on supposera également que les rayons solaires sont normaux à la surface.

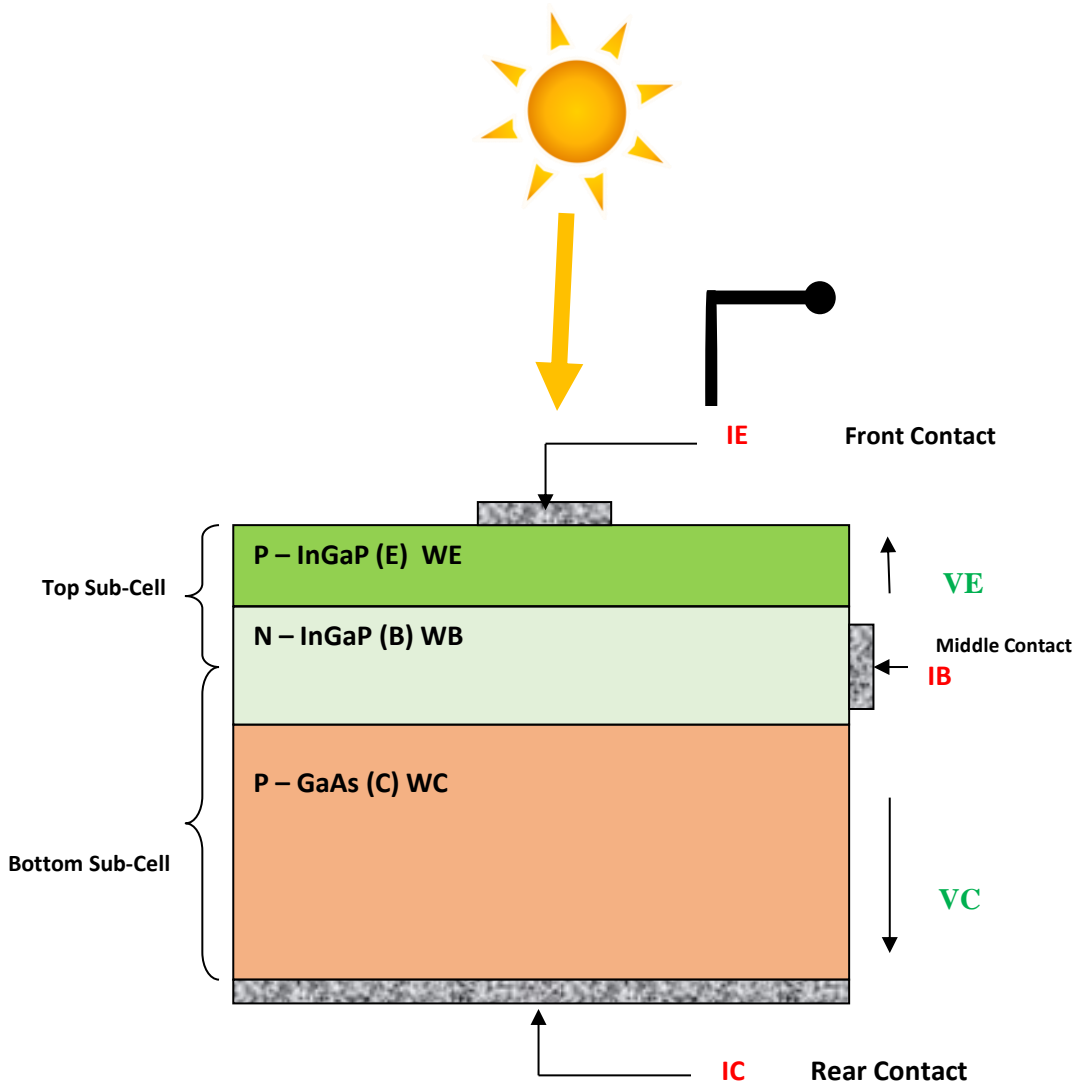


Figure 3-1 Schéma de la structure de la cellule solaire a trois électrodes (InGaP/InGaP/GaAs).

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.4 Paramètres de simulation

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation de la cellule InGaP/InGaP/GaAs sont regroupés dans le tableau (3.1)

Paramètres	InGaP (E)	InGaP (B)	GaAs (C)
NA	$1 \times 10^{23}$	-	$1 \times 10^{23}$
ND	-	$1 \times 10^{24}$	-
W (um)	0.1 (Variable)	0.3 (Variable)	3 (Variable)
Eg (ev)	1.9	1.9	1.42
Nc (m <sup>-3</sup> )	$1.3 \times 10^{26}$	$1.3 \times 10^{26}$	$4.7 \times 10^{23}$
Nv (m <sup>-3</sup> )	$1.28 \times 10^{25}$	$1.28 \times 10^{25}$	$7 \times 10^{24}$
X <sub>0</sub> (ev)	4.16	4.16	4.07
μ <sub>n</sub> (m <sup>2</sup> /V. s)	$1945 \times 10^{-4}$	$1945 \times 10^{-4}$	0.88
μ <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> /V. s)	$141 \times 10^{-4}$	$141 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-2}$
Er	11.6	11.6	13.1

Tableau 3-1 Paramètres de la structure simulée.

### 3.5 Variation de l'épaisseur de l'émetteur WE

#### 3.5.1 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la jonction BE de la cellule

##### 3.5.1.1 Caractéristiques courant tension JE(VE)\_WE

La figure (3.2) représente les caractéristiques JE(VE) pour différentes épaisseurs de l'émetteur WE. On voit que le courant de court-circuit augmente jusqu'à l'épaisseur de 0.1um après il diminue. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

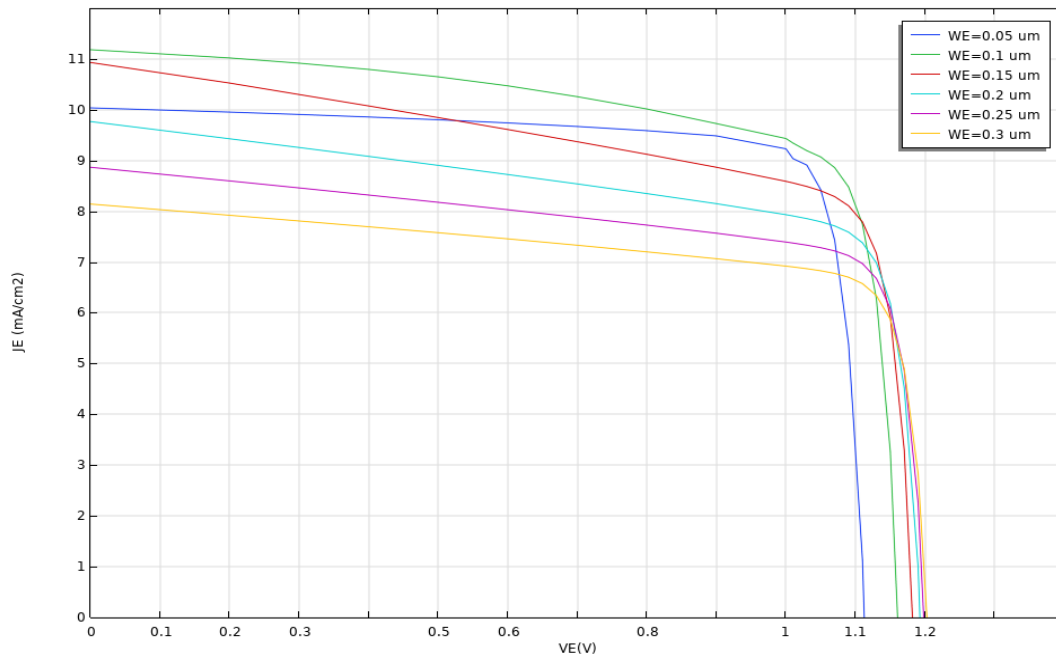


Figure 3-2 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs WE

### 3.5.1.2 Caractéristiques puissance tension PE(VE) \_WE

La figure (3.3) présente les caractéristiques PE(VE) pour différentes épaisseurs de la couche émettrice WE. On remarque que la puissance maximale augmente jusqu'à l'épaisseur de 0.1μm après elle diminue.

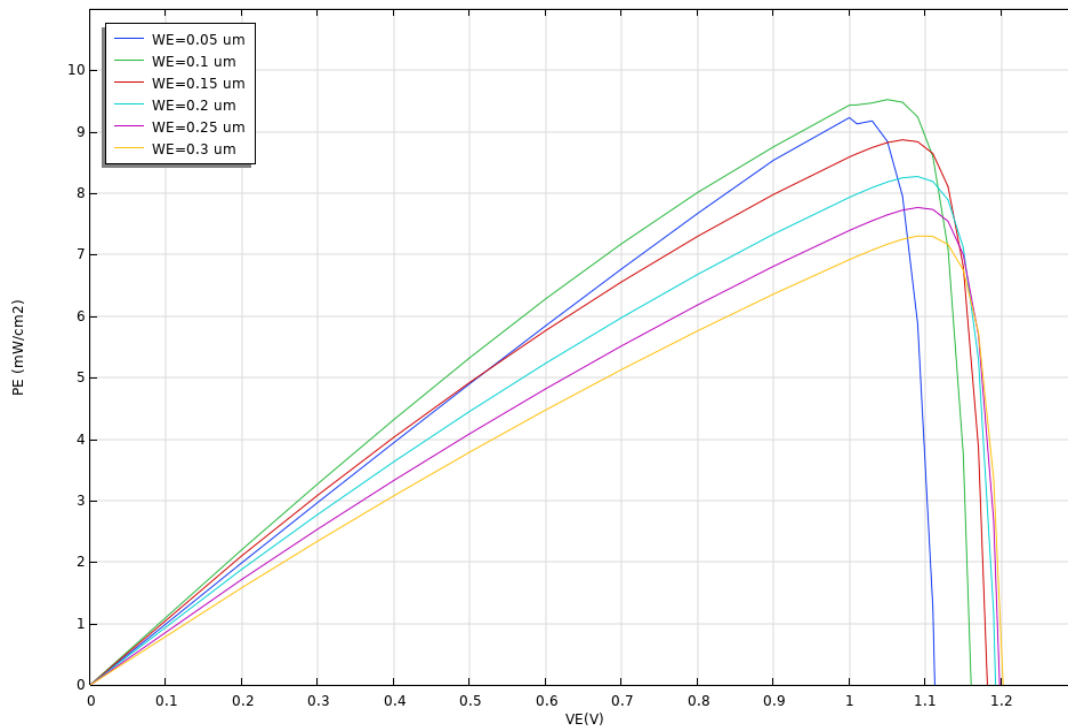


Figure 3-3 Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs WE.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.5.1.3 Densité de courant de court-circuit $J_{Ecc}$ (WE)

La variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{Ecc}$  en fonction de l'épaisseur de WE dans la cellule supérieure InGaP est illustrée sur la figure (3.4). On remarque que le courant de court-circuit  $J_{Ecc}$  augmente jusqu'à  $0.1 \mu\text{m}$  après il diminue.

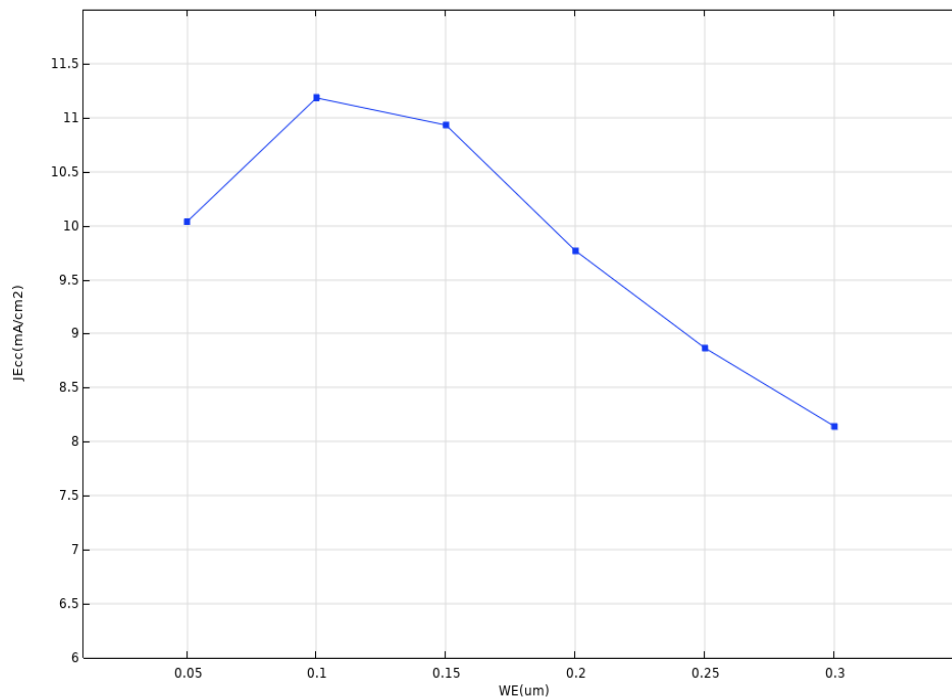


Figure 3-4 Variation du courant de court-circuit  $J_{Ecc}$  en fonction de WE

### 3.5.1.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ (WE)

L'influence de la couche absorbante WE sur la tension de circuit ouvert dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (3.5). On remarque que la tension de circuit ouvert augmente jusqu'à l'épaisseur  $0.2 \mu\text{m}$  après elle se stabilise.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

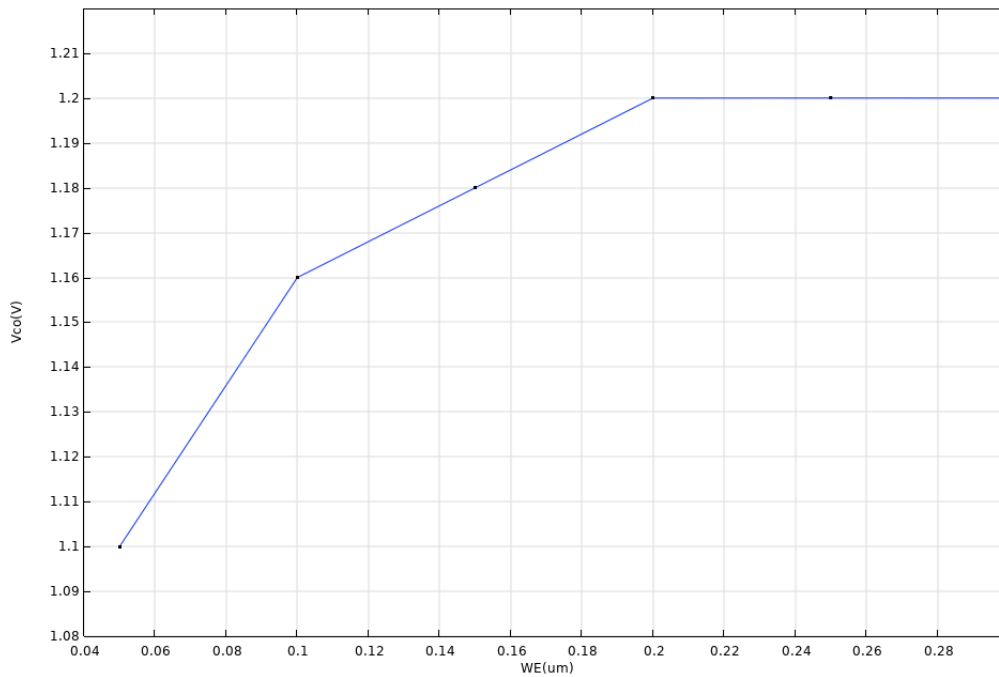


Figure 3-5 Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de WE

### 3.5.1.5 Puissance maximale $P_{Emax}(WE) = \text{Rendement } \eta(WE)$

Dans la figure (3.6), on observe que la puissance maximale et le rendement augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à  $0.08\mu\text{m}$  de la couche émetteur WE et cela est dû à l'augmentation du courant et de la tension, ensuite elle diminue.

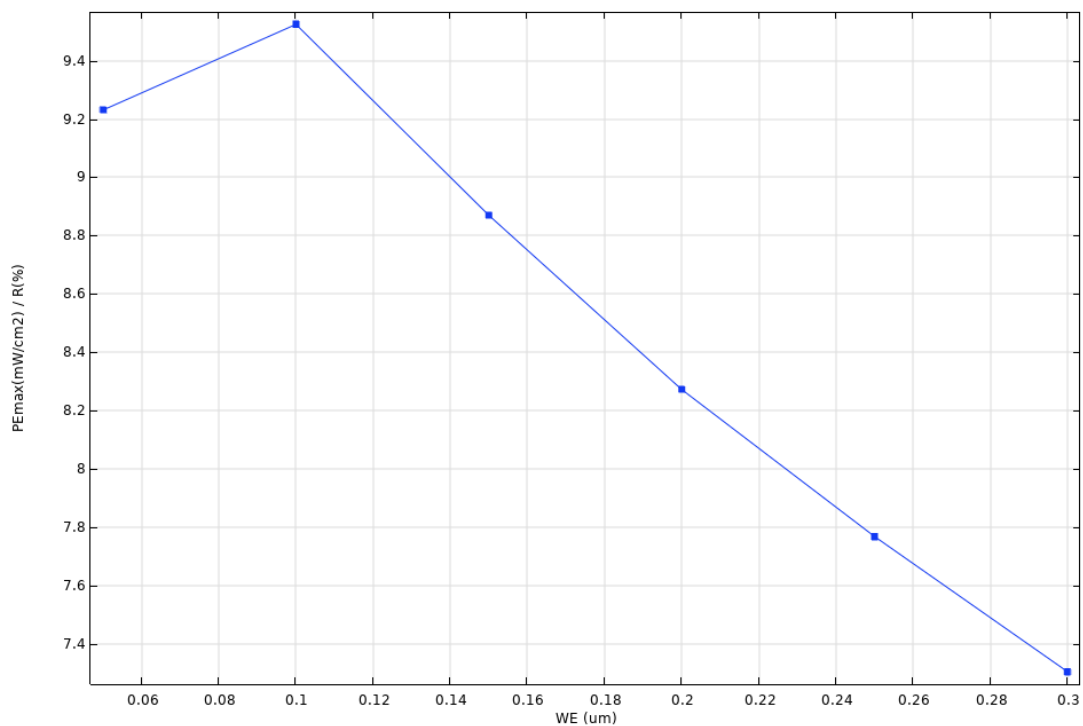


Figure 3-6 Variation de la puissance maximale et du rendement en fonction de WE

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.5.2 Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la jonction BC de la cellule

#### 3.5.2.1 Caractéristiques courant tension JC(VC)\_WE

La figure (3.7) représente les caractéristiques JC(VC) de la cellule inférieure pour différentes épaisseurs WE. On voit que le courant de court-circuit diminue. Quant à la tension de circuit ouvert, elle reste pratiquement constante.

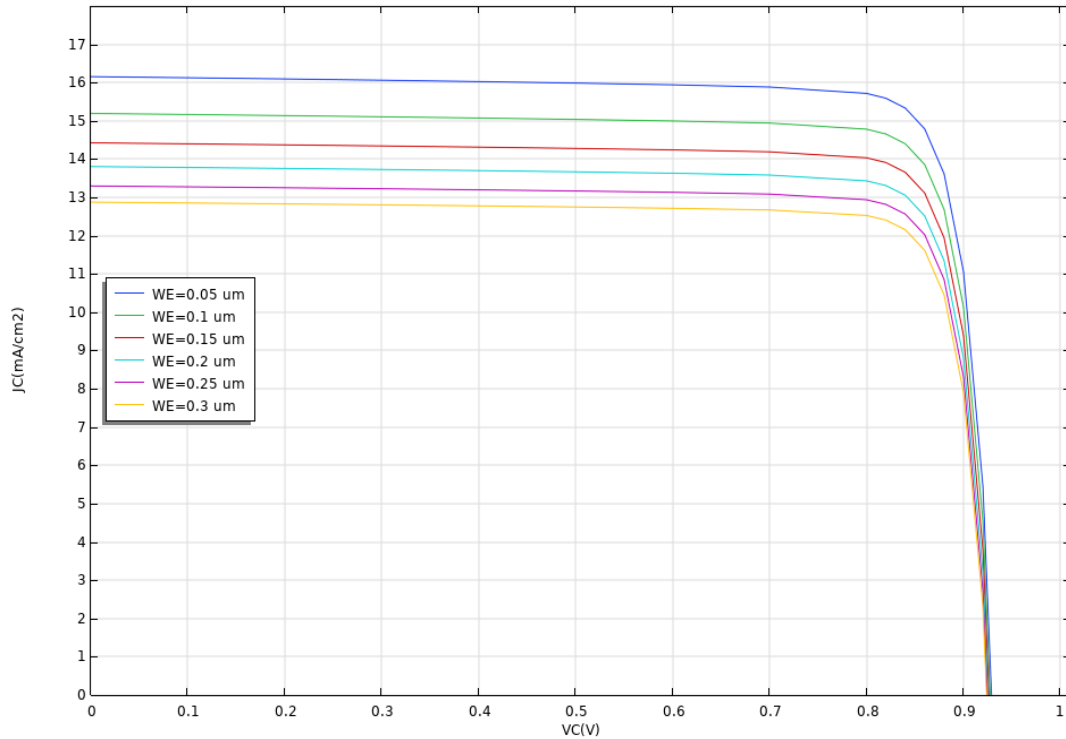


Figure 3-7 Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs WE.

#### 3.5.2.2 Caractéristiques puissance tension PC(VC)\_WE

La figure (3.8) présente les caractéristiques puissance-tension PC(VC) pour différentes épaisseurs de la couche émetteur WE dans la cellule inférieure. On remarque que la puissance maximale diminue avec l'augmentation de l'épaisseur WE.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

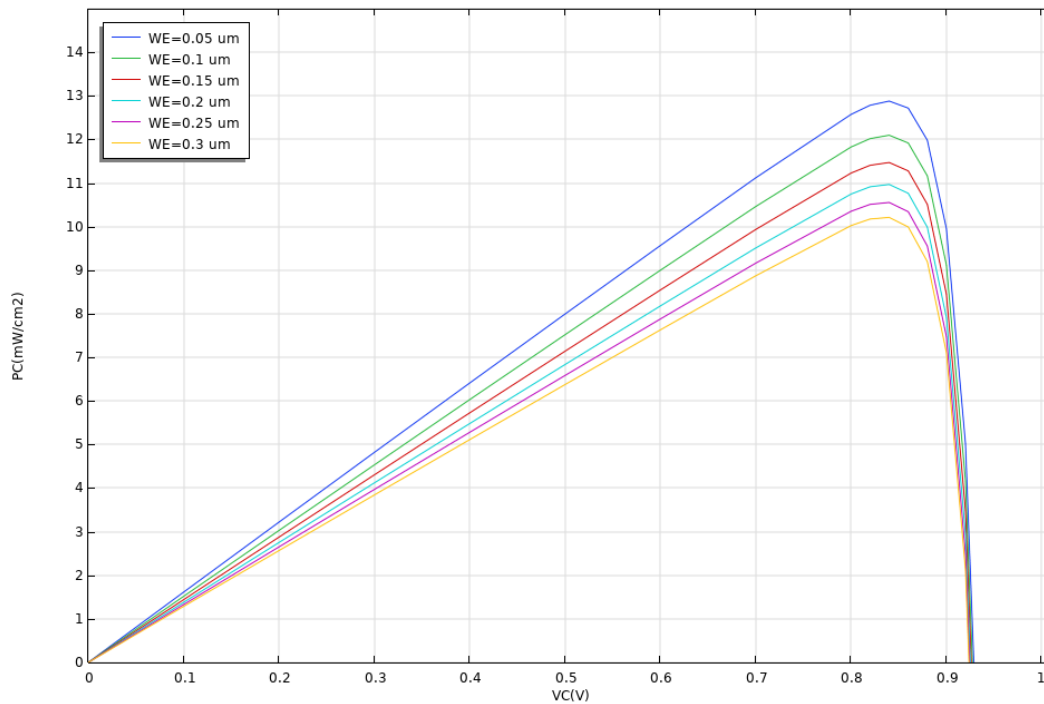


Figure 3-8 Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs WE.

### 3.5.2.3 Densité de courant de court-circuit $J_{Ccc}$ (WE)

La variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de l'épaisseur de l'émetteur WE dans la cellule inférieure est illustrée sur la figure (3.9). On remarque que le courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  diminue lorsque WE augmente.

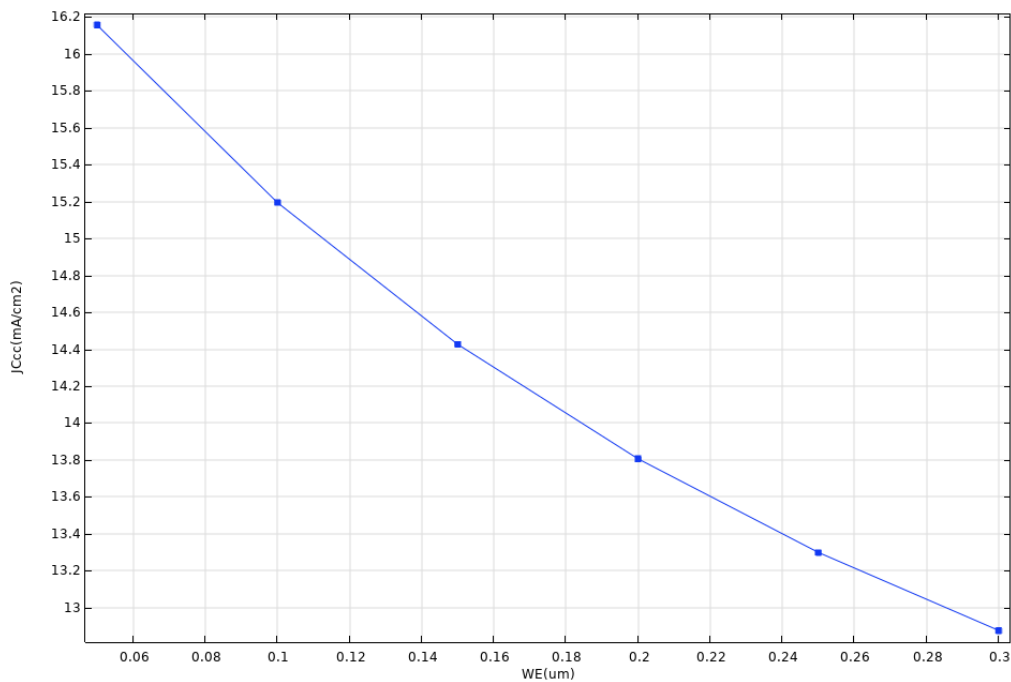


Figure 3-9 Variation du courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de WE.



## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.5.2.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ (WE)

D'après les figures (3.7) et (3.8) l'épaisseur WE n'a pas d'effet sur la tension de circuit-ouvert.

### 3.5.2.5 Puissance maximale $PC_{max}$ (WE) = Rendement $\eta$ (WE)

Dans la figure (3.10), on observe que la puissance maximale et le rendement diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche émetteur InGaP et cela est dû à diminution du courant de court-circuit et de la tension de circuit-ouvert qui reste constante.

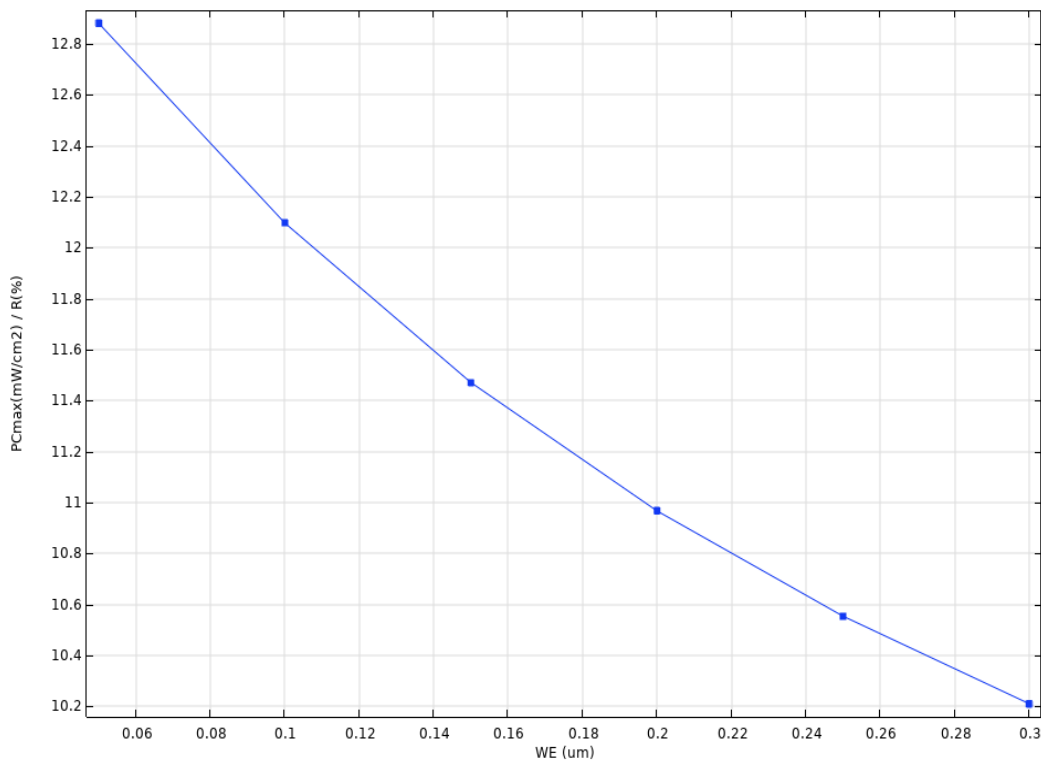


Figure 3-10 Variation de la puissance maximale et du rendement en fonction de WE.

## 3.6 Rendement total $R_{tot}$ (WE)

La variation du rendement total, égal à la somme des rendements de la cellule supérieure et inférieure, en fonction de WE est illustrée dans la figure (3.11). On remarque que le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche WE. On obtient un rendement maximal de l'ordre de 22% pour une épaisseur  $WE=0.05\mu m$ .

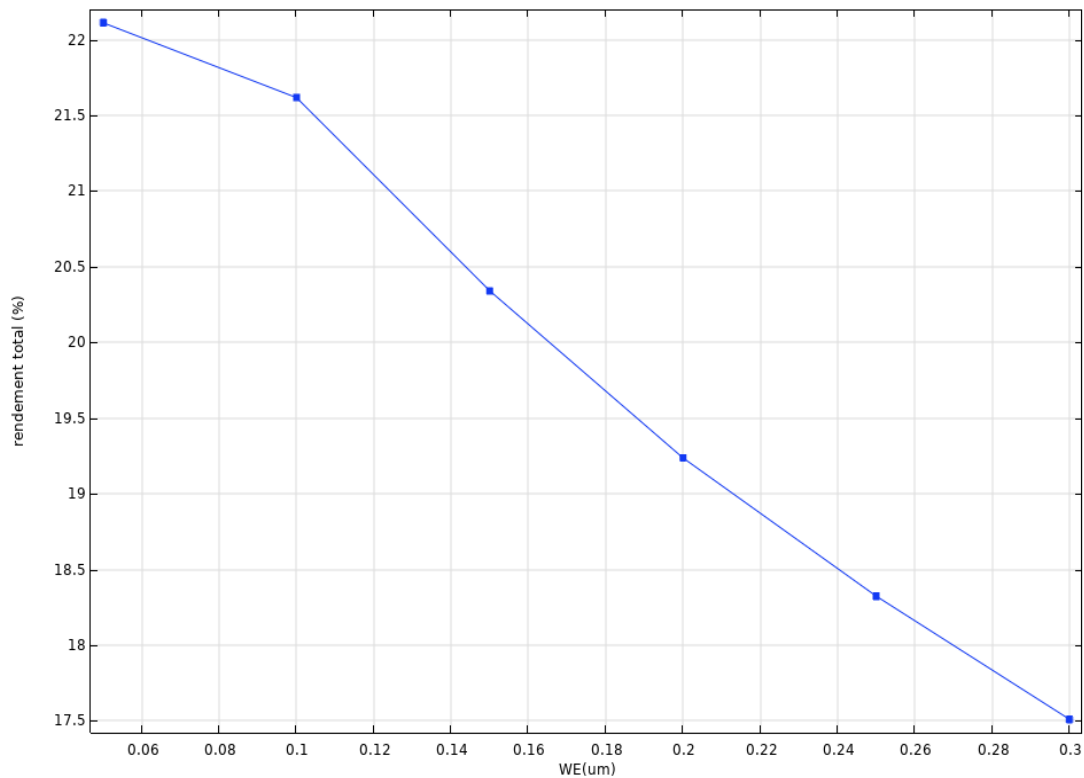


Figure 3-11 Variation du rendement total en fonction de WE.

### 3.7 Variation de l'épaisseur de la base WB

#### 3.7.1 Effet de l'épaisseur de la base sur la jonction BE de la cellule

##### 3.7.1.1 Caractéristiques courant tension JE(VE)\_WB

La figure (3.12) représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base WB. On constate que le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur WB jusqu'à la valeur WB=0.3 $\mu$ m, ensuite la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle reste pratiquement constante.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

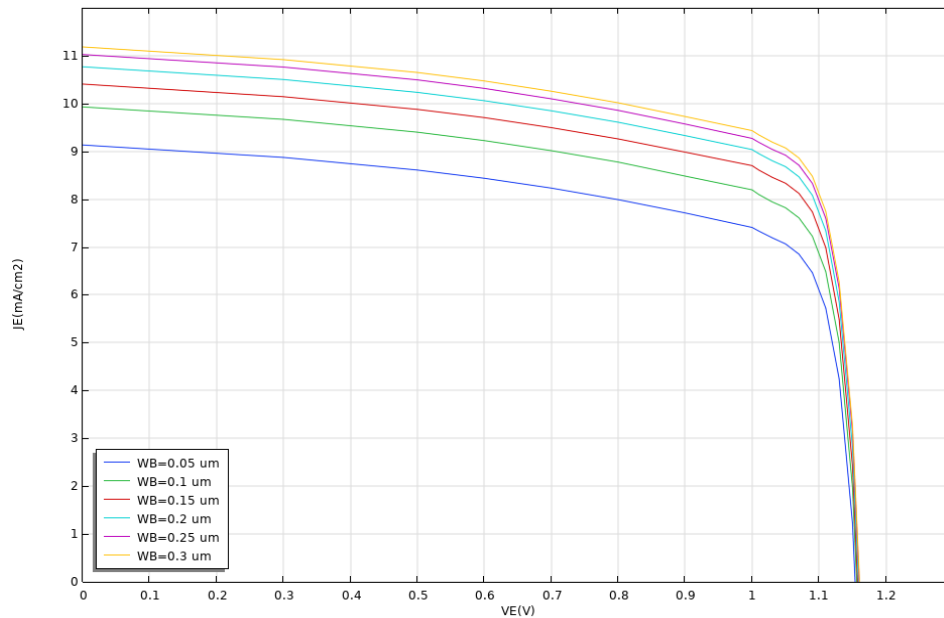


Figure 3-12 Caractéristiques courant tension  $JE(VE)$  pour différentes épaisseurs WB.

### 3.7.1.2 Caractéristiques puissance tension $PE(VE)$ \_WB

La figure (3.13) présente les caractéristique  $PE(VE)$  pour différentes épaisseurs de la base WB. On remarque que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur WB, La variation devient très faible à partir de  $WB=0.3\mu m$ . Quant à la tension de circuit ouvert, elle reste constante.

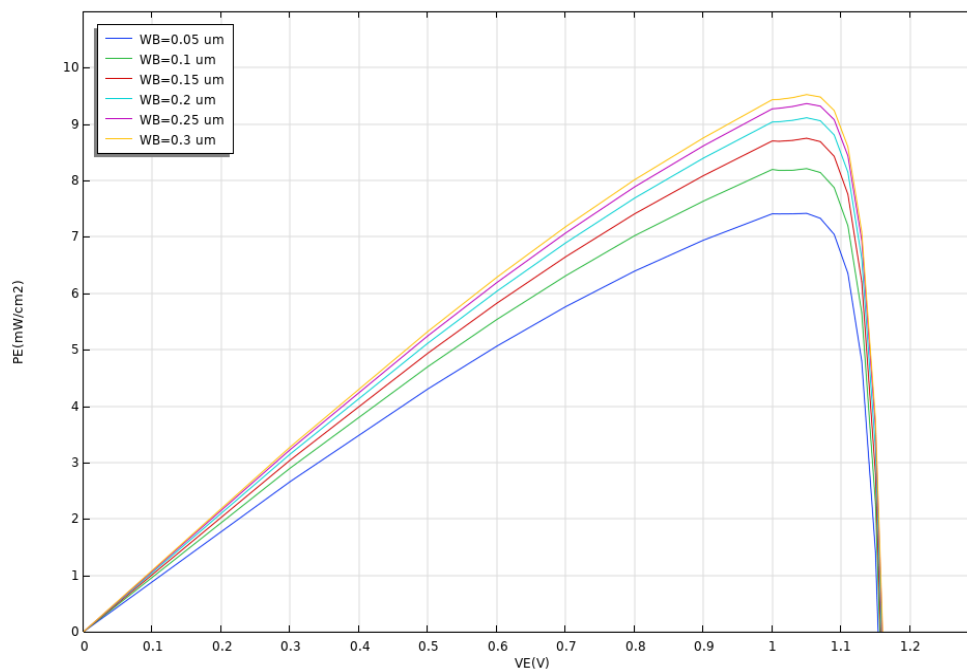


Figure 3-13 Caractéristiques puissance tension  $PE(VE)$  pour différentes épaisseurs WB.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.7.1.3 Densité de courant de court-circuit $J_{Ecc}$ (WB)

La figure (3.14) montre la variation du courant de court-circuit en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur WB de la base. On remarque que le courant de court-circuit augmente très rapidement de 0.05 jusqu'à 0.3  $\mu\text{m}$  et ensuite il se stabilise.

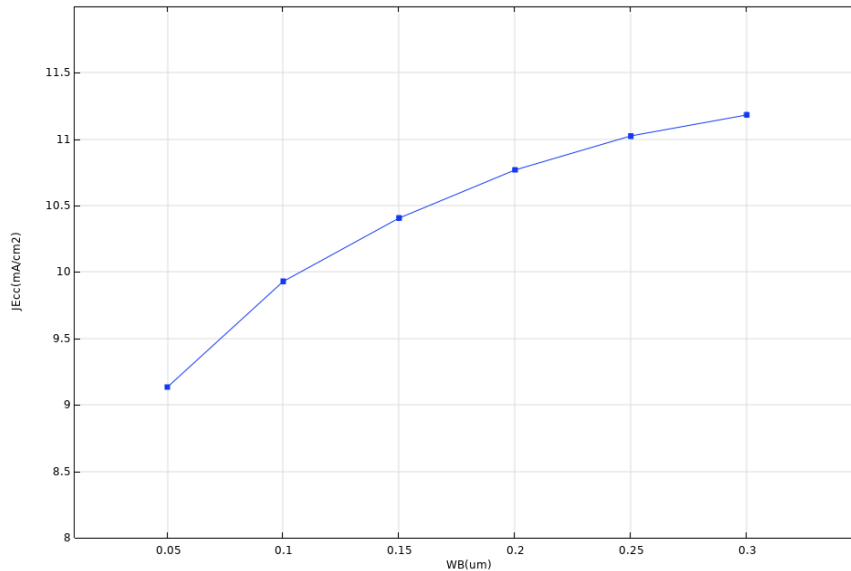


Figure 3-14 Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{ECC}$  en fonction de WB

### 3.7.1.4 Puissance maximale $PE_{max}$ (WB) = Rendement $\eta$ (WB)

Dans la figure (3.15) on constate que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche WB dû à l'augmentation du courant de court-circuit.

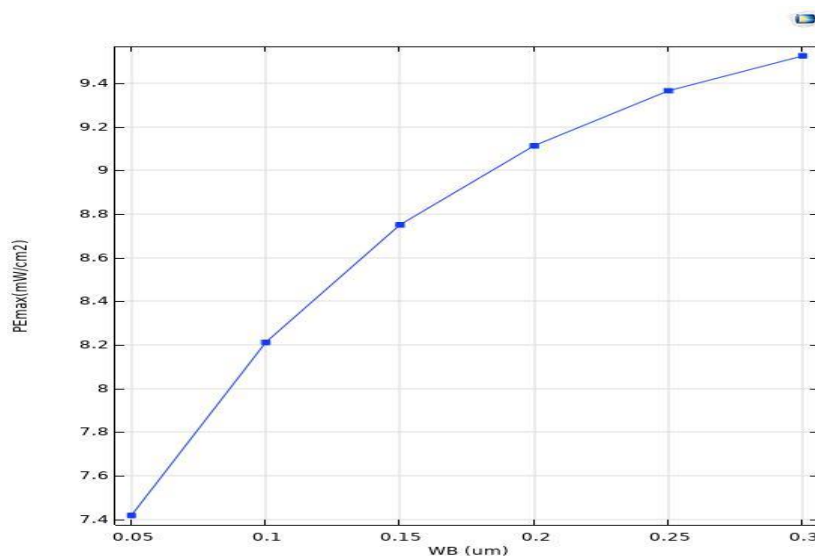


Figure 3-15 Variation de la puissance maximale  $PE_{max}$  en fonction de la couche WB.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.7.2 Effet de l'épaisseur de la base sur la jonction BC de la cellule

#### 3.7.2.1 Caractéristiques courant tension $JC(VC)$ \_WB

La figure (3.16) représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base WB. On constate que le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de l'épaisseur WB. Quant à la tension de circuit ouvert, elle reste constante.

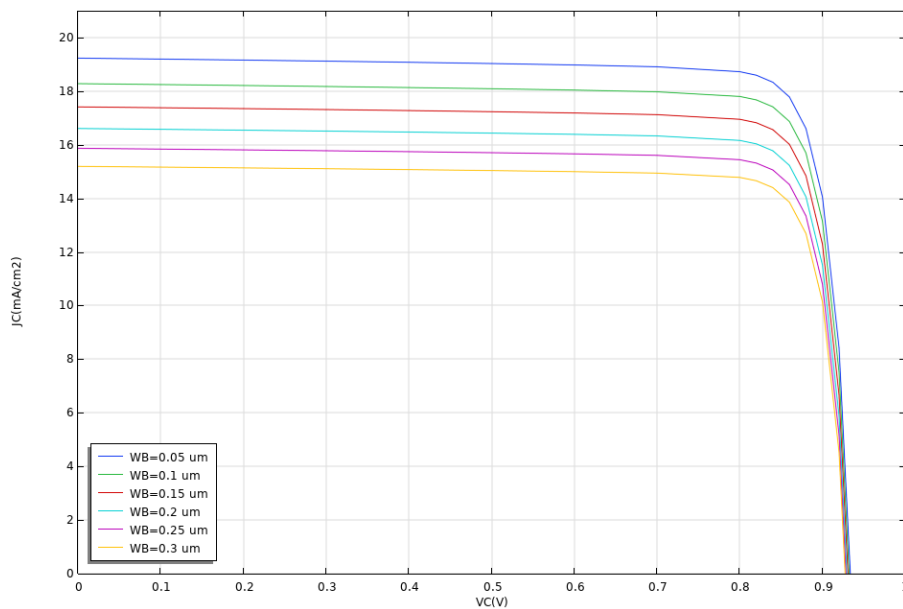


Figure 3-16 Caractéristiques courant tension  $JC(VC)$  pour différentes épaisseurs WB.

#### 3.7.2.2 Caractéristiques puissance tension $PC(VC)$ \_WB

La figure (3.17) présente les caractéristique  $PC(VC)$  pour différentes épaisseurs de la base WB. On remarque que la puissance maximale diminue avec l'augmentation de l'épaisseur WB. Quant à la tension de circuit ouvert, elle est stable.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

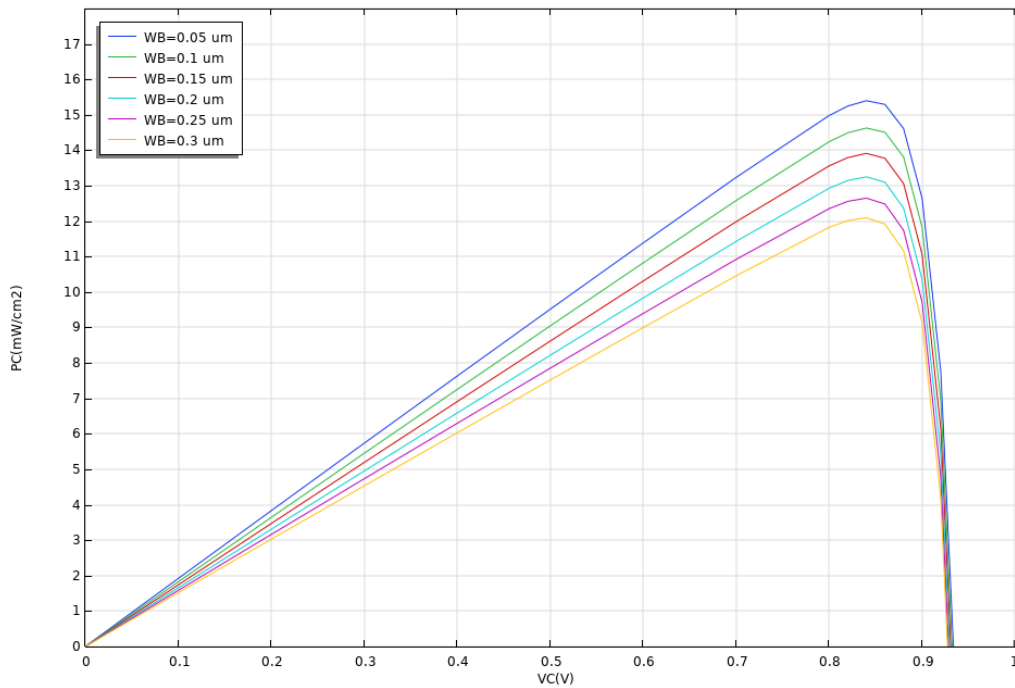


Figure 3-17 Caractéristiques puissance tension  $PC(VC)$  pour différentes épaisseurs  $WB$ .

### 3.7.2.3 Densité de courant de court-circuit $J_{Ccc}$ ( $WB$ )

La figure (3.18) montre la variation du courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur  $WB$  de la base. On remarque que le courant de court-circuit diminue lorsque  $WB$  augmente.

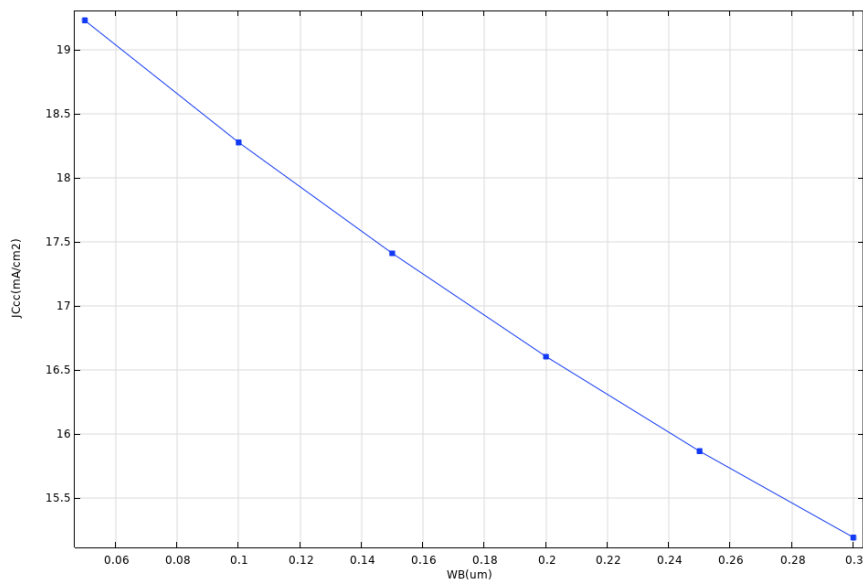


Figure 3-18 Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de  $WB$ .

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.7.2.4 Puissance maximale $PC_{max}$ (WB) = Rendement $\eta$ (WB)

Dans la figure (3.19) on constate que la puissance maximale  $PC_{max}$  et le rendement diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la base WB dû à la diminution du courant de court-circuit.

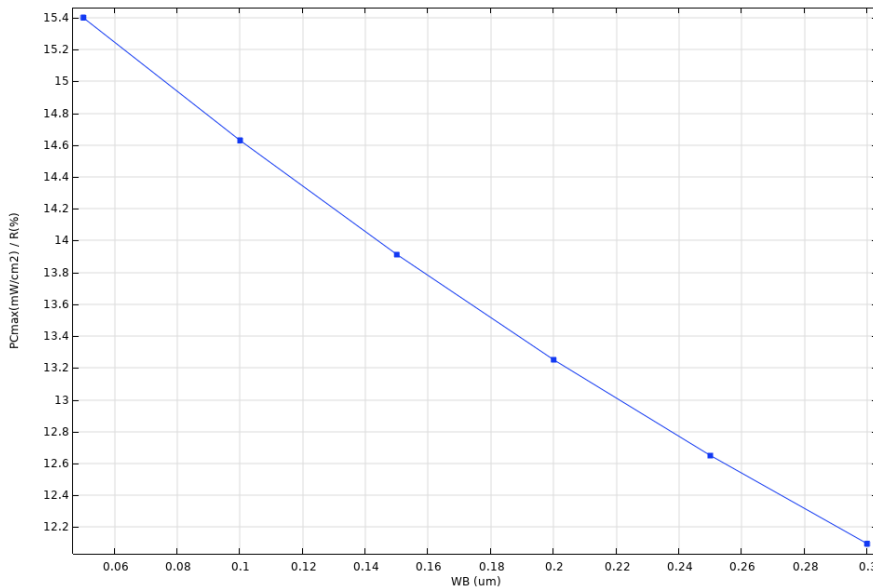


Figure 3-19 Variation de la puissance maximale  $PC_{max}$  et du rendement en fonction de WB.

### 3.8 Rendement totale $R_{tot}$ (WB)

La variation du rendement de la cellule inferieure, en fonction de l'épaisseur de la base WB, est représentée dans la figure (3.20). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de 0.05um jusqu'à 0.1um, puis le rendement diminue.

On obtient un rendement maximal de l'ordre de 22.9% pour une épaisseur WB=0.1 $\mu$ m.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

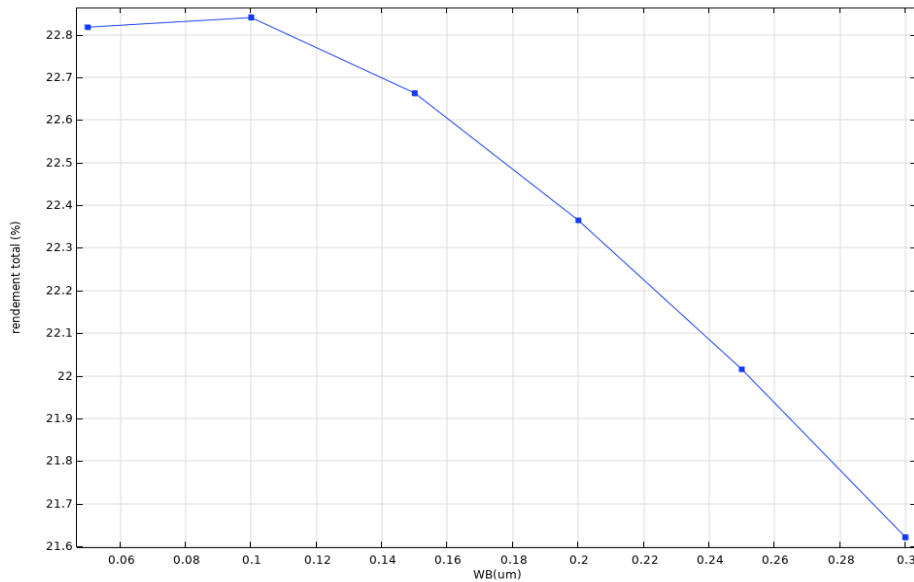


Figure 3-20 Variation du rendement total en fonction de WB.

### 3.9 Variation de l'épaisseur du collecteur WC

#### 3.9.1 Effet de l'épaisseur du collecteur sur la jonction BC de la cellule

##### 3.9.1.1 Caractéristiques courant tension JC(VC)\_WC

La figure (3.21) représente les caractéristiques JC(VC) pour différentes épaisseurs du collecteur WC. On voit que le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à une valeur égale à 3 $\mu\text{m}$ , la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

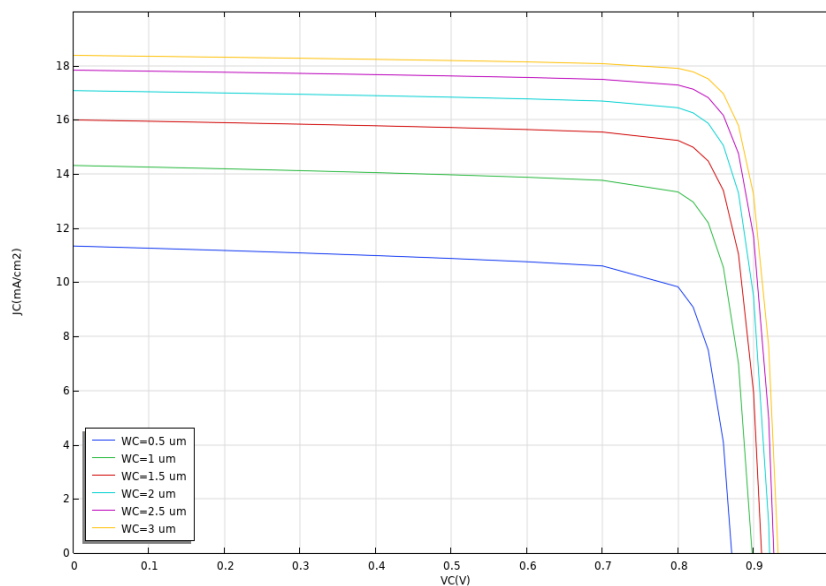


Figure 3-21 Caractéristiques courant tension JC(VC) pour différentes épaisseurs WC.



## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.9.1.2 Caractéristiques puissance tension $PC(V_C)$ \_WC

La figure (3.22) présente les caractéristique  $PC(V_C)$  pour différentes épaisseurs du collecteur WC. On remarque que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur WC, La variation devient faible à partir de  $WC=3\mu\text{m}$ . Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente puis se stabilise à partir de  $3\mu\text{m}$ .

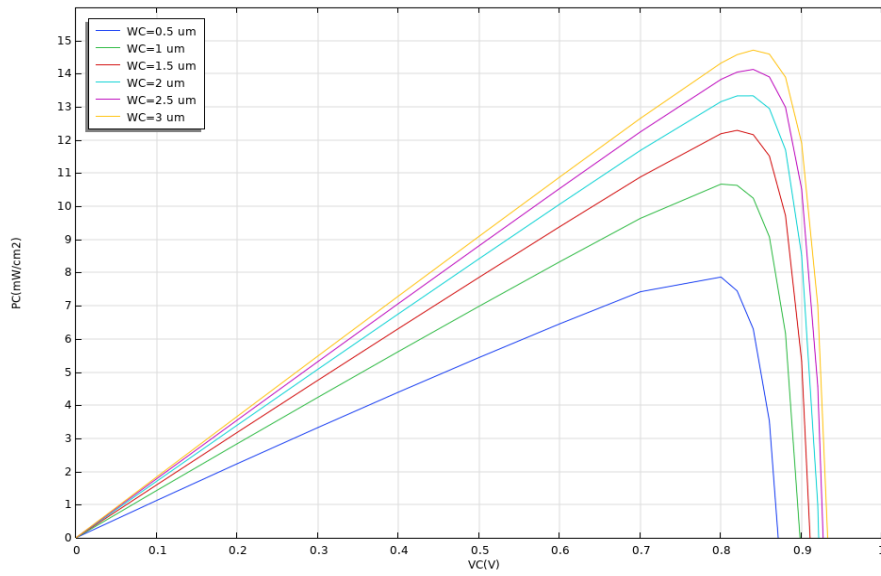


Figure 3-22 Caractéristiques puissance tension  $PC(V_C)$  pour différentes épaisseurs WC.

### 3.9.1.3 Densité de courant de court-circuit $J_{Ccc}$ (WC)

La figure (3.23) montre la variation du courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur du collecteur WC. On remarque que le courant de court-circuit augmente lorsque WC augmente.

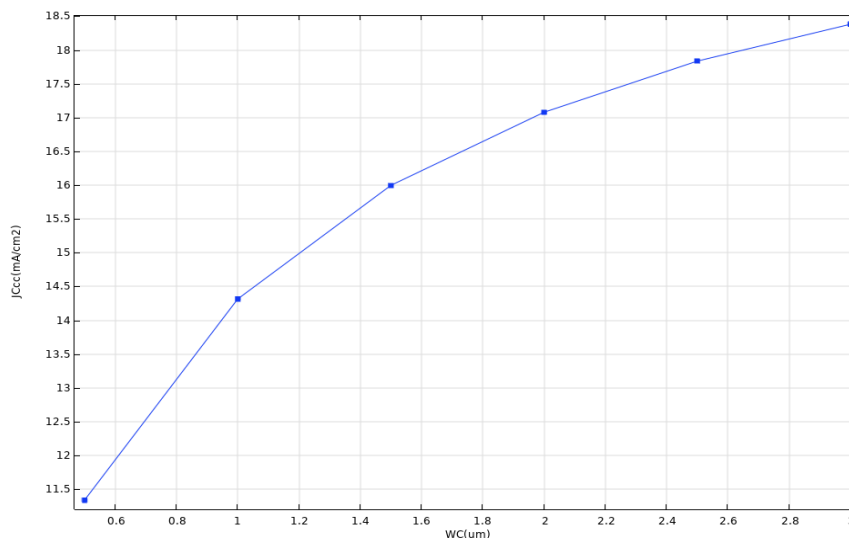


Figure 3-23 Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{Ccc}$  en fonction de WC.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.9.1.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ (WC)

L'influence de l'épaisseur du collecteur WC sur la tension de circuit ouvert dans la cellule inférieure est représentée dans la figure (3.24). On remarque que la tension de circuit ouvert augmente jusqu'à l'épaisseur  $2\mu\text{m}$  après elle se stabilise.

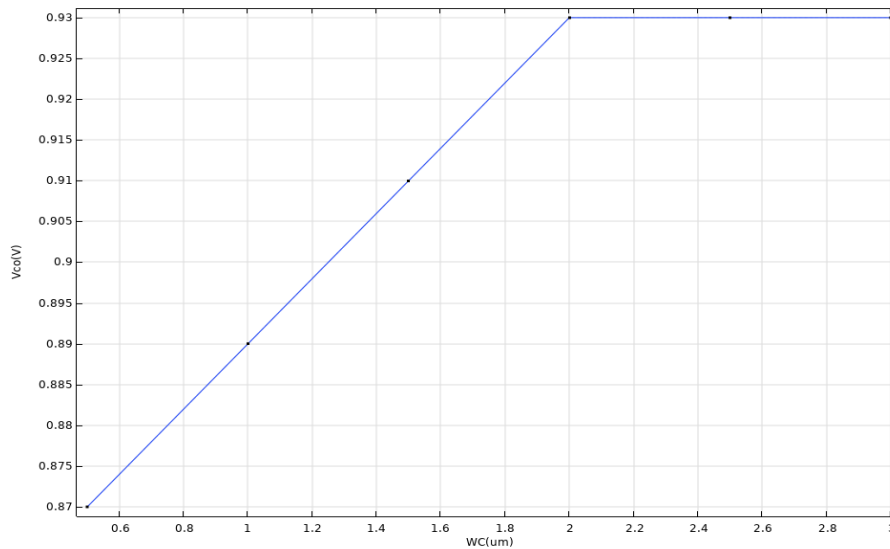


Figure 3-24 Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de WC.

### 3.9.1.5 Puissance maximale $PC_{max}$ (WC) = Rendement $\eta$ (WC)

Dans la figure (3.25) on constate que la puissance maximale  $PC_{max}$  augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du collecteur WC dû à l'augmentation du courant de court-circuit et de la tension de circuit-ouvert.

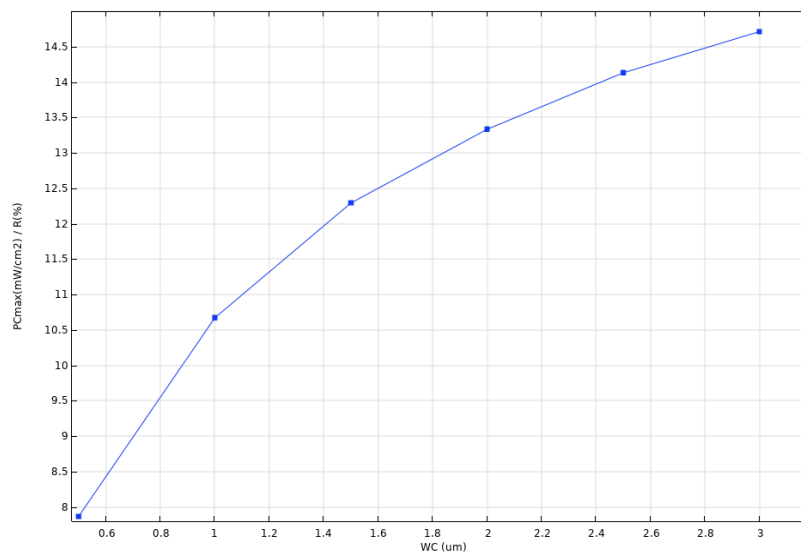


Figure 3-25 Variation de la puissance maximale  $PC_{max}$  en fonction de WC.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

### 3.10 Structure optimisée

D'après les figures (3.26) (3.27) les épaisseurs qui optimisent notre structure sont :

WE ( $\mu\text{m}$ )	WB ( $\mu\text{m}$ )	WC ( $\mu\text{m}$ )
0.05	0.1	5

Tableau 3-2 les épaisseurs optimisées pour notre structure.

#### 3.10.1 JE/PE(VE) optimisée

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule supérieure optimisée sont représentées sur la figure (26). On obtient un rendement optimal de l'ordre de 7,5%.

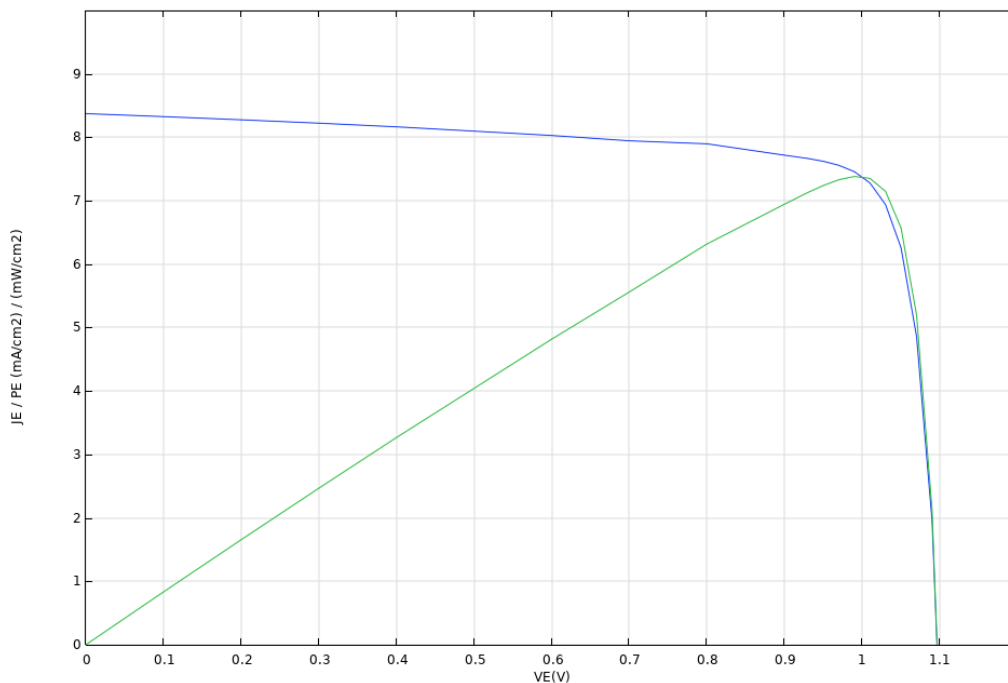


Figure 3-26 Caractéristiques courant/puissance-tension optimisées JE/PE(VE).

#### 3.10.2 JC/VC(VC) optimisée

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule inférieure optimisée sont représentées sur la figure (3.27). On obtient un rendement optimal de l'ordre de 17,5%.

## CHAPITRE 3 : Résultats de simulation et discussion

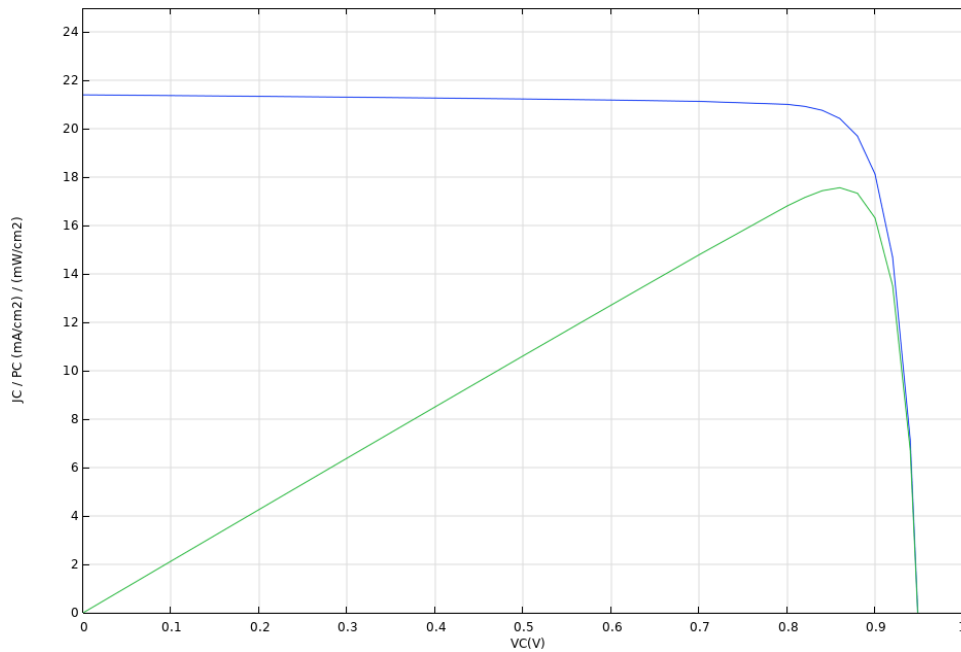


Figure 3-27 Caractéristiques courant/puissance-tension optimisées JC/PC(VC).

D'après les figures (3.26) (3.27), on obtient un rendement optimal de la structure égal à 25%.

### 3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances optimales de la cellule solaire à 3 électrodes ont été déterminées par des simulations à l'aide du logiciel Comsol.

Les résultats de simulation ont clairement montré que les épaisseurs des couches jouent un rôle très important dans les performances de la cellule solaire. Les résultats de simulation prévoient un rendement de conversion optimal de l'ordre de 25%.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons fait l'étude et la simulation d'une cellule solaire à 3 électrodes InGaP/InGaP/GaAs.

L'utilisation de l'outil de simulation, le logiciel Comsol, a permis à travers la détermination de la caractéristiques (J-V) de la cellule d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir : le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et le rendement de conversion  $\eta$ .

L'influence des épaisseurs des différentes couches sur les performances de la cellule a été étudiée.

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure dans cette configuration sont obtenues pour une épaisseur de l'émetteur  $W_E = 0.05\mu\text{m}$ , une épaisseur de la base  $W_B = 0.1\mu\text{m}$  et une épaisseur du collecteur  $W_C = 5\mu\text{m}$ . Un rendement de conversion optimal de l'ordre de 25% a été obtenu.

Tous ces résultats simulés permettent de conclure que l'optimisation des paramètres de la structure est prometteuse et peut améliorer le rendement de la cellule solaire à 3 électrodes InGaP/InGaP/GaAs.

En perspective, la suite de ce travail, peut être envisagé en considérant l'influence des dopages des différentes couches, ce qui permettra, sans doute, d'augmenter encore le rendement de conversion.

## Références

- [1] **Energie solaire photovoltaïque.doc** / B. Flèche et D. Delagnes, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Cours Sti Elt, Juin 2007, Ebook, 18 p., 2007.
- [2] **www.Annabac.can**, les variations de la puissance solaire sur terre). La dernière visite le 10/09/2022.
- [3] **Hamlat saddek, Hamdaoui atamene**. « Etude des cas possibles pour la réalisation d'une centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique du village touristique RUSSICA\_PARK. » Mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA 2017.
- [4] **YACINE Fouad**. « ETUDE DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ». MEMOIRE de Magister, Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf(USTO.MB) 2011.
- [5] **Jérôme faist** «introduction a la physique des semi-conducteurs» université de neuchatelneuchatel, mai 2001
- [6] **a .chovet, p. Masson** «physique des semi-conducteurs» école polytechnique Département.
- [7] **Zemmal badr Eddine** «utilisation de la méthode non linéaire pour caractérisation du Mosfet» thèse de magister université larbi ben m'hidi (Oum ELBouaghi) 2010.
- [8] **Bennamed Benabdallah Nadia**. ' ' Propriétés physiques des semi-conducteurs
- [9] **A.Saidane** , 'Physique des semiconducteurs' , Tom II, OPU, alger, 1993.
- [10] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled « ETUDE DE LA JONCTION PN D'UN SEMI-CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE ». Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [11] **Thibaut Desrues**, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière"., thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [12] **Fiche.pdf** « Simulation des effets des irradiations par électrons a l'aide du simulateur de dispositifs atlas» .
- [13] **DIB Wassila** «Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués . Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen, 2010.

- [14] **Mostefa Kara Selma** «Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen, 2012.
- [15] **Assia BOURAIOU** « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition » Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009.
- [16] **M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta**, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2008, 16, 61.
- [17] **A. Luque and S. Hegedus**, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.2003
- [18] **M. Abderrezek**, —Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, these Dr. en Sci. Univ. Setif -1, 2015.
- [19] **J. M. Olson, D. J. Friedman and S. Kurtz**, —Chapter 8 : High-efficiency III–V Multijunction Solar Cells, in « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Inc., 2011, pp. 314–360.
- [20] **F. Bouhdjar**, —Etude et simulation numérique des cellules solaires à hétérojonction (aSi:H/ $\mu$ c-Si:H), these PhD. , Univ. Biskra, 2016. la dernie viste le 05/07/2022.
- [21] **A. Shah**, —Thin-film silicon solar cells, EPFL Press, 2010 .
- [22] **J. M. Olson, D. J. Friedman and S. Kurtz**, “High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells”, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2003.
- [23] **Peter S. Zory Jr., Paul F. Liao, Paul K.**, “Quantum Well Lasers”, Academic Press. 1993.
- [24] **S. M. Sze and M. K. Lee**, “Semiconductor Devices, Physics and Technology”, 3rd edition johnwiley& sons, 2012.
- [25] **Brozel MR, Stillman GE**, “ Propertiesfo Gallium Arsenides ”, 3rd edition, Institution of Electrical Engineers, 1996
- [26] **A. R. Jha**, “ Solar cell Technology and applications ”, Taylor & Francis Group, p.26, 2010, ISBN 978-1-4200-8177-0. la dernie viste le 10/07/2022.



[27] **M. Green**, “Solar Cells: operating Principles, Technology, and System application”, Chap.1 Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982. la dernie viste le 10/07/2022.

[28] **D. Ahmari, M. Fresina, Q. Hartmann, P. Barlage, M. Feng, G. Stillman**, InGaP/GaAs

Heterojunctions bipolar transistor grown on a semi-insulating InGaP buffer layer”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 18, N°.11, pp.559-561, 1997. la dernie viste le 11/07/2022.

[29] **W. Lour, J. Tsai, L. Laih, W. Liu**, “ Influence of channel doping-profile on camel-gate fieleffect transistor”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.43, pp. 871-876, 1996. la dernie viste le 11/07/2022.