

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

**THEME**

*Contribution à l'étude des cellules  
photovoltaïques hétérostructure et  
tandem sous AMPS-1D*

**Dirigé par :**

Dr. BENNACER Hamza

Dr. ZIANE Mohamed Issam

**Présenté par :**

BENSALEM Elmahdi Naceur

KAHILI Mohamed moustapha

**Année universitaire : 2019/2020**

# *Remerciements*

Tous d'abord nous remercions dieu de nous avoir donne la volonté ,le courage ainsi que de nous avoir béni pour entreprendre ce modeste travail. Nos sincères remerciement et une profonde gratitude pour notre encadreur Dr.Bennacer enseignant a l'université de m'sila, le guide qui nous a orienté et encouragé a faire se travail et bien plus de par sa patience et clairvoyance .Un très grand merci a tous les professeurs et mentors qui nous on guide, éduque et formé tout en long de notre parcours universitaire .Un chaleureux remerciement au jury en charge de nous notes j'espère que ce travail sera a la hauteur de vos attentes Nous exprimons toute notre Gratitude à nos parents pour leur encouragement , la confiance et le soutient morale dont ils ont fait preuve tout ou long de ces années de études.

aidés à la réalisation de ce travail.

## *Liste des figures*

N° de figure	Titre	N° de page
<b>I.1</b>	La structure zincblende (à gauche), et la structure chalcopyrite (à droite)	13
<b>I.2</b>	Illustration schématique de la formation de composés $I-III-VI_2$ et $II-IV-V_2$ à partir d'éléments du Groupe $IV$ (Diagramme de substitution cationique)	14
<b>I.3</b>	La représentation graphique de la première zone de Brillouin pour les deux structures (a) : zincblende et (b) : chalcopyrite	15
<b>I.4</b>	Site anionique et le déplacement latéral $u$ dans la structure chalcopyrite	17
<b>I.5</b>	Les valeurs expérimentales du déplacement latéral $u$ (le paramètre interne) versus les valeurs calculées selon pour quelques chalcopyrites	17
<b>I.6</b>	L'énergie de gap fondamental versus le paramètre de maille pour quelques chalcopyrites de type $II-IV-V_2$	18
<b>I.7</b>	La structure cristalline de $ZnGeP_2$	18
<b>I.8</b>	la bande de gap et la constante de lattice du $ZnGeP_2$ et du $ZnSiP_2$ comparé au Si	20
<b>I.9</b>	la structure de bande électronique	21
<b>I.10</b>	la partie imaginaire de la fonction diélectrique complexe	21
<b>I.11</b>	reflectivité du $ZnGeP_2$	22
<b>I.12</b>	Absorption coefficient of $ZnGeP_2$ within mBJ approach in comparison with Si and other experimental and computational data	22
<b>II.1</b>	Le spectre solaire de référence	28
<b>II.2</b>	Le spectre solaire de référence (AM 1.5)	29
<b>II.3</b>	Une cellule photovoltaïque	30
<b>II.4</b>	Processus d'absorption de la lumière dans un matériau	30
<b>II.5</b>	Structure d'une cellule photovoltaïque, ("Photo watt" )	31
<b>II.6</b>	Schéma de la densité de courant en fonction de tension pour une diode en obscurité et sous éclaircissement	32
<b>II.7</b>	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque	33
<b>II.8</b>	Illustration de la prépondérance des matériaux à base de silicium cristallin dans la production de cellules photovoltaïques	34
<b>II.9</b>	Stratégies de réduction des coûts de l'électricité photovoltaïque (Relation du coût par watt de l'énergie solaire pour le coût de la surface de fabrication de dispositifs solaires (modules) et le rendement de la cellule ( <i>Adapté de J.-F. Guillemoles</i> ))	35
<b>II.10</b>	Le progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers dispositifs de recherche ou de laboratoire [NREL]	36
<b>II.11</b>	La variation du rendement de conversion idéal pour une cellule en fonction de la largeur de bande interdite du matériau (à gauche) et les variations spectrales de la sensibilité d'une cellule solaire au (Si) ou à (GaAs) (à droite). <i>RQI : le rendement quantique interne</i>	38
<b>II.12</b>	Structure d'une cellule photovoltaïque multijonction épitaxie de type $GaN/P_2/GaAs/Ge$	41
<b>II.13</b>	Le spectre solaire (1.5 AM) et les parties du spectre qu'on peut exploiter par des cellules solaires à base de : (a) Si ; (b) : $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge$	42
<b>II.14</b>	Le rendement concernant divers cellules solaires à base de semi-conducteurs	43

<b>II.14</b>	Le rendement concernant divers cellules solaires à base de semi-conducteurs	43
<b>II.15</b>	La sensibilité de différents types de cellules solaires (à droite)	43
<b>II.16</b>	Vue en coupe transverse au microscope électronique à balayage d'une cellule à base de CuInSe électrodéposé, élaborée à l'IRDEP	43
<b>III.1</b>	L'icône exécutable d'AMPS-1D	51
<b>III.2</b>	Page d'accueil de l'interface d'AMPS-1D	52
<b>III.3</b>	L'interface des conditions environnementales et des paramètres d'entrées et de convergence	53
<b>III.4</b>	L'interface des propriétés physiques du matériau.	54
<b>III.5</b>	La structure de la première cellule simulée.	55
<b>III.6</b>	La deuxième structure à étudier	56
<b>III.7</b>	La variation du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche ZnGeP <sub>2</sub>	57
<b>III.8</b>	La variation de rendement et de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche Si	58
<b>III.9</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction du dopage de la couche ZnGeP <sub>2</sub>	60
<b>III.10</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction du dopage de la couche Si dopé (p)	61
<b>III.11</b>	Variation du rendement et facteur de forme en fonction de la température de la cellule ZnGeP <sub>2</sub> /Si	62
<b>III.12</b>	Le graphe du résultat final déduit par WxAMPS-1D	63
<b>III.13</b>	Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (n)	65
<b>III.14</b>	Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (p)	66
<b>III.15</b>	Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche Si (n) .	67
<b>III.16</b>	Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche Si (p)	68
<b>III.17</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (n)	70
<b>III.18</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (p)	71
<b>III.19</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (p)	72
<b>III.20</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche Si (p)	73
<b>III.21</b>	Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de la température de la couche Si (p)	75
<b>III.22</b>	Le résultat final obtenue par l'AMPS-1D	76

## *Liste des tableaux*

N° de Tableau	Titre	N° de Page
<b>I.1</b>	La formule chimique des composés ternaires de type <i>I-III-VI<sub>2</sub></i> et <i>II-IV-V<sub>2</sub></i> et leurs analogues binaires	12
<b>I.2</b>	Les positions et les coordonnées des 8 atomes de la maille tétragonale de la structure chalcopyrite en fonction de $a$ , $c$ et $u$ rapporté par <i>Zunger</i> . Les vecteurs unitaires du réseau sont : $a_1 = a(1, 0, 0)$ ; $a_2 = a(0, 1, 0)$ et $a_3 = a(1/2, 1/2, c/2a)$ avec le volume de la maille est ( $V=a^2.c/2$ )	15
<b>I.3</b>	les paramètres de réseau calculés avec l'approche DFT	18
<b>II.1</b>	Les différentes structures technologiques des cellules photovoltaïques disponibles dans les littératures	36
<b>II.2</b>	Les différentes générations des cellules photovoltaïques	37
<b>II.3</b>	Les rendements confirmés des cellules solaires terrestres et sous-module mesurée sous le spectre mondial d'AM1.5 (1000 W/m <sup>2</sup> à 25 °C)	45
<b>II.4</b>	Top 10 des rendements confirmés des cellules et modules solaires mesurés sous le spectre AM1.5 (1000 W/m <sup>2</sup> à 25 °C)	46
<b>II.5</b>	Les rendements des cellules concentrateurs et des modules terrestres mesurés sous le faisceau direct du spectre AM 1,5 à 25 °C	47
<b>III.1</b>	Les paramètres électroniques de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (n)	56
<b>III.2</b>	Les paramètres électroniques de la couche Si (p)	56
<b>III.3</b>	Les résultats de simulation obtenus par rapport aux épaisseurs	57
<b>III.4</b>	Les résultats de simulation Jsc. Vco. $\eta$ . FF. par rapport aux épaisseurs	58
<b>III.5</b>	Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	59
<b>III.6</b>	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	59
<b>III.7</b>	L'effet de dopages de la couche ZnGeP <sub>2</sub> sur les performances de la cellule Photovoltaïque	59
<b>III.8</b>	L'effet de dopages de la couche Si dopé p sur les performances de la cellule Photovoltaïque	60
<b>III.9</b>	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales du dopage de chaque couche	61
<b>III.10</b>	Les valeurs optimales du dopage de chaque couche	61
<b>III.11</b>	L'effet de la température sur les performances de la cellule Photovoltaïque	62
<b>III.12</b>	Les valeurs optimales des paramètres de la cellule	63
<b>III.13</b>	Les paramètres électriques de la couche ZnGeP <sub>2</sub>	63
<b>III.14</b>	Les paramètres électriques de la couche Si	64
<b>III.15</b>	L'effet de l'épaisseur de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (n) sur les performances de la cellule photovoltaïque	64
<b>III.16</b>	Les résultats de simulation obtenus par rapport aux épaisseurs	65
<b>III.17</b>	Les caractéristiques électriques de la cellule tandem obtenus en fonction de l'épaisseur de la couche en Si (n)	67
<b>III.18</b>	Les résultats de simulation Jsc, Vco, $\eta$ et FF par rapport aux épaisseurs	68

<b>III.19</b>	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couches	69
<b>III.20</b>	Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couches	69
<b>III.21</b>	L'effet de dopages de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (n) sur les performances de la cellule Photovoltaïque	69
<b>III.22</b>	L'effet de dopages de la couche ZnGeP <sub>2</sub> (p) sur les performances de la cellule Photovoltaïque	71
<b>III.23</b>	L'effet de dopages de la couche Si (n) sur les performances de la cellule Photovoltaïque	72
<b>III.24</b>	L'effet de dopages de la couche Si (p) sur les performances de la cellule photovoltaïque	73
<b>III.25</b>	Les valeurs optimales du dopage de chaque couche	73
<b>III.26</b>	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	74
<b>III.27</b>	L'effet de la température sur les performances de la cellule photovoltaïque.	74
<b>III.28</b>	Les valeurs optimales des paramètres de la cellule	75
<b>III.29</b>	Les valeurs optimales des paramètres de la cellule	75

## **Introduction générale**

Contenue des prévisions de l'explosion démographique prévisionnée pour les années à venir une forte demande d'énergie et à prévoir pour subvenir aux besoins futurs [1], or les énergies produites par les combustibles fossiles tels que le carbone, le pétrole et le gaz naturel font partie des énergies polluantes et surtout non renouvelables qui ne peuvent pas approvisionner les besoins d'énergie pour les siècles à venir. Donc pour pouvoir remédier à ce problème il va falloir développer les énergies renouvelables. Parmi les filières les plus avancées dans le domaine des énergies renouvelables la filière photovoltaïque qui consiste essentiellement à la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique grâce à des cellules PVs à base de semi-conducteurs [2] s'avère très prometteuse mais avec des limitations concernant les prix élevés comparés aux sources conventionnelles. Les recherches les plus avancées à ce jour se concentrent sur deux axes essentiels. L'axe principal se concentre sur l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques afin de profiter au maximum des rayonnements du spectre solaire. Le deuxième axe a pour but d'innover des procédés et matériaux nouveaux en vue de la fabrication de cellules photovoltaïques moins chères que possible. Une estimation de 2012 a constaté que plus de 90 % du marché photovoltaïque est dominé par des technologies principalement constituées de silicium sous forme de plaquette naturelle monocristalline ou polycristalline comme matériau absorbant [3] avec un rendement record de 26,6% [4]. Afin d'obtenir de meilleurs résultats de rendement les ternaires chalcopyrites semblent être une alternative prometteuse puisque ils sont des matériaux à bande interdite directe et un coefficient d'absorption plus important. Par conséquent, les composés les plus communs pour faire des cellules solaires à multi-jonction sont les chalcopyrites de type II-IV-V<sub>2</sub>. Dans ce contexte, de grands efforts sont consacrés récemment, théoriquement et expérimentalement pour bien exploiter ces matériaux comme des couches absorbantes en cellules photovoltaïques [5-15]. Notre but dans ce travail, est l'étude par simulation d'une cellule solaire à base de ZnGeP<sub>2</sub> avec le simulateur WxAMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) dans les conditions standard (T=25°C et sous illumination de AM 1.5) et fait l'optimisation de quelques paramètres physiques de chaque couche tel que l'épaisseur et le dopage pour l'amélioration du rendement. En outre, l'étude de l'effet de la température sur les paramètres de sortie de la cellule comme la densité de courant de court-circuit (J<sub>sc</sub>), la tension de circuit ouvert (V<sub>co</sub>), le facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ).

## Introduction générale

Notre mémoire regroupe trois chapitres plus une introduction générale et conclusion générales. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les matériaux ternaires chalcopyrites et notamment le  $\text{ZnGeP}_2$  on revue leurs différentes propriétés électriques, optiques et électroniques indispensables pour le lancement de la simulation. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et un rappel sur les différentes générations des cellules photovoltaïques réalisées jusqu'à nos jours. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation des structures proposées soit à hétérojonction  $\text{ZnGeP}_2/\text{Si}$  ou bien, la structure Tandem  $\text{ZnGeP}_2$  (n)-  $\text{ZnGeP}_2$  (p) -  $\text{Si}$  (n)/ $\text{Si}$  (p) avec l'outil de simulation WxAMPS-1D. Afin, d'optimiser le rendement électrique de cette structure, on a déterminé et discuté l'influence du dopage, l'épaisseur et la température sur les caractéristiques électriques des cellules.

## Référence

- [1] DARANFED Ouarda, « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  », Thèse de Doctorat en Science physique, Université de MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 2013
- [2] BOUGUERROUMA Kamel, « Etude des Chalcogénures de métaux de transition ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ) en couches minces pour des applications photovoltaïques. », mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2016.
- [3] SLIMANI TLEMCANI Taoufik, « Etude expérimentale de films minces de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  élaborés par électrodéposition et spray ultrasonique : Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, université Mohammed V–Rabat MAROK, 2016.
- [4] NERL <http://WWW.nerl.gov/ncpv/images/efficiency-chart.pdf>
- [5] BENNACER Hamza et al, Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 53, March 2015, pp. 181-189.
- [6] V. L. Shaposhnikov, A. V. Krivosheeva, and V. E. Borisenko, *Phys. Rev.* B85 (2012) 205201.
- [8] F. Chiker et al, Solid State Communications 151 (2011) 1568–1573.
- [9] J.L. Shay, J.H. Wernick, Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties and Applications, Pergamon Press, Oxford, Pergamon, New York, 1975.
- [10] A. Continenza, S. Massida, A.J. Freeman, T.M.De. Pascale, F. Meloni, M. Serra,

## Introduction générale

Phys. Rev. B 46 (1992) 10070.

[11] J.E. Jaffe, A. Zunger, Phys. Rev. B 27 (1983) 5176.

[12] A. Zunger, J.E. Jaffe, Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 662.

[13] J.E. Jaffe, A. Zunger, Phys. Rev. B 29 (1984) 1882.

[14] J.E. Jaffe, A. Zunger, Phys. Rev. B 30 (1984) 741.

[15] A.G. Petukhov, W.R.L. Lambrecht, B. Segall, Phys. Rev. B 49 (1993) 4549.

# Chapitre I

## I.1. Introduction

La structure diamant est l'une parmi les structures les plus simples et symétriques car seuls le (Si) et le *Germanium* (Ge), cristallisent habituellement dans cette structure [1].

Comme analogues binaires du groupe IV, les composés III-V [2-4] et II-VI fournissent des nouvelles propriétés disponibles pour l'étude et l'exploitation.

A l'échelle des composés ternaires, la baisse de la symétrie en raison de la formation de super-réseau ouvre la voie à des dispositifs non- linéaires et des propriétés optiques intéressantes [1].

La recherche de nouveaux semi-conducteurs est basée sur l'examen des composés ternaires présentant un analogue de la structure diamant ou de la coordination tétraédrique . *Goodman et Douglas* (1954) [3] ont discutés la possibilité de la semiconductivité dans les composés I-III-VI<sub>2</sub> qui étaient synthétisés un an plus tôt par *Hahn et al* (1953) [4]. De son côté, *Goodman* (1957) [5] a montré en outre que la substitution des atomes ordonnés des groupes II et IV pour les atomes du groupe III dans les composés III-V peuvent préparer de nouveaux composés semi-conducteurs de type II-IV-V<sub>2</sub> [1].

Un intérêt particulier est attribué aux chalcopyrites ternaires de type I-III-VI<sub>2</sub>, notamment le CuGaS<sub>2</sub> et le CuAlS<sub>2</sub>, car ils peuvent être élaborés de type-p avec un gap direct couvrant respectivement le spectre visible et l'ultraviolet . Ils sont uniques dans ce secteur, ou, ils ont générés une activité dans le domaine des hétérojonctions avec les composés II-VI [1].

Ces composés sont également d'intérêt d'un point de vue fondamental, car la structure chalcopyrite est simple, non cubique et similaire à la structure zincblende. Alors que les bandes de valence de la plupart des cristaux zincblende sont composés par les orbitales s et p, les métaux nobles de niveau d dans les composés I-III-VI<sub>2</sub> hybrident avec les orbitaux contraires s et p, d'où tout cela conduit à plusieurs caractéristiques anormales de la structure de bande d'énergie [6-7].

Pour qu'un matériau ou bien un semi-conducteur soit efficace en cellule photovoltaïque, sa bande interdite (E<sub>g</sub>) doit être optimale pour utiliser la majorité des rayonnements [2]. Depuis 1970, les études s'intéressent à l'investigation des propriétés des chalcopyrites en couches minces, et ceci pour leur grand potentiel en matière d'utilisation photovoltaïque [8]. Les composés ternaires forment une partie de cette étude, en particulier les composés chalcopyrites qui représentent des candidats prometteurs. De plus, les chalcopyrites représentent des matériaux très importants dans les applications en optique non linéaire [9].

Le reste de ce chapitre résume des notions de bases sur les matériaux chalcopyrites de façon général et le ZnGeP<sub>2</sub>.

## I.2. La structure chalcopyrite

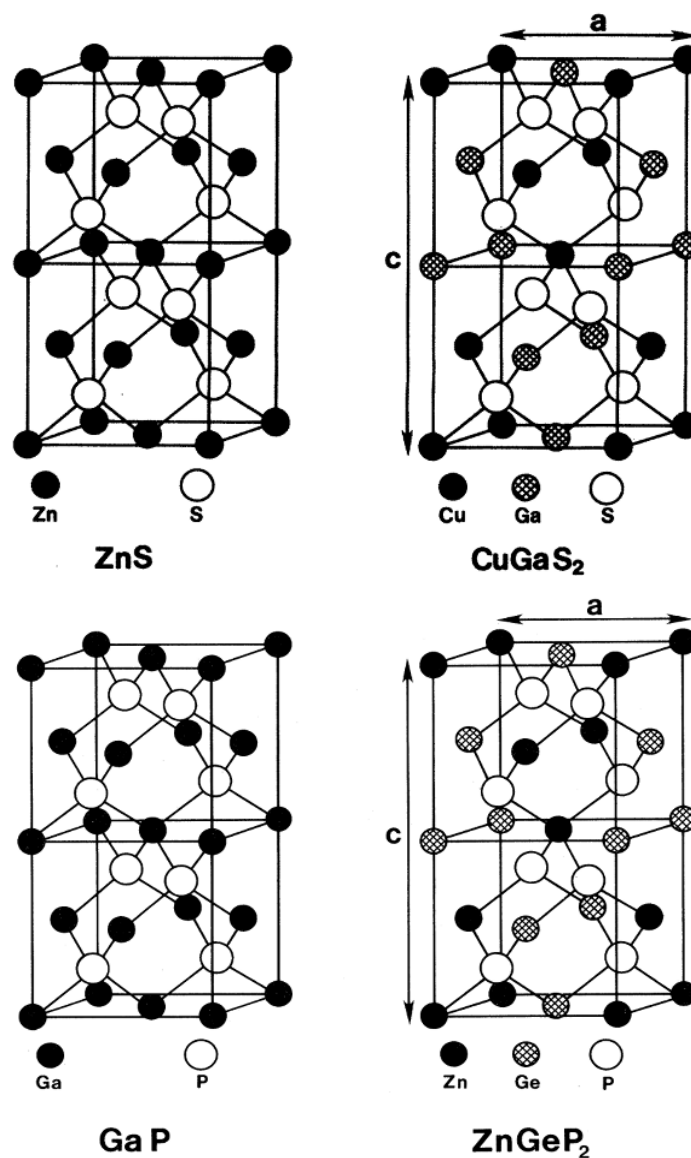
### I.2.1. Les chalcopyrites de type I-III-VI<sub>2</sub> et II-IV-V<sub>2</sub>

Tout récemment, une grande attention a été accordée à l'étude des propriétés électroniques et optiques des composés ternaires de la formule chimique :  $A^{N-1}B^{N+1}C_2^{8-N}$  (N=3, 2). Théoriquement, l'étude des propriétés électroniques et optiques de ces composés est une extension logique à l'étude de leurs plus proches analogues les semi-conducteurs Zinblende de type  $B^N C^{8-N}$  (N=3, 2) (tableau I.1). Les composés  $A^{N-1}B^{N+1}C_2^{8-N}$  ont de nombreuses propriétés physiques intéressantes qui promettent d'être utile pour les applications de la technologie des semi-conducteurs [10].

**Tableau.I.1.** La formule chimique des composés ternaires de type I-III-VI<sub>2</sub> et II-IV-V<sub>2</sub> et leurs analogues binaires.

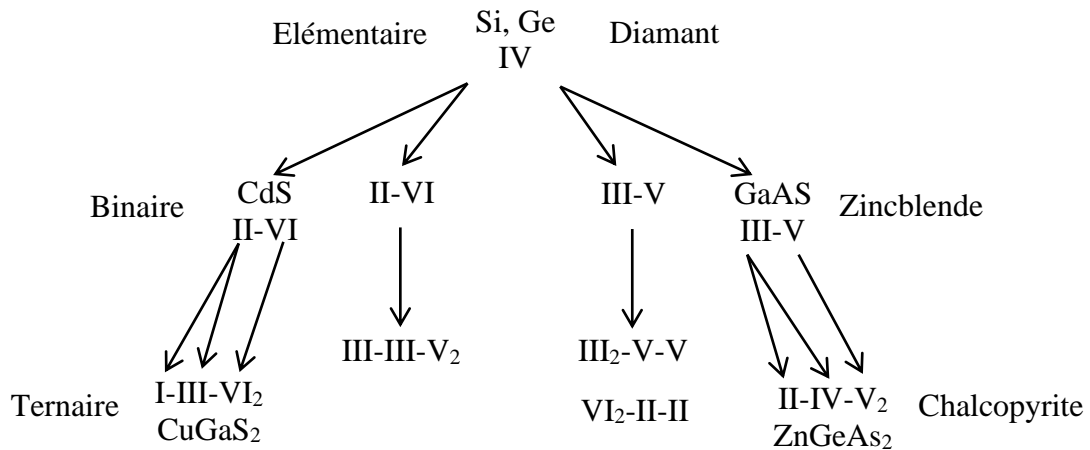
	Le composé $A^{N-1}B^{N+1}C_2^{8-N}$	L'analogue binaire $B^N C^{8-N}$
N = 2	$A^1 B^3 C_2^{VI}$ (I-III-VI <sub>2</sub> )	$B^II C^{VI}$ (II-VI)
N = 3	$A^II B^IV C_2^V$ (II-IV-V <sub>2</sub> )	$B^III C^V$ (III-V)

Les composés chalcopyrites  $ABC_2$  de la structure (I-III-VI<sub>2</sub> avec des anions de type *chalcogenide*) et (II-IV-V<sub>2</sub> avec des anions de type *pnictide*) font toujours l'objet de nombreux travaux. Ils constituent une extension naturelle des composés de structure Zinblende (II-VI) et (III-V) dont ils découlent cristallographiquement (figure.I.1). Ils ont presque le même arrangement des atomes anions mais différent dans l'ordre de distribution des atomes cations (A et B) qui font que la cellule unité tétragonale a un *axe-c* avoisinant le double de l'*axe-a* de la cellule unité zinblende. On peut définir un analogue binaire à chaque composé ternaire  $ABC_2$  en prenant le cation de la colonne située entre les atomes A et B dans le tableau périodique [9,11]. C'est le cas du  $ZnS$  qui est l'analogue binaire de  $CuGaS_2$  ou bien le cas du  $GaP$  qui est l'analogue binaire de  $ZnGeP_2$  (figure.I.1).



**Figure.I.1.** La structure zincblende (à gauche), et la structure chalcopyrite (à droite) [12-14].

Donc, ces matériaux de structure à empilement tétraédrique peuvent être considérés comme des dérivés polycationiques d'un composé monoatomique de la quatrième colonne du tableau périodique de *Mendeleïev*. La substitution cationique des composés (II-VI) et (III-V) donne lieu à des familles de composés qui possèdent à nouveau une même structure tétraédrique : la structure chalcopyrite. Cette relation peut être représentée par un diagramme de substitution cationique [9,15].



**Figure.I.2.** Illustration schématique de la formation de composés  $I\text{-III-VI}_2$  et  $II\text{-IV-V}_2$  à partir d'éléments du Groupe IV (Diagramme de substitution cationique) [1, 16]

Les chalcopyrites ternaires  $ABC_2$  cristallisent dans la structure tétragonale avec un groupe d'espace de type  $I\bar{4}2d$  ( $D_{2d}^{12}$ ) (8 atomes par maille unitaire primitive) qui constitue une superstructure du réseau *Zincblende*  $F43m$  (2 atomes par maille unitaire) [1]. Il est clair de voir que cette structure dérive de la structure cristalline *zincblende* par dédoublement de sa cellule cubique le long de l'axe  $-z$  (qui devient par la même occasion l'axe  $-c$  de la structure chalcopyrite) [11]. Comparée à la structure *zincblende*, la structure chalcopyrite est différente en ayant deux types d'atomes cations. En effet, dans le cristal chalcopyrite les deux cations ne sont pas aléatoirement distribués, mais ils sont arrangés périodiquement [11].

Les chalcopyrites sont des structures tétragonale (de coordination 4) où chaque atome est associé à quatre atomes proches voisins formant un tétraèdre plus ou moins régulier. Chaque anion (C) est lié à deux cations (A) et deux cations (B) alors que chaque cation est lié à quatre anions en formant le tétraèdre sus-indiqué [17,18].

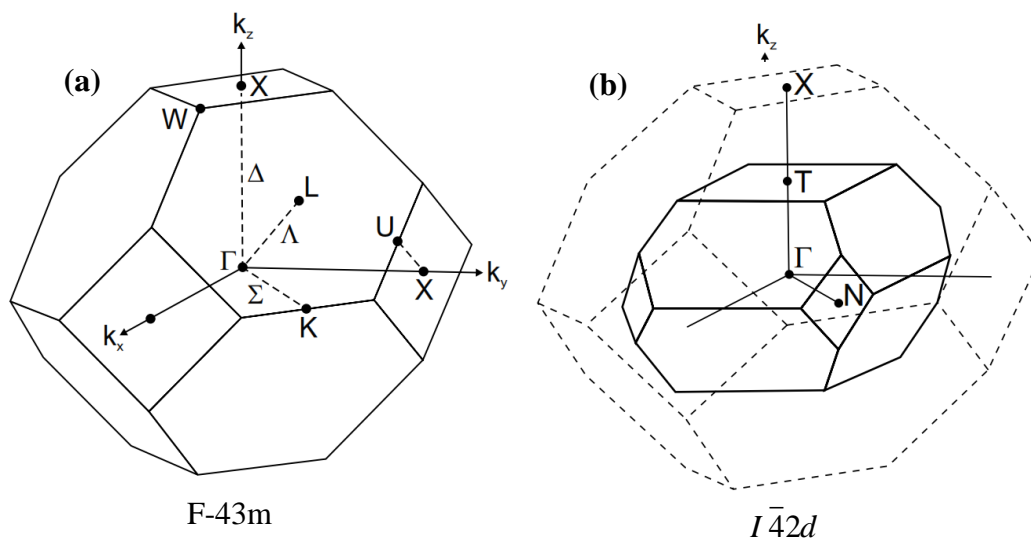
La structure chalcopyrite est décrite dans le groupe d'espace  $I\bar{4}2d$  avec les positions atomiques suivantes :

**Tableau.I.2.** Les positions et les coordonnées des 8 atomes de la maille tétragonale de la structure chalcopyrite en fonction de  $a$ ,  $c$  et  $u$  rapporté par *Zunger* [18]. Les vecteurs unitaires du réseau sont :  $a_1 = a(1, 0, 0)$  ;  $a_2 = a(0, 1, 0)$  et  $a_3 = a(1/2, 1/2, c/2a)$  avec le volume de la maille est ( $V=a^2.c/2$ ) [18].

Atomes	Les coordonnées (x, y, z)
A <sub>1</sub>	0, 0, 0
A <sub>2</sub>	0, a/2, c/4
B <sub>1</sub>	a/2, a/2, 0
B <sub>2</sub>	a/2, 0, c/4
C <sub>1</sub>	a (1/4+u), a/4, c/8
C <sub>2</sub>	a (3/4-u), 3a/4, c/8
C <sub>3</sub>	a/4, a (3/4+u), 3c/8
C <sub>4</sub>	3a/4, a (1/4-u), 3c/8

Comme la cellule primitive d'un cristal de chalcopyrite est quatre fois plus grande que la maille élémentaire d'un cristal de zincblende comprimé le long de l'axe z, la zone de Brillouin de zincblende est quatre fois plus grande que celle de l'analogue de la chalcopyrite (figure I.3) [10].

Les cations sont considérés comme répartis de manière aléatoire parmi la position de cations dans l'analogue Zincblende. Ensuite, le composé possède la structure de zincblende, l'un des deux sites de la maille primitive est occupé par l'anion et l'autre par la moyenne des deux cations  $\left(\frac{A^2 + B^2}{2}\right)$ . Il est seulement de l'ordre des deux cations et leurs différents potentiels que réduit la zone de Brillouin [10].



**Figure.I.3.** La représentation graphique de la première zone de Brillouin pour les deux structures (a) : zincblende et (b) : chalcopyrite [19].

Généralement, un ternaire chalcopyrite, est composé de mélange entre deux structures Zincblende et introduit un changement du groupe de symétrie du (F-43m) au ( $I\bar{4}2d$ ) caractérisant ainsi une structure quadratique chalcopyrite pour ces types de cristaux, le paramètre de maille  $c$  devrait être le double du paramètre  $a$  [1], or les chalcopyrites présentent, de par l'alternance des cations, des modifications structurales qui sont : un déplacement anionique  $u$  (aussi appelé le paramètre interne) et une compression quadratique  $c/a$  [9]. Le paramètre interne  $u$  n'influe que sur les distances entre le premier voisin ( $d_{AX}$  et  $d_{BX}$ ). De plus, en raison des différences de rayon entre les deux cations, le réseau est distordu avec une hauteur de cellule unie et légèrement inférieure au double de la base. Le cristal entier se trouve comprimé le long de l'axe cristallographique  $c$ . Cette compression quadratique est caractérisée par  $\tau$ , tel que [9]:

$$u = \frac{1}{4} + \frac{d_{AX}^2 - d_{BX}^2}{a^2} \quad (\text{I.1})$$

$$\tau = 2 - \frac{c}{a} \leq 0 \quad (\text{I.2})$$

$$\eta = \frac{c}{2a} \quad (\text{I.3})$$

Pour une chalcopyrite idéale,  $u = 1/4$ ,  $c/a = 2$ ,  $\tau = 0$  et  $\eta = 1$  [1]. Les deux atomes  $A$  et  $B$  sont coordonnées par un tétraèdre d'atomes  $X$ . Les deux distances les plus importantes  $d_{AX}$  et  $d_{BX}$  sont liées à la longueur de cellule et l'atome  $X$  par sa position interne libre par la relation [9]:

$$d_{AX} = \sqrt{a^2 u^2 + \frac{4a^2 + c^2}{64}} \quad (\text{I.4})$$

$$d_{BX} = \sqrt{a^2 (u^2 - 1/2)^2 + \frac{4a^2 + c^2}{64}} \quad (\text{I.5})$$

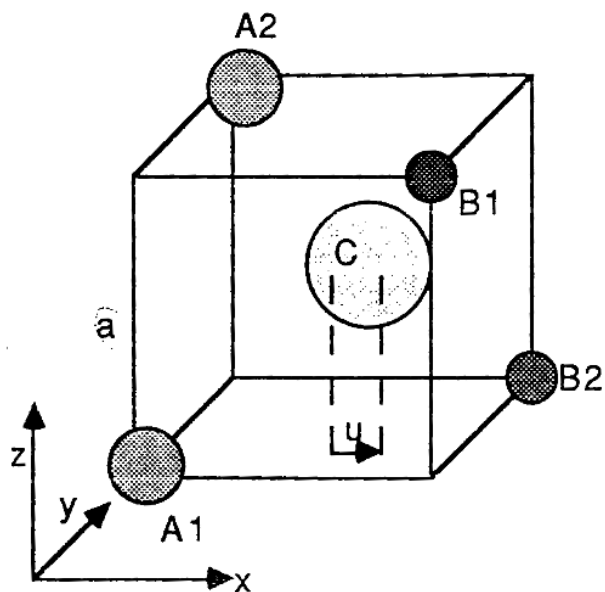


Figure.I.4. Site anionique et le déplacement latéral  $u$  dans la structure chalcopyrite  $ABC_2$  [15, 17].

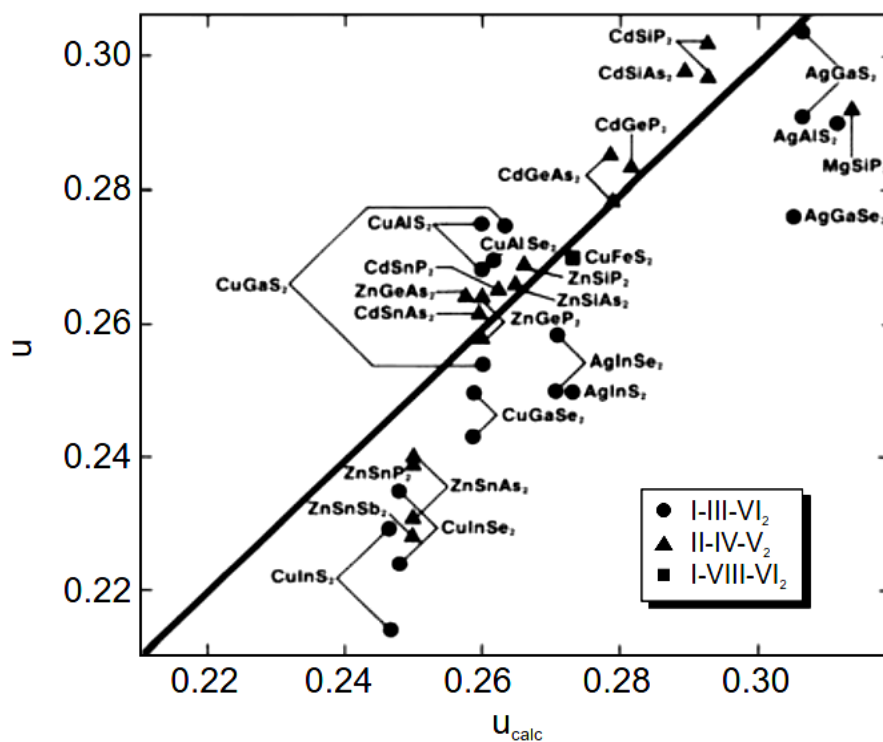
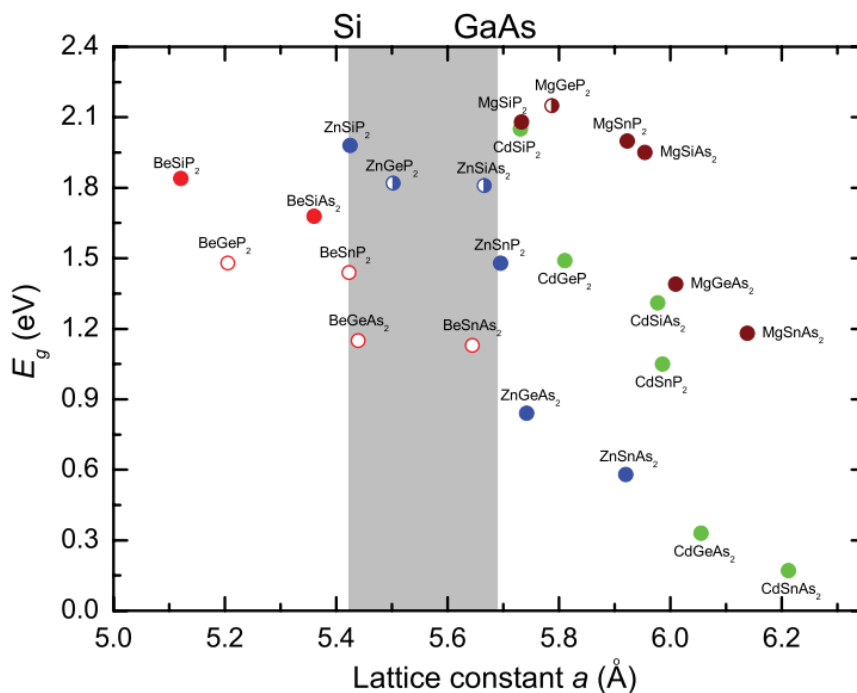
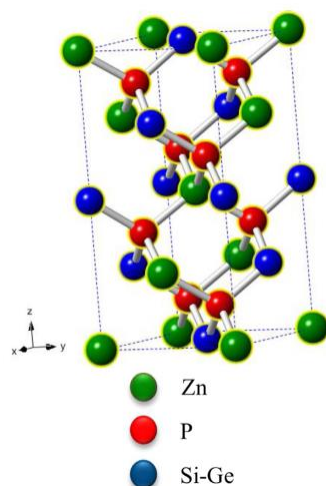


Figure.I.5. Les valeurs expérimentales du déplacement latéral  $u$  (le paramètre interne) versus les valeurs calculées selon [13] pour quelques chalcopyrites [19].



**Figure.I.6.** L'énergie de gap fondamental versus le paramètre de maille pour quelques chalcopyrites de type  $II-IV-V_2$  [20].

### I.3. Le ternaire ZnGeP<sub>2</sub>



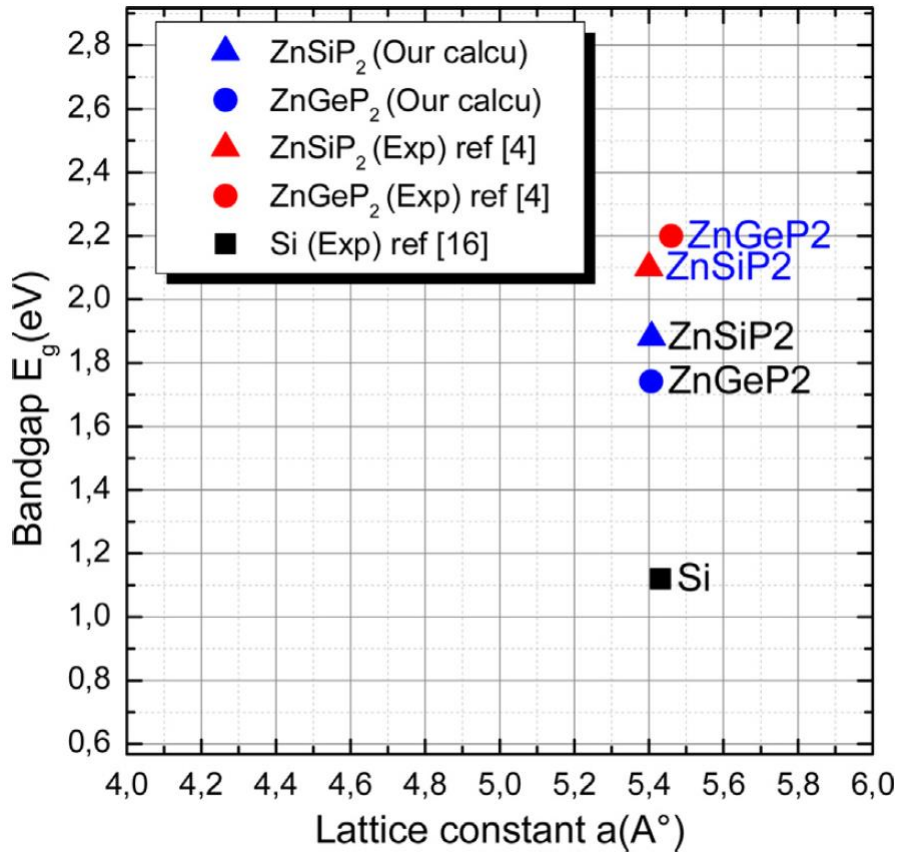
**Figure.I.7.** La structure cristalline de ZnGeP<sub>2</sub>[21]

La figure (I.7) illustre la structure cristalline du ternaire ZnGeP<sub>2</sub> [21], qui est tetragonale ( $a=b \neq c$ ), ( $c \approx 2a$ ), ( $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ).

Le tableau (I.2) represente l'ensemble des parametres de reseau obtenues par le calcul numerique basé sur la theorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) [21]

**Tabelau.I.3.** les parametres de reseau calculés avec l'approche DFT[21]

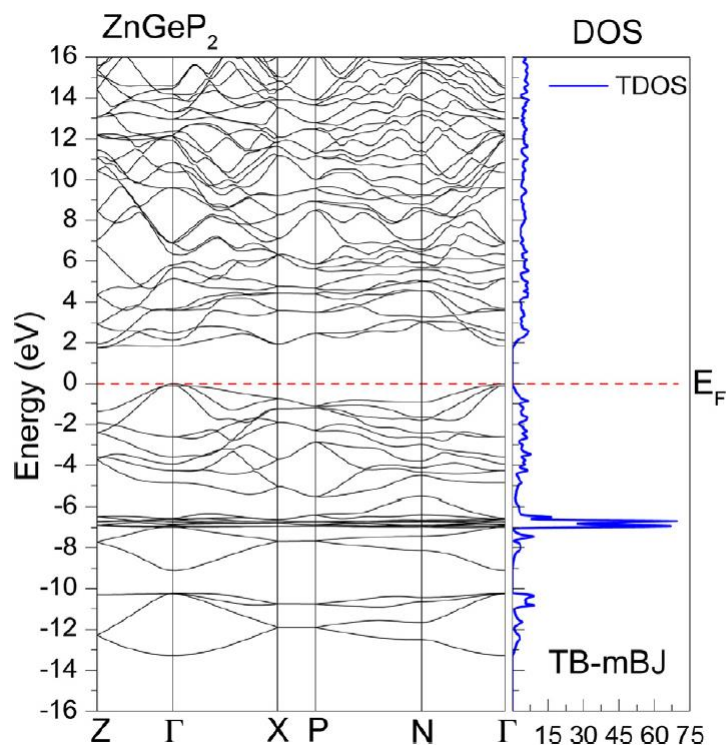
	a (Å)	c(Å)	c/a	u
ZnGeP <sub>2</sub>				
LDA	5.406	10.596	1.96	0.250
	5.466	10.722	1.961	
	5.502	10.850	1.972	0.254
	5.46	10.710	1.960	0.258
	5.465	10.766	1.970	0.250
EXP	5.480	10.795	-	0.254
	5.473	10.717		



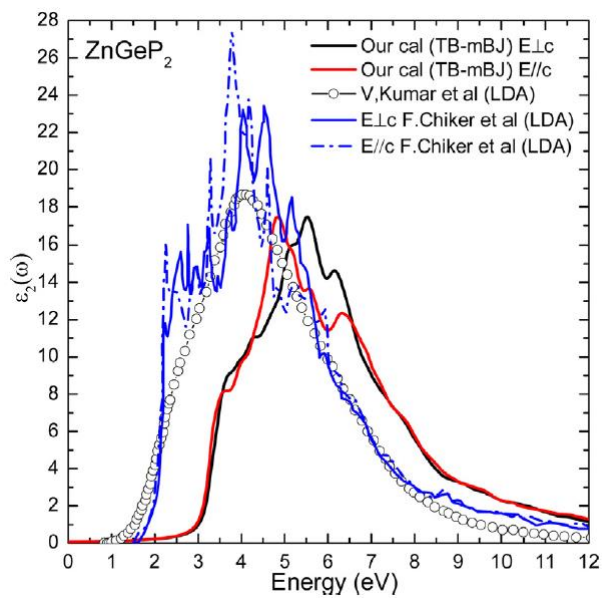
**Figure.I.8.** la bande de gap et la constante de lattice du ZnGeP<sub>2</sub> et du ZnSiP<sub>2</sub> comparé au Si[21]

#### I.4. Les propriétés physico-chimiques

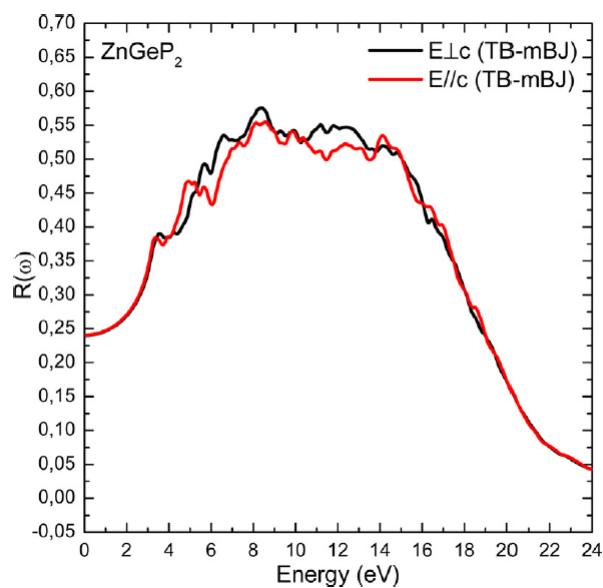
Les propriétés physico-chimiques d'un matériau sont des facteurs indispensables pour le choix d'une application technologique. C'est le cas pour les cellules photovoltaïques ou les propriétés optoélectroniques des matériaux, le facteur le plus important. Dans ce qui suit, on va évoquer quelques propriétés optoélectroniques du ZnGeP<sub>2</sub> tels que la structure de bande électronique, la partie imaginaire de la fonction diélectrique complexe, l'absorption optique et la réflectivité.



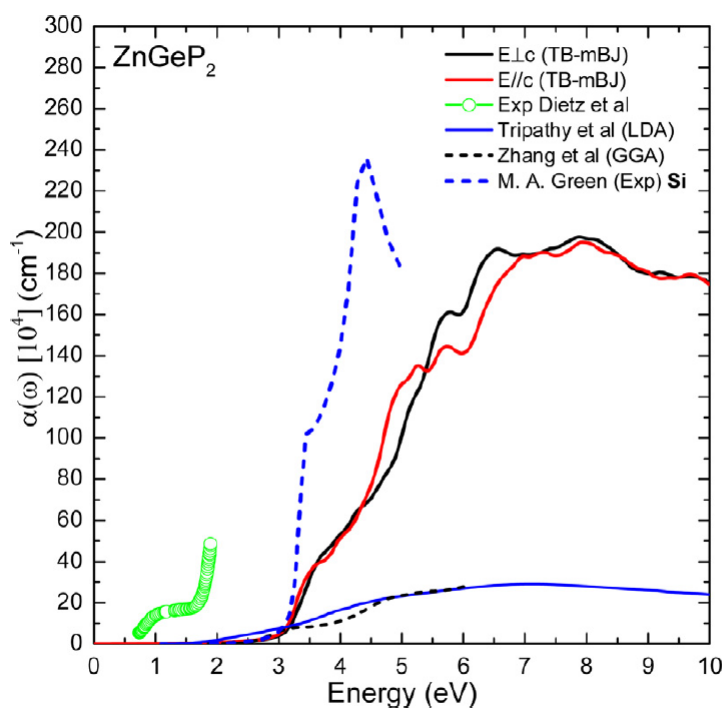
**Figure.I.9.** la structure de bande eletronique[21]



**Figure.I.10.** la partie imaginaire de la fonction dieletriqe complexe [21]



**Figure.I.11.** réflectivité du  $\text{ZnGeP}_2$  [21]



**Figure.I.12.** Absorption coefficient of  $\text{ZnGeP}_2$  within mBJ approach in comparison with Si and other experimental and computational data [21].

## I.5. Conclusion

Les chalcopyrites sont des matériaux prometteurs dans plusieurs domaines et applications et surtout en cellule photovoltaïque, soit dans les cellules solaires à base des couches minces

(*Thin film Solar cells*) comme le cas de Cu-III-VI<sub>2</sub>, ou bien comme des matériaux absorbeurs dans des cellules solaires multijonction (*MJ solar cells*) concernant la famille de III-III-V<sub>2</sub>.

Dans cette étude on va calculer les propriétés optoélectroniques des ternaires chalcopyrites de la forme ZnGeP<sub>2</sub> ou (X=Ge, P, N) avec la méthode FP-LAPW qui est basée sur la DFT, puis on va exploiter ces propriétés dans des cellules solaires à multijonction.

## I.5. Références

- [1] Wernicke et al, "Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications", (livre), Pergamon press, 1975.
- [2] Blum, A. N., Mokrovski, N. P., and Regel, A. R. (1950) Seventh All-union Conference on the Properties of Semiconductors, Kiev.
- [3] Goodman, C. H. L., and Douglas, R. W. (1954) *Physica* 20, 1107.
- [4] Hahn, H. Frank, G., Kingler, W., Meyer, A., and Storger, G. (1953) *Z. anorg. Chem.* 271, 153
- [5] Goodman, C. H. L. (1957) *Nature* 179, 828.
- [6] Böhm, O. Madelung, G. Huber, A. MacKinnon, A. Scharmann, E.-G. Scharme, "Physics of Ternary Compounds", Springer-verlag Berlin, (1985).
- [7] Dheerendra Singh Yadav, Chakresh Kumar, "Opto-Electronics Properties of Chalcopyrite and Binary Solids: Ternary Chalcopyrite Semiconductor, Transition Metal Compounds", Lambert academic publishing, ISBN-13: 978-3848414161 (2012).
- [8] Ouahida Aissaoui, "Etude des propriétés physiques des couches minces de structure chalcopyrite", Thèse Doctorat, Université de Annaba, (2011).
- [9] Ouahrani Tarik, "Calcul des propriétés structurales, thermiques et optiques des composés chalcopyrites par la méthode FP-(L)APW", Thèse de doctorat en physique, Université de Tlemcen, 2011.
- [10] Carmen Varea De Alvarez, "Electronic structure of Diamond, Zincblende and chalcopyrite semiconductors", Thèse, Inorganic Materials Research Division, Lawrence Berkeley Laboratory and department of physics, University of California.
- [11] Chahed Abbes, "Etude Ab-initio des propriétés structurales, électroniques et optiques des semi-conducteurs chalcopyrites AgXY<sub>2</sub> (X=Al, Ga, In et Y=S, Se, Te), thèse de doctorat d'état en physique, université de Sidi Bel Abbes, 2006.
- [12] Wanxiang Feng, Jun Ding, Di Xiao, and Yugui Yao, *Phys. Rev. Lett.* 106, 016402 – 2011
- [13] J. E. Jaffe and Alex Zunger, *Physical Review B*, Vol 29, N° 4, p1882-1906, (1984).
- [14] J. E. Jaffe and Alex Zunger, *Physical Review B*, Vol 30, N° 2 – p741, (1984).

- [15] Olivier Brisson, ‘‘Elaboration et caractérisation de monocristaux de  $\text{AgGaX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) pour l’optique non-linéaire dans l’infrarouge. Approche par simulation numérique de l’hydrodynamique dans la phase fluide’’, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, France, (1995).
- [16] Siebentritt. S, Rau. U, ‘‘Wide-Gap chalcopyrite’’, (Livre), Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006).
- [17] Selmane Emna, ‘‘Synthèse et caractérisation du ternaire chalcopyrite  $\text{CuAlS}_2$ ’’, Mémoire en chimie Minérale, Université de Tunis II, (1992).
- [18] J. E. Jaffe and Alex Zunger, Physical Review B, Vol 28, N° 10, p5822-5847,(1983).
- [19] Marius Grundmann, (Livre), ‘‘the Physics of Semiconductors, an Introduction Including Devices and Nanophysics’’, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [20] V. L. Shaposhnikov et al, Physical Review B 85, 205201 (2012).
- [21] H.bennacer et al, Optik, 159 (2018) 229–244, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.01.079>

# Chapitre II

## II.1. Introduction

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins en énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique [1].

*Alexandre-Edmond Becquerel* en 1839 [1]: il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière, c'est *L'effet photovoltaïque*. *Albert Einstein* expliqua le phénomène photoélectrique en 1912 [1], mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5 % [2].

La production photovoltaïque mondiale actuelle est à base de silicium cristallin . En effet, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car la technologie du silicium est arrivée presque à sa maturité et le silicium est un matériau abondant sur terre, parfaitement stable et non toxique. On peut résumer les objectifs de la recherche et la fabrication dans les cellules solaires dans les points suivante :

- Utiliser moins des matériaux semiconducteurs en obtenant des cellules plus minces ou bien :
- Utiliser des matériaux semiconducteurs moins coûteux . Ceux-ci ont tendance à être moins purs et moins parfaits.
- Améliorer les performances des cellules solaires avec des semi-conducteurs moins coûteux et moins parfaits.
- Même avec cette matière pauvre a maintenir un rendement élevé de production , il faut réduire le nombre de cellules ou modules rejetés par le contrôle de la qualité.
- Accroître l'utilisation de matériaux en réduisant le gaspillage des semi-conducteurs et la fabrication de cellules
- Augmenter le flux solaire sur les cellules solaires en utilisant des concentrateurs sans augmenter
- Augmenter l'utilisation du rayonnement solaire en absorbant plus du spectre solaire de manière efficace.
- Augmenter la vitesse et le débit des procédés de fabrication.
- Simplifier les étapes de traitement (ce qui réduit les coûts de fabrication et augmente le rendement) et réduire les coûts d'équipement.
- Réduire les coûts et améliorer les performances.

## II.2. Rayonnement, spectre solaire et l'efficacité idéale de conversion

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil [5].

La figure (II.1) présente la gamme de rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible ainsi que les longueurs d'ondes correspondantes.

À chaque longueur d'onde  $\lambda$  peut être associé un photon d'énergie  $E_{ph} = h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Js) et  $\nu$  la fréquence correspondant à la longueur d'onde  $\lambda$  ( $\lambda = c/\nu$ ,  $c$  étant la vitesse de propagation de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup>) [3, 5].

On rappelle la relation permettant de passer de la longueur d'onde  $\lambda$  (en  $\mu\text{m}$ ) à l'énergie  $E_{ph}$  du photon associé (en eV) :

$$E_{ph} (\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda (\mu\text{m})}$$

(II.1)

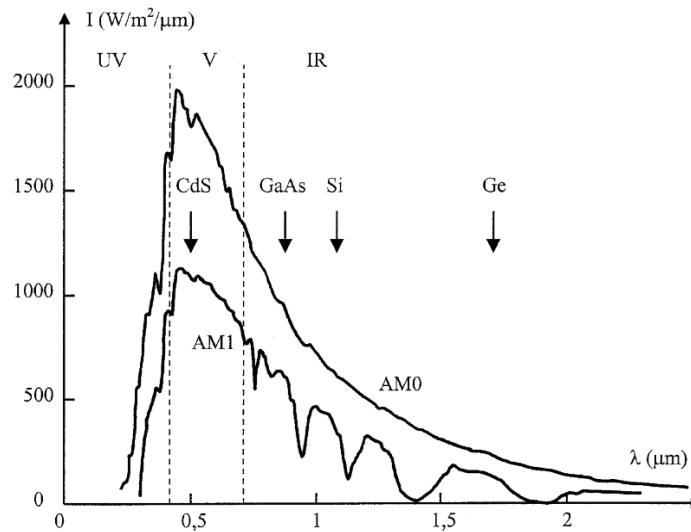
Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution spectrale du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol, ou en raison de multiples paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution spectrale peuvent varier dans de très grandes proportions [6].

Nous verrons que la cellule photovoltaïque n'est sensible que dans un domaine bien précis de longueur d'onde. Il est donc nécessaire de définir un spectre standard, appelé spectre de référence, qui peut être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles. Le spectre présenté sur la figure (II.14) a été retenu par la C.E.I (la Commission électrotechnique internationale) (IEC : International Electrotechnical Commission). Il donne en fonction de la longueur d'onde la radiance spectrale, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface. Cette grandeur est exprimée en  $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$  [6].

L'intégration de cette radiance spectrale sur toutes les longueurs d'ondes donne l'irradiance de ce rayonnement de référence exprimée en  $\text{Wm}^{-2}$ . La valeur qui a été choisie par le CEI, et qui correspond à la figure (II.14) est égale à  $1 \text{ kWm}^{-2}$ . Ce spectre de référence correspond à la traversée par le rayonnement solaire d'une couche atmosphérique de référence qui sera définie par ailleurs (spectre A.M. 1.5). Il est à noter que dans la

pratique, le spectre que l'on enregistre au sol varie sans cesse et peut s'écarter notablement de ce spectre de référence [6].

Avec 8 % de la puissance de flux solaire (irradiance spectrale) se situe dans l'ultraviolet (0.2-0.4  $\mu\text{m}$ ), 48 % de la puissance se situe dans le spectre visible (0.4 - 0.8  $\mu\text{m}$ ) et 37 % dans le proche infrarouge (0.2 - 2  $\mu\text{m}$ ) [3, 6]. D'après la figure (II.14), il est clair que le maximum de l'irradiance spectrale correspond à la longueur d'onde de 0.5  $\mu\text{m}$  qui se situe dans la région visible.



**Figure.II.1.** Le spectre solaire de référence [7].

Les photons du spectre solaire (figure II.1) ne vont pas être tous utilisables pour la génération de paires électron-trou. Si ( $E_{\text{ph}} < E_{\text{g}}$ ) le photon n'est pas absorbé par le matériau (semi-conducteur) qui est donc transparent pour cette longueur d'onde. Si ( $E_{\text{ph}} > E_{\text{g}}$ ) le photon est absorbé mais une partie de l'énergie est perdue par la thermalisation. La figure (II.15) résume ceci sur le spectre de référence en montrant, sous forme d'aires, les pourcentages correspondant aux photons non absorbés (**I**) environ 20% et aux pertes par thermalisation (**II**) environ 32%. La zone utile du spectre pour le Silicium comme exemple est la zone (**III**) environ 48%, mais l'énergie correspondante ne pourra pas être totalement transformée en énergie électrique. Nous constatons également que la cellule photovoltaïque ne répond donc que dans un domaine limité de longueurs d'ondes de 0,4  $\mu\text{m}$  à 1,1  $\mu\text{m}$  pour les cellules industrielles au silicium [6].

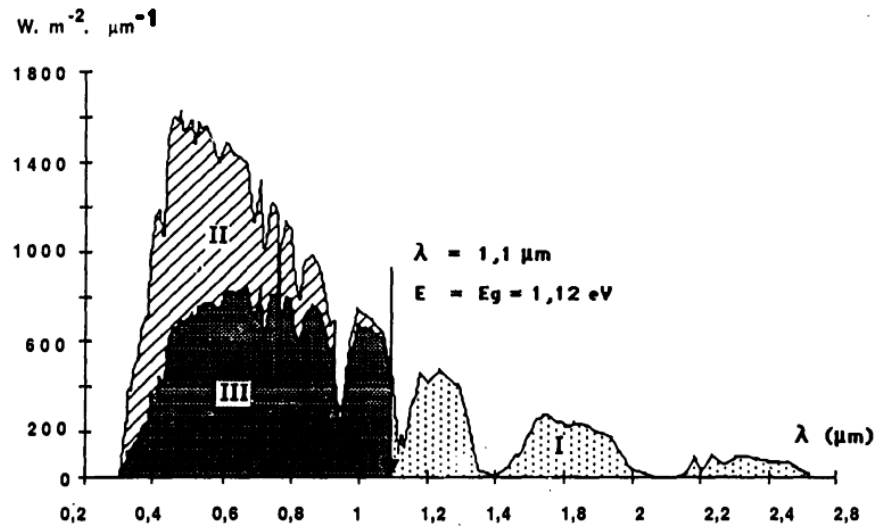


Figure.II.2. Le spectre solaire de référence (AM 1.5) [6].

## II.5. Cellule solaire

Une cellule solaire (figure.II.2) est un élément semi-conducteur qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique. Elle consiste en une base de Silicium dopée de type P couverte d'une mince couche de type N, au-dessus de laquelle on dispose d'une grille métallique qui constitue avec la base arrière les électrodes de sortie de la cellule.

Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie " $h\nu$ " supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur, un couple électron-trou est créé: c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne

de la jonction PN vers ses extrémités, ce qui va créer une différence de potentiel appelée tension photovoltaïque. Si une charge est appliquée aux bornes de la cellule, cette tension génère un courant  $I_{ph}$  appelé courant photovoltaïque [8, 9].

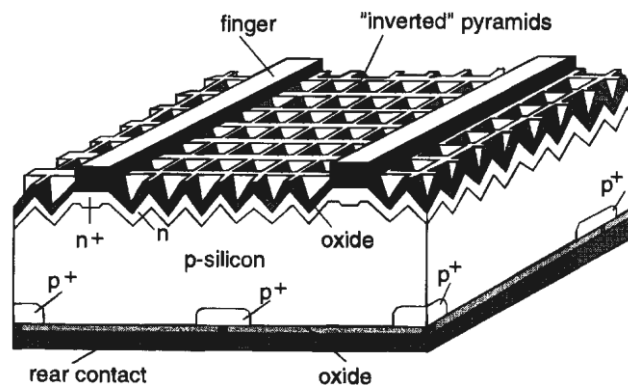


Figure.II.3. Une cellule photovoltaïque [8].

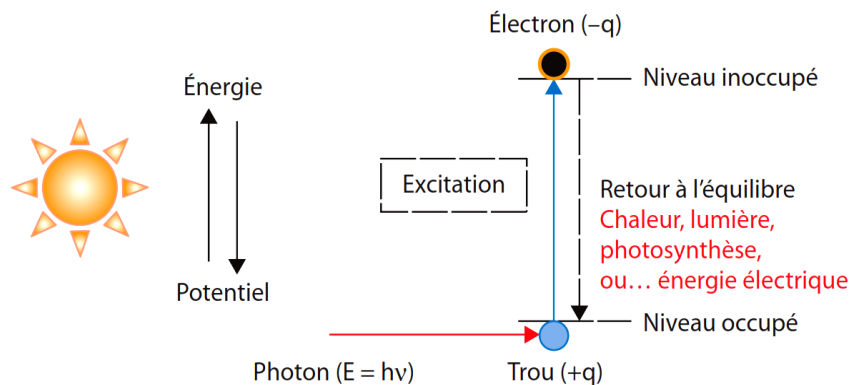
### II.5.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique:

- L'absorption de photons (figure II.3).
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collection de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

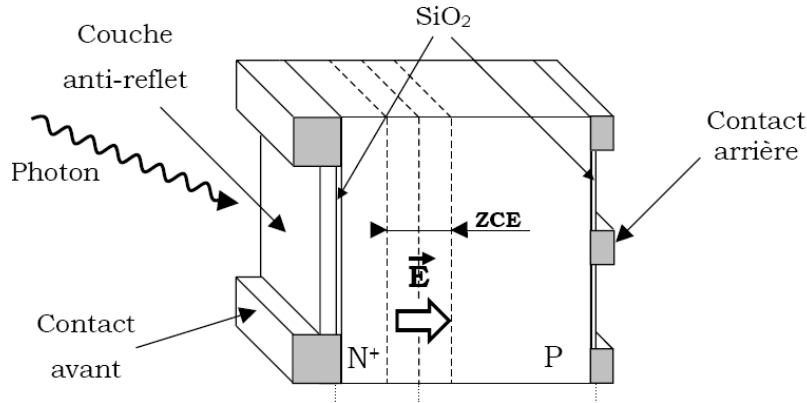
Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué:

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte de résistance électrique la plus faible possible [10].



**Figure.II.4.** Processus d'absorption de la lumière dans un matériau [11, 12].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons-trous créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n [2]. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré dans la figure (II.4).



**Figure.II.5.** Structure d'une cellule photovoltaïque, (“Photo watt”) [10].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n où p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont chassés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créés par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photo courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [1].

Sous éclairement la caractéristique  $I(V)$  de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées, il existe une région dans laquelle le produit  $V*I$  est négatif (figure II.5), la diode fournit de l'énergie. Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure (II.5) se ramène à la figure (II.6) [7].

Donc, le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée se transcrit:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (II.2)$$

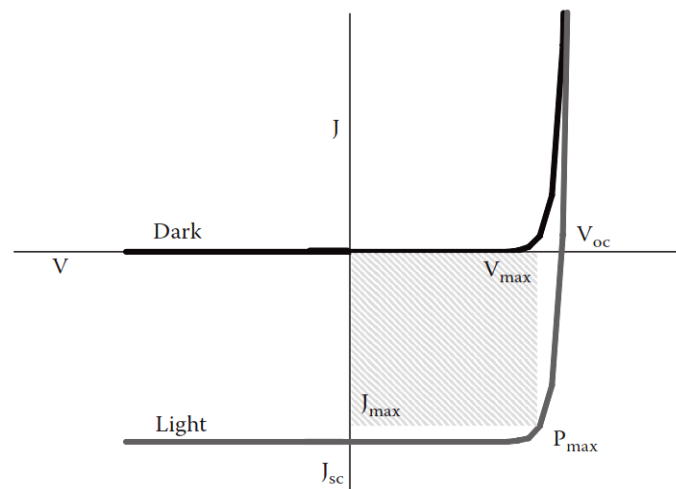
Avec  $I_{ph}$  : densité de courant photogénéré (le photocourant ou bien le courant d'éclairément) et  $I_{obs}$  : densité de courant d'obscurité (le courant direct qui résulte de la polarisation de la diode dans le sens passant par la tension V qui apparait aux bornes de la

résistance de charge [7]. Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (II.2) peut être écrite sous la forme suivante:

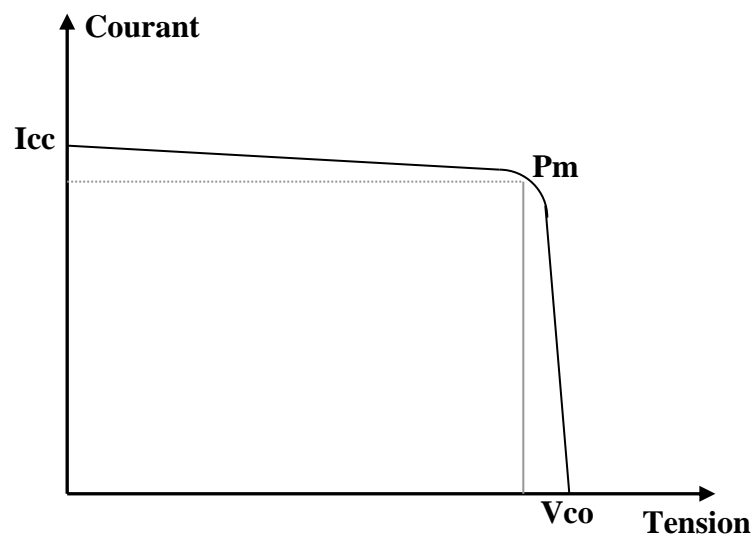
$$I(V) = I_{ph} - I_s (\exp(qV / kt) - 1) \quad (\text{II.3})$$

Avec  $I_s$ : courant de saturation de la diode,  $q$ : charge élémentaire,  $k$ : constante de Boltzmann,  $T$ : température.

La caractéristique d'une cellule en pleine obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée dans la figure (II.6).



**Figure.II.6.** Schéma de la densité de courant en fonction de tension pour une diode en obscurité et sous éclairement [13].



**Figure.II.7.** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [7].

A partir de la caractéristique I(V) (figure II.6) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment:

**I<sub>cc</sub>**: courant de court-circuit (obtenu pour V=0).

$$I_{cc} = I_{ph}$$

(II.4)

**V<sub>co</sub>**: tension en circuit ouvert (obtenu pour I=0).

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

(II.5)

**I<sub>m</sub>**: courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**V<sub>m</sub>**: tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**η**: rendement de conversion.

**FF**: facteur de forme.

Avec:

η= (Puissance électrique maximale fournie) / (puissance solaire incidente):

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S}$$

(II.6)

Avec **P<sub>i</sub>**: puissance d'éclairement reçue par unité de surface; **S**: surface de la cellule photovoltaïque.

FF= (puissance maximale délivrée sur la charge) / (V<sub>co</sub> \* I<sub>cc</sub>) [1,7]:

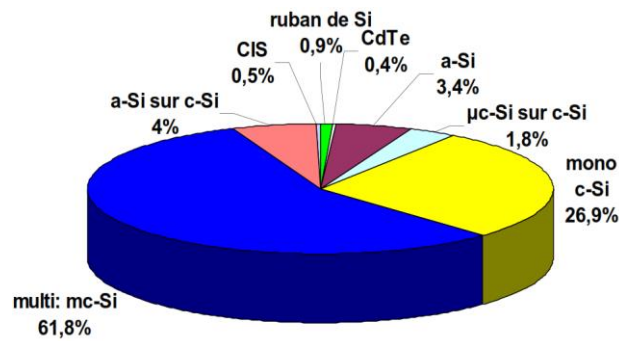
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$$

(II.7)

## II.6. Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques

Le secteur des cellules solaires photovoltaïques se développe le plus rapidement et sans conteste. Récemment, plus de 90% des cellules photovoltaïques sont encore à base de Silicium cristallin, qui est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel avec une durée de vie des modules PV plus de 25 ans [14]. Effectivement, le Silicium est l'un des éléments les plus Disponibles en abondance sur terre, non toxique et parfaitement stable. Actuellement et à l'avenir, d'autres matériaux, au stade préindustriel ou au niveau

de la recherche et même au niveau de la validation des concepts, viendront contribuer à la motivation et la stimulation de ce marché très prometteur [14].

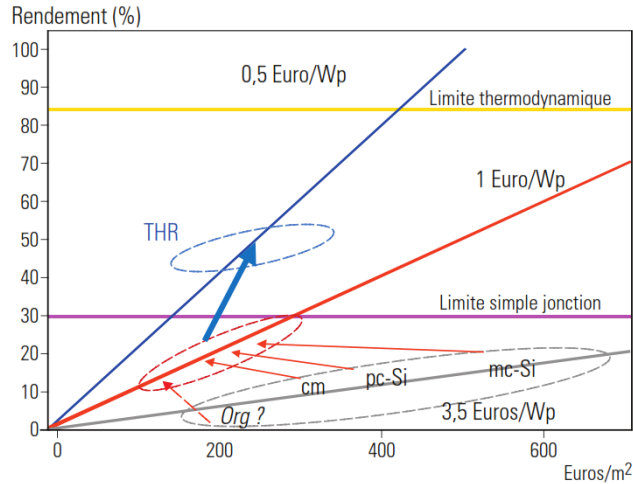


**Figure.II.8.** Illustration de la prépondérance des matériaux à base de silicium cristallin dans la production de cellules photovoltaïques [14].

La production industrielle mondiale de modules photovoltaïques est 20 fois plus importante qu'il y a 10 ans et a probablement dépassé les 2 GWc en 2006 [14]. Pourtant, malgré l'immense chemin parcouru, l'électricité solaire n'a pas encore franchi le seuil lui permettant d'être compétitive par rapport aux autres sources de production d'électricité [14]. Ceci nécessitera de nouvelles approches technologiques pour toutes les filières de la plus ancienne et la plus industrialisée comme le silicium cristallin, aux nouveaux matériaux en couches minces, afin de réduire les coûts de production tout en augmentant le rendement de conversion [14]. Récemment, la production de cellules à base de silicium massif multicristallin pour les applications terrestres (figure II.21), représente plus de 60% des ventes avec encore 27% en silicium monocristallin. Le silicium amorphe (a-Si) est tombé à près de 3% du marché et est dépassé par la montée en puissance des hétérojonctions à base de (a-Si) en couches minces sur silicium cristallin qui représentent 4% du marché [14-15].

Y a-t-il des limites à la réduction du coût de l'électricité photovoltaïque? En 2012, les modules ont été vendus 0,5-0,7 €/W et le coût de l'électricité solaire est d'environ 20 cts / kWh. À plus long terme, le développement de l'énergie photovoltaïque (PV) doit être basée sur une rupture technologique majeure en ce qui concerne l'utilisation de procédés et de matériaux à très faible coût, et / ou sur l'ingénierie des dispositifs offrant des performances bien plus élevées, la récolte de la plupart des énergies solaires disponibles. Deux approches sont ciblées sur cette question aujourd'hui: la première vise des matériaux et des processus à faible coût pour réduire le coût de la surface de dispositifs photovoltaïques, une partie de

l'efficacité de dispositif, peut-être sacrifiée et le second, visant l'efficacité maximale possible, au même coût que les modules d'aujourd'hui (voir la figure II.8). Il ya une différence majeure entre ces deux approches: les concepts de conversion, les matériaux et les procédés. [16].



**Figure.II.9.** Stratégies de réduction des coûts de l'électricité photovoltaïque (Relation du coût par watt de l'énergie solaire pour le coût de la surface de fabrication de dispositifs solaires (modules) et le rendement de la cellule (*Adapté de J.-F. Guillemoles*) [20].

La figure (II.8) illustre bien la stratégie globale des recherches sur le photovoltaïque, elle fait apparaître les différentes options et les perspectives à moyen et long termes. Ceux-ci résulteront à la fois d'un abaissement des coûts et d'une augmentation du rendement indiqués par les flèches pour les différentes filières.

Beaucoup de recherches ont été effectuées sur la technologie des cellules photovoltaïques pour améliorer le rendement et diminuer les couts. Pour augmenter les rendements, la tendance doit comporter des couches minces en tandem silicium amorphe, silicium microcristallin et aux cellules à multicouches associant des semi-conducteurs de sensibilités complémentaires. La figure (II.9) montre l'évolution des rendements record des filières photovoltaïques principales et actuelles (jusqu'en 2015). On y trouve les cellules au silicium monocristallin et poly-cristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), au tellure de cadmium (CdTe) mais, aussi les cellules à base de composés appelés III-V et leurs alliages, qui appartiennent à la catégorie des cellules à multijonction. À côté de ces filières bien établies, sont apparues de nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, qui n'en sont donc qu'à leurs balbutiements. Les filières Si, CIS et CdTe sont actuellement les seules utilisées de façon importante. Les chercheurs se focalisent particulièrement sur l'augmentation des

rendements. Le graphique de la figure (II.9) montre que toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis quarante ans. Il n’y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement, tel celui de 44,7 % récemment obtenu aux USA grâce à des cellules hélas trop complexes pour une utilisation commune. Mais, le challenge est là et il constitue une motivation essentielle de la recherche [11, 12,17]

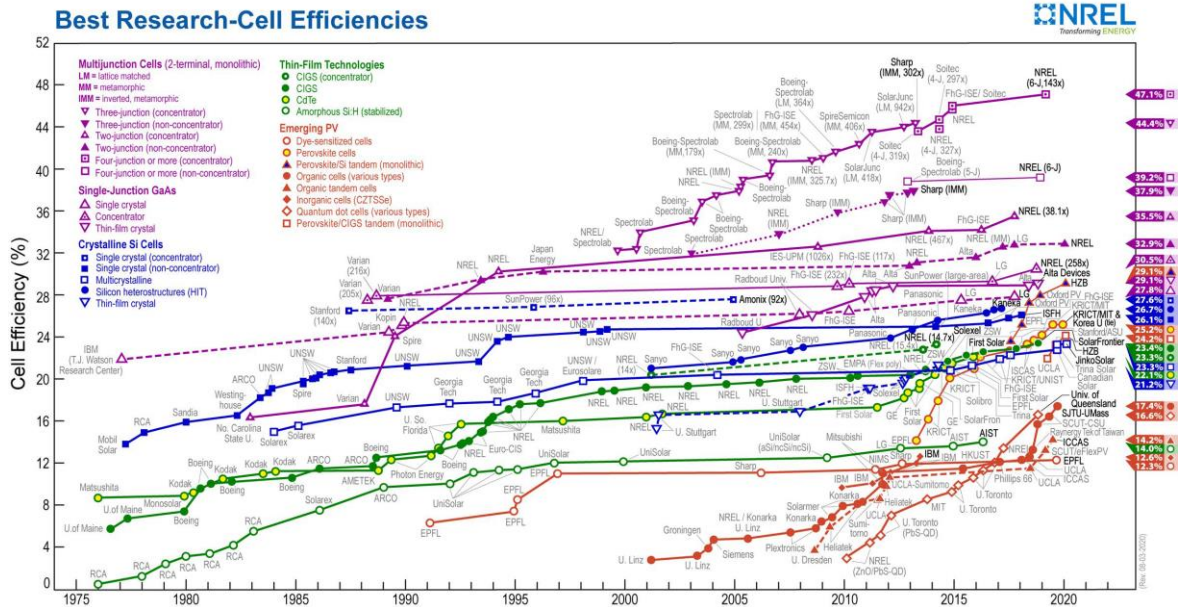


Figure.II.10. Le progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers dispositifs de recherche ou de laboratoire [NREL] [18].

D’après les littératures, on peut classifier les différentes structures et filières des cellules solaires selon la technologie d’élaboration et la génération sous les tableaux (II.5) et (II.6).

Tableau.II.1. Les différentes structures technologiques des cellules photovoltaïques disponibles dans les littératures [16, 19-20].

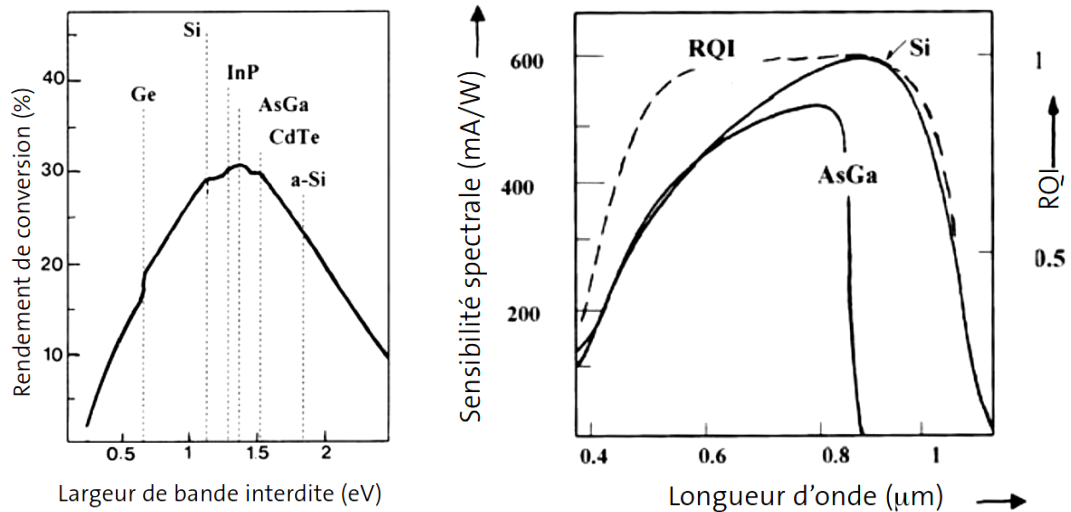
Les Structures des Cellules	
<u>Structure homojonction</u>	Un seul matériau à modifier de sorte qu'un côté est de type p et l'autre côté est le type n. Une jonction PN est située de telle sorte que la quantité maximale de la lumière soit absorbée près de lui.
<u>Structure hétérojonction</u>	La jonction est formée avec le contact entre deux semi-conducteurs différents. Couche supérieure - avec une bande interdite élevée (haute), sélectionnée

	pour sa transparence à la lumière. Couche inférieure - avec une faible largeur de bande interdite qui absorbe facilement la lumière.
<i>Structure p-i-n et n-i-p</i>	Un sandwich à trois couches est créé. Il contient une couche intrinsèque dans le milieu entre la couche de type n et la couche de type p. La lumière génère des électrons et des trous libres dans la région intrinsèque.

**Tableau.II.2.** Les différentes générations des cellules photovoltaïques [16, 19-20].

<b>Matériaux utilisés</b>	
<i>La première génération</i>	Les wafers de silicium monocristal (c -Si) ou bien multicristallin (mc-Si).
<i>La deuxième génération</i> Couches minces	Le silicium amorphe (a-Si). Le silicium microcristallin ( $\mu$ c-Si). Le tellure de cadmium (CdTe). Le Cuivre-gallium-indium-diséléniure (CIGS) et leurs alliages.
<i>La troisième génération</i>	Cellules solaires à base des nano-cristaux. Cellules solaires à base des concentrateurs (CPV). Cellules photo-électrochimiques (PEC) Cellules solaires organiques. Cellules solaires à base de colorant sensibilisé (Dye-sensitized) DSSC.
<i>La quatrième génération</i>	Hybride - cristaux inorganiques dans une matrice de polymère.

Du En raison de la condition quantique  $h\nu > E_g$ . Le choix des matériaux dépend surtout de la largeur de la bande interdite  $E_g$ . Plus  $E_g$  est faible, plus grand sera le nombre de photons utilisables, mais aussi plus faible sera la photo- tension. Les calculs montrent que les meilleurs rendements de conversion à terre  $\eta$ , définis comme le rapport de la puissance électrique fournie à un circuit extérieur à la puissance reçue du soleil par la cellule, seront obtenus si  $E_g$  est compris entre 1 et 1,7 eV, comme le montre la figure (II.11) [17].



**Figure.II.11.** La variation du rendement de conversion idéal pour une cellule en fonction de la largeur de bande interdite du matériau (à gauche) et les variations spectrales de la sensibilité d'une cellule solaire au (Si) ou à (GaAs) (à droite). *RQI* : le rendement quantique interne [17].

Il existe actuellement, deux grands familles et approches technologiques dans la réalisation des cellules solaires :

**La première** consiste à réaliser la cellule photovoltaïque avec un matériau monocristallin de haute qualité. Cette approche est dominée par les cellules solaires à base de silicium et de composés III-V, son objectif est d'augmenter le rendement et le couvre de l'ordre de 85% de la production mondiale [7, 21]. Le silicium n'est pas le mieux placé, mais d'autres considérations entrent en jeu et lui confèrent un intérêt primordial. En effet, un matériau destiné à la fabrication de cellules solaires doit être abondant, non toxique et peu coûteux, car beaucoup de matière est exigée (avec un rendement de conversion de 20 % et une puissance solaire de  $1 \text{ kW.m}^{-2}$ , il faudrait  $5 \text{ km}^2$  de cellules pour fournir 1 GW). Aussi il faudrait que les propriétés électriques des matériaux (longueur de diffusion et durée de vie des porteurs minoritaires) soient les meilleurs possibles pour que des cellules très performantes ( $\eta > 20 \%$ ) puissent être obtenues. Pour cela, la densité de dislocation doit être inférieure à  $100 \text{ cm}^{-2}$  dans un monocristal, et les concentrations en impuretés indésirables (métaux de transition) doivent être inférieures à  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

Seul le silicium peut satisfaire de telles exigences, d'autant plus qu'il bénéficie des progrès de l'industrie de la microélectronique. Le rendement théorique maximal pour les cellules au silicium est de 28%. On distingue les types de silicium suivant :

La technologie monocristalline est coûteuse car elle nécessite des barres de silicium pur. Son rendement est le plus élevé (14-16%), ce qui a l'avantage de réduire la taille des

modules. Dans la pratique, les cellules monocristallines permettent d'obtenir un rendement de l'ordre de 15% à 22%. Ces cellules présentent néanmoins deux inconvénients: d'une part leur prix élevé, d'autre part une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée [1]. La technologie multi-cristalline est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite deux à trois fois d'énergie que la technologie monocristalline. Son rendement est un peu moindre car étant de l'ordre de (10 à 15%) mais son coût est plus avantageux, chose qui permet à cette technologie de dominer actuellement le marché. De l'autre côté, la technique du silicium en ruban (EFG) permet de s'affranchir des lingots et de la perte de silicium lors de la découpe. Il s'agit de cristalliser du silicium fondu (quelques dizaines de micromètres) sur un ruban souple. La consommation de silicium est divisée par deux. Une solution, EFG (Edge defined film Fed Growth) est testée depuis longue date et industrialisée par certains fabricants.

Le silicium amorphe (a-Si) est un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin (5-7%), le silicium amorphe présente trois avantages: un fort coefficient d'absorption ce qui autorise de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron, une faible consommation énergétique durant le cycle de production avec un temps de retour énergétique inférieur à un an et une aptitude à être déposé en grandes surfaces de l'ordre du mètre carré (m<sup>2</sup>). Par contre, ses deux points faibles sont le rendement de conversion et la dégradation sous lumière [1, 14]. Le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance comme les calculatrices, par exemple, mais des firmes comme Solarex, Phototronix, Canon ou Fortum proposent des modules de taille équivalente à celle des modules cristallins. De son côté, Sanyo a mis au point une technologie de silicium amorphe sur une couche de silicium monocristallin (technologie HIT) dont les rendements sont supérieurs à celui du silicium monocristallin (rendement de l'ordre de 19%).

Pour le silicium poly cristallin (Poly- c-Si) ou micro cristallin ( $\mu$ c-Si) : il s'agit de déposer une couche mince (de l'ordre de 10  $\mu$ m) sur un substrat de verre ou de céramique. Cette technologie, essentiellement développée par la société américaine *Astropower* (USA), est encore à l'étape de production pilote.

Bien sûr, des tolérances en défauts et impuretés peuvent toujours être admises si on peut se contenter de rendements de conversion moyenne ( $\eta \sim 16\%$ ). Ce sera le cas du silicium poly-cristallin à gros grains (> quelques mm<sup>2</sup>), appelé aussi multicristallin (mc-Si). Il semble alors possible d'admettre des concentrations en impuretés métalliques de l'ordre de  $10^{14}\text{cm}^{-3}$  [17]

Compte tenu des caractéristiques du silicium (gap indirect à la valeur optimum, les cellules au silicium ne sont pas les plus performantes. Toutefois, en raison de leur coût, elles demeurent compétitives, au moins, dans les applications terrestres [1].

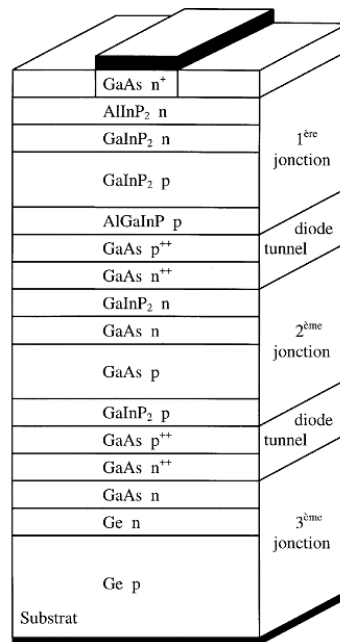
Les matériaux semi-conducteurs de type *III-V* sont utilisés comme des matériaux primordiales dans l'élaboration de cellules solaires photovoltaïques de haut rendement et efficacité, soit dans la technologie des couches mince (Thin film) ou bien dans la technologie des cellules PV en mono ou multijonctions. L'objectif des cellules multicolores (multijonctions) à base des composés *III-V*, est la réduction des deux principales causes de baisse de rendement des cellules monojonction, les pertes résultant de la non absorption des photons d'énergie  $h\nu < E_g$  et les pertes thermiques associées à la thermalisation des photo- porteurs chauds créés par les photons d'énergie  $h\nu > E_g$  [7].

Dans cette optique, les semi-conducteurs *III-V* tels que le GaAs et l'InP, ainsi que leurs alliages, sont potentiellement plus performants que le silicium pour deux raisons évidentes, leur gap est direct et sa valeur est voisine de la valeur optimale. Le principal obstacle dans les applications terrestres reste leur coût, mais leur domaine de prédilection est incontestablement le domaine spatial où le marché est moins sensible au coût qu'aux performances. Les figures de mérite primordiales sont d'une part le rapport puissance/poids et d'autre part la résistance aux rayonnements cosmiques. À cause de leurs propriétés, les composés *III-V* résistent mieux que le silicium aux rayonnements cosmiques et aux températures de fonctionnement en orbite ( $\sim 50$  °c) [7].

Le concept des cellules photovoltaïques multicolores est simple : plusieurs cellules (matériaux) avec des gaps différents sont empilées de manière à ce que le flux lumineux incident interagisse séquentiellement avec les cellules de gaps décroissants (voir la figure II.12).

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 gaps plus petits. Ces dernières, à leur tour, absorbent alors et convertissent les photons les plus bas en énergie. Les pertes par thermalisation sont ainsi minimisées car chaque cellule convertit des photons d'énergie  $h\nu \sim E_g$ . 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. Le deuxième paramètre à maîtriser est l'accord des photocourants. En effet, alors

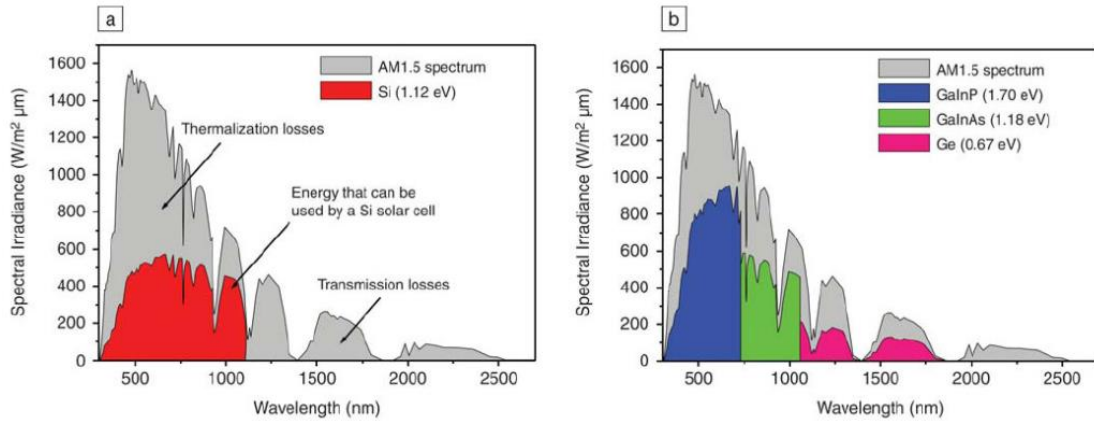
que les tensions de circuit ouvert  $V_{co}$  s'ajoutent, les courants de court-circuit  $I_{cc}$  doivent être ajustés car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbent ni trop ni peu de rayonnement. En effet dans le premier cas les courants débités par les cellules inférieures sont trop faibles, dans le deuxième cas ce sont les courants débités par les cellules supérieures qui le sont [7].



**Figure.II.12.** Structure d'une cellule photovoltaïque multijonction épitaxiale de type GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge [7].

La figure (II.12) représente la structure d'une cellule tricolore multijonction en accord de maille sur un substrat de germanium (à gauche) et l'échantillonnage que cette structure opère dans le spectre solaire (à droite). Le rendement maximal théorique de ce type de cellule est de 35%.

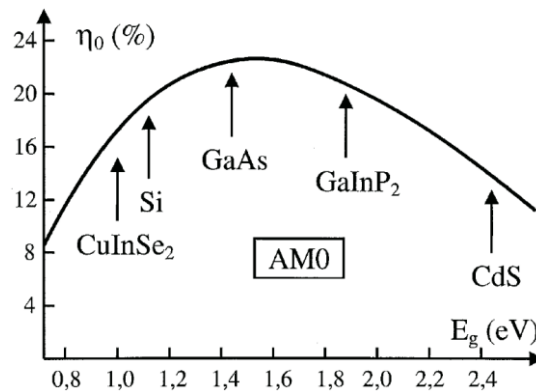
À titre de comparaison, les meilleures cellules au silicium monocristallin ont un rendement de 17 % en BOL et 12 % en EOL, de leurs côtés les cellules unijonction GaAs, bijonction GaInP<sub>2</sub>/GaAs et trijonction GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge ont respectivement des rendements de 19, 21,6 et 23 % en BOL et 16, 18 et 20 % en EOL. Des cellules bicolors GaInP<sub>2</sub>/GaAs ont été réalisées avec  $V_{co} \sim 2,4$  V,  $I_{cc} \sim 14$  mA/cm<sup>2</sup>, FF  $\sim 89$  % et un rendement de l'ordre de 29 % (figure II.22). Enfin et toujours à titre de comparaison, avec des panneaux classiques de 70 m<sup>2</sup> les cellules à base de GaAs débitent 15 kW en EOL alors que les mêmes panneaux à cellules silicium ne débitent que 6 kW [7].



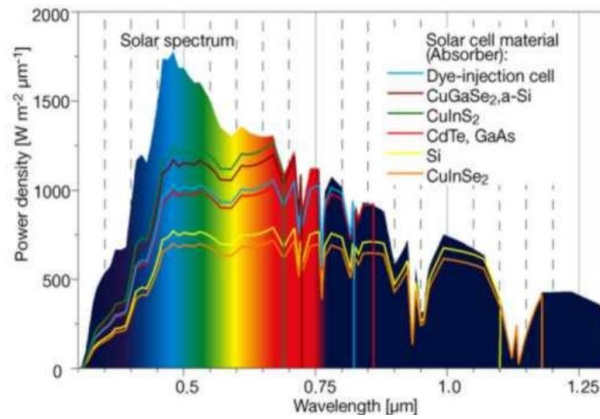
**Figure. II.13.** Le spectre solaire (1.5 AM) et les parties du spectre qu'on peut exploiter par des cellules solaires à base de : (a) Si ; (b) :  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  [22, 23]

**La seconde approche** technologique dans la réalisation des cellules solaires, consiste à réaliser la cellule en couches minces, généralement amorphes ou poly-cristallines, déposées sur un substrat peu coûteux comme le verre ou une feuille métallique. Leurs principaux intérêts résident, d'une part, dans leur stabilité et d'autre part, dans la possibilité de réaliser des cellules de grande surface sensible (jusqu'à  $0,5\text{m}^2$ ). En outre, une grande variété de technique de dépôt étant disponible, il est possible d'optimiser le coût de fabrication [7].

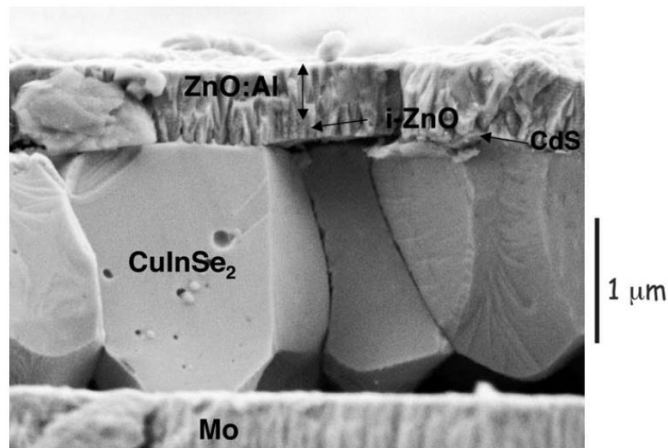
Les matériaux les plus utilisés dans cette approche sont le silicium amorphe, poly-cristallin ou microcristallin, tellure de cadmium, l'arséniure de gallium et les semi-conducteurs II-VI et surtout les composés *chalcopyrites* de type  $I\text{-III-VI}_2$  tel que  $\text{CuInS}_2$  et  $\text{CuInSe}_2$ . Ce dernier a, en particulier, un coefficient d'absorption parmi les plus importants de tous les semi-conducteurs ( $\sim 10^5\text{ cm}^{-1}$ ). De ce fait, on peut réaliser des zones actives très minces ce qui rend moins critique la longueur de diffusion des photoporteurs. La valeur du gap de  $\text{CuInSe}_2$  (1.02 eV) est toutefois assez éloignée de la valeur optimale (figure II.14). Elle est augmentée en utilisant l'alliage quaternaire  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  [7].



**Figure.II.14.** Le rendement concernant divers cellules solaires à base de semi-conducteurs [7].



**Figure.II.15.** La sensibilité de différents types de cellules solaires (à droite) [4, 24].



**Figure.II.16.** Vue en coupe transverse au microscope électronique à balayage d'une cellule à base de CuInSe électrodéposé, élaborée à l'IRDEP [17].

Les principales filières couches minces sont le silicium amorphe utilisé, depuis de longues années, dans les montres et calculatrices, notamment le CdTe (hétérojonction tellurure de cadmium, sulfure de cadmium) et le CIS (hétérojonction de diséléniure cuivre indium/sulfure de cadmium). La fabrication se réalise en automatique, avec tunnels pour dépôts de couches et à l'aide de laser pour les connexions. Elle est adaptée aux grosses productions. Ces premières technologies ouvrent actuellement d'autres voies, sans que l'on sache laquelle dominera.

Le tellurure de cadmium (CdTe) : ou encore appelé hétérojonction cadmium telluride-sulfure de cadmium : composé poly-cristalline déposé sur substrat de verre. Les premières cellules ont été développées en 1972. Il y a quelques années, cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais les problèmes de coût et de toxicité posés par le cadmium ont pesé lourdement sur son développement. De son côté, le diséléniure cuivre indium (CIS ou CIGS) est un matériau composé de diséléniure cuivre indium combinés avec du sulfure de cadmium.

Cette technologie de couches minces permettant d'atteindre des épaisseurs inférieures au micromètre, est présente aujourd'hui dans de nombreux projets industriels. Alors que l'arséniure de gallium (GaAs) est un matériau monocristallin combiné avec différents matériaux. Les cellules photovoltaïques en couches minces qui intègrent cette technologie sont caractérisées par un haut rendement mais leur cout étant encore très élevé, leur utilisation reste cantonnée à des applications très spécifiques comme le domaine spatial.

En plus, d'autres technologies sont en cours d'expérimentation comme les cellules organiques, les cellules à colorant et les cellules à concentrateurs (cellule PV photonique).

Les cellules à colorant inventées en 1991 par le chimiste suisse Michael Graetzel sont composées d'une poudre de cristaux à base de dioxyde de titane  $TiO_2$  associée à un électrolyte et à un colorant qui absorbe la lumière. Cette technologie en est encore au stade expérimental. Le rendement est moyen et la stabilité à long terme est mauvaise, mais sa fabrication est en théorie plus facile que les autres cellules, de plus que la matière première est bon marché. Toutefois, les cellules organiques sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques. Un semi-conducteur organique se présente sous la forme d'un cristal ou d'un polymère dont les caractéristiques principales sont la conduction par les électrons et les trous. Les molécules servant à la conception de ces semi-conducteurs sont composés de carbone.

Plusieurs raisons justifient l'utilisation des matériaux organiques pour la fabrication des cellules photovoltaïques. La plus importante se trouve dans les avantages particuliers de ces matériaux : ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche (évaporation sous vide) ou par voie humide (Tournette, jet d'encre), avec des techniques simples, issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisés sont relativement petites, les films ayant des épaisseurs de l'ordre de 100 nm. Enfin l'ingénierie moléculaire permet d'adapter les valeurs du *gap*. C'est pour cela que les recherches dans ce domaine sont très actives à travers le monde ; mais des problèmes restent à résoudre et ce type de cellule n'est pas encore commercialisé [17].

Les tableaux (II.7), (II.8), (II.9) et (II.10) basés sur les études et publications du *Martin A. Green et al* [25], illustrent et résumant les rendements enregistrés et confirmés des cellules solaires terrestres et spatiales, modules et sous-modules mesurées sous le spectre de référence d'AM1.5 ( $1000 \text{ W/m}^2$  à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Tableau.II.3.** Les rendements confirmés des cellules solaires terrestres et sous-module mesurée sous le spectre mondial d'AM1.5 ( $1000 \text{ W/m}^2$  à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [25].

Classification	Efficiency (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill factor (%)	Test Centre (date)
<b>Silicon</b>						
Si (crystalline cell)	26.7 ± 0.5	79.0 (da)	0.738	42.65 <sup>a</sup>	84.9	AIST (3/17)
Si (DS wafer cell)	23.8 ± 0.3	246.44 (t)	0.7087	40.88 <sup>b</sup>	82.2	ISFH (12/19)
Si (thin transfer submodule)	21.2 ± 0.4	239.7 (ap)	0.687 <sup>c</sup>	38.50 <sup>c,d</sup>	80.3	NREL (4/14)
Si (thin-film minimodule)	10.5 ± 0.3	94.0 (ap)	0.492 <sup>c</sup>	29.7 <sup>c,e</sup>	72.1	FhG-ISE (8/07)
<b>III–V cells</b>						
GaAs (thin film cell)	29.1 ± 0.6	0.998 (ap)	1.1272	29.78 <sup>f</sup>	86.7	FhG-ISE (10/18)
GaAs (multicrystalline)	18.4 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.2	79.7	NREL (11/95)
InP (crystalline cell)	24.2 ± 0.5 <sup>g</sup>	1.008 (ap)	0.939	31.15 <sup>a</sup>	82.6	NREL (3/13)
<b>Thin-film chalcogenide</b>						
CIGS (cell) (cd free)	23.35 ± 0.5	1.043 (da)	0.734	39.58 <sup>h</sup>	80.4	AIST (11/18)
CdTe (cell)	21.0 ± 0.4	1.0623 (ap)	0.8759	30.25 <sup>d</sup>	79.4	Newport (8/14)
CZTSSe (cell)	11.3 ± 0.3	1.1761 (da)	0.5333	33.57 <sup>f</sup>	63.0	Newport (10/18)
CZTS (cell)	10.0 ± 0.2	1.113 (da)	0.7083	21.77 <sup>a</sup>	65.1	NREL (3/17)
<b>Amorphous/microcrystalline</b>						
Si (amorphous cell)	10.2 ± 0.3 <sup>i,g</sup>	1.001 (da)	0.896	16.36 <sup>d</sup>	69.8	AIST (7/14)
Si (microcrystalline cell)	11.9 ± 0.3 <sup>g</sup>	1.044 (da)	0.550	29.72 <sup>a</sup>	75.0	AIST (2/17)
<b>Perovskite</b>						
Perovskite (cell)	21.6 ± 0.6 <sup>j,k</sup>	1.0235 (da)	1.193	21.64 <sup>l</sup>	83.6	CSIRO (6/19)
Perovskite (minimodule)	18.0 ± 0.6 <sup>j,m</sup>	19.276 (da)	1.070 <sup>c</sup>	21.53 <sup>c,b,n</sup>	78.4	Newport (12/19)
<b>Dye sensitised</b>						
Dye (cell)	11.9 ± 0.4 <sup>o</sup>	1.005 (da)	0.744	22.47 <sup>p</sup>	71.2	AIST (9/12)
Dye (minimodule)	10.7 ± 0.4 <sup>o</sup>	26.55 (da)	0.754 <sup>c</sup>	20.19 <sup>c,q</sup>	69.9	AIST (2/15)
Dye (submodule)	8.8 ± 0.3 <sup>o</sup>	398.8 (da)	0.697 <sup>c</sup>	18.42 <sup>c,r</sup>	68.7	AIST (9/12)

## Organic

Organic (cell)	13.45 ± 0.2 <sup>s</sup>	1.023 (da)	0.8422	23.28 <sup>l</sup>	68.6	FhG-ISE (6/19)
Organic (minimodule)	12.6 ± 0.2 <sup>s</sup>	26.129(da)	0.8315 <sup>c</sup>	21.32 <sup>c,l</sup>	71.1	FhG-ISE (9/19)
Organic (submodule)	11.7 ± 0.2 <sup>s</sup>	203.98 (da)	0.8177 <sup>c</sup>	20.68 <sup>c,l</sup>	69.3	FhG-ISE (10/19)

**Tableau.II.4.** Top 10 des rendements confirmés des cellules et modules solaires mesurés sous le spectre AM1.5 (1000 W/m<sup>2</sup> à 25 °C) [25].

Classification	Efficiency (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill factor (%)	Test Centre (date)
<b>Cells (silicium)</b>						
Si (crystalline)	26.0 ± 0.5 <sup>a</sup>	4.015 (da)	0.7323	42.05 <sup>b</sup>	82.3	FhG-ISE (11/19)
Si (crystalline)	25.8 ± 0.5 <sup>a</sup>	4.008 (da)	0.7241	42.87 <sup>c</sup>	83.1	FhG-ISE (7/17)
Si (crystalline)	26.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	3.9857 (da)	0.7266	42.62 <sup>d</sup>	84.3	ISFH (2/18)
Si (large crystalline)	25.1 ± 0.4	244.45 (t)	0.7470	39.55 <sup>b</sup>	85.0	ISFH (9/19)
Si (large crystalline)	26.6 ± 0.5	179.74 (da)	0.7403	42.5 <sup>e</sup>	84.7	FhG-ISE (11/16)
Si (DS wafer)	22.8 ± 0.3	246.7 (t)	0.6871	40.90 <sup>b</sup>	81.2	ISFH (9/19)
<b>Cells (III–V)</b>						
GaInP	22.0 ± 0.3 <sup>a</sup>	0.2502 (ap)	1.4695	16.63 <sup>f</sup>	90.2	NREL (1/19)
<b>Cells (chalcogenide)</b>						
CdTe (thin film)	22.1 ± 0.5	0.4798 (da)	0.8872	31.69 <sup>g</sup>	78.5	Newport (11/15)
CZTSSe (thin film)	12.6 ± 0.3	0.4209 (ap)	0.5134	35.21 <sup>h</sup>	69.8	Newport (7/13)
CZTS (thin film)	11.0 ± 0.2	0.2339(da)	0.7306	21.74 <sup>e</sup>	69.3	NREL (3/17)
<b>Cells (other)</b>						
Perovskite (thin film)	25.2 ± 0.8 <sup>ij</sup>	0.0937 (ap)	1.1805	25.14 <sup>b</sup>	84.8	Newport (7/19)
Organic (thin film)	17.35 ± 0.2 <sup>k</sup>	0.032 (da)	0.862	25.83 <sup>b</sup>	78.0	NREL (10/19)
Dye sensitised	12.25 ± 0.4 <sup>lj</sup>	0.0963 (ap)	1.0203	15.17 <sup>b</sup>	79.1	Newport (8/19)

**Tableau.II.5.** Les rendements des cellules concentrateurs et des modules terrestres mesurés sous le faisceau direct du spectre AM 1,5 à 25 °C [25].

Classification	Effic. (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	FF (%)	Test Centre (date)
Si (crystalline)	24.4 ± 0.5	13 177 (da)	79.5	5.04 <sup>a</sup>	80.1	AIST (9/16)
Si (multicrystalline)	20.4 ± 0.3	14 818 (ap)	39.90	9.833 <sup>b</sup>	77.2	FhG-ISE (10/19)
GaAs (thin film)	25.1 ± 0.8	866.45 (ap)	11.08	2.303 <sup>c</sup>	85.3	FhG-ISE (11/17)
CIGS (Cd free)	19.2 ± 0.5	841 (ap)	48.0	0.456 <sup>c</sup>	73.7	AIST (1/17)
CdTe (thin film)	19.0 ± 0.9	23 573 (da)	227.8	2.560 <sup>b</sup>	76.6	FhG-ISE (9/19)
a-Si/nc-Si (tandem)	12.3 ± 0.3 <sup>d</sup>	14 322 (t)	280.1	0.902 <sup>e</sup>	69.9	ESTI (9/14)
Perovskite	17.9 ± 0.5 <sup>f</sup>	804 (da)	58.7	0.323 <sup>g</sup>	70.3	AIST (1/20)
Organic	8.7 ± 0.3 <sup>h</sup>	802 (da)	17.47	0.569 <sup>i</sup>	70.4	AIST (5/14)
<b>Multijunction</b>						
InGaP/GaAs/InGaAs	31.2 ± 1.2	968 (da)	23.95	1.506	83.6	AIST (2/16)
Notable exception						
CIGS (large)	18.6 ± 0.6	10 858 (ap)	58.00	4.545 <sup>b</sup>	76.8	FhG-ISE (10/19)

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques notions sur les cellules solaires et les différents matériaux et technologies utilisés dans ce domaine tels que les cellules solaires à base des semi-conducteurs *III-V*, *II-VI* et leurs alliages et dérivés ainsi que les chalcopyrites qui sont prometteuses dans ce sens. Les avancements des travaux de recherche permettent d'améliorer, d'année en année, les technologies existantes, par exemple : la réduction de l'épaisseur de la coupe des lingots de silicium, l'amélioration du rendement d'un lingot par traitement de surface, la technologie CIS avec des matériaux moins nobles et la technologie des nouveaux semi-conducteurs (les cellules à deux, trois et N jonctions, les systèmes à concentration).

## II.8. Références

- [1] S. R. Wenham and M. A. Green « Silicon Solar Cells », John Wiley & Sons, Ltd, 1062-7995/96/010003, (1995).
- [2] Nichiporuk Oleksiy «Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigitées», Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2005).
- [3] Zekia Sen, Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems- Vol. II- Solar Irradiation fundamentals, © Encyclopedia of Life support Systems. [5] Antonio Luque et Steven Hegedus, 'Handbook of Photovoltaic Science and Engineering', (Livre), John Wiley & Sons Ltd, (2003).
- [4] D Dimova-Malinovska, Journal of Physics: Conference Series 253 (2010) 012007, IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/253/1/012007.
- [5] Jha, A. R, 'Solar cell technology and applications', (Livre), Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [6] Bernard. Equer, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Vol I, Ellipses, (1993).
- [7] Henry Mathieu «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, cours», (livre), 5<sup>ème</sup> édition, Dunod, (2001).
- [8] Peter Würfel, Physics of Solar Cells, From Principles to New Concepts, (livre), Wiley-VCH, (2005).
- [9] Anne Labouret et Michel Viloz, 'Energie solaire photovoltaïque', (Livre), 2eme édition, DUNOD, (2005).
- [10] Bruno Thuillier «Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisées à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin» Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2001).
- [11] Daniel Lincot, 'Les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat', EDP Sciences, (2011), ISBN : 978-2-7598-0642-3, p. 127.
- [12] Daniel Lincot, 'La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire', découverte n° 344 - 345 janvier - février (2007).
- [13] Loucas Tsakalakos, 'Nanotechnology for photovoltaics', (Livre), Taylor and Francis Group, LLC, (2010).
- [14] Jean-Claude Muller, Energie et développement durable, 14-15 Mars (2007), JEEA 2007 ENS Cachan-antenne de Bretagne.
- [15] Thomas Surek, NERL, Journal of Crystal Growth 275 (2005) 292–304.
- [16] Gavin Conibeer et Arthur Willoughby, 'Solar Cell Materials-Developing Technologies', (Livre), John Wiley & Sons, Ltd, (2014).

- [17] Bernard Equer, Charles de Novion et Michèle Leduc, ‘‘Un «dossier photovoltaïque » dans Reflets de la physique’’, (2007).
- [18] (NREL) [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).
- [19] Xiaodong Wang et Zhiming M. Wang, ‘‘ High-Efficiency Solar Cells-Physics, Materials, and Devices ‘’, Springer International Publishing Switzerland, (2014).
- [20] G. Gourdin, ‘‘ Solar cell technologie – current state of the art’’, (2007).
- [21] R.W. Miles, K.M. Hynes, II. Forbes, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 51 (2005) 1- 42, doi:10.1016/j.pcrysgrow.2005.10.002.
- [22] Natalya V. Yastrebova, ‘‘High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential’’, Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, April (2007).
- [23] J. M. Román, State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications, Advanced Photovoltaic Cell Design, (2004).
- [24] Thekaekra M P, *Suppl. Proc. 20<sup>th</sup> Ann. Meet. Inst. Environ. ScII. pp. 21-30*, (1974).
- [25] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2020); 28:629–638.

# Chapitre III

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va proposer, étudier et simuler deux structures (cellules photovoltaïques) afin de traiter l'inconvénient des cellules PVs monojonction à base de Silicium. Donc, on va constater l'effet des différents paramètres de chaque couche sur les performances de la cellule et de les optimisés afin d'avoir un rendement de conversion optimal en utilisant l'outil de simulation WxAMPS-1D. Ce logiciel utilise l'équation de poisson, l'équation de continuité pour trou libres et l'équation de continuité d'électrons libres, par conséquent, les résultats de la caractéristique de transport sont le fruit des solutions et de ses équations, se qui impose qu'il y a une marge de calcul a respecté pour que ce logiciel ne s'arrête pas. Voici, donc, les résultats obtenues détaillés dans les pages qui suivantes.

### III.2. L'outil de simulation WxAMPS-1D

Le terme **AMPS-1D** est une abréviation de la phrase anglaise: *Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional* (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques) [1,2]. Ce package a été développé en 1997 par une équipe dirigée par le Professeur *Stephen Fonashet* (l'université de Pennsylvania - USA) sous plusieurs versions en UNIX ou bien sous Windows. Pour nous, on a choisi d'utilisé la deuxième version de (2012) sous Windows 7 [3,4]. L'AMPS-1D est un outil de simulation unidimensionnel utilisé pour simuler la physique du transport dans les dispositifs à l'état solide d'une manière très simple et très souple [1]. Il est élaboré pour analyser et optimiser des structures destinées pour des applications technologiques en microélectronique ou optoélectronique et notamment en photovoltaïques [5,6]. Récemment, il est largement utilisé pour l'analyse et la modélisation des cellules photovoltaïques en couches minces [3].



**Figure.III.1.** L'icône exécutable d'AMPS-1D.

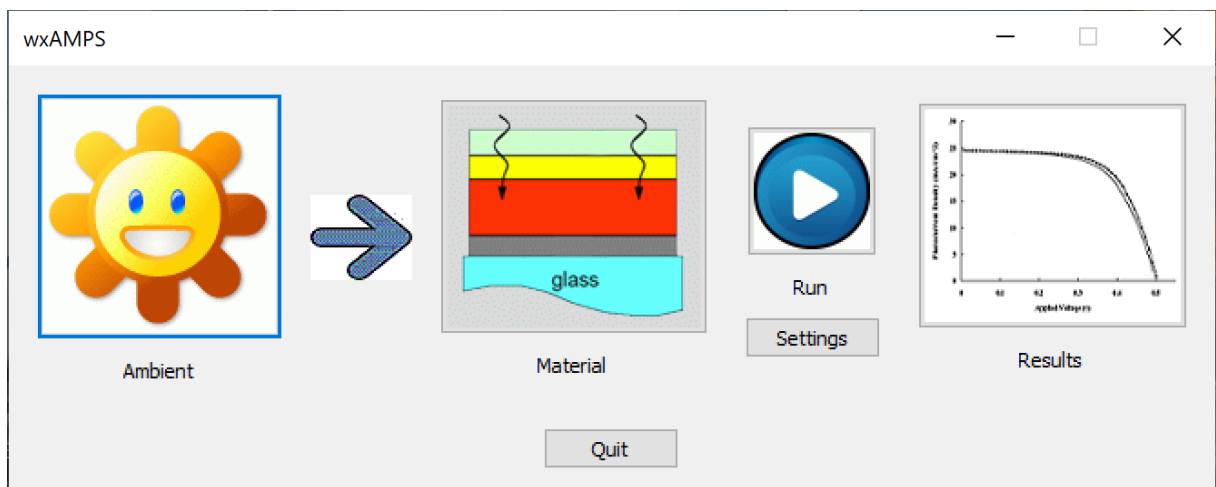
### III.2.2. Les caractéristiques d'AMPS-1D

L'AMPS-1D utilise les propriétés électroniques et optiques du matériau (gap d'énergie, l'affinité électronique, le dopage et les mobilités,... etc) à la conception des structures contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température [3]. C'est ta-dire, l'AMPS-1D permet d'obtenir la réponse de la cellule à une tel situation donnée, par exemple à la polarisation par la lumière, par la tension électrique ou dans le changement de la température [1]. Et l'exploration des changements que subissent les paramètres internes du dispositif tels que le diagramme de bande, la composante du courant, le taux de recombinaison et le champ électrique en fonction de la position, de l'intensité lumineuse, de la tension électrique et de la température [3]. Les caractéristiques électriques qu'il peut générer sont :

- Les caractéristiques ( $J-V$ ) sous illumination et sans éclairage.
- Le rendement quantique (Quantum efficiency ( $QE$ )) pour des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et lumière.

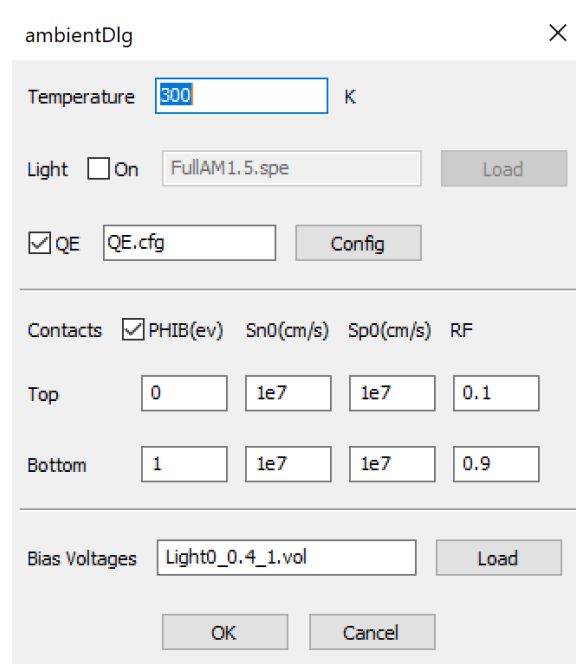
L'interface de l'AMPS-1D (Figure III.2) est constituée de trois boîtes de dialogue. Chacune donne les paramètres nécessaires avant le lancement de la simulation par l'AMPS-1D. Les trois boîtes de dialogues donnent [3] :

- Les conditions environnementales.
- Les propriétés du matériau de chaque couche.
- Les paramètres de modélisation: le type du modèle, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, les tensions de polarisation pour lesquelles la sortie ( $J-V$ ) et ( $QE$ ) doit être générée [3,4].



**Figure.III.2.** Page d'accueil de l'interface d'AMPS-1D.

L'interface des conditions environnementales dans le l'AMPS-1D est illustrée sous la figure (III.3). Donc pour étudier l'effet de la température et/ou l'éclairage sur les performances de la cellule solaire on peut les varier a partir cette interface. Dans la figure (III.4) on a présenté l'interface des propriétés optoélectroniques du matériau pour chaque couche constituée la structure à simulée comme les propriétés électroniques, les propriétés optiques et les défauts. Donc, après le choix du modèle de la cellule solaire qu'on veut la simuler, on peut étudier l'effet de l'épaisseur et le dopage de chaque couche sur les paramètres électriques de la cellule PV afin d'obtenir un rendement optimal.



**Figure.III.3.** L'interface des conditions environnementales et des paramètres d'entrés et de convergence.

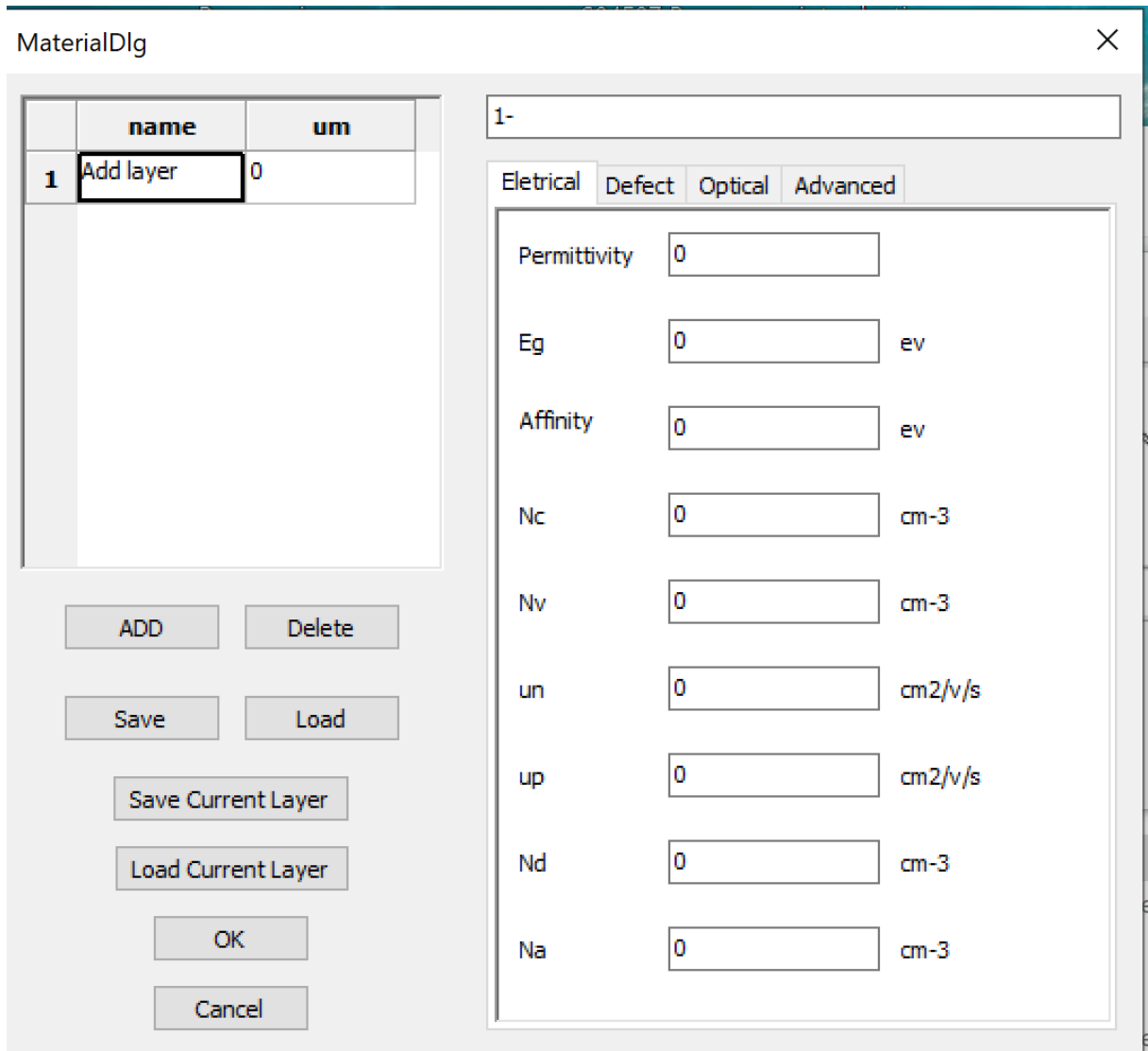
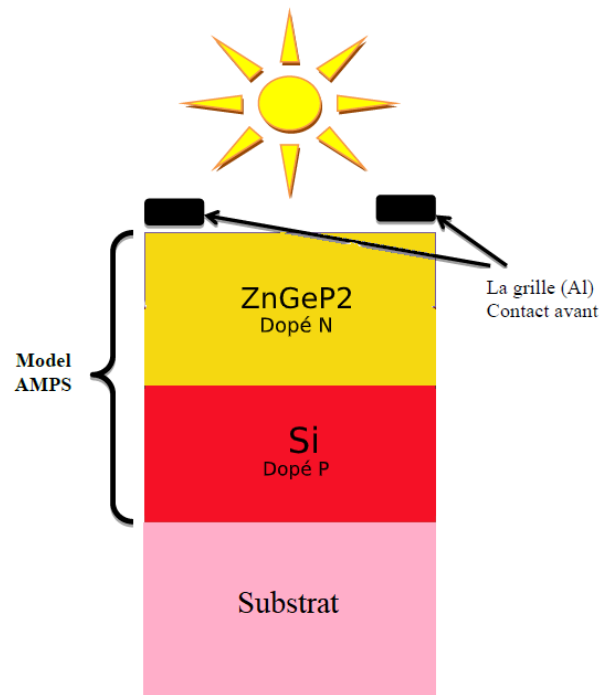


Figure.III.4. L'interface des propriétés physiques du matériau.

### III.3. Les structures (cellules PVs) proposées

#### III.3.1. La première structure proposée

Premièrement, nous avons choisi une cellule PV composée d'une couche d'un matériau chalcopyrite avec une large absorption optique du spectre solaire ( $\text{ZnGeP}_2$ ) associée avec une couche de Silicium (figure III .5), cette structure représente une monojonction à hétéro-structure (n- $\text{ZnGeP}_2$  /p-Si ).



**Figure.III.5.** La structure de la première cellule simulée.

### III.3.2. La deuxième structure proposée

La deuxième structure à proposer, est une cellule tandem (multijonction) consiste à empiler deux cellules simples ( $n\text{-ZnGeP}_2 / p\text{-ZnGeP}_2 + (n\text{-Si} / p\text{-Si})$ ) voir la figure (III.6). Son principe de fonctionnement a été bien rapporté dans le deuxième chapitre du mémoire.

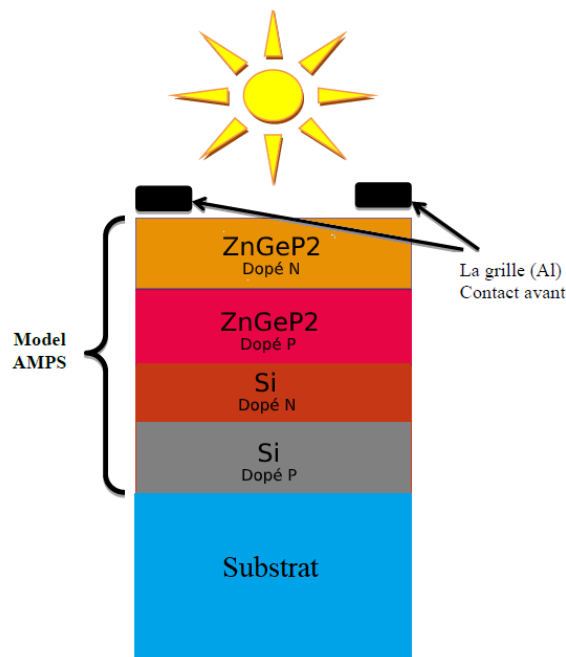


Figure.III.6. La deuxième structure à étudier.

### III.4. l’optimisation des différentes couches des structures

#### III.4. 1. Effet de l’épaisseur de chaque couche sur le rendement de la 1<sup>er</sup> structure (ZnGeP<sub>2</sub> / Si)

Dans cette partie, on va optimiser les épaisseurs pour chaque couche de la cellule proposée afin d’obtenir un rendement de conversion maximal. Les paramètres électroniques nécessaires pour la simulation sont résumés dans les tableaux (III.1 et III.2).

Tableau.III.1. Les paramètres électroniques de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub>

Permittivité	Eg (eV)	Affinite (eV)	Nc (cm <sup>-3</sup> )	Nv (cm <sup>-3</sup> )	Un (cm <sup>2</sup> /v/s)	Up (cm <sup>2</sup> /v/s)	Nd (cm <sup>-3</sup> )	Na (cm <sup>-3</sup> )
10	2	3.58	6.8e+16	1.5e+19	1000	40	variable	0

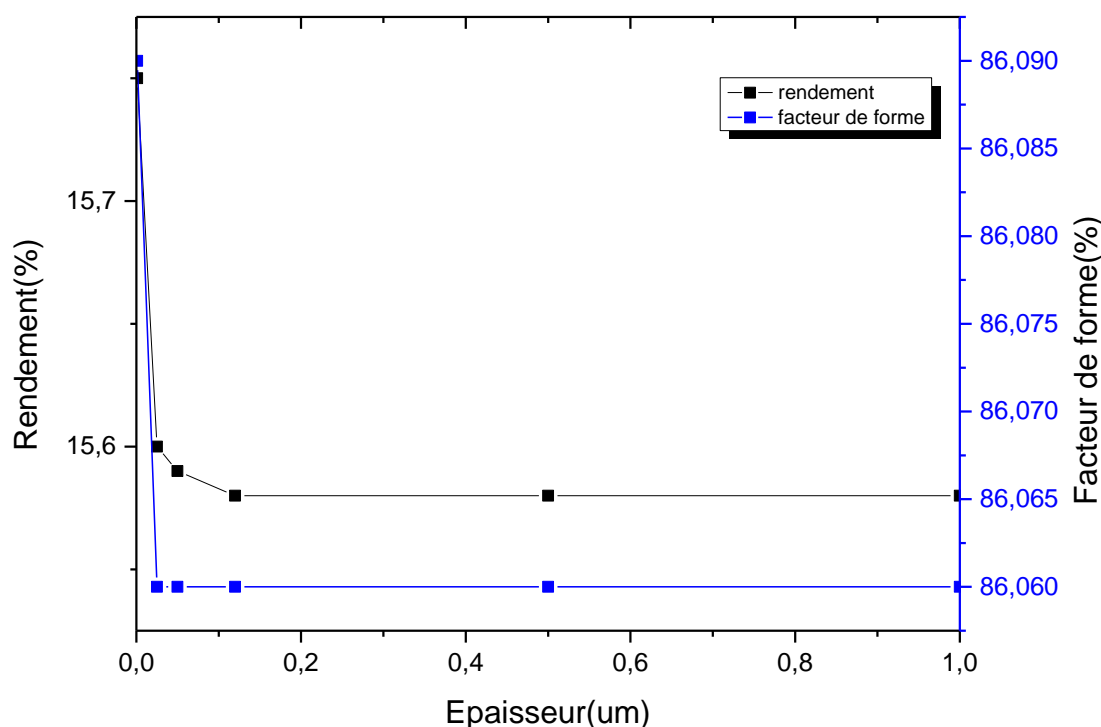
Tableau.III.2. Les paramètres électroniques de la couche p-Si

Permittivité	Eg (eV)	Affinite (eV)	Nc (cm <sup>-3</sup> )	Nv (cm <sup>-3</sup> )	Un (cm <sup>2</sup> /v/s)	Up (cm <sup>2</sup> /v/s)	Nd (cm <sup>-3</sup> )	Na (cm <sup>-3</sup> )
11.7	1.12	4.05	2.8e+19	1.04e+19	125	60	0	variable

III.4.1.1. Effet de l'épaisseur de la couche en n-ZnGeP<sub>2</sub>

Tableau.III.3. Les résultats de simulation obtenus par rapport aux épaisseurs.

L'épaisseur de la couche n-ZnGeP <sub>2</sub>	$J_{SC}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
0.001	23.1767	0.7900	15.75	86.09
0.025	22.95	0.7898	15.60	86.06
0.05	22.93	0.7897	15.59	86.06
0.12	22.93	0.7897	15.58	86.06
0.5	22.93	0.7897	15.58	86.06
1	22.93	0.789	15.58	86.06
5	22.92	0.7897	15.58	86.06
8	22.91	0.7897	15.57	86.06
10	22.90	0.7897	15.56	86.06
13	22.89	0.7897	15.55	86.06



**Figure.III.7.** La variation du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub>.

Dans le tableau (III.1) nous représentons les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque obtenues par la simulation tels que le courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le rendement et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation dans l'épaisseur de la couche ZnGeP<sub>2</sub> influe inversement sur le rendement de conversion et le facteur de forme qui est presque stable.

III.4.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche p-Si

Tableau.III.4. Les résultats de simulation  $J_{sc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$ , FF, par rapport aux épaisseurs

L'épaisseur de la couche p-Si	$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
0.5	8.76	0.6687	4.91	83.80
1	10.98	0.6687	6.41	84.27
2	13.49	0.7175	8.20	84.75
3	15.16	0.7298	9.37	85.09
4	16.28	0.7407	10.27	85.17
6	17.99	0.7525	11.58	85.36
8	19.20	0.7623	12.53	85.61
10	20.14	0.7684	13.27	85.77
14	21.52	0.7805	14.40	85.71
17	22.30	0.7851	15.06	86.02
20	22.93	0.7897	15.59	86.06
22	23.30	0.7929	15.88	85.98
25	23.78	0.7977	16.29	85.88
30	24.45	0.8027	16.91	86.17

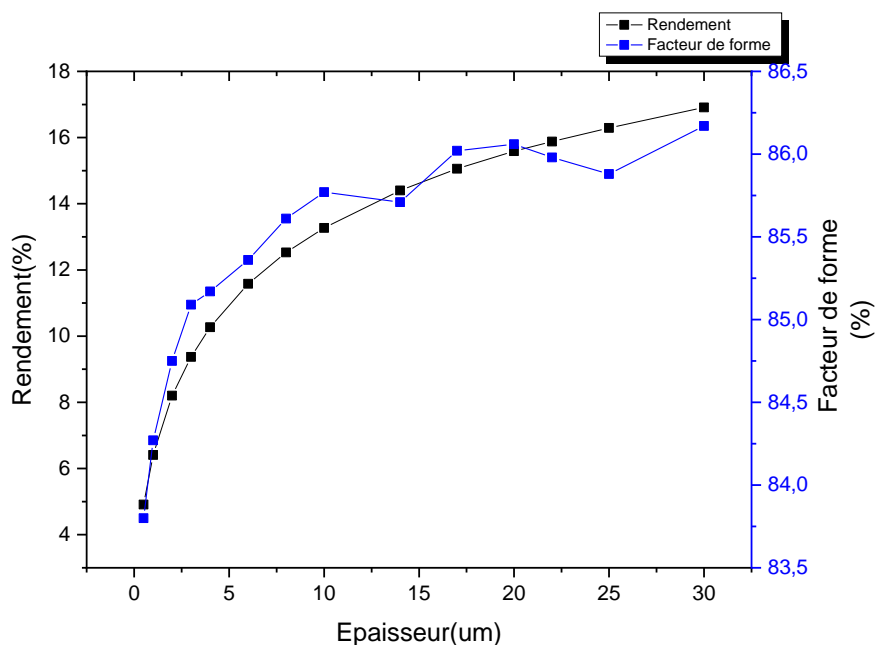


Figure.III.8. La variation de rendement et de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche p-Si.

Dans le tableau (III.2) nous représentons les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation tels que le courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension

de circuit ouvert  $V_{co}$ , le rendement de conversion et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche de Si dopé (p) (entre 0  $\mu\text{m}$  et 30  $\mu\text{m}$ ) influe proportionnellement dans le rendement de conversion le facteur de forme.

**Tableau.III.5.** Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

n-ZnGeP <sub>2</sub>	p-Si
0.001	30

**Tableau.III.6.** Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
24.4569	0.8027	16.9169	86.1737

### III.4.2. L'Effet du dopage sur les paramètres de la cellule

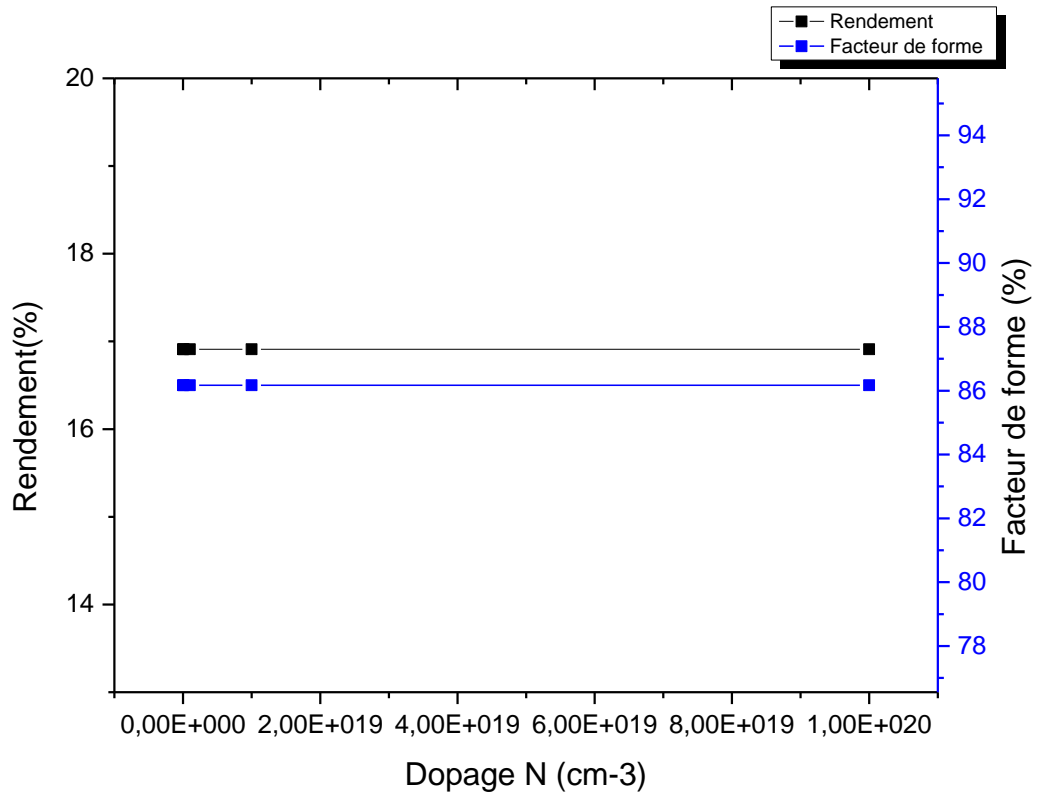
On va suivre les mêmes étapes précédentes, mais cette fois-ci, on va fixer les épaisseurs optimales des couches et on varie dans les dopages des couches afin d'obtenir un meilleur rendement.

#### III.4.2.1. Effet du dopage de la couche ZnGeP<sub>2</sub> dopé (n)

On a varié dans la concentration de dopage  $N_d$  de la couche ZnGeP<sub>2</sub> de  $10^{15}$  à  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> avec les concentrations de dopage  $N_d$  de la couche ZnGeP<sub>2</sub> (n) est  $10^{15}$  cm<sup>-3</sup> la concentration de dopage  $N_a$  de la couche Si (p) 0 cm<sup>-3</sup>.

**Le tableau.III.7.** L'effet de dopages de la couche ZnGeP<sub>2</sub> sur les performances de la cellule Photovoltaïque.

Dopage n-ZnGeP <sub>2</sub>	$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
1e15	24.45	0.8027	16.91	86.17
1e16	24.45	0.8027	16.91	86.17
1e17	24.45	0.8027	16.91	86.17
1e18	24.45	0.8027	16.91	86.17
1e19	24.45	0.8027	16.91	86.17
1e20	24.45	0.8027	16.91	86.17

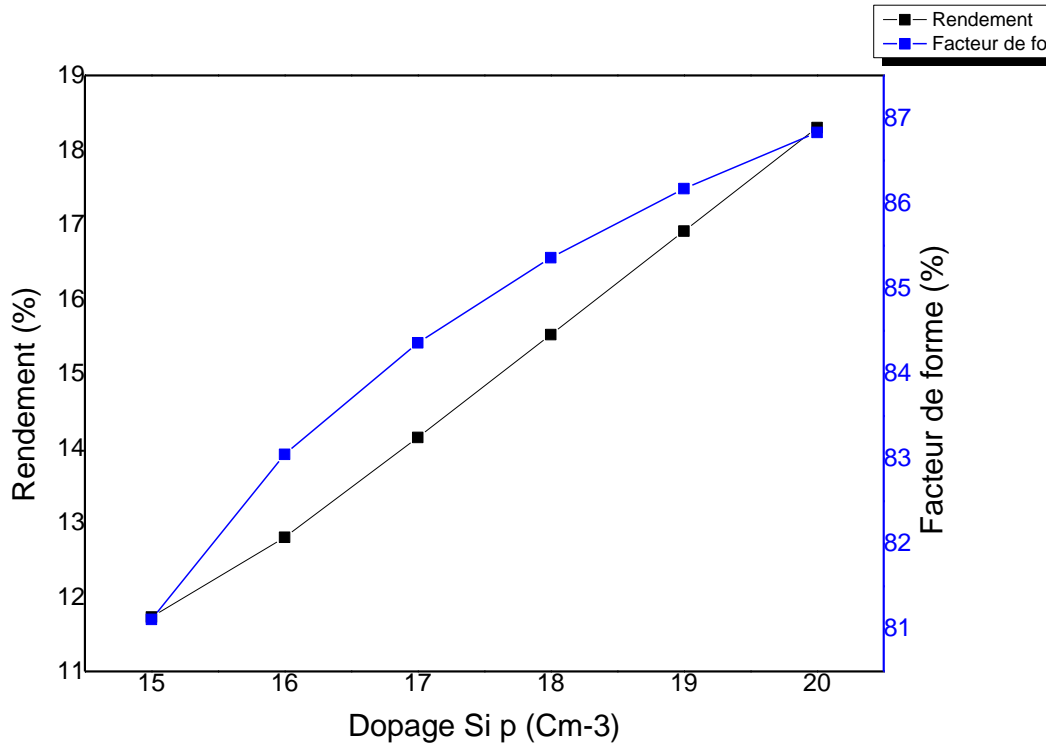


**Figure.III.9.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction du dopage de la couche ZnGeP<sub>2</sub>

**III.4 .2.2. L’effet du dopage de la couche p-Si sur le rendement.**

**Tableau.III.8.** L’effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule Photovoltaïque

dopage n-ZnGeP <sub>2</sub>	J <sub>SC</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	η (%)	FF (%)
10E15	25.59	0.5651	11.73	81.11
10E16	24.71	0.6238	12.80	83.05
10E17	24.52	0.6834	14.14	84.36
10E18	24.47	0.7430	15.52	85.36
10E19	24.45	0.8027	16.91	86.17
10E20	24.45	0.8623	18.30	86.83



**Figure.III.10.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction du dopage de la couche p-Si.

**Tableau.III.9.** Les performances de la cellule pour les valeurs optimales du dopage de Chaque couche.

n-ZnGeP <sub>2</sub>	p-Si
1e20	1e20

**Tableau.III.10.** Les valeurs optimales du dopage de chaque couche.

$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
24.45	0.8623	18.30	86.82

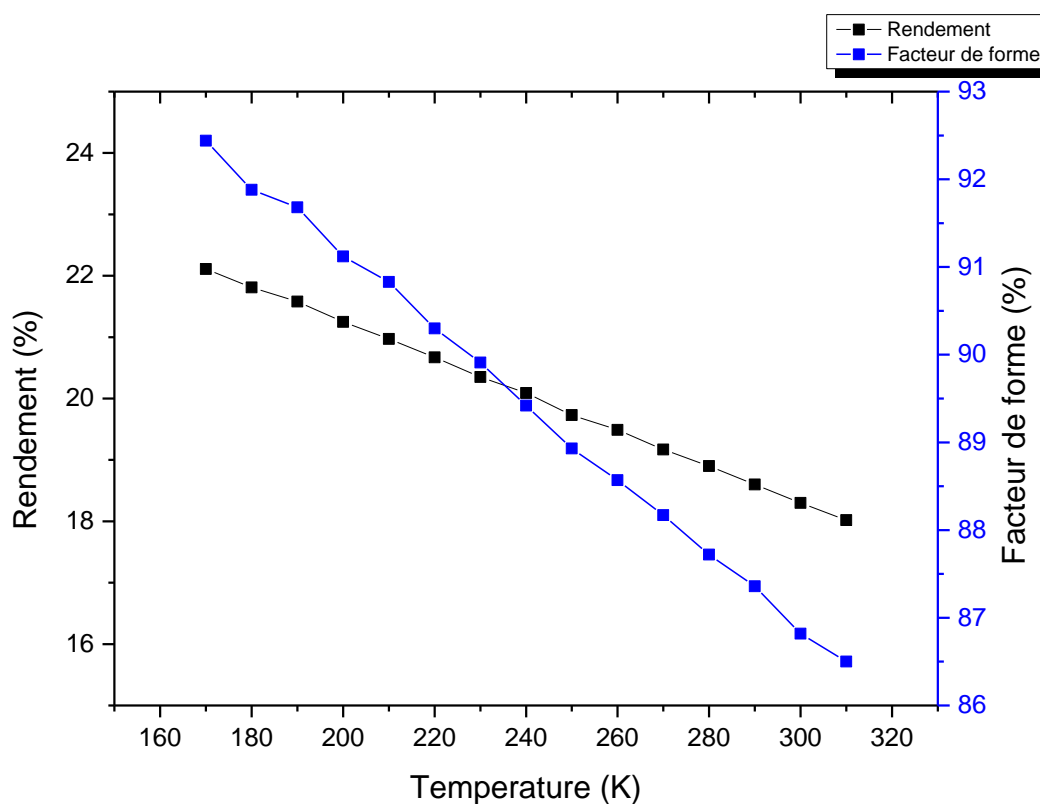
### III.4.3 l'effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Nous avons variés la

température dans la gamme 300 à 400 °K et nous avons observés une claire influence sur les performances de la cellule PV.

**Tableau.III.11.** L’effet de la température sur les performances de la cellule Photovoltaïque

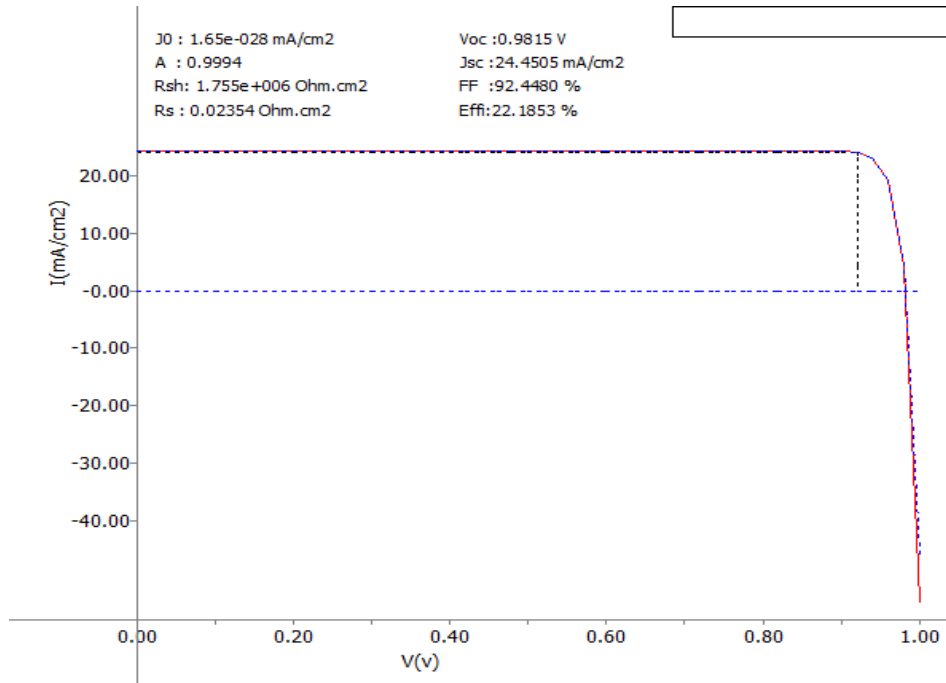
Temperature (K°)	J <sub>SC</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	η (%)	FF (%)
170	24.555	0.9815	22.11	92.44
180	24.45	0.9710	21.81	91.88
190	24.45	0.9629	21.58	91.68
200	24.45	0.9538	21.25	91.12
210	24.45	0.9445	20.97	90.83
220	24.45	0.9364	20.67	90.30
230	24.45	0.9261	20.35	89.91
240	24.45	0.9188	20.09	89.42
250	24.45	0.9077	19.73	88.93
260	24.45	0.9004	19.49	88.57
270	24.45	0.8893	19.17	88.17
280	24.45	0.8814	18.90	87.72
290	24.45	0.8708	18.60	87.36
300	24.45	0.8623	18.30	86.82
310	24.45	0.8522	18.02	86.50



**Figure.III.11.** Variation du rendement et facteur de forme en fonction de la température de la cellule ZnGeP<sub>2</sub>/Si.

**Tableau.III.12.** Les valeurs optimales des paramètres de la cellule.

La Cellule	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )
ZnGeP <sub>2</sub> (n)	0.001	1E20
Si(p)	30	1E20



**Figure.III.12.** Le graphe du résultat final déduit par WxAMPS-1D.

### III.5. L'Effet des épaisseurs, dopages et températures sur le rendement de la cellule tandem proposée

Cette partie est consacrée à l'optimisation des épaisseurs, dopages et température sur la performance de la cellule tandem proposée. Sachant que, notre structure a simulé est constitué en deux cellule superposées l'une sur l'autre soit en empilement mécanique ou bien monolithique comme le suivant : (ZnGeP<sub>2</sub> (n)/ ZnGeP<sub>2</sub> (p)- Si (n)/ Si(p)), voir la figure (III.6).

**Tableau.III.13.** Les paramètres électriques de la couche ZnGeP<sub>2</sub>

Permittivite	Eg (eV)	Affinite (eV)	Nc ( $\text{cm}^{-3}$ )	Nv ( $\text{cm}^{-3}$ )	Un ( $\text{cm}^2/\text{v/s}$ )	Up ( $\text{cm}^2/\text{v/s}$ )	Nd ( $\text{cm}^{-3}$ )	Na ( $\text{cm}^{-3}$ )
10	2	3.58	6.8e+16	1.5e+19	1000	40	variable	0

**Tableau.III.14.** Les paramètres électriques de la couche Si

Permittivite	Eg (eV)	Affinite (eV)	Nc (cm <sup>-3</sup> )	Nv (cm <sup>-3</sup> )	Un (cm <sup>2</sup> /v/s)	Up (cm <sup>2</sup> /v/s)	Nd (cm <sup>-3</sup> )	Na (cm <sup>-3</sup> )
11.7	1.12	4.05	2.8e+19	1.04e+19	125	60	0	variable

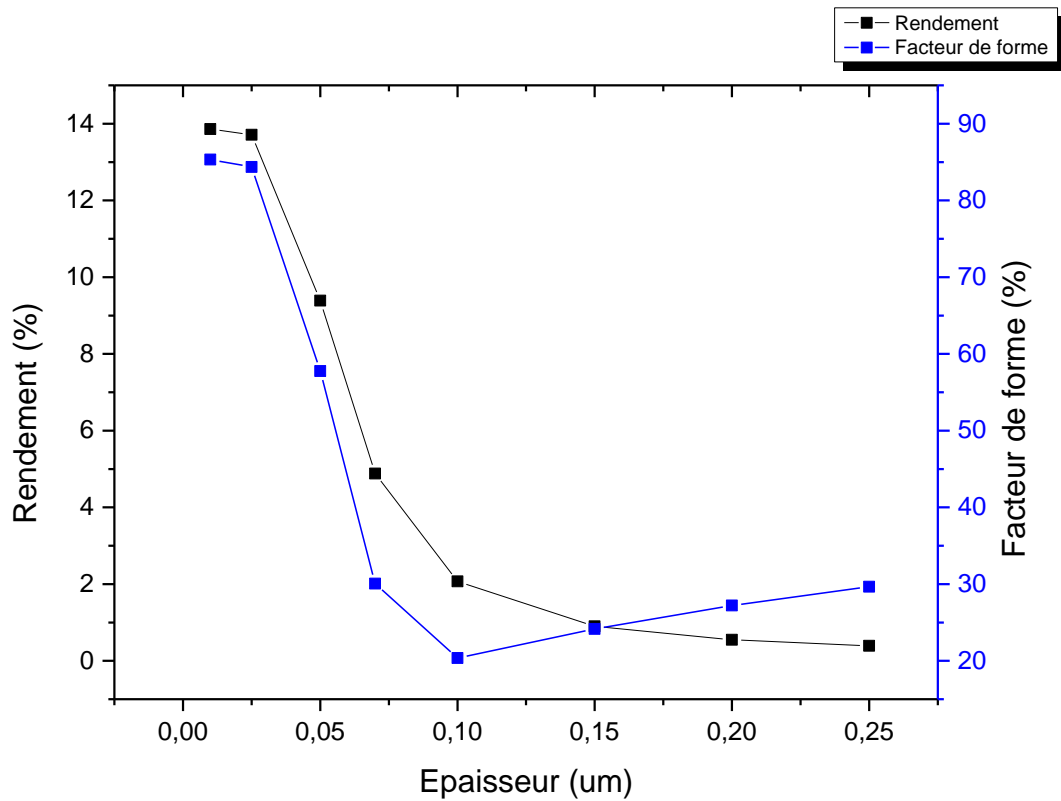
### III.5.1 Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

#### III.5.1.1 Effet de l'épaisseur de la couche en ZnGeP<sub>2</sub> dopée (n) sur le rendement.

Dans le tableau (III.15), nous représentons les paramètres de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation tel que le courant de court-circuit  $J_{SC}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le rendement et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche en ZnGeP<sub>2</sub> (n) a une influence sur les performances de la cellule solaire, telle que les performances diminuent avec des petites valeurs.

**Tableau III.15.** L'effet de l'épaisseur de la couche ZnGeP<sub>2</sub> dopée (n) sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche n-ZnGeP <sub>2</sub>	$J_{SC}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
0.01	22.35	0.7269	13.86	85.32
0.025	22.35	0.7272	13.71	84.35
0.05	22.35	0.7277	9.39	57.77
0.07	22.34	0.7275	4.88	30.06
0.1	13.97	0.7274	2.07	20.37
0.15	5.13	0.7272	0.90	24.16
0.2	2.97	0.7272	0.55	27.22
0.25	1.84	0.7271	0.39	29.66



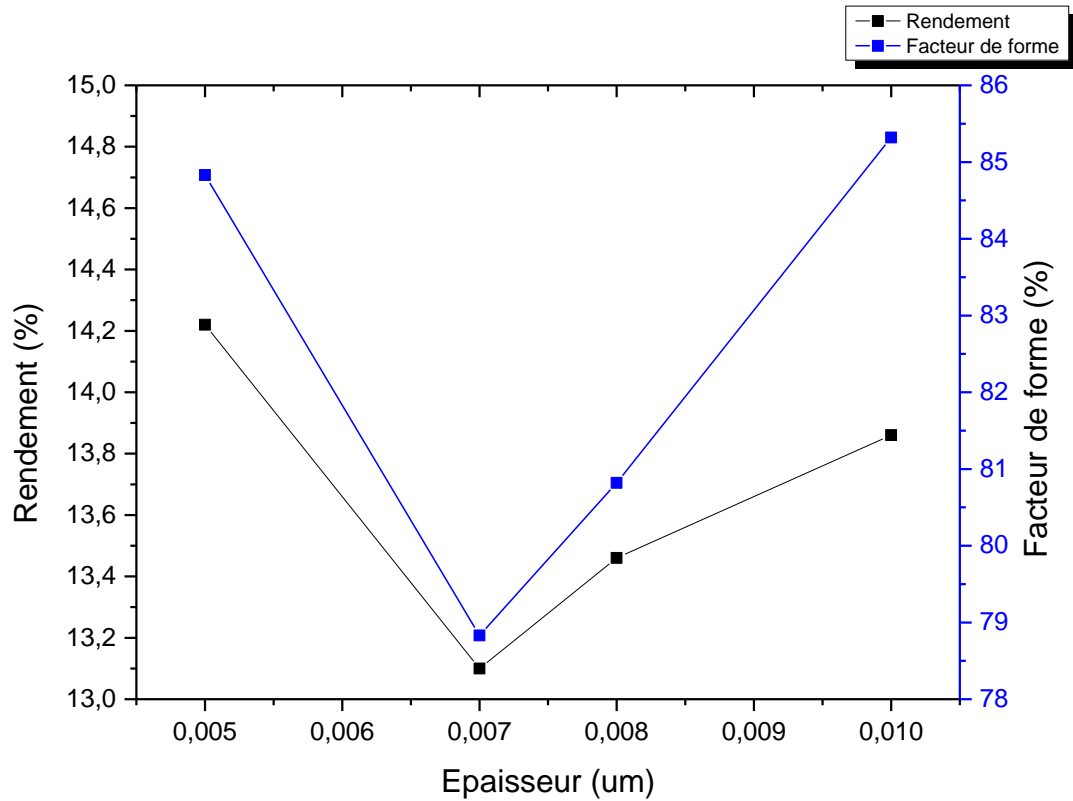
**Figure.III.13.** Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub>

**III.5.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub> sur le rendement.**

L'épaisseur de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub> est variée de 0.5 nm à 10 nm tandis que l'épaisseur de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub> est maintenue constante (10 µm). L'effet de l'épaisseur de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub> sur la cellule solaire est illustré dans les figures (III.)8 et (III.9).

**Tableau III.16.** Les résultats de simulation obtenus par rapport aux épaisseurs.

L'épaisseur de la couche p-ZnGeP <sub>2</sub>	J <sub>SC</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	η (%)	FF (%)
0.01	22.35	0.7269	13.86	85.32
0.008	22.72	0.7330	13.46	80.82
0.007	22.67	0.7329	13.10	78.83
0.005	22.89	0.7352	14.22	84.83



**Figure.III.14.** Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub>

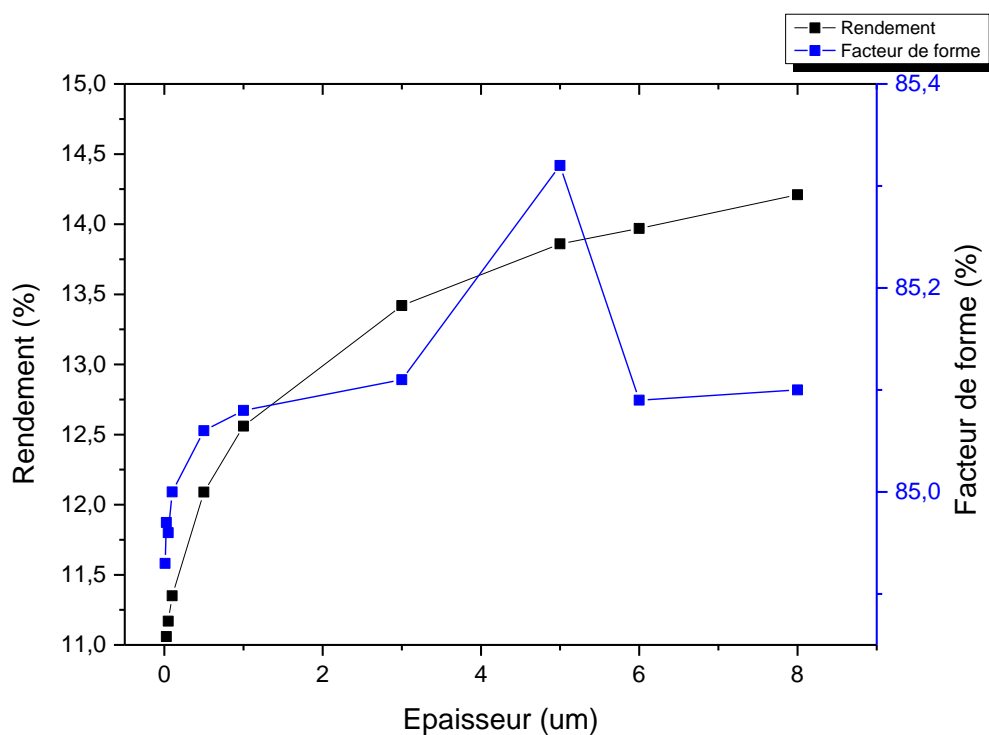
Dans le tableau (III.16), nous représentons les paramètres de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation tels que le courant de court-circuit  $J_{SC}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , le rendement et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub> a une fiable influence sur le rendement et le facteur de forme.

### III.5.1.3. Effet de l'épaisseur de la couche n-Si sur le rendement

Dans le tableau (III.17), nous représentons les caractéristiques électriques de la cellule tandem obtenus par la simulation en fonction de l'épaisseur de la couche n-Si tels que le courant de court-circuit  $J_{SC}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , le rendement et le facteur de forme. Le changement progressivement dans l'épaisseur de la couche Si dopé (n) augmente dans le rendement et le facteur de forme.

**Tableau.III.17.** Les caractéristiques électriques de la cellule tandem obtenus en fonction de l'épaisseur de la couche n-Si.

L'épaisseur de la couche n-Si	$J_{SC}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
0.01	17.65	0.7218	10.82	84.93
0.025	18.025	0.7222	11.06	84.97
0.05	18.20	0.7224	11.17	84.96
0.1	18.48	0.7227	11.35	85.00
0.5	19.63	0.7239	12.09	85.06
1	20.38	0.7247	12.56	85.08
3	21.71	0.7262	13.42	85.11
5	22.35	0.7269	13.86	85.32
6	22.58	0.7271	13.97	85.09
8	22.95	0.7275	14.21	85.10



**Figure.III.15.** Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche n-Si .

III.5.1.4 Effet de l'épaisseur de la couche p-Si sur le rendement.

Dans le tableau (III.17), on a résumé les paramètres de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche p-Si on a un rendement en augmentation (0  $\mu\text{m}$  – 6  $\mu\text{m}$ ). La même remarque s'applique dur le facteur de forme.

Tableau.III.18. Les résultats de simulation  $J_{sc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$  et FF par rapport aux épaisseurs

L'épaisseur de la couche en p-Si	$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
0.01	21.05	0.4977	8.38	80.04
0.025	21.06	0.58	10.06	82.27
0.05	21.07	0.6031	10.52	82.81
0.1	21.10	0.6231	10.94	83.24
0.5	21.29	0.6659	11.92	84.07
1	21.52	0.6845	12.43	84.42
3	22.32	0.7139	13.49	84.66
6	23.22	0.7327	14.46	84.99

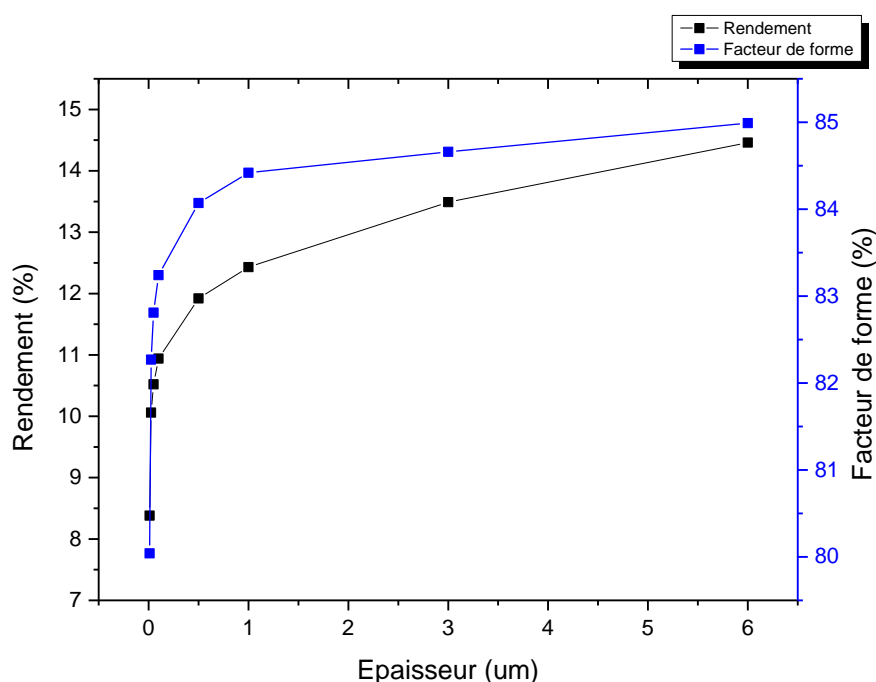


Figure.III.16. Variation de rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche p-Si

**Tableau.III.19.** Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couches .

$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{cc}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
23.2274	0.7327	14.4663	84.9973

**Tableau.III.20.** Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couches

n-ZnGeP <sub>2</sub> (μm)	p-ZnGeP <sub>2</sub> (μm)	n-Si (μm)	p-Si (μm)
0.01	0.01	8	6

### III.5.2. L'Effet du dopage de chaque couche de la cellule tandem sur l'efficacité.

Pour étudier l'influence du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule solaire, nous fixons les épaisseurs des couches par leurs valeurs optimales obtenus par l'étape précédente.

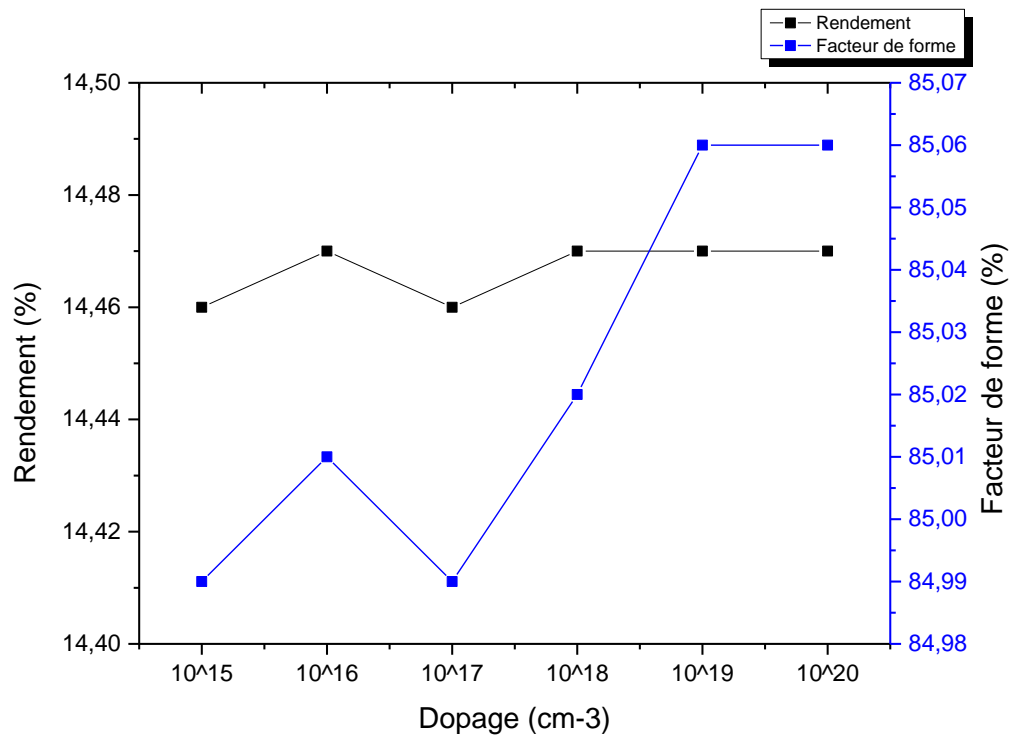
#### III.5.2.1. Effet du dopage de la couche en n-ZnGeP<sub>2</sub> sur le rendement

Nous varions la concentration de dopage  $N_a$  de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub> de  $10^{15}$  à  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>, en même temps, on fixe les dopages pour le reste des couches forment la cellule.

D'après la figure (III.17) et le tableau (III.21), on constate que la variation progressive dans le dopage n'a pas une grande influence sur le rendement de conversion et le facteur de forme, même chose pour le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

**Tableau.III.21.** L'effet de dopages de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub> sur les performances De la cellule Photovoltaïque

Dopage n-ZnGeP <sub>2</sub>	$J_{SC}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
$10^{15}$	23.22	0.7327	14.46	84.99
$10^{16}$	23.22	0.7328	14.47	85.01
$10^{17}$	23.22	0.7327	14.46	84.99
$10^{18}$	23.2271	0.7327	14.47	85.02
$10^{19}$	23.2274	0.7327	14.47	85.06
$10^{20}$	23.2274	0.7327	14.47	85.06



**figure.III.17.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche n-ZnGeP<sub>2</sub>

### III.5.2.2. L'Effet du dopage de la couche en p-ZnGeP<sub>2</sub> sur le rendement.

Nous varions la concentration de dopage  $N_a$  de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub> de 10<sup>14</sup> à

10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>, en même temps, on fixe les dopages pour le reste des couches forment la cellule.

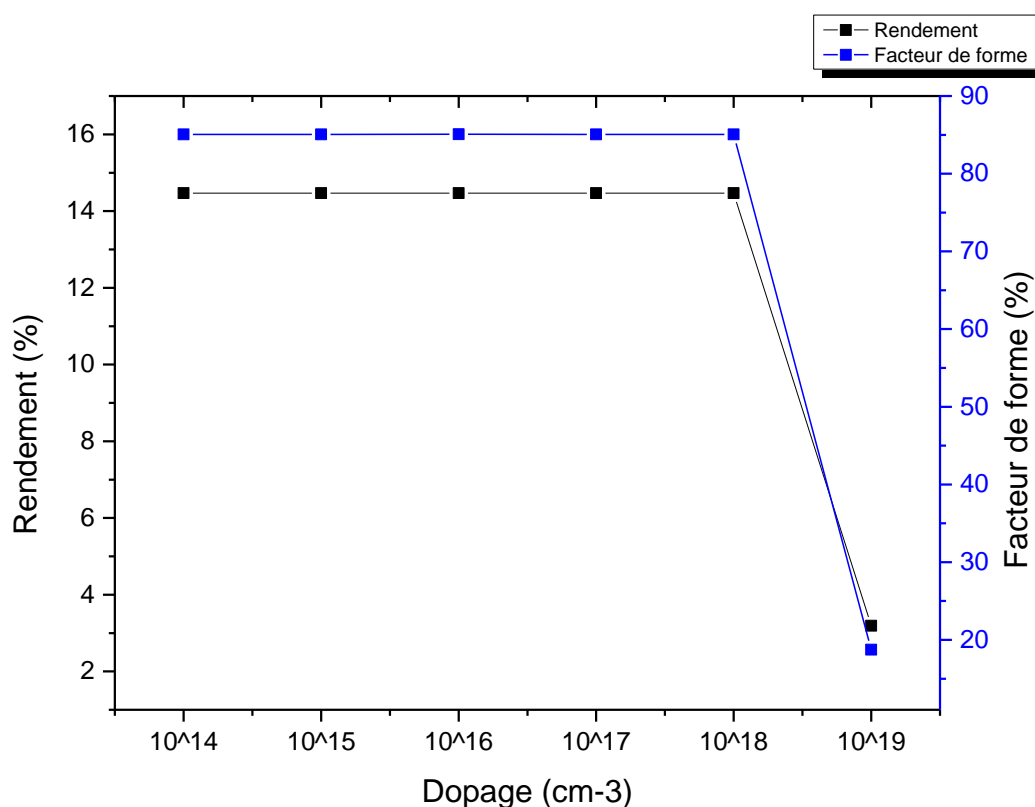
D'après la figure (III.18) et le tableau (III.22), on constate que la variation progressive dans

le dopage n'a pas une grande influence sur le rendement de conversion et le facteur de forme,

même chose pour me courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

**Tableau.III.22.** L'effet de dopages de la couche ZnGeP<sub>2</sub> dopé p sur les performances de la cellule Photovoltaïque.

Dopage p-ZnGeP <sub>2</sub>	J <sub>SC</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	η (%)	FF (%)
10e14	23.22	0.7327	14.47	85.06
10e15	23.22	0.7327	14.47	85.06
10e16	23.22	0.7327	14.47	85.07
10e17	23.22	0.7327	14.47	85.06
10e18	23.22	0.7327	14.47	85.06
10e19	23.21	0.7344	3.19	18.74



**Figure.III.18.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub>.

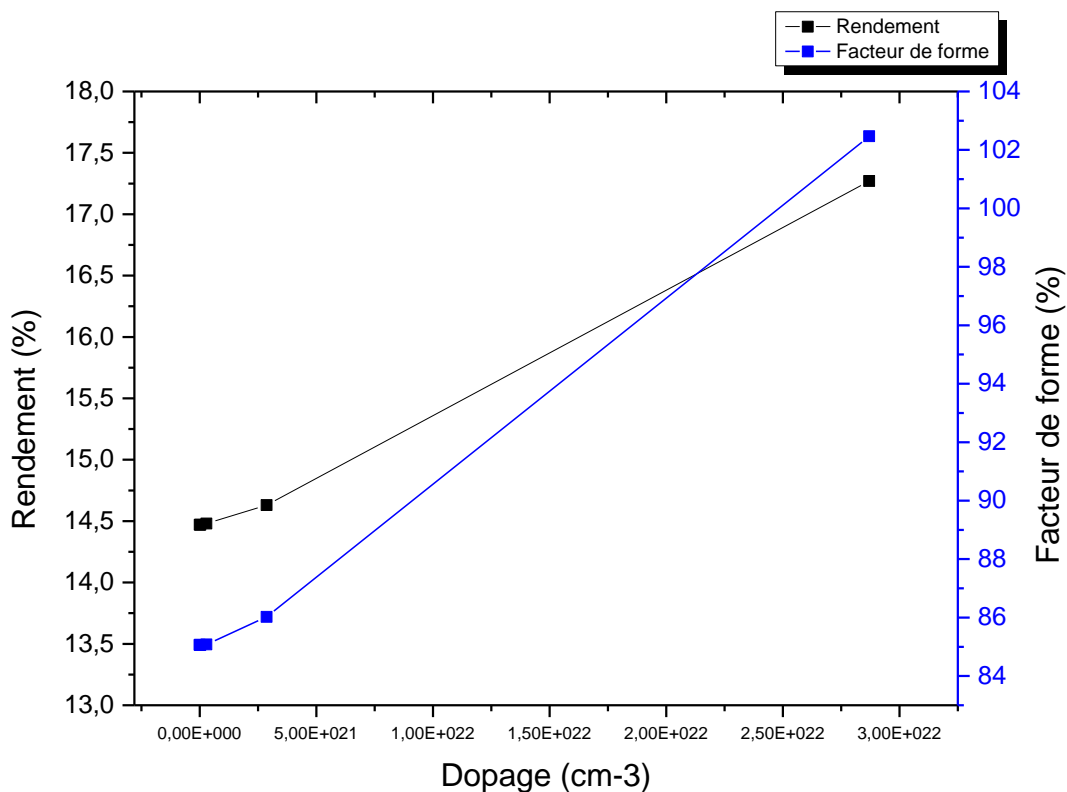
### III.5.2.3. Effet du dopage de la couche n-Si sur le rendement.

Nous varions la concentration de dopage Na de la couche n-Si de  $2.87e^{15}$  à  $2.87e^{22}cm^{-3}$ , en même temps, on fixe les dopages pour le reste des couches forment la cellule.

D'après la figure (III.19) et le tableau (III.23), on constate que la variation progressive dans le dopage n'a pas une grande influence sur le rendement de conversion et le facteur de forme, même chose pour le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

**Tableau.III.23.** L'effet de dopages de la couche n-Si sur les performances de la cellule Photovoltaïque

Dopage n-Si	J <sub>SC</sub> (mA.cm <sup>-2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	η (%)	FF (%)
2.87e15	23.22	0.7327	14.47	85.07
2.87e16	23.22	0.7327	14.47	85.07
2.87e17	23.22	0.7327	14.47	85.07
2.87e18	23.22	0.7327	14.47	85.06
2.87e19	23.22	0.7327	14.47	85.06
2.87e20	23.22	0.7327	14.48	85.08
2.87e21	23.22	0.7327	14.63	86.02
2.87e22	22.95	0.7346	17.27	102.47

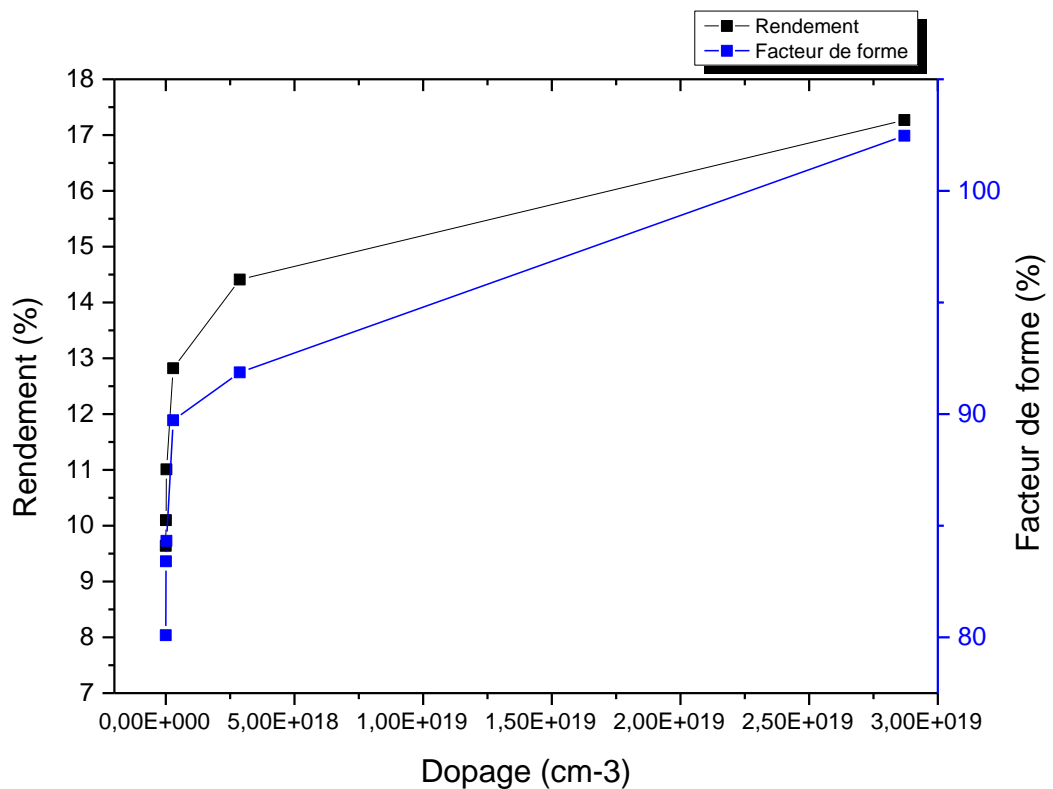


**Figure.III.19.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche p-ZnGeP<sub>2</sub>.

**III.5.2.4. Effet du dopage de la couche en p-Si sur le rendement.**

**Tableau III.24.** L'effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage p-Si	$J_{SC}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF (%)
2.87e14	25.61	0.4699	9.64	80.09
2.87e15	24.13	0.5020	10.10	83.40
2.87e16	23.54	0.5549	11.01	84.32
2.87e17	23.24	0.6148	12.82	89.72
2.87e18	23.24	0.6748	14.41	91.87
2.87e19	22.95	0.7346	17.27	102.47



**Figure.III.20.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de dopage de la couche p-Si

**Tableau.III.25.** Les valeurs optimales du dopage de chaque couche.

n-ZnGeP <sub>2</sub> (cm <sup>-3</sup> )	p-ZnGeP <sub>2</sub> (cm <sup>-3</sup> )	n-Si (cm <sup>-3</sup> )	p-Si (cm <sup>-3</sup> )
1e16	1e16	2.87e22	2.87e19

**Tableau.III.26.** Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de Chaque couche

$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
23.24	0.7346	17.27	101.16

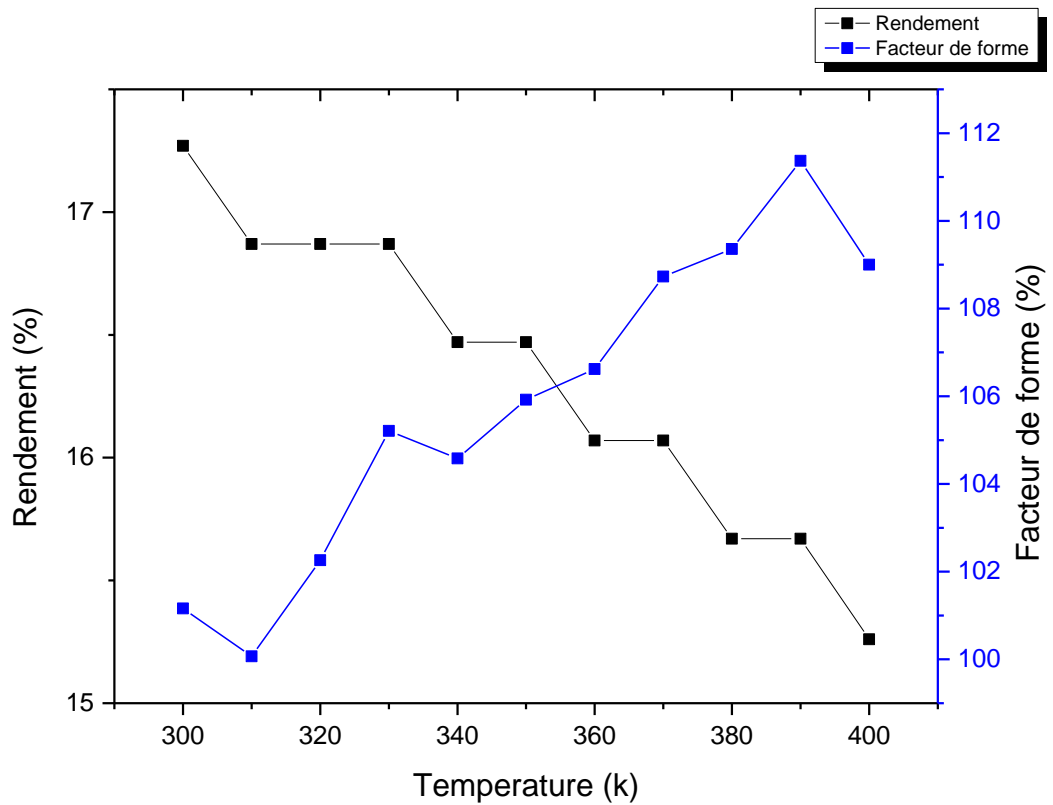
### III.5.3 l'effet de la température sur les paramètres des cellules Photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Nous avons varié la température dans la gamme 300 à 400 °K et nous avons observé l'influence de la variation de température sur les performances de la cellule solaire.

#### III.5.3.1. Effet de la température sur la cellule tandem ZnGeP<sub>2</sub>, Si sur le rendement

**Tableau.III.27.** L'effet de la température sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Température (K°)	$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
400	23.54	0.5950	15.26	109.00
390	23.07	0.6099	15.67	111.37
380	22.99	0.6232	15.67	109.36
370	23.27	0.6250	16.07	108.73
360	23.10	0.6500	16.07	106.62
350	23.44	0.6634	16.47	105.92
340	23.34	0.6747	16.47	104.58
330	23.24	0.6899	16.87	105.21
320	23.46	0.7032	16.87	102.26
310	23.35	0.7220	16.87	100.07
300	23.24	0.7346	17.27	101.16



**Figure.III.21.** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de la température de la couche p-Si

**Tableau.III.28.** Les valeurs optimales des paramètres de la cellule.

La Cellule	Epaisseur (µm)	Dopage (cm <sup>-3</sup> )
ZnGeP <sub>2</sub> (n)	0.01	1E16
ZnGeP <sub>2</sub> (p)	0.01	1E15
Si(n)	8	2.87E22
Si(p)	6	2.87E19

**Tableau.III.29.** Les valeurs optimales des paramètres de la cellule.

$J_{sc}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$V_{cc}$ (V)	$\eta$ (%)	$FF$ (%)
24.45	0.9815	22.18	92.4480

Après avoir effectué des simulation pour voir le rendement ainsi que le facteur de forme en fonction de la température. On a déduit le meilleur résultat traduit dans le graph ci-dessous

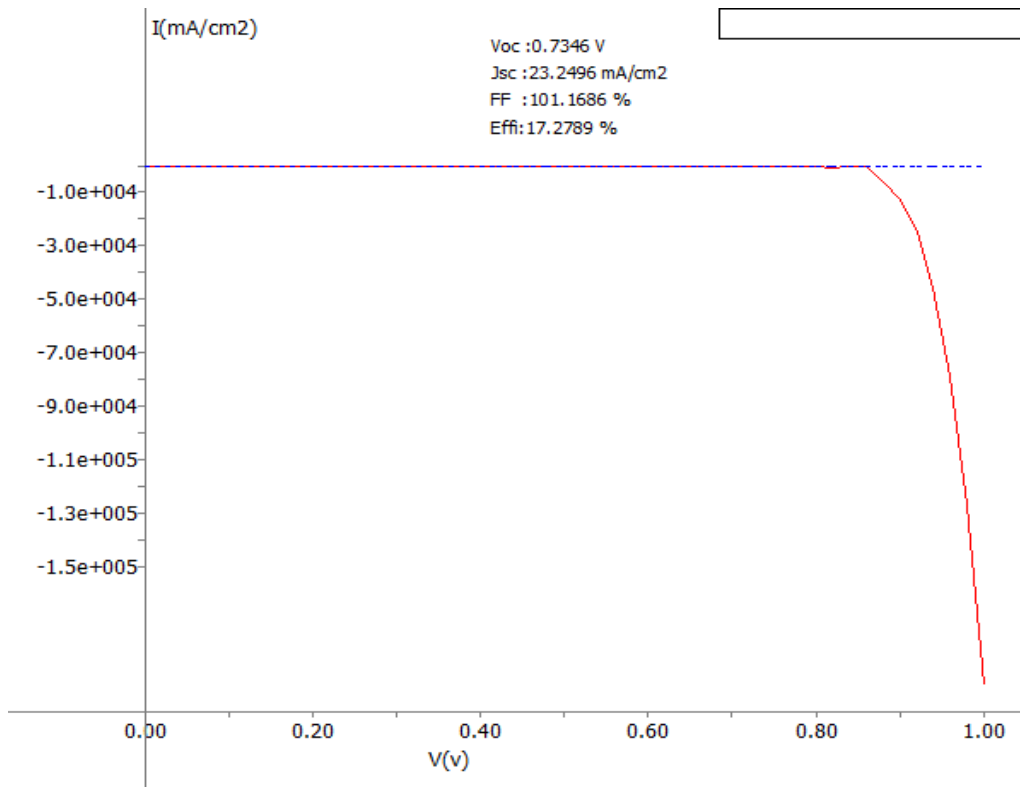


Figure.III.22. Le résultat final obtenu par l'AMPS-1D.

**Référence :**

- [1] S.J. Fonash et al., A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional devices simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsylvania State University, 1997. See also <http://www.ampsmodeling.org>.
- [2] Djemai Mounira, « Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [3] Yiming Liu , Daniel Heinzl, Angus Rockett : «A REVISED VERSION OF THE AMPS SIMULATION CODE», Bourses d'Etat, Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
- [4] Djeghbala Afaf, «Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [5] BOURAIOU Assia, « Elaboration et Caractérisation des couches minces CuInSe<sub>2</sub> par Electrodeposition », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI- Constantine, 2009.
- [6] Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSélénure de Cuivre Indium Galium CuIn(1-x)Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> (CIGS) », Mémoire de Magister en : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra.

## **Conclusion générale**

Dans ce mémoire, on a contribué dans la branche des cellules et matériaux photovoltaïques. Notre contribution présente une étude numérique dans le but de résoudre un problème technique dans les cellules photovoltaïques à monojonction. Donc, on a simulé et étudié des cellules tandems (multijonction) à base d'un nouveau matériau photovoltaïque qu'est le  $\text{ZnGeP}_2$ . Comme conclusion et d'après les résultats obtenus on peut dire que ces matériaux exploités dans notre étude ( $\text{ZnGeP}_2$ ) et les chalcopyrites II-IV-V<sub>2</sub> de façon général sont des candidats prometteurs comme des matériaux photovoltaïques d'excellence grâce à leurs propriétés physiques intéressantes dans le champ d'optoélectronique. Le WxAMPS-1D montre dans cette étude leur puissance dans la simulation numérique des cellules PV. On a simulé dans ce mémoire deux structures photovoltaïques, l'une hétéro-structure ( $\text{ZnGeP}_2/\text{Si}$ ) et l'autre une structure tandem (multijonction avec deux cellules  $\text{ZnGeP}_2$  (n)/  $\text{ZnGeP}_2$  (p) – Si (n)/Si (p)). Les résultats de simulation en grosso modo acceptables dans les deux structures simulées avec des rendements de conversion encourageants de 22 % ( hétéro-structure) et 17,27 % (tandem). Comme perspectives à ce travail, il est préférable d'orienter vers des études expérimentales et l'élaboration de ces couches et structures afin de réaliser ces cellules soit en doctorat ou bien comme des future projet de fin d'étude master.

## ملخص

مؤخرا تعتبر الكالكوبيريت مواد هامة في عدة مجالات تكنولوجية مثل الإلكترونيك والالكترونيات الضوئية بسبب خصائصها الالكترونية والضوئية الخطية والغير خطية الممتازة ومن بين هذه المواد الشبه ناقله يوجد صنفان من هذه النواقل  $I-III-VI_2$  et  $II-IV-V_2$  المستعملة بكثرة خلال الآونة الأخيرة في الأبحاث وتطوير خلايا شمسية جديدة ذات الطبقات رقيقة أو متعددة الطبقات. الهدف من هذا العمل هو محاكاة بعض بنيات الكالكوبيريت للطبقات الرقيقة ومتعددة الطبقات باستعمال برنامج المحاكات  $AMPS-1D$ .

## Résumé

Récemment, Les chalcopyrites sont des matériaux intéressants dans des plusieurs domaines technologiques comme l'électronique, l'optoélectronique et la photonique à cause de leurs excellentes propriétés électroniques, optique linéaire et non linéaire. Parmi ces matériaux semi-conducteurs on a les deux familles  $I-III-VI_2$  et  $II-IV-V_2$  qui sont largement utilisées ces dernières années dans la recherche et le développement des nouvelles cellules solaires en multijonctions ou en couches minces. Le but de ce travail est d'étudier et de simuler quelques structures photovoltaïques à base de chalcopyrites en couches minces ou bien multijonctions sous l'environnement  $AMPS-1D$ .

## Abstract

Recently, chalcopyrites are interesting materials in several technological fields such as electronic, optoelectronic and photonic because of their excellent properties (electronic, optic). Among these semiconductor materials, we found the  $I-III-VI_2$  and  $II-IV-V_2$  compounds, which are widely used recently in the research and development of the new multijonctions or thin films cells. Our aim behind this work is to study and simulate some photovoltaic structures based on chalcopyrite in thin-layer or multijonction by using  $AMPS-1D$  software.