

République algérien démocratique et populaire
Ministères d'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DU MASTER

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Microélectronique

Thème

**Etude d'une cellule photovoltaïque hétéro-structure a base du
ZnSiP₂ avec le simulateur AMPS-1D**

Présenté par :

DAHMANINour El Houda

ROUIBIInes

Encadré par

Dr. BENNACER Hamza

Dr.ZIANE Mohamed Issam

Promotion : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je remercié ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

J'exprime toute ma profonde gratitude, ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à Mr. BENNACER Hamza, docteur à l'université de M'silla, pour m'avoir encadré tout le long de mon travail, qui par ses enseignements et ses conseils a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie tous : Mes collègues des études en micro - électronique pour leur soute

Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail en premier
Lieu à Nos parents qui nous
Soutenus pour nous nous permettre de réaliser tous notre
objectifs et qu'ils trouvent
ici toute notre reconnaissance et notre gratitude. A nos
frères, à nos sœurs. Et grande
famille ROUIBI et Dahmani. A tous notre enseignants
depuis le primaire jusqu'à
maintenant surtout les enseignants du département
électronique.
A tous nos amis, et groupe microélectronique*

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 الأونة 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.

Sommaires

Remerciements	II
Dédicace	III
Résumé.....	IV
Sommaire.....	VI

Liste des figures.....	VIII
------------------------	------

Liste des tableaux.....	VI
-------------------------	----

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les matériaux Chalcopyrites

I.1.Introduction.....	6
-----------------------	---

I.1.Les chalcopyrite.....	6
---------------------------	---

I.2.La structure chalcopyrite.....	7
------------------------------------	---

I.2.1.Les chalcopyrites de type I-III-VI ₂ et II-IV-V ₂	7
---	---

I.3.Le ternaire ZnSiP ₂	14
--	----

I.3.1.Les propriétés optique de ZnSiP ₂	15
--	----

I.3.2. Les Propriétés photovoltaïques de ternaire ZnSiP ₂	15
--	----

I.4.Conclusion.....	15
---------------------	----

I.5.Références.....	16
---------------------	----

Chapitre II : Généralités sur les cellules photovoltaïques

II.1. Introduction.....	20
-------------------------	----

II.2.Rayonnement et spectre solaire et l'efficacité idéale de conversion.....	21
---	----

a) La cellule photovoltaïque.....	22
-----------------------------------	----

II.3.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	23
---	----

a) La jonction P-N.....	25
-------------------------	----

II.4.Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques.....	26
--	----

II.5.Conclusion.....	31
----------------------	----

II.6.Références.....	32
----------------------	----

Chapitre III : *Résultats de la simulation et discussion*

III.1.Introductio.....	35
III.2.Présentation du simulateur <i>AMPS-1D</i>	35
III.2.1.Généralité.....	35
III.2.2.Fonctionnalité de simulateur <i>wxamps</i>	36
III.2.2.1.Interface.....	36
III.2.2.2.Conditions environnementales.....	36
III.2.2.3.Paramètres de modélisation	37
III.2.2.4.Propriétés générales des matériaux.....	37
III.3. La structure de la cellule étudiée.....	38
III.3.1.Etude de la première structure cellulaire (n-ZnSiP ₂ / p-Si).....	38
III.3.2.Etude de la première structure cellulaire (n-ZnSiP ₂ /p-ZnSiP ₂ /n-Si/p-S.....	39
III.4.Optimisations des paramètres de la cellule photovoltaïque.....	40
III.4.1.La première cellule solaire.....	40
III.4.1.1.Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	40
a) Effet de l'épaisseur de la couche en ZnSiP ₂	40
b) Effet de l'épaisseur de la couche en Si.....	42
III.4.1.2.Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque	44
a) Effet du dopage de la couche en ZnSiP ₂	44
b) Effet du dopage de la couche en Si	46
III.4.1.3.L'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	48
III.4.2.La deuxième cellule solaire.....	49
III.4.2.1.Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	50
a) Effet de l'épaisseur de la couche en n-ZnSiP ₂	50
b) Effet de l'épaisseur de la couche en p-ZnSiP ₂	52

c) Effet de l'épaisseur de la couche en n-Si.....	54
d) Effet de l'épaisseur de la couche en p-Si.....	56
III.4.2.2.Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque	58
a) Effet du dopage de la couche en n-ZnSiP ₂	58
b) Effet du dopage de la couche en p-ZnSiP ₂	60
c) Effet du dopage de la couche en n-Si.....	61
d) Effet du dopage de la couche en p-Si.....	63
III.4.2.3.L'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	65
III.5.Conclusion.....	66
III.6.Références.....	68

Liste des figures

Figure	Titre	Page
I.1.	Analyse spectrale du rayonnement solaire	3
I.2	A. Un spécimen de chalcopirite dans la nature B. La structure cristalline du CuFeS_2	6
I.3	la structure zinc blende (à gauche), et la structure chalcopirite (à droite)	9
I.4	lustration 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)	10
I.5	la représentation graphique de la première zone de Brillouin pour les deux structures (a) : zinc blende et (b) : chalcopirite	12
I.6	Site anionique et le déplacement latéral u dans la structure chalcopirite ABC_2	13
I.7	les valeurs expérimentales du déplacement latéral u (le paramètre interne) versus les valeurs calculées selon pour quelques chalcopirites	13
I.8	l'énergie de gap fondamental versus le paramètre de maille pour quelques chalcopirites de type $II\text{-IV-V}_2$	14
I.9	La structure cristalline de ZnSiP_2	15
I.10	Spectre de photoluminescence de ZnSiP_2	16
II.1	schéma de principe d'un générateur photovoltaïque	20
II.2	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	21
II.3	Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.	23
II.4	Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.	24
II.5	Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	25
II.6	Junction PN à l'équilibre.	25
II.7	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.	26
II.8	l'évolution des meilleurs rendements des cellules photovoltaïques en laboratoire	27
II.9	Répartition de la production mondiale des modules PV par technologies	28

II.10	Répartition de la production mondiale des modules PV par technologies	28
II.11	Bandes interdites théoriquement déterminées en fonction des constantes de réseau pour certaines des chalcopyrites II-IV-V2 les plus abondantes en terre. Les matériaux III-V ainsi que Si et Ge du groupe IV sont également représentés. Les barres verticales grises recouvrant Si et Ge mettent en évidence les matériaux avec une constante de réseau similaire, à $\pm 1\%$. [14]	30
II.12	Spectre de photoluminescence de ZnSiP ₂ (rouge) et bord d'absorption (gris).	30
III.1	Interface d'accueil del'AMPS-1D.	36
III.2	La fenêtre des conditions environnementale.	37
III.3	La fenêtre des paramètres électriques d'entré.	38
III.4	Schéma simplifié de structure de cellule substrat en couches minces à base de (ZnSiP ₂ /Si).	38
III.5	Schéma simplifié de structure de cellule substrat en couches minces à base de (n-ZnSiP ₂ /p-ZnSiP ₂)	39
III.6	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la coucheZnSiP ₂ .	41
III.7	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la coucheenZnSiP ₂	42
III.8	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche Si	43
III.9	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en Si	44
III.10	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en ZnSiP ₂ .	45
III.11	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en ZnSiP ₂ .	46
III.12	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en Si.	47
III.13	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en Si.	47

III.14	Variation du rendement en fonction de la température.	49
III.15	Variation du facteur de forme en fonction de la température.	49
III.16	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche n-ZnSiP ₂ .	51
III.17	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche n-ZnSiP ₂ .	51
III.18	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche p-ZnSiP ₂ .	53
III.19	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche p-ZnSiP ₂ .	53
III.20	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche n-Si.	55
III.21	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en n-Si.	55
III.22	Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche p-Si.	57
III.23	Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en p-Si.	57
III.24	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche n-ZnSiP ₂ .	59
III.25	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche n-ZnSiP ₂ .	59
III.26	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche n p-ZnSiP ₂ .	60
III.27	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche p-ZnSiP ₂ .	61
III.28	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en n-Si.	62
III.29	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en n-Si.	62
III.30	Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en p-Si.	63
III.31	Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche	64

	en p-Si.	
III.32	Variation du rendement en fonction de la température.	65
III.33	Variation du facteur de forme en fonction de la température	66

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Propriétés physiques chimique et optique de la chalcoppyrite CuFeS_2	7
I.2	La formule chimique des composés ternaires de type <i>I-III-VI₂</i> et <i>II-IV-V₂</i> et leurs analogues binaires.	8
I.3	Les positions et les coordonnées des 8 atomes de la maille tétragonale de la structure chalcoppyrite 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 ($V = a^2 \cdot c/2$)	11
II. 1	Le spectre de rayonnement solaire extraterrestre en énergie.	22
II. 2	Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium.	28
III.1	Les paramètres électriques des matériaux des couches (n- ZnSiP_2 , p-Si)	39
III.2	Les paramètres électriques des matériaux des couches (n- ZnSiP_2 , p- ZnSiP_2 , n-Si, p-Si)	40
III.3	L'effet de l'épaisseur de la couche ZnSiP_2 sur les performances de la cellule photovoltaïque.	40
III.4	L'effet de l'épaisseur de la couche Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.	42
III.5	Les values optimal d'épaisseur de chaque Couche	44
III.6	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.	44
III.7	l'effet de dopages de la couche n- ZnSiP_2 sur les performances de la cellule photovoltaïque	45
III.8	l'effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque	46
III.9	Valeurs des dopages optimales de chaque couche.	48
III.10	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales	48
III.11	Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.	48
III.12	L'effet de l'épaisseur de la couche n- ZnSiP_2 sur les performances de la cellule photovoltaïque	50
III.13	L'effet de l'épaisseur de la couche p ZnSiP_2 sur les performances de la cellule photovoltaïque	52

III.14	L'effet de l'épaisseur de la couche n-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque	54
III.15	L'effet de l'épaisseur de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque	56
III.16	Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.	58
III.17	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	58
III.18	l'effet de dopages de la couche n- $ZnSiP_2$ sur les performances de la cellule photovoltaïque.	58
III.19	l'effet de dopages de la couche p- $ZnSiP_2$ sur les performances de la cellule photovoltaïque.	60
III.20	l'effet de dopages de la couche n-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.	61
III.21	l'effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.	63
III.22	Valeurs des dopages optimales de chaque couche.	64
	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales	64
III.23	Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.	65

Introduction générale

Introduction générale

Pendant les dernières décennies, une croissance de la consommation mondiale de l'énergie a été observée, en proportion du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, Cependant, la plupart de l'énergie est produite par les combustibles fossiles et notamment le carbone, le pétrole et le gaz naturel dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Donc nous devons développer et utiliser les sources d'énergies renouvelables et non polluantes.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on trouve, la filière photovoltaïque qui s'avère l'une des plus prometteuses, mais la principale limitation du développement de cette filière est son prix relativement élevé comparé aux sources conventionnelles. Récemment, les recherches dans le domaine photovoltaïque se portent principalement sur deux axes. Le premier, concerne le développement de cellules photovoltaïques à très haut rendement de conversion. Le second axe de recherche a pour objectif le développement de procédés et matériaux nouveaux en vue de la fabrication de cellules photovoltaïques à bas coût [1]. Le marché photovoltaïque est dominé par les technologies à base de silicium cristallin. En 2012, elles représentent 90 % de la part de marché [1]. On distingue deux grandes familles de cellules selon la nature de la plaquette de silicium, monocristalline ou poly-cristalline, pour lesquels les rendements record sont égaux à 25 et 20.4 %, respectivement [2] Les modules traditionnels ont une efficacité de conversion moyenne d'environ 15%. Ces technologies éprouvées ont un coût de fabrication en constante diminution, mais ce type de module ne peut pas utiliser le spectre total du soleil comme le montre la (Figure. I.1) où la couleur rouge représente ce qui peut être utilisé à partir du spectre solaire et c'est un petit pourcentage comme indiqué. Une grande quantité d'énergie solaire n'est pas exploitée.

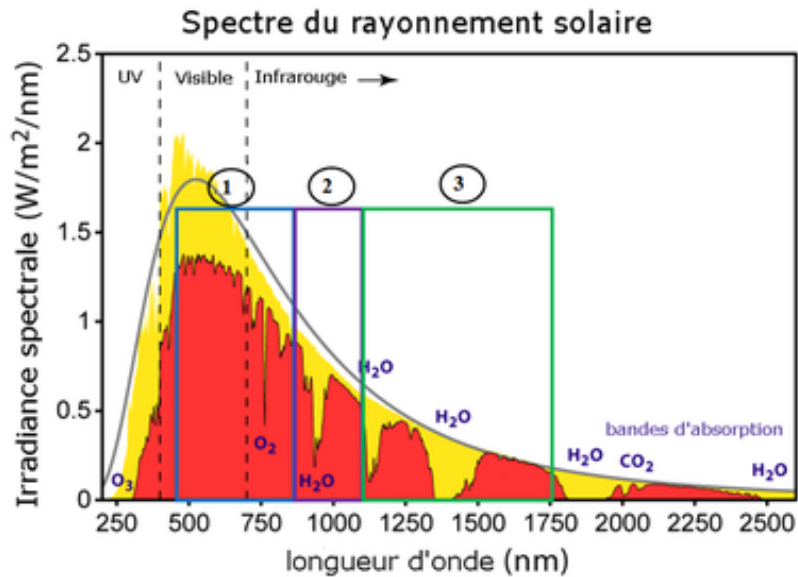


Figure. I.1.Analyse spectrale du rayonnement solaire [1].

Par conséquent, certains matériaux semi-conducteurs sont en cours de développement pour remplacer le silicium, et ils ne nécessitent que quelques microns d'épaisseur (contre environ 200 micromètres pour le silicium) pour absorber tous les photons de la lumière incidente [3]. Des techniques de synthèse moins énergivores peuvent également être utilisées, permettant une réduction significative des coûts de production par rapport au silicium cristallin. [3].

La recherche de nouveaux matériaux aux propriétés physico-chimiques spécifiques est un grand défi dans l'industrie d'aujourd'hui, donc avant d'utiliser des matériaux dans l'industrie, il faut s'assurer de la qualité de leurs propriétés physiques et chimiques. Cependant, la compréhension de ces propriétés d'une substance nécessite des connaissances de base de sa structure, de sa stabilité de phase et de ses diverses propriétés, mécaniques, élastiques, électrothermiques, magnétiques et en particulier les propriétés photoélectriques [2]. Les chalcopyrites sont des matériaux prometteurs en électronique, Optoélectronique et photonique en raison de leurs excellentes propriétés électroniques et Optique linéaire et non linéaire. Parmi ces matériaux semi-conducteurs, on trouve Famille ZnSiP₂ largement utilisée ces dernières années dans la recherche et

Développement de nouvelles cellules solaires. Cellules solaires basées sur ce le matériau atteint des rendements très élevés, il est très stable et la vie est trop haute. Il est considéré comme une classe importante de matériaux grâce à la modification du module de réseau, de

l'écart énergétique, de l'indice de réfraction, des constantes optiques et d'autres paramètres physiques [4].

Plusieurs publications attestent aujourd'hui que l'introduction de nanostructures de silicium dans le secteur photovoltaïque peut créer la capacité de franchir un certain nombre de limites. Dans ce domaine, les propriétés spécifiques que présentent ces nanocorps peuvent être exploitées de différentes manières. - Superposition de plusieurs cellules (utilisant différentes gammes d'énergie) - Concentration de cellules - Utilisation de photons à basse énergie qui ne sont normalement pas absorbés par la cellule - Les cellules porteuses chaudes produisent plus de paires d'électrons / trous pour des énergies plus élevées dans la plage interdite - Conversion de photons pour ajuster le spectre de la lumière du soleil aux propriétés des semi-conducteurs [4].

Références

[1]	Systèmes photovoltaïques fabrication et impact environnemental
[2]	Thomas Mambrini "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", (2014).
[3]	D. P. Hohm and M. E. Ropp, Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed, in Proc. Photovoltaic Specialist Conference, pp. 1699–1702, 2000
[4]	N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, Optimized one-cycle control in photovoltaic grid connected applications, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 42, pp. 954– 972, 2006

Chapitre I

*Généralité sur les martiales
chalcopyrites*

I.1.Introduction

I.1.1.les chalcopyrites

La chalcopyrite est dérivée des mots grecs «chalkos», le cuivre et les «pyrites» frappent le feu et elle est également connue sous le nom de pyrite de cuivre (Szymanowski, 1996)[1].

La chalcopyrite est un minéral jaune laiton avec une composition chimique de CuFeS_2 composée de sulfure double (35 %), de cuivre (34,5 %) et de fer (30,5 %). Il se produit dans la plupart des gisements de sulfures à travers le monde et est le minerai de cuivre le plus important depuis des milliers d'années.

La surface de la chalcopyrite perd son éclat métallique et sa couleur jaune-laiton lors du vieillissement. Il se ternit en une couleur terne, gris-vert, mais en présence d'acides, le ternissement peut développer une irisation rouge à bleu à violet [2].

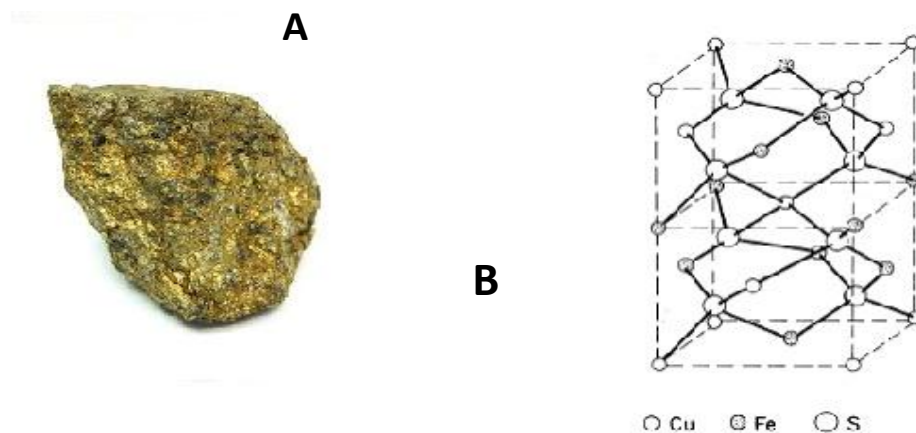


Figure I.2.A. Un spécimen de chalcopyrite dans la nature [2] **B.** La structure cristalline du CuFeS_2 [3].

Dans ce chapitre, nous intéressons les composés ternaires plus précisément les éléments II-IV-V₂, leur structure cristalline et quelques propriétés intéressantes (électroniques et optiques).

I.2. La structure chalcopyrite

I.2.1. Les chalcopyrites de type I-III-VI₂ et II-IV-V₂

Tout récemment, une grande attention a été accordée à l'étude des propriétés électroniques et optiques des composés ternaires de la formule chimique : $A^{N-I}B^{N+I}C_2^{8-N}$ (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 Zinc blende de type $B^N C^{8-N}$ (N=3, 2) (tableau I.1). Les composés $A^{N-I}B^{N+I}C_2^{8-N}$ ont de nombreuses propriétés physiques intéressantes qui promettent d'être utile pour les applications de la technologie des semi-conducteurs [4].

Tableau.I.2. La formule chimique des composés ternaires de type I-III-VI₂ et II-IV-V₂ et leurs analogues binaires.

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

Les composés chalcopyrites ABC_2 de la structure (I-III-VI₂ avec des anions de type *chalcogenide*) et (II-IV-V₂ avec des anions de type *pnictide*) font toujours l'objet de nombreux travaux. Ils constituent une extension naturelle des composés de structure Zincblende (II-VI) et (III-V) dont ils découlent cristallographiquement (figure.I.1). Ils ont presque le même arrangement des atomes anions mais diffèrent 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 zincblende. 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 [5,6]. 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).

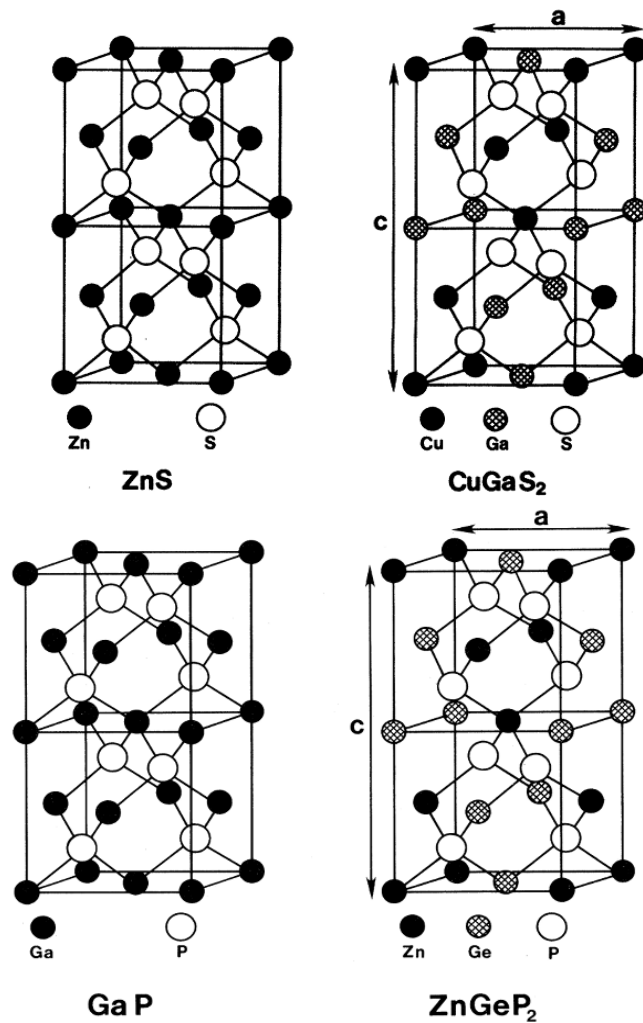


Figure.I.3. la structure zincblende (à gauche), et la structure chalcopyrite (à droite) [7-8].

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 (figures.I.7) [5,9].

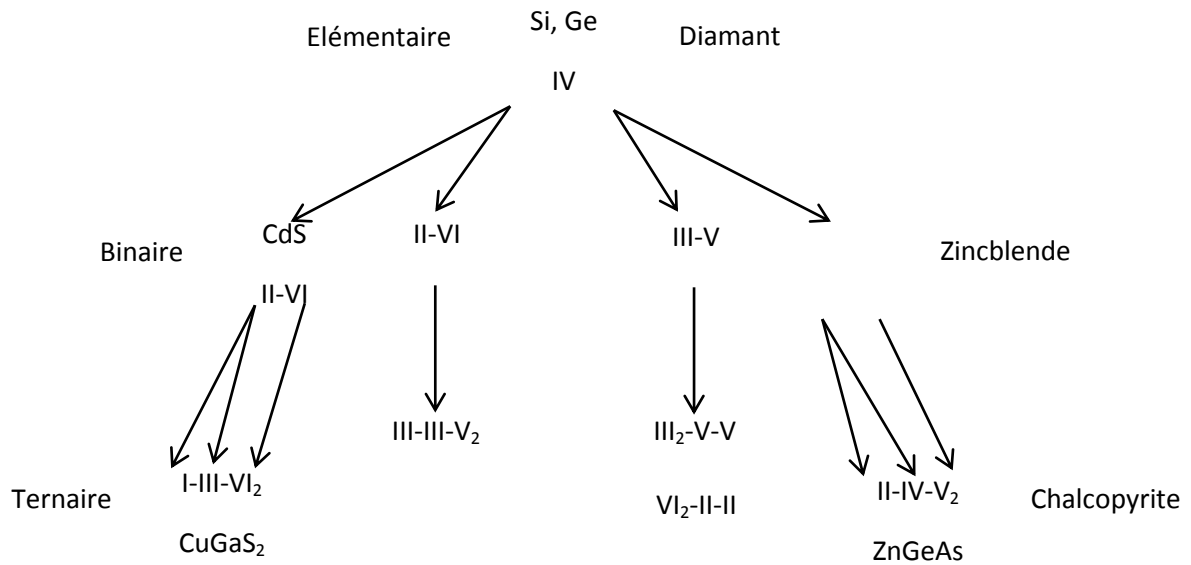


Figure.I.4. Illustration schématique de la formation de composés $I\text{-III-VI}_2$ et $II\text{-IV-V}_2$ à partir d'éléments du Groupe IV (Diagramme de substitution cationique) [2, 10]

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) [2]. 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) [6]. 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 [6].

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 [11,12].

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

Tableau.I.3. 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* [12].

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 ($V=a^2.c/2$) [12].

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

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 [4].

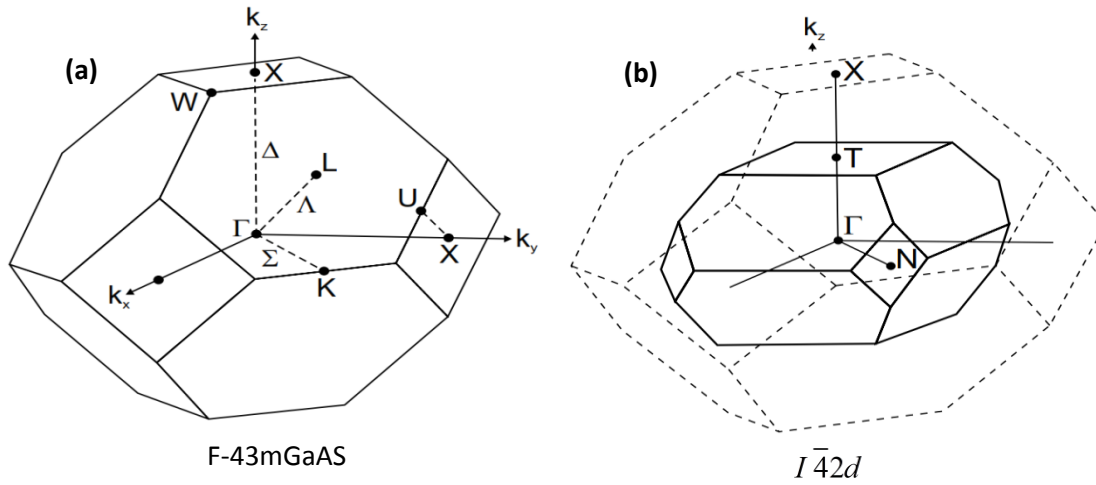


Figure.I.5. la représentation graphique de la première zone de Brillouin pour les deux structures (a) : zincblende et (b) : chalcopyrite [1].

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 [2], 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 [5]. 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 τ , tel que [5] :

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

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

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

Pour une chalcopyrite idéale, $u = 1/4$, $c/a = 2$, $\tau = 0$ et $\eta = 1$ [6]. Les deux atomes A et B sont coordonnées par un tétraèdre d'atomes X . Les deux distances les plus importantes d_{AX} et

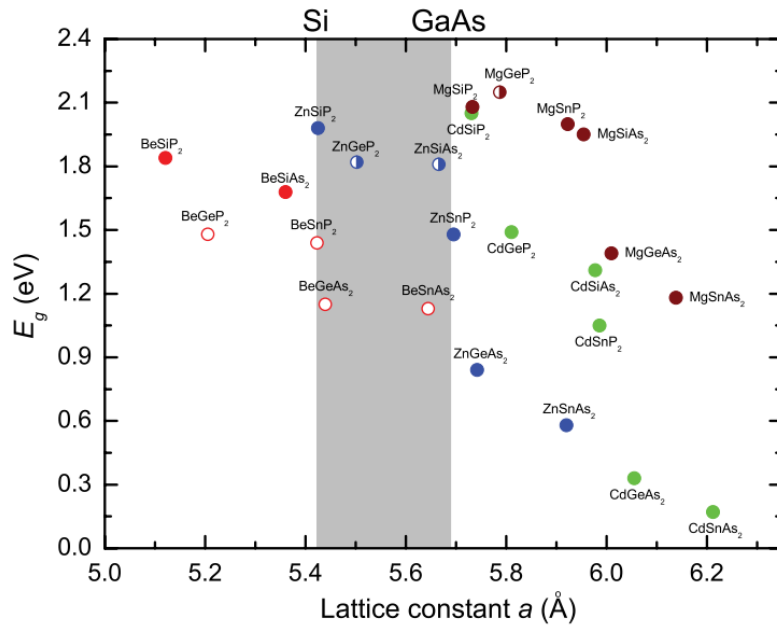


Figure. I.8. l'énergie de gap fondamental versus le paramètre de maille pour quelques chalcopyrites de type $II-IV-V_2$ [14].

I.3. Le ternaire ZnSiP₂

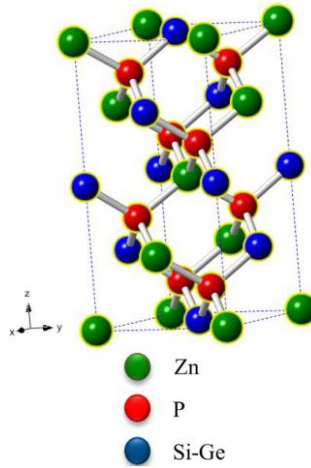


Figure. I.9.La structure cristalline de ZnSiP₂ [10].

I.3.1. Les propriétés optique de ternaire ZnSiP₂

Des expériences de photoluminescence ont montré que le ZnSiP₂ a une longue durée de vie de porteur minoritaire - une condition préalable à un bon matériau PV - et qu'il émet de la lumière via des transitions peu profondes de paires donneur-accepteur. L'émission optique et l'absence de pièges profonds sont extrêmement prometteuses pour les applications PV [15].

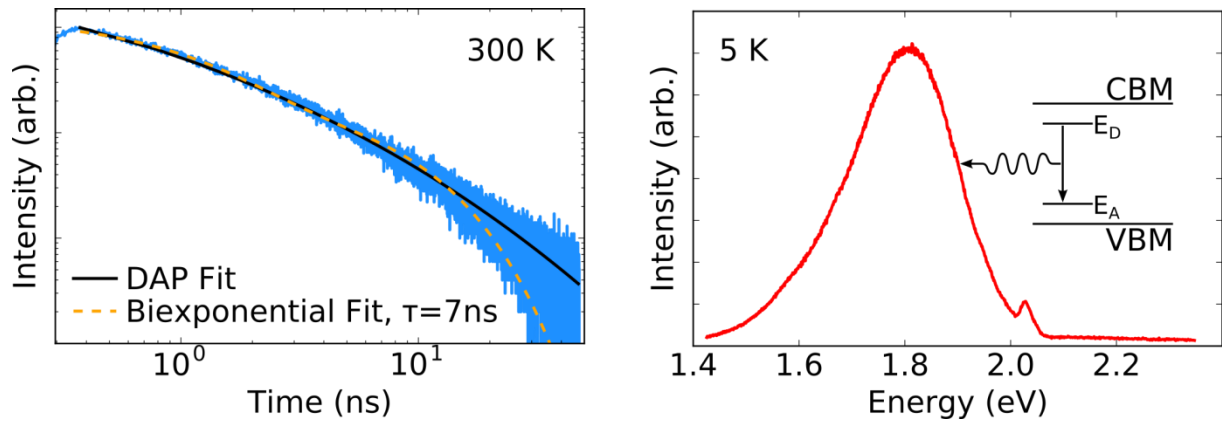


Figure. I.10. Spectre de photoluminescence de ZnSiP_2 [15]

I.4. Conclusion

Les chalcopyrites sont des matériaux prometteurs dans des plusieurs domaines et applications et surtout en cellules photovoltaïques, soit dans les cellules solaires a base des couches minces (*Thin film Solarcells*) comme le cas de Cu-III-VI_2 , ou bien comme des matériaux absorbeurs dans des cellules solaires multijonction (*MJ solarcells*) concernant la famille de III-III-V_2 .

I.5. Références

[1]	Marius Grundmann, (Livre), ‘‘the Physics of Semiconductors, an Introduction Including Devices and Nanophysics’’, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
[2]	Wernicke et al, ‘‘Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications’’, (livre), Pergamon press, 1975.
[3]	David L. Jones, ‘‘ The Leaching of Chalcopyrite’’, Thèse de doctorat, University of British Columbia, Vancouver 8, Canada, (1974).
[4]	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
[5]	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.
[6]	Chahed Abbes, ‘‘Etude Ab-initio des propriétés structurales, électroniques et optiques des semi-conducteurs chalcopyrites $AgXY_2$ (X=Al, Ga, In et Y=S, Se, Te), thèse de doctorat d’état en physique, université de Sidi Bel Abbes, 2006
[7]	WanxiangFeng, Jun Ding, Di Xiao, and Yugui Yao, Phys. Rev. Lett. 106, 016402 – 2011
[8]	J. E. Jaffe and Alex Zunger, Physical Review B, Vol 30, N° 2 – p741, (1984).
[9]	Olivier Brisson, ‘‘Elaboration et caractérisation de monocristaux de $AgGaX_2$ (X = S, 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, (199
[10]	BENNCER Hamza et al, ‘First principles investigation of optoelectronic properties of $ZnXP_2$ (X = Si, Ge) lattice matched with silicon for tandem solar cells applications using the mBJ exchange potential ‘’, (Article), Volume 159, April 2018, Pages 229-244.
[11]	Aaron Martinez, Elisa Miller, Pauls Stradins, Andrew Norman, Eric Toberer, Adele Tamboli NREL is a national laboratory of the U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC
[12]	J. E. Jaffe and Alex Zunger, Physical Review B, Vol 28, N° 10, p5822-5847,(1983).
[13]	J. E. Jaffe and Alex Zunger, Physical Review B, Vol 29, N° 4, p1882-1906, (1984).
[14]	V. L. Shaposhnikov et al, Physical Review B 85, 205201 (2012).
[15]	www.nrel.gov (National Renewable Energy Laboratory- USA)

Chapitre II

Généralités

Sur les cellules

photovoltaïques

II.1.Introduction

La technologie photovoltaïque, qui permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, est considérée comme l'une des voies les plus prometteuses pour le développement de l'énergie propre et renouvelable. Depuis le début du siècle, l'industrie photovoltaïque a bénéficié d'une croissance exponentielle, pour atteindre une production supérieure à 23 GWc en 2010 [1]. Selon le dernier rapport de « GTM Research » (Greentech Media) sur le marché solaire mondial pour le troisième trimestre 2016, la demande mondiale atteindra cette année un nouveau record à 73 gigawatt (GW) en croissance de 33 % par rapport à l'année précédente, avec une majorité de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité [1].

Les systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau sont également promis à un avenir radieux. Les systèmes PV isolés permettent, d'alimenter en énergie électrique des zones qui ne sont pas desservies par le réseau. D'autre part, les composants de récupération d'énergie par effet photovoltaïque, pour l'alimentation de dispositifs électroniques autonomes, constituent un marché en plein expansion qui représentera plusieurs milliards de dollars à l'horizon 2020, à la fois pour des applications grand public (électronique nomade) mais également professionnelles (capteurs pour le bâtiment et la surveillance des structures). [1]. En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin [2]. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique [2].

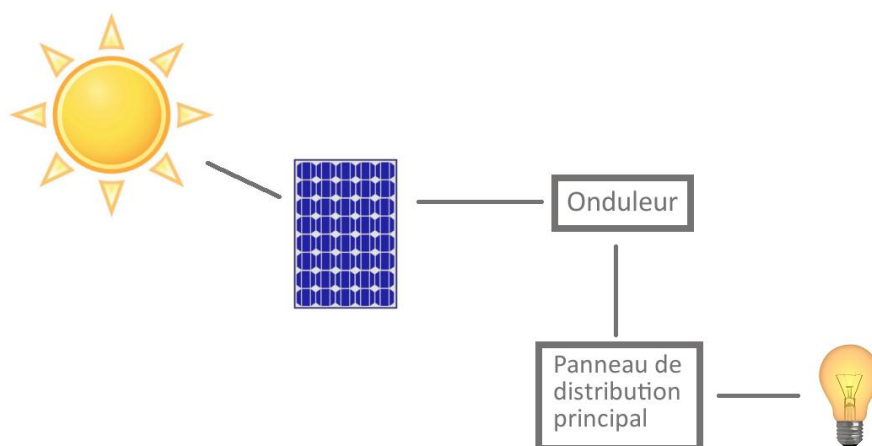


Figure .II 1. Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [3].

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

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bandes [4] :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 [4] cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m^2 à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu.[4]

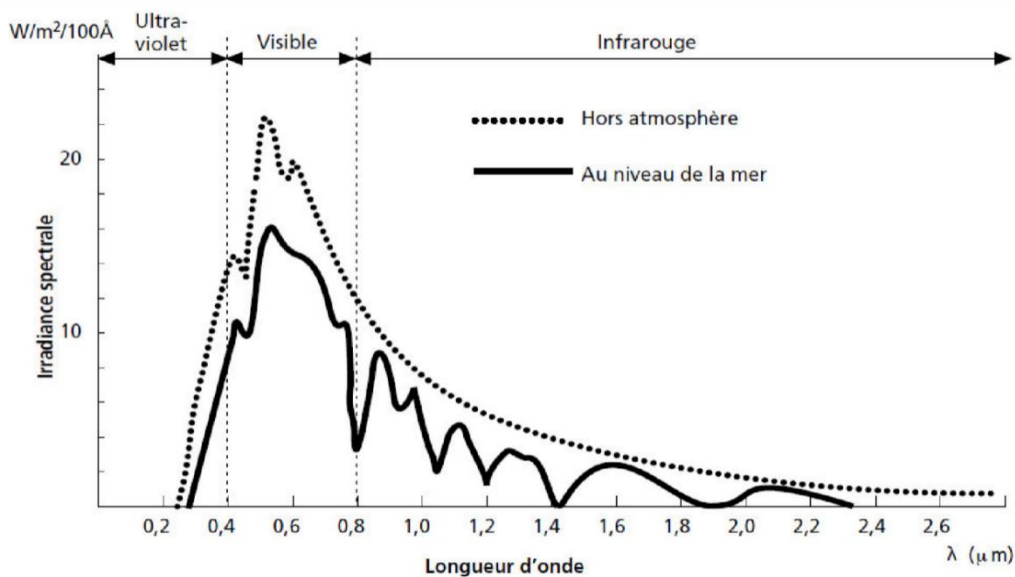


Figure .II 2. Analyse spectrale du rayonnement solaire. [5]

-La distribution du spectre de rayonnement extraterrestre en énergie est répartie comme le suivant. Tableau. II. 1. [6]

Tableau. II. 1. Le spectre de rayonnement solaire extraterrestre en énergie.

ultraviolet <i>UV</i>	$0.20 \mu\text{m} < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
Visible	$0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48.0%
infrarouge <i>IR</i>	$0.78 \mu\text{m} < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6%

a) La cellule photovoltaïque

La figure. II.3 présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique I(V) de la cellule. La première est la résistance série *Rs*, cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension *V* aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt *Rsh* qui correspondre aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant *I_{ph}* sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge. L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances *Rs* et *Rsh* s'écrit donc [7] :

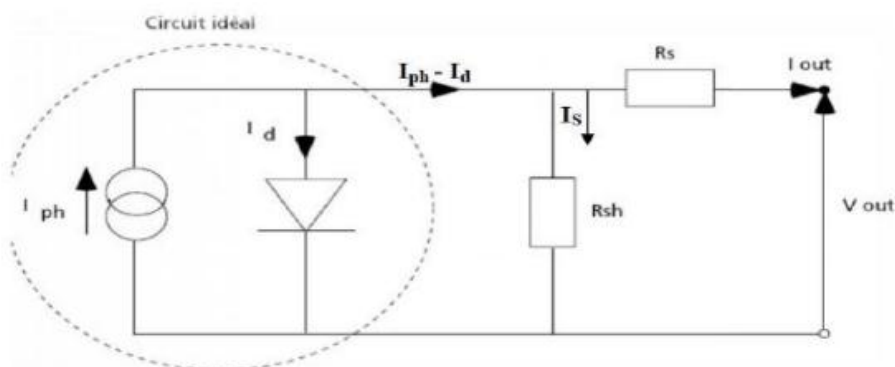


Figure .II 3 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.

V : tension

$K=1.38 \cdot 10^{-23}$: courant de Boltzmann.

$q=1.602 \cdot 10^{-19}$: charge de l'électron.

T : température absolue en °K.

I_s : Courant de saturation de la diode.

I_{ph} : photo courant.

I_d : Courant de la diode.

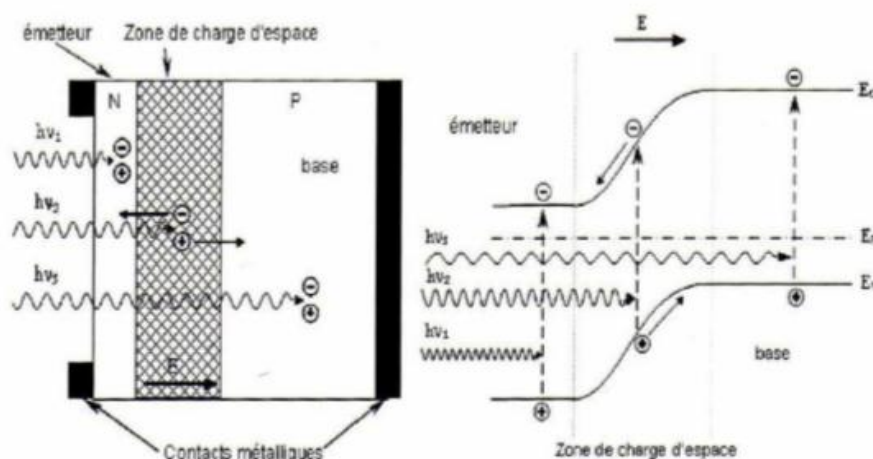
II.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photovoltaïque. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

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

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

Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure (II 4) :



(a) (b)

Figure .II 4. Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

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

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

-Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photo générés vont être entraînés par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous). Ce déplacement de la photo porteuse donne naissance à un photo courant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo courant total I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [8].

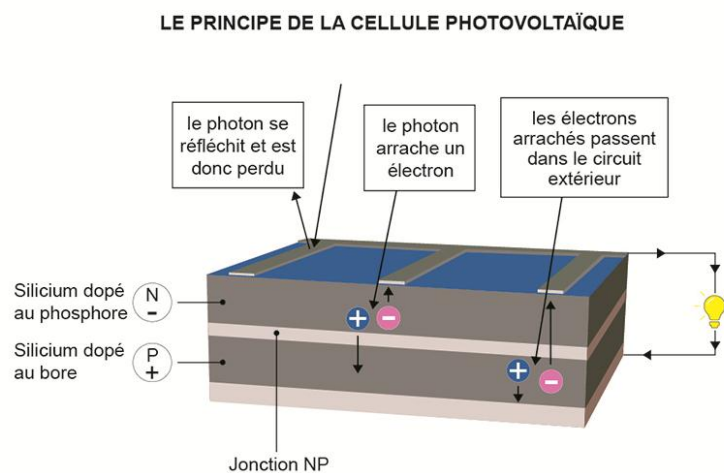


Figure.II.5. Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [9].

a) La jonction P-N :

Lorsque les deux zones sont misent en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forment des paires électron-trou neutre, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

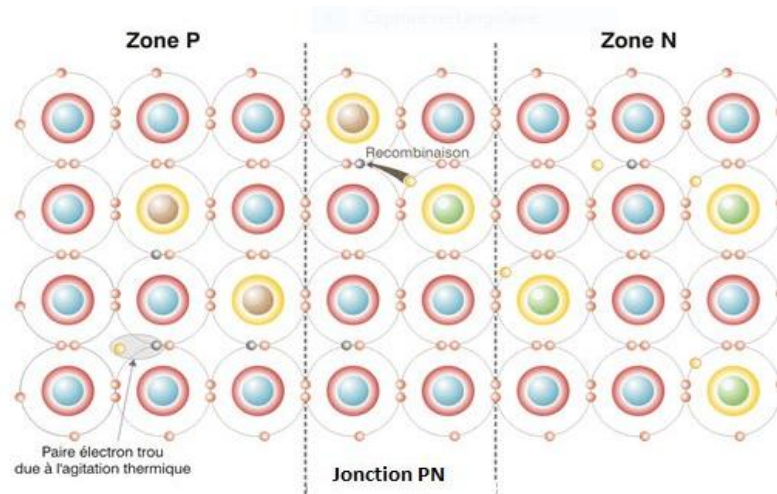


Figure II.6. Jonction PN à l'équilibre.

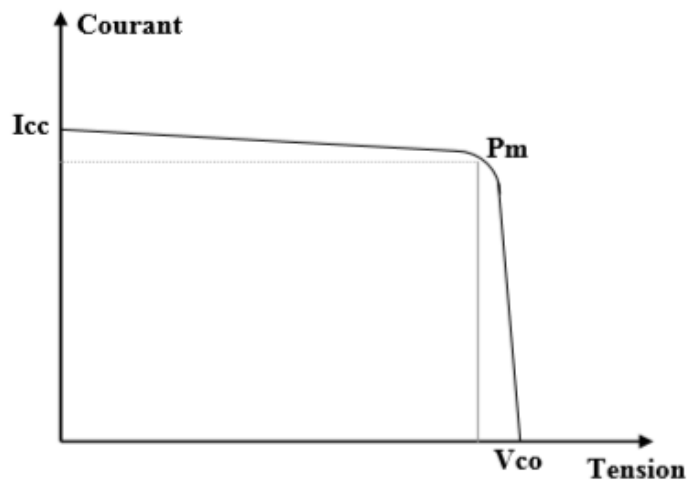


Figure II.7. Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque. [10]

A partir de la caractéristique I(V) (figure II.7) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$).

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$).

II.4. Matériaux et technologies photovoltaïques

Depuis le début du siècle l'énergie solaire photovoltaïque (PV) enregistre l'un des taux de croissance les plus élevés dans le monde. Cette croissance est due en partie aux avancées technologiques enregistrées dans la production des cellules photovoltaïques sur ses différentes filières.

En effet, depuis des années nous assistons à des records de rendement dans toutes les filières PV. La traditionnelle carte publiée par NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) sur les records annuels, en laboratoire, des rendements des cellules photovoltaïques montre que le photovoltaïque gardera encore une bonne tendance de croissance sur les années à venir (Figure II.8) [11].

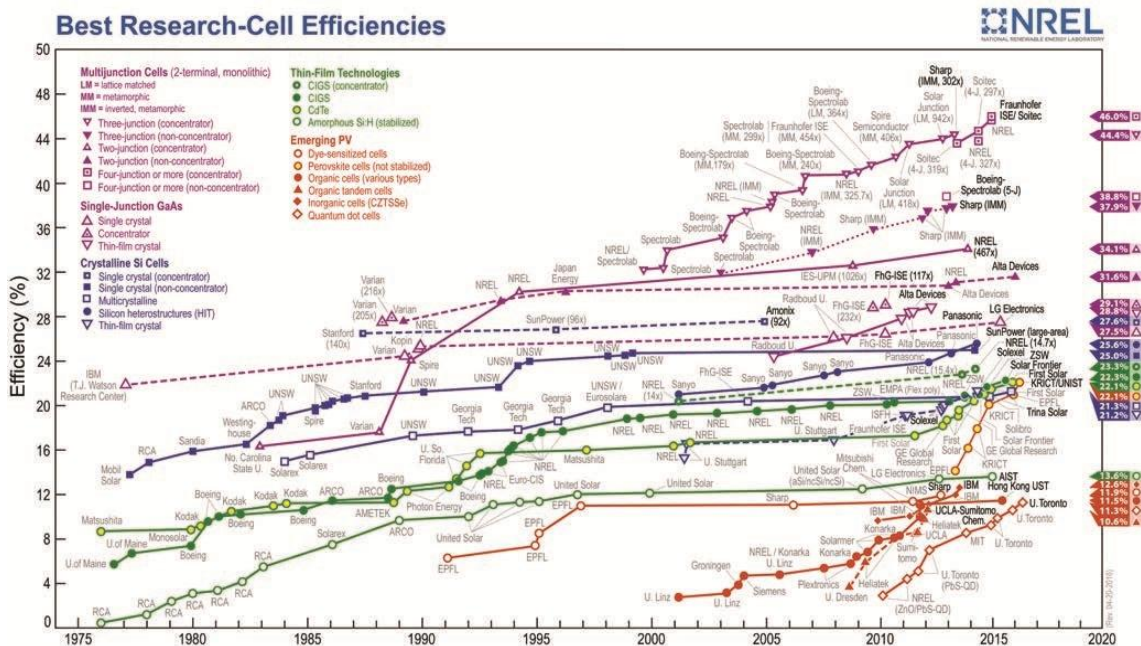


Figure II.8. l'évolution des meilleurs rendements des cellules photovoltaïques en laboratoire [11].

Une grande avancée a été enregistrée en 2016 sur les cellules en silicium cristallin (c-Si) hétérojonctions. En effet, les laboratoires NREL et le CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique) ont développé en collaboration une nouvelle cellule InGaP/Si (Indium Gallium Phosphide) avec un rendement de 29,8%, un record mondial qui dépasse même la

limite théorique (29,4%) des cellules PV à base de silicium cristallin [11]. Mais cette évolution ne peut pas cacher la stagnation de l'évolution du rendement des cellules à base de c-Si en mono-jonction. Son évolution est très faible sur les dix dernières années, notamment pour le monocristallin (mono-Si) et le multi-cristallin (mc-Si) les plus commercialisés dans le monde. Tandis que d'autres filières présentent une évolution très importante. De 2013 à 2016 le rendement des cellules CdTe est passé de 17% à 22,1% et les cellules pérovskites sont passées de 13% à 22,1% sur la même période [11].

Cependant, sur le plan commercial le silicium cristallin reste curieusement dominant sur le marché photovoltaïque. Il a même renforcé sa position avec 93% de la production mondiale en 2015 ; un niveau qu'il a perdu depuis 2004 au profit des cellules en couches minces (Thin-Film Technologies) pour descendre jusqu'à 83% de la production mondiale en 2009 avant de repartir à la hausse (figure II.9) [12].

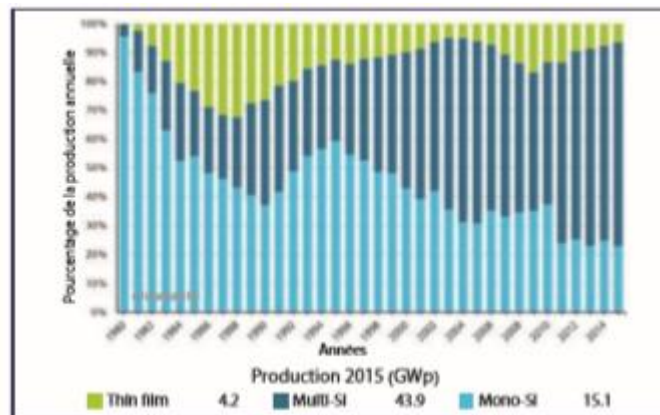


Figure.II.9. Répartition de la production mondiale des modules PV par technologies [12].

Cette dominance s'explique, d'une part, par l'évolution remarquable du silicium multi-cristallin il a représenté, à lui seul, environ 70% de la production mondiale en 2015, d'autre part, par le recul du silicium amorphe, où sa dégradation dans le temps a grandement pénalisé sa position sur le marché. La figure II.10 montre l'évolution des parts de marché des technologies couches minces. [15]

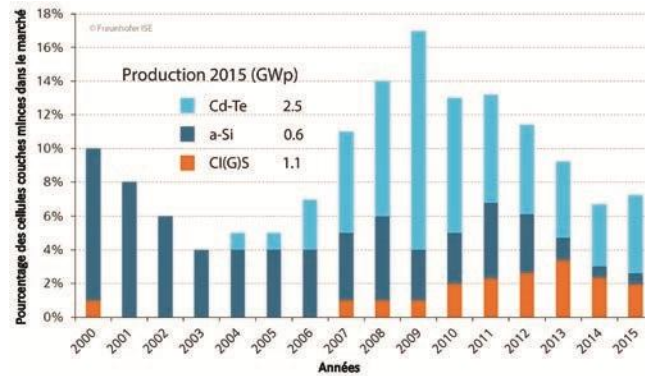


Figure.II.10. Répartition de la production mondiale des modules PV par technologies [12]

Tableau. II. 2. Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium [13]

Matériaux utilisés

<u>La première génération</u>	Les wafers de silicium monocristal (c -Si) ou bien multicristallin (mc-Si).
<u>La deuxième génération</u> Couches minces	Le silicium amorphe (a-Si). Le silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$). Le tellure de cadmium (CdTe). Le Cuivre-gallium-indium-diséléniure (CIGS) et leurs alliages.
<u>La troisième génération</u>	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.
<u>La quatrième génération</u>	Hybride - cristaux inorganiques dans une matrice de polymère.

Les matériaux optoélectroniques sont généralement des semi-conducteurs qui sont liés de manière covalente avec une coordination tétraédrique (c'est-à-dire des matériaux des groupes IV, II-VI et III-V). Alors que les analogues ternaires II-VI tels que I-III-VI₂ (par exemple CuInSe₂) ont été largement étudiés, il est surprenant que les analogues III-V tels que II-IV-V₂ (par exemple ZnSiP₂) aient reçu moins d'attention pour les dispositifs optoélectroniques.

montre que les composés de chalcopyrite II-IV-V₂ couvrent une large gamme de bandes interdites, de 0,4 eV (CdSnAs₂) à 2,5 eV (MgSnP₂), et ont des constantes de réseau compatibles avec de nombreux semi-conducteurs unaires et binaires. De nombreux composés II-IV-V₂ sont formés à partir d'éléments comparativement peu coûteux et non toxiques (par exemple, Zn, Mg, Si, Sn, N, P), ce qui les rend particulièrement attrayants pour les applications nécessitant un déploiement à grande échelle comme le photovoltaïque (PV). Les matériaux à large bande interdite II-IV-V₂ n'ont fait l'objet d'aucune enquête, malgré des opportunités significatives pour Applications photovoltaïques en tandem, diodes électroluminescentes, circuits photoniques et laser. Dans le domaine de la PV en tandem, il a été difficile de trouver des matériaux à large bande interdite adaptés aux tandems, et en particulier ceux compatibles avec Si. Ainsi, le II- Les composés ZnSiP₂ et ZnGeP₂ sont d'un grand intérêt en tant que matériaux de cellules supérieures épitaxiales sur une cellule inférieure en silicium. La mise en œuvre de ces matériaux sous forme de cellules supérieures peu coûteuses et abondantes en terre sur Si tire parti de la domination du Si PV (> 90% de part de marché). Les travaux présentés ici se concentrent sur la caractérisation PV pertinente du ZnSiP₂. [14]

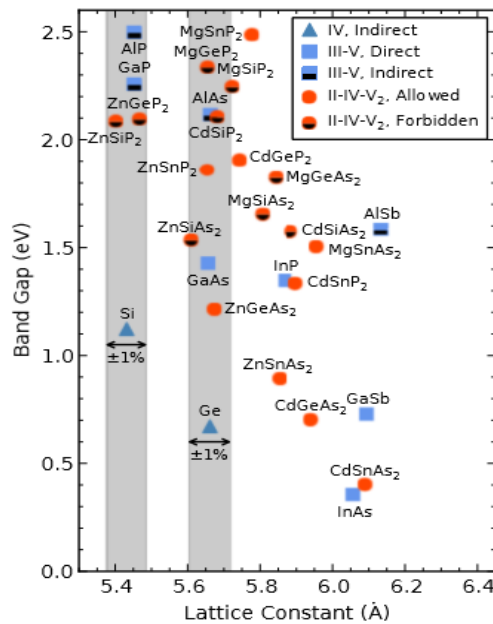


Figure.II.11. Bandes interdites théoriquement déterminées en fonction des constantes de réseau pour certaines des chalcopyrites II-IV-V₂ les plus abondantes en terre.

Les matériaux III-V ainsi que Si et Ge du groupe IV sont également représentés. Les barres verticales grises recouvrant Si et Ge mettent en évidence les matériaux avec une constante de réseau similaire, à $\pm 1\%$. [14]

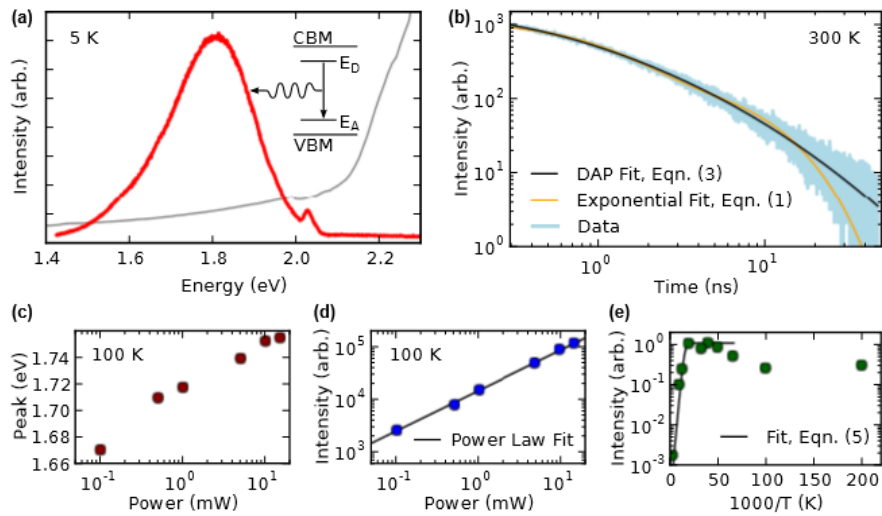


Figure.II.12. Spectre de photoluminescence de ZnSiP_2 (rouge) et bord d'absorption (gris) [14].

La mise en œuvre d'un matériau optiquement actif sur du silicium a été un défi technologique persistant. Pour tandem photovoltaïque utilisant une cellule inférieure en Si, ainsi que pour d'autres applications optoélectroniques, il existe depuis longtemps besoin de matériaux optiquement actifs à large bande interdite pouvant être intégrés au Si. ZnSiP_2 est une large bande interdite stable (2,1 eV) matériau à treillis apparié au silicium et composé d'éléments bon marché. C'est également un matériau résistant aux défauts. Ici, nous rapportons le premier appareil photovoltaïque ZnSiP_2 . Le ZnSiP_2 a une excellente photo réponse et tension de circuit ouvert élevée de 1,3 V, mesurée dans une configuration photo électrochimique. Le décalage haute tension et faible bande interdite-tension est comparable à des matériaux III-V à large bande interdite beaucoup plus matures montrant que les défauts intrinsèques du ZnSiP_2 sont peu profonds et que la durée de vie des porteurs minoritaires est de 7 ns. Celles-ci des résultats favorables encouragent le développement du ZnSiP_2 et des matériaux associés en tant que matériaux absorbants photovoltaïques. [14]

II.5. 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 II-IV-V₂ qui sont prometteuses dans ce sens. Les avancements des travaux de recherche permettent d'améliorer, d'année en année, les technologies existantes. Pour le chapitre suivant on donne une description sur le logiciel utilisé et les résultats obtenir par la simulation numérique avec leurs interprétations.

II.6. Référence :

[1]	Z. Benmohamed et al, « Influence des Couches Antireflets sur les Performances d'une Cellule Solaire au Silicium Multicristallin », Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 43-46.
[2]	http://users.polytech.unice.fr/~pmasson/Enseignement/Cours%20de%20physique%20des%20SC%20-%20Poly%20-%20BAC+3.pdf
[3]	https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaïque.html
[4]	Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, BocarSadasy, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
[5]	R. Bernard; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion
[6]	M. LIPINSKI, P. PANEK et Al; Double pouroussilicom layer ou milticrystalline si for photovoltaic application; solar.En.Mot.s.sol.celles. vol.72, pp-271-276- 2002
[7]	S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
[8]	H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990
[9]	https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche
[10]	Henry Mathieu «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, cours», (livre), 5eme édition, Dunod,(2001).
[11]	http://www.nrel.gov/
[12]	Photovoltaics report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2016.
[13]	BENNACER Hamza, « Contribution au développement des nouveau cellules solaires à base des semi-conducteurs composés, Thèse de doctorat, UDL-Sidi bel abbesse, (Déc-2015).
[14]	Aaron Martinez, Elisa Miller, Pauls Stradins, Andrew Norman, Eric Toberer, Adele Tamboli NREL is a national laboratory of the U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC.

Chapitre III
Résultats de simulation et
discussions

III.1.Introduction

Les chercheurs se sont tournés vers les simulations en raison des coûts élevés des expériences [1]. La simulation numérique est devenue nécessaire pour tous les domaines de recherche, en particulier la recherche technique et technologique, car la simulation est devenue un élément important et nécessaire de tout travail en raison de ses avantages, car elle permet au chercheur de concevoir ou d'étudier plus facilement, c'est-à-dire de faire une expérience exactement comme il le fait dans la réalité. Cela l'aide à raccourcir le temps et à faciliter le travail, ainsi qu'à fournir tous ou (la plupart) les éléments nécessaires à la recherche, des outils et produits chimiques et des mini-programmes faciles à appliquer. Les programmes de simulation nous permettent également de sauvegarder le travail et de le modifier sans avoir à recommencer le au début. Il permet aussi de le partager avec d'autres chercheurs.

Les programmes de simulation nous donnent cette opportunité d'étudier et d'interpréter les résultats obtenus, Afin d'améliorer la structure et les différents composants des cellules pour leurs bonnes performances. Parmi les programmes disponibles, on trouve l'AMPS-1D [2]. Dans ce chapitre, nous présentons l'étude les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base du ternaire $ZnSiP_2$. Nous avons étudié l'effet de différents paramètres de chacune des couches de cellules afin d'améliorer rendement de conversion η (%), la densité de courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF . Nous allons obtenir tout cela du simulateur *AMPS-1D* pour générer les résultats des propriétés électriques des cellules étudiées et ses discussions.

III.2.Présentation du simulateur *AMPS-1D*

III.2.1.Généralité

L'AMPS-1D (*analysais of Microelectronic and Photonic Structures in one Dimension*) est notre logiciel de simulation pour l'analyse et la conception des phénomènes de transport en microélectronique et dans les structures photonique. Sa capacité de mener tout type de défaut, l'énergie du gap et la distribution spéciale, son incorporation de la recombinaison S-R-H et bande à bande, son incorporation des statique de *Boltzmann* et de *Fermi-Dirac*, sa capacité de définir les propriétés variables des matériaux, son traitement globale des contacts et sa capacité de manier le transport dans les dispositifs sous polarisation, sous éclairement ou les deux à la fois.

Il traite numériquement les trois équations du dispositif (l'équation de poisson, équation de continuité pour les trous libres et celle pour les électrons libres)[3].

Ce logiciel a été développé en 1997 par Professeur (*Stephen Fonashet*) à l'université de Pennsylvanie - USA). Ce logiciel a été développé sous plusieurs versions en UNIX ou bien sous Windows. Pour nous, on a choisi d'utiliser la dernière version (2012) sous Windows 7[4,5].

III.2.2.Fonctionnalité de simulateur wxAMPS

III.2.2.1.Interface

L'interface d'utilisateur principale (*Figure III.1*) est presque la même que la version décrite précédemment[6] à l'exception d'un Section "Paramètres" sous le bouton Exécuter, permettant aux utilisateurs d'échanger les modèles de tunnel et ajuster numérique paramètres. Dans la boîte de dialogue "Paramètres", les utilisateurs peuvent configurer limite supérieure des temps d'itération, la précision de convergence et la plage de serrage qui est les variables maximales changer en une itération. La variation des variables est bloquée Afin d'éviter la surestimation générée par le Méthode Newton.

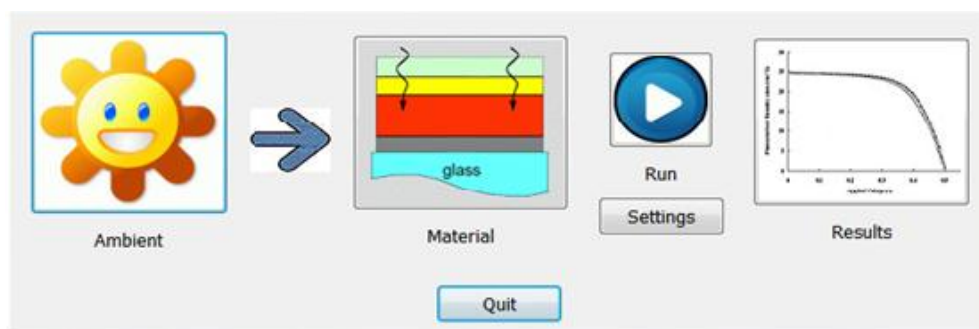


Figure. III.1.L'interface d'accueil de l'AMPS-1D.

Pour faire démarrer la simulation par AMPS-1D, trois types de paramètres sont Nécessaires :

III.2.2.2.Conditions environnementales

Dans l'interface des conditions environnementales on peut jouer sur la température et la lumière .On a fixé la température à 300 °K (température ambiante) avec le choix de l'obscurité ou l'éclairage pour examiner l'influence de ces paramètres sur les performances de la cellule PV. La figure (III.2) présente cette interface d'AMPS-1D.

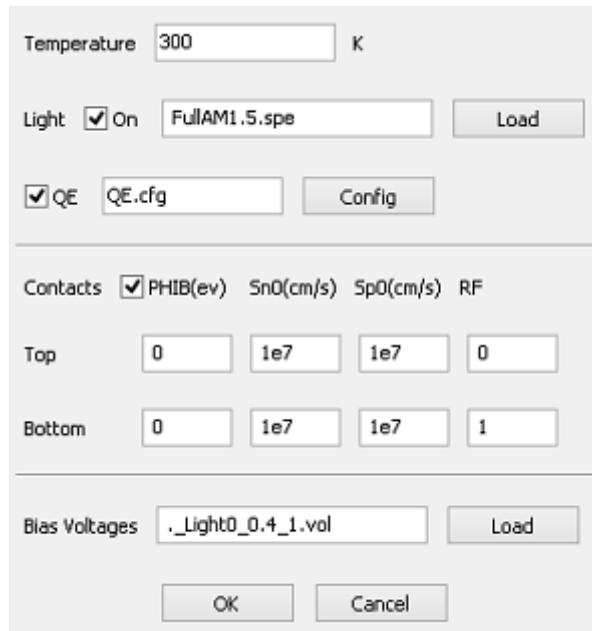


Figure. III.2.La fenêtre des conditions environnementale.

III.2.2. 3.Paramètres de modélisation

Les paramètres de modélisation sont : le type de mode de fonctionnement, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, la tension de polarisation pour laquelle la sortie (J-V) et (QE) devraient être générés [7, 8,9].

III.2.2.4.Propriétés générales des matériaux

Pour une simulation réussie, il faut fixer les propriétés physiques du matériau pour chaque couche de la structure (**ZnSiP₂** / **Si**), on mentionne l'épaisseur du matériau, les propriétés électriques (l'énergie de gap, la mobilité, l'affinité, dopage ...), les propriétés optiques et les défauts. L'interface des propriétés du matériau permet de découvrir l'effet de l'épaisseur et le dopage pour chaque couche sur les caractéristiques de la cellule pour obtenir un rendement maximale à travers les modifications dans cette interface.

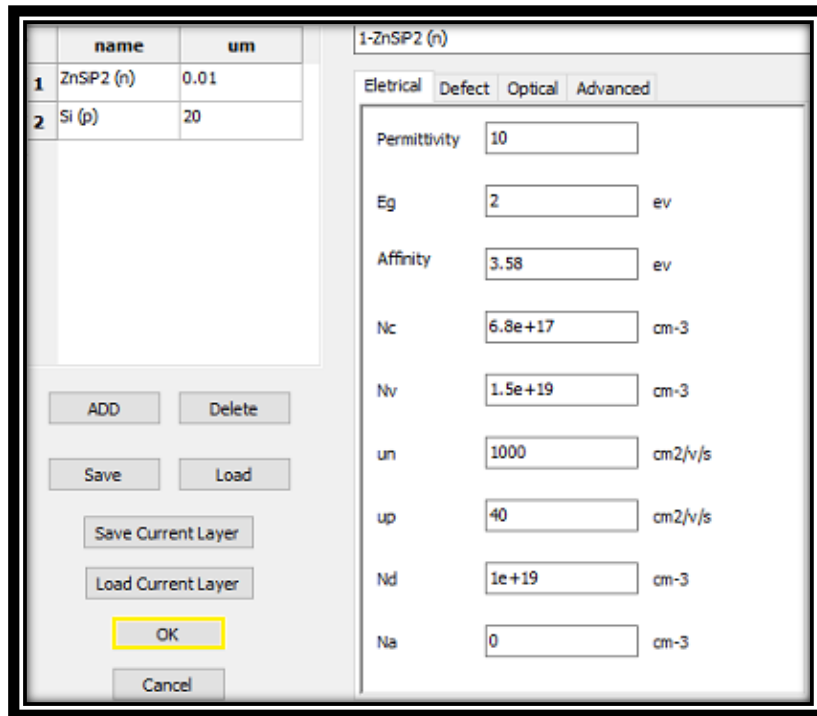


Figure III.3. La fenêtre des paramètres électriques d'entrée.

III.3. La structure de la cellule étudiée

III.3.1. Etude de la première structure cellulaire (n-ZnSiP₂/ p-Si)

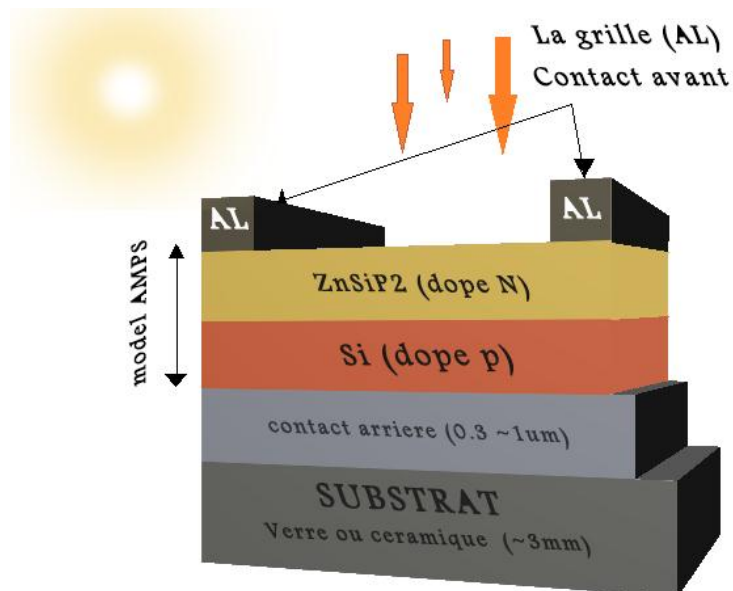


Figure III.4. Schéma simplifié de la cellule à base de (ZnSiP₂/Si).

Tableau III.1. Les paramètres électriques des matériaux des couches (n-ZnSiP₂, p-Si)

Couche / Propriété	n-ZnSiP ₂	n-Si
Permittivité diélectrique	10	11.7
Bande de gap (eV)	2	1.12
Affinité électronique (eV)	3.58	4.05
Densité des états effective dans la BC (N _c (cm ⁻³))	6.8e+17	2.8e19
Densité des états effective dans la BV (N _v (cm ⁻³))	1.5e+19	1.04e19
Mobilité d'électron μ _n (cm ² /V.s)	1000	125
Mobilité du trou μ _p (cm ² /V.s)	40	60
Densité du donneur N _d (cm ⁻³)	1e+19	0
Densité du donneur N _a (cm ⁻³)	0	1e+20

III.3.2. Etude de la deuxième structure cellulaire (n-ZnSiP₂/p-ZnSiP₂/n-Si/p-Si)

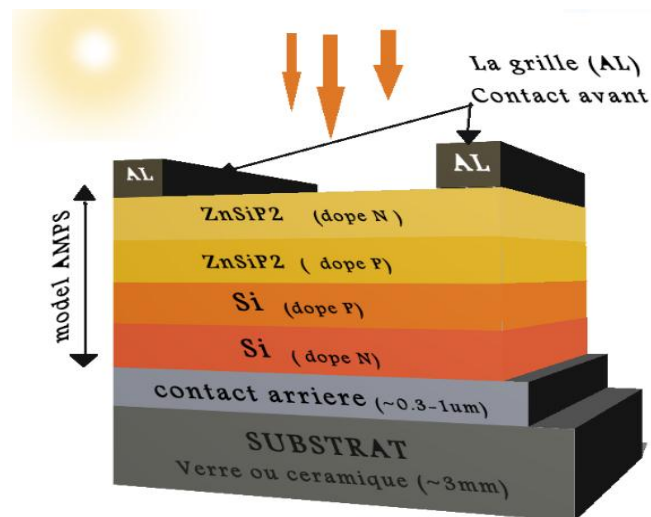


Figure III.5. Schéma simplifié de la cellule tandem à base de (n-ZnSiP₂/p-ZnSiP₂).

Tableau III.1. Les paramètres électriques des matériaux des couches (n-ZnSiP₂, p-ZnSiP₂, n-Si, p-Si)

Couche \ Propriété	n-ZnSiP ₂	p-ZnSiP ₂	n-Si	p-Si
Permittivité diélectrique	10	10	11.7	11.7
Bande de gap (eV)	2	2	1.12	1.12
Affinité électronique (eV)	3.58	3.58	4.05	4.05
Densité des états effective dans la BC (N _c (cm ⁻³))	6.8e+17	6.8e+17	2.8e19	2.8e19
Densité des états effective dans la BV (N _v (cm ⁻³))	1.5e+19	1.5e+19	1.04e19	1.04e19
Mobilité d'électron μ _n (cm ² /V.s)	1000	1000	125	125
Mobilité du trou μ _p (cm ² /V.s)	40	40	60	60
Densité du donneur N _d (cm ⁻³)	1e+19	0	1e+19	0
Densité de l'accepteur N _a (cm ⁻³)	0	1e+15	0	1e+20

III.4. Optimisations des paramètres de la cellule photovoltaïque

III.4.1. La première cellule solaire

III.4.1.1. Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

a) Effet de l'épaisseur de la couche en n-ZnSiP₂

Tableau III.3. L'effet de l'épaisseur de la couche ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche n-ZnSiP ₂ (μm)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	η (%)	FF (%)
0.01	25.11	0.8066	17.48	86.3349

0.02	24.88	0.8064	17.32	86.3312
0.03	24.87	0.8064	17.31	86.3307
0.04	24.8768	0.8064	17.3186	86.3306
0.05	24.8715	0.8064	17.3147	86.3304
0.06	24.8734	0.8064	17.3162	86.3307
0.07	24.8699	0.8064	17.3136	86.3304
0.08	24.8673	0.8064	17.3117	86.3304
0.09	24.8683	0.8064	17.3125	86.3304
0.1	24.8661	0.8064	17.3109	86.3305

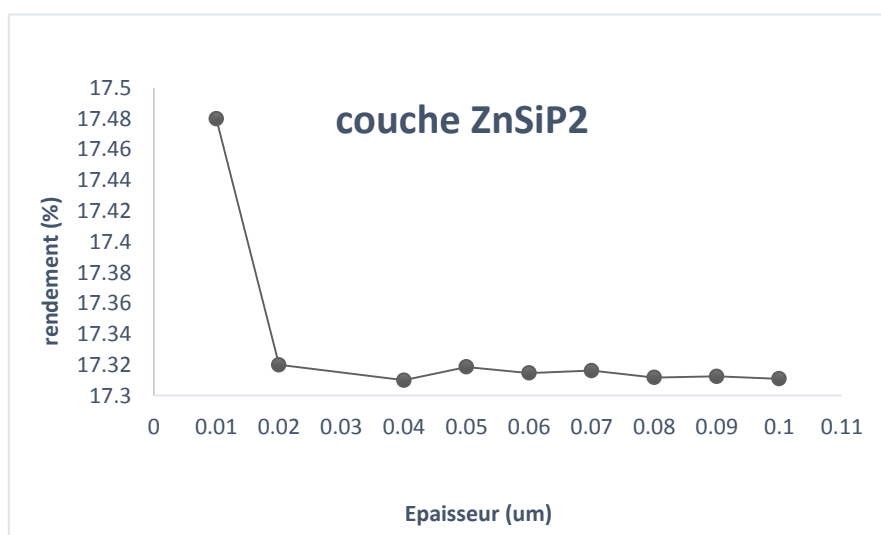


Figure III.6. Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche $ZnSiP_2$.

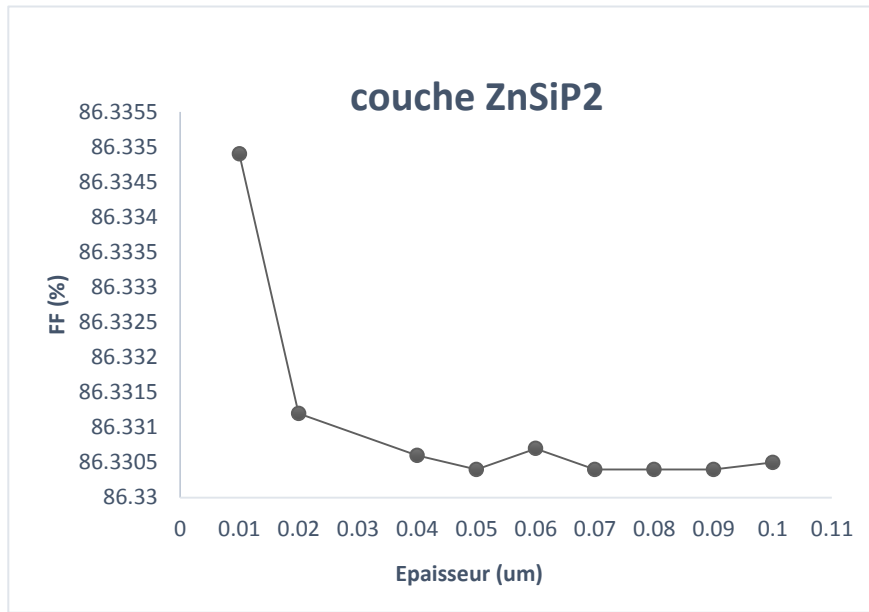


Figure III.7. Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en ZnSiP₂

Les figures (III.6), (III.7) et le tableau III.3 représentent 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 ZnSiP₂ n'a pas une grande influence sur les performances de la cellule solaire. Donc on préfère que l'épaisseur de la couche ZnSiP₂ soit la plus petite possible.

b) Effet de l'épaisseur de la couche en p-Si

Tableau III.4. L'effet de l'épaisseur de la couche Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche p-Si (μm)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
1	11.12	0.69	6.5	84.34
5	17.36	0.74	11.08	85.47
10	20.27	0.78	13.36	85.78
15	21.92	0.78	14.72	86.87

20	23.05	0.79	15.67	85.06
25	23.9	0.8	16.37	86.89
30	24.56	0.80	16.99	86.24
35	25.20	0.80	17.57	86.34
36	25.11	0.80	17.48	86.33
37	25.30	0.80	17.65	86.34
38	25.39	0.80	17.73	86.34

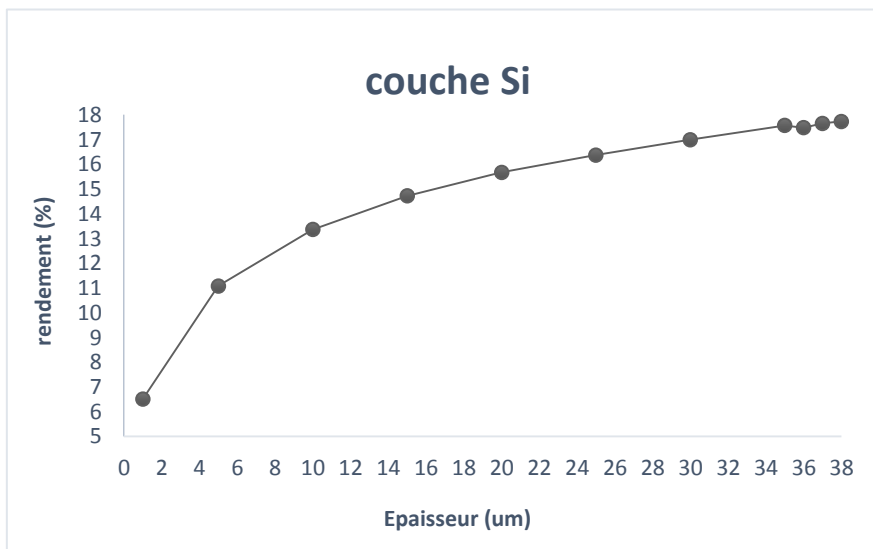


Figure III.8. Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche

Si

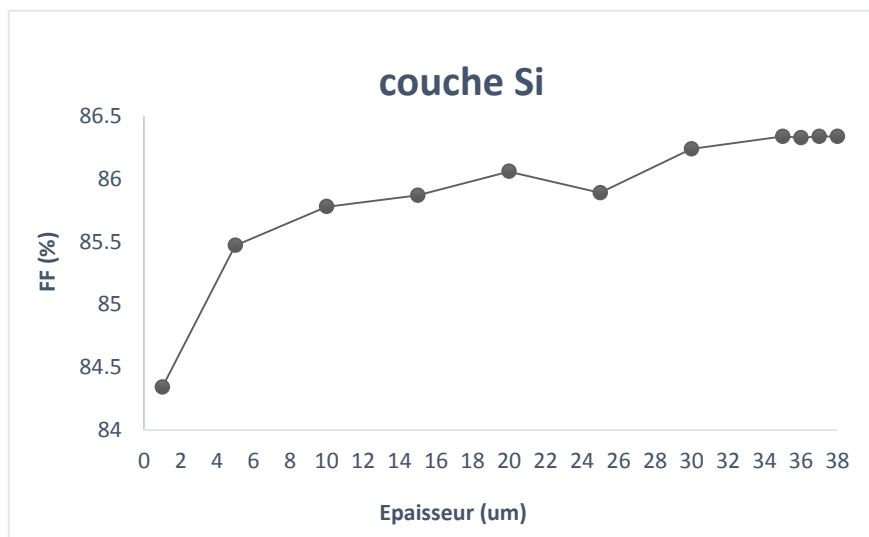


Figure III.9. Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en Si

Dans le tableau (III.4), il est clair que, le changement de l'épaisseur de la couche Si n'est pas significative sur les performances de la cellule solaire. Afin que les performances augmentent nous préférons que l'épaisseur de la couche de Si soit la plus grande, à μm 38.5 le rendement 17.88%.

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

n-ZnSiP ₂ (μm)	p-Si (μm)
0.01	38

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

Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
25.39	0.8090	17.7377	86.3467

III.4.1.2. Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

a) Effet du dopage de la couche en n-ZnSiP₂

On change la concentration de dopage Nd de la couche ZnSiP₂ de 10^{15} à 10^{20} cm⁻³

Le tableau III.7. l'effet de dopages de la couche n-ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque

Dopage de la couche n-ZnSiP ₂ (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10^{15}	0.02	0.83	0.0072	41.32

10^{16}	0.021	0.83	0.0073	40.69
10^{17}	0.029	0.82	0.0083	34.50
10^{18}	15.76	0.79	3.13	25.16
10^{19}	22.95	0.78	15.60	86.06
10^{20}	22.95	0.78	15.60	86.06

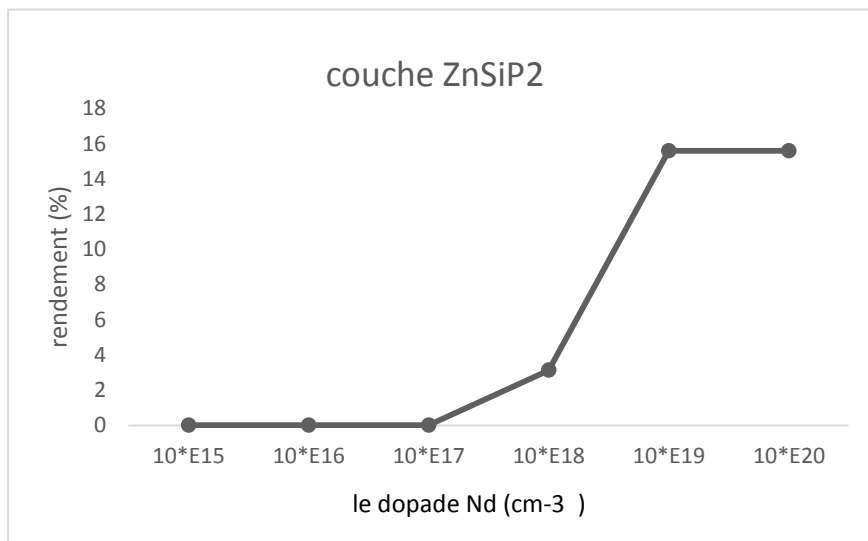


Figure III.10. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en ZnSiP₂.

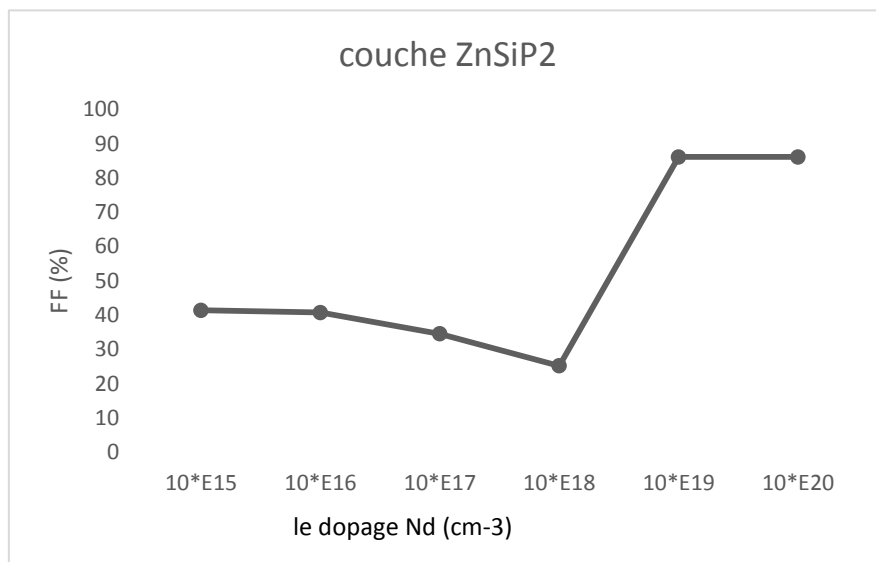


Figure III.11. Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en ZnSiP₂.

L'effet de la concentration du dopage de la couche ZnSiP₂ illustré dans le tableau (III.7) et les figures (III.10 et III .11). Nous remarquons que l'augmentation dans le dopage influe sur la densité de court-circuit J_{sc}, le rendement et le facteur de forme et la tension de circuit ouvert V_{co}, le rendement η et le facteur de forme FF augmentent avec l'augmentation de dopage de la couche ZnSiP₂.

b) Effet du dopage de la couche en p-Si

Tableau III.8. l'effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche p- Si (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10 ¹⁵	24.37	0.55	10.93	80.84
10 ¹⁶	23.29	0.61	11.77	82.69
10 ¹⁷	23.05	0.66	12.97	83.91
10 ¹⁸	25.16	0.72	14.28	85.09
10 ¹⁹	85.06	0.78	15.60	86.06
10 ²⁰	85.06	0.84	16.92	86.84

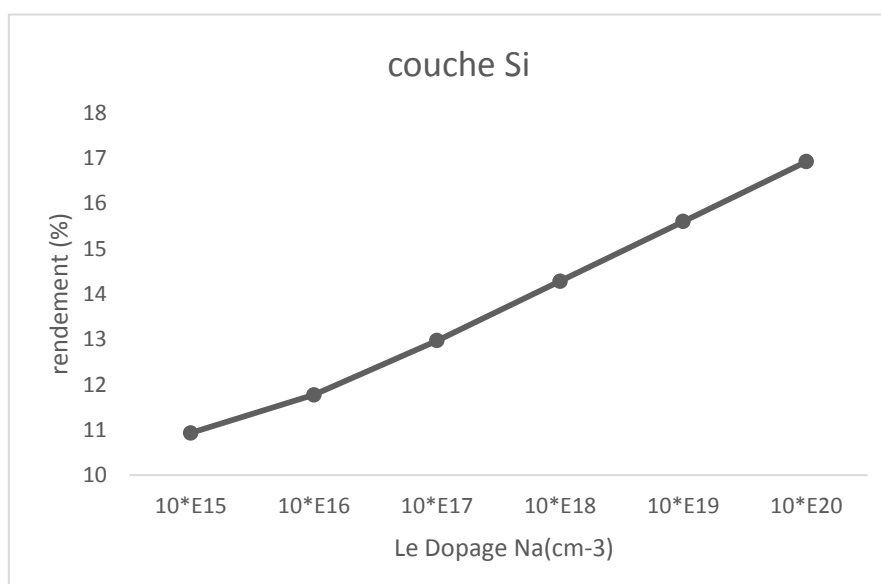


Figure III.12. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en Si.

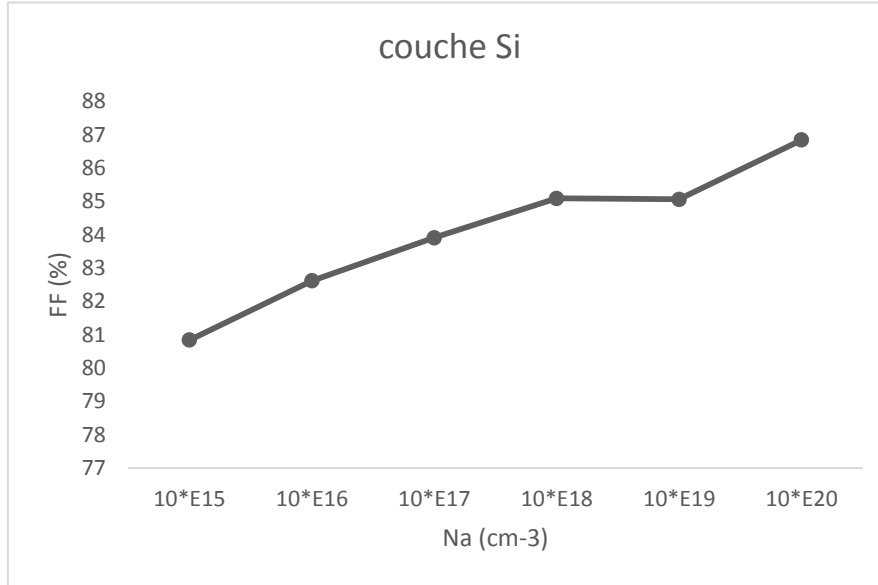


Figure III.13. Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en Si.

Notez que l'augmentation de la concentration de dopage a une grande influence sur le rendement et le facteur de forme FF.

Tableau III.9. Les valeurs des dopages optimales de chaque couche.

$N_d(\text{ZnSiP}_2) (\text{cm}^{-3})$	$N_a(\text{Si}) (\text{cm}^{-3})$
10^{19}	10^{20}

Tableau III.10. Les performances de la cellule pour les valeurs optimales.

$J_{sc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co} (\text{V})$	$\eta (\%)$	$FF (\%)$
87.08	0.86	19.20	87.08

III.4.1.3.L'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

Tableau III.11. Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.

La température (°K)	J_{sc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	η (%)	FF (%)
270	25.56	0.89	20.23	88.20
280	25.56	0.88	19.94	87.93
290	25.56	0.88	19.62	87.20
300	25.56	0.89	19.34	86.80
310	25.56	0.86	19.00	86.31
320	25.56	0.85	18.75	86.20
330	25.56	0.84	18.41	85.51

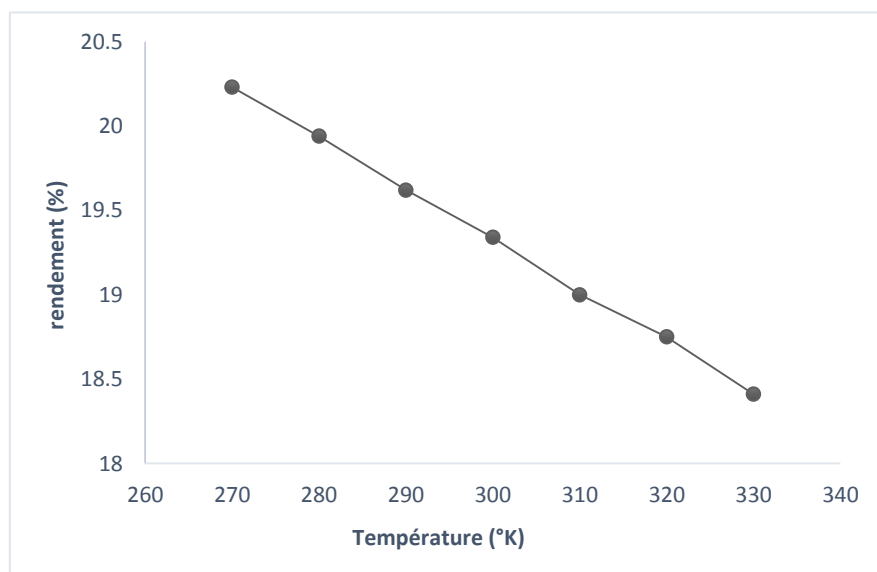


Figure III.14.La variation du rendement en fonction de la température.

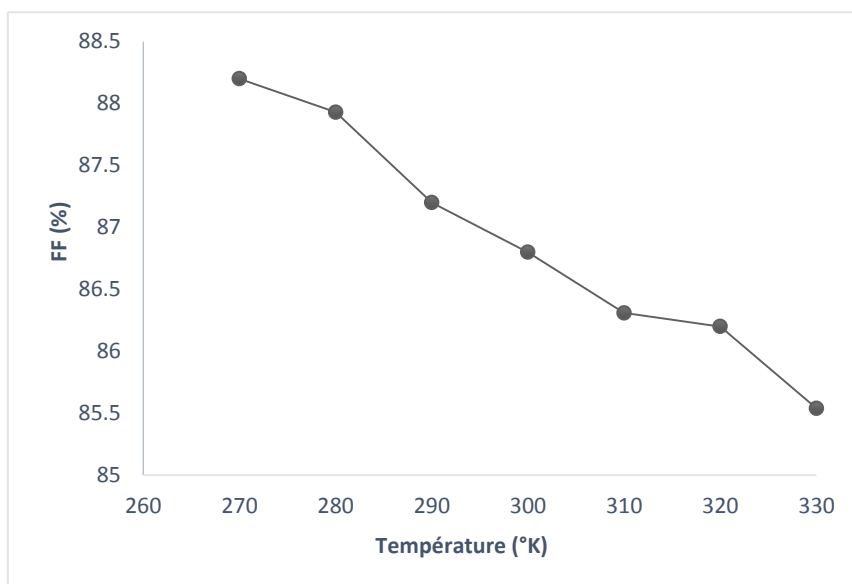


Figure III.15.La variation du facteur de forme en fonction de la température.

La Figure III.14 illustre l'allure du rendement de la conversion PV η en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximale de η est au-dessous de la température de 270 ° K. Dans notre gamme de température 270-330 ° K ; La variation de FF avec la température pour les cellules solaires au ZnSiP_2 est illustrée dans la Figure III.15. le FF diminue avec l'augmentation de la température. la diminution de FF et le rendement η de la conversion PV est presque linéaire avec la température.

III.4.2.La deuxième cellule solaire

III.4.2.1.Effet de l'épaisseur de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

a) Effet de l'épaisseur de la couche en n- ZnSiP_2

Tableau III.12. L'effet de l'épaisseur de la couche n- ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque

L'épaisseur de la couche n-ZnSiP ₂ (μm)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
0.01	27.0259	0.7869	18.24	85.7841
0.02	27.0249	0.7868	18.27	85.94
0.1	27.0184	0.7868	18.2690	85.9413
0.2	27.0102	0.7868	18.2633	85.9409
0.3	27.0021	0.7868	18.2577	85.9410
0.4	26.9940	0.7868	18.2520	85.9408
0.5	26.9859	0.7868	18.2463	85.9409
0.6	26.9777	0.7867	18.2407	85.9409
0.7	26.9696	0.7867	18.23	85.9407
0.8	26.9615	0.7867	18.22	85.9407
0.9	26.95	0.7867	18.2236	85.9405
1	26.94	0.7867	18.21	85.9405

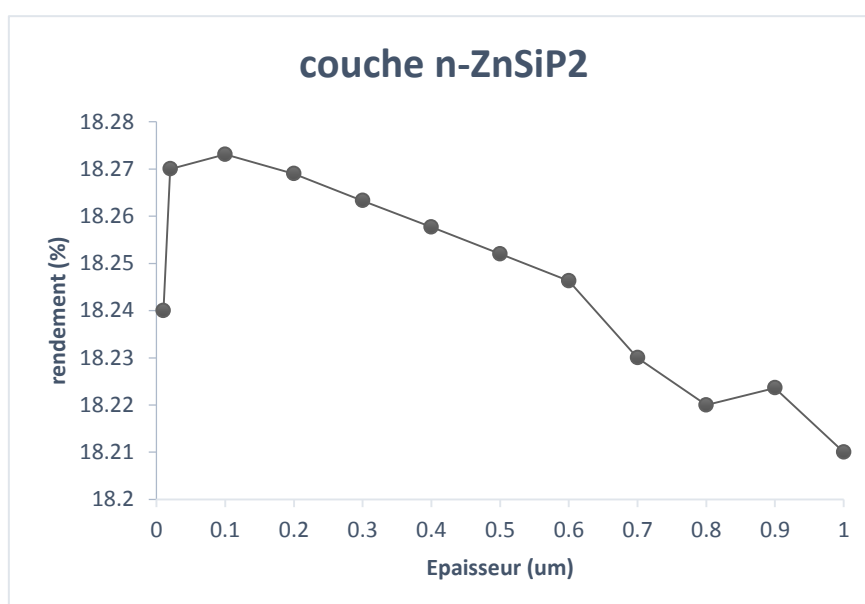


Figure III.16. La variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche-ZnSiP₂.

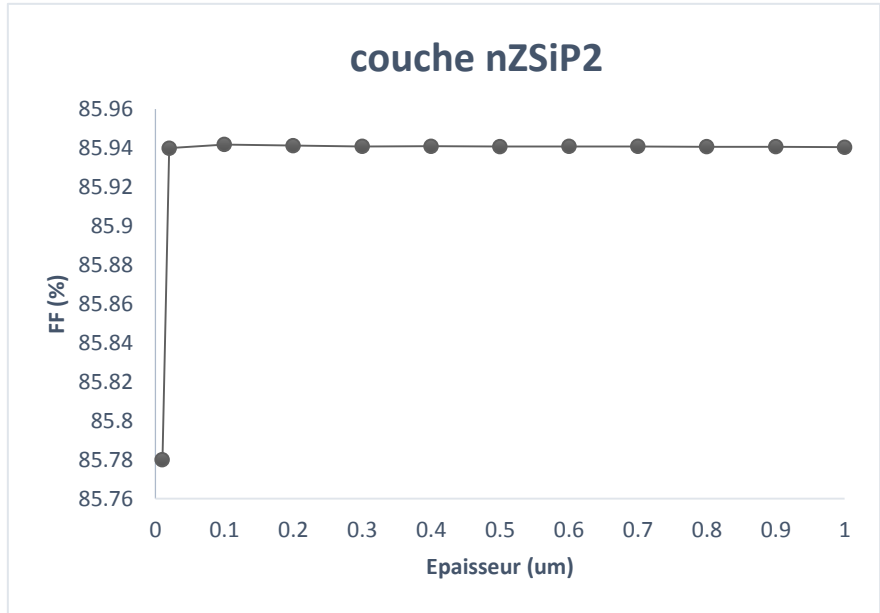


Figure III.17. La variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur.

Dans le tableau (III.12), nous représentons les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque obtenus par la simulation tel que le courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , rendement et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche en n-ZnSiP₂ n'a pas d'une grande influence sur les performances de la cellule solaire, donc on préfère que l'épaisseur de la couche n-ZnSiP₂ soit la plus petite possible.

b) Effet de l'épaisseur de la couche en p-ZnSiP₂

Tableau III.13. L'effet de l'épaisseur de la couche p- ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque.

L'épaisseur de la couche p-ZnSiP ₂ (μm)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)

0.01	27.0248	0.7869	18.27	85.95
0.015	27.0248	0.7870	18.22	85.68
0.02	27.0248	0.7873	18.11	85.12
0.025	27.0248	0.7873	18.1112	85.1272
0.03	27.0249	0.7876	17.55	82.48
0.035	27.0249	0.7877	16.75	78.68
0.04	27.0249	0.7876	15.19	71.36
0.045	27.0249	0.7876	13.15	61.80
0.05	27.0250	0.7875	11.14	52.38

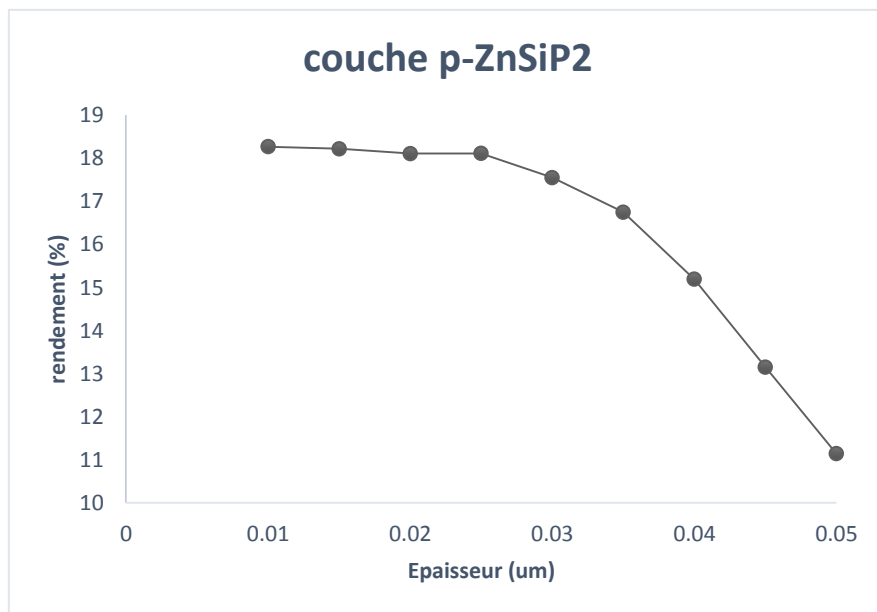


Figure III.18. Variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche p-ZnSiP₂.

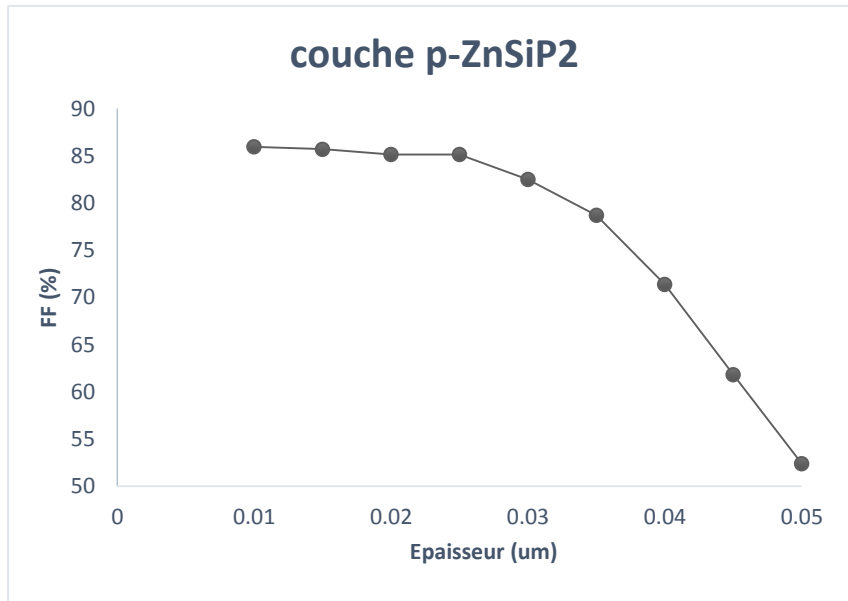


Figure III.19. Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en $p\text{-ZnSiP}_2$.

Dans le tableau(III.13), nous avons représenté l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche $p\text{-ZnSiP}_2$ sur les différents paramètres de la cellule solaire. Nous observons que la variation de l'épaisseur influe beaucoup plus sur le courant de court-circuit I_{sc} , qui diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de $p\text{-ZnSiP}_2$

Effet de l'épaisseur de la couche en n-Si

Tableau III.14.L'effet de l'épaisseur de la couche n-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque

L'épaisseur de la couche n-Si (μm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF (%)
0.5	23.43	0.7905	15.91	85.22
1	23.80	0.7909	16.17	85.23
2	23.43	0.7917	16.61	85.24
3	23.96	0.7923	16.98	85.25
4	24.42	0.7928	17.30	85.85

5	25.82	0.7933	17.58	85.83
6	26.18	0.7937	17.83	85.82
7	26.80	0.7941	18.05	85.80
8	26.78	0.7944	18.25	85.79
9	27.04	0.7947	18.43	85.78
10	27.27	0.7950	18.72	85.79
11	27.48	0.7952	18.74	85.76
12	27.68	0.7955	18.88	85.75
13	27.85	0.7985	19.00	85.74

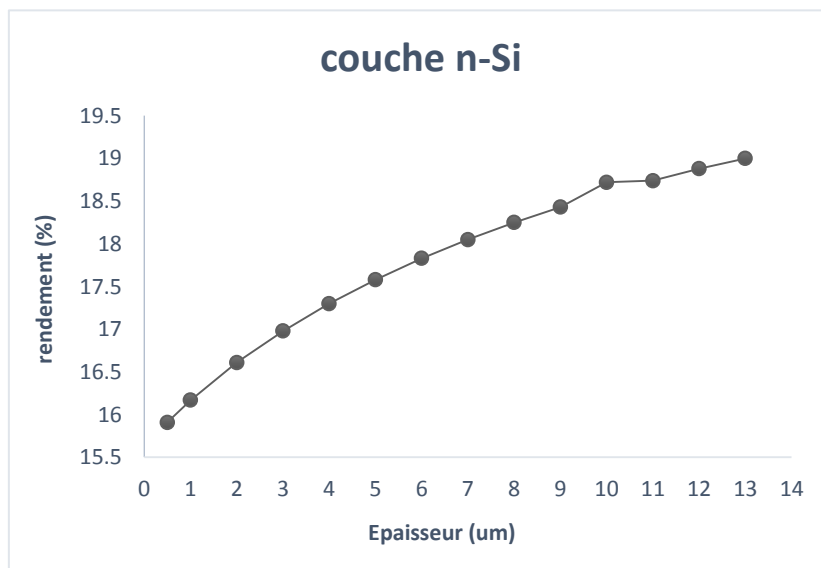


Figure III.20. La variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche n-Si.

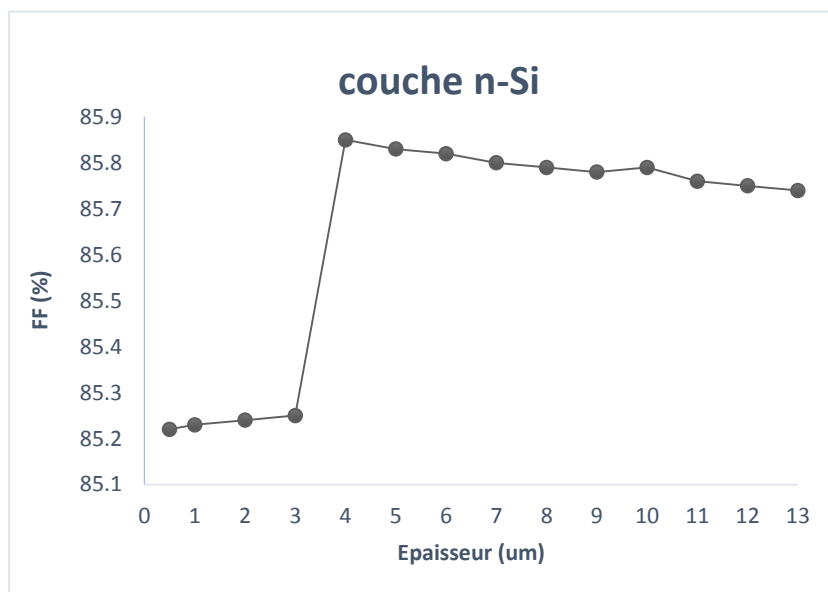


Figure III.21. La variation de FF en fonction de l'épaisseur de la couche en n-Si.

D'après les résultats obtenus dans le tableau (III.14), on note que la densité de courant de court-circuit augmente proportionnellement avec l'épaisseur de la couche en Si.

c) Effet de l'épaisseur de la couche en p-Si

Tableau III.15. L'effet de l'épaisseur de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque

L'épaisseur de la couche p-Si (μm)	Jsc (mA/cm^2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
1	27.96	0.7188	16.83	84.54
5	27.59	0.76	17.84	85.19
10	27.58	0.77	18.31	85.37
15	27.70	0.7875	18.73	85.86
16	27.73	0.7891	18.79	85.87
17	27.76	0.7908	18.85	85.86
18	27.22	0.7924	18.87	85.83
19	27.82	0.7940	18.95	85.79

20	27.85	0.7957	19.00	85.74
21	27.88	0.7973	19.04	85.67
22	27.92	0.7989	19.10	85.63
23	27.95	0.8004	19.16	85.68
24	27.98	0.8011	19.22	85.76

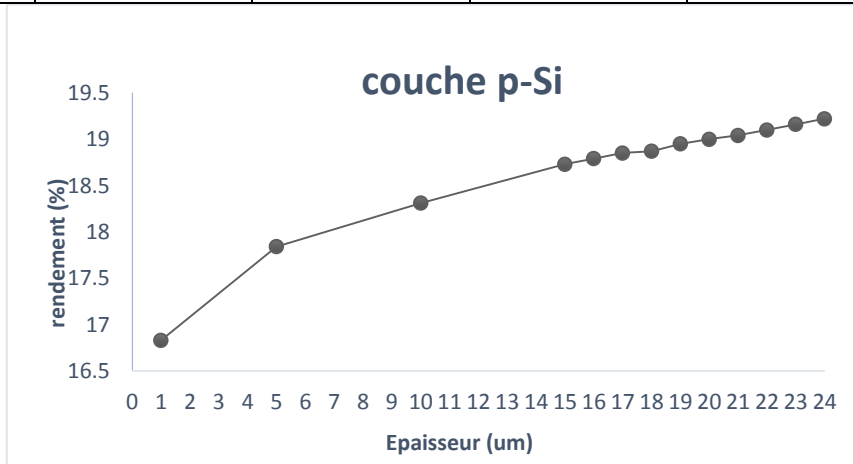


Figure III.22. La variation de rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche p-Si.

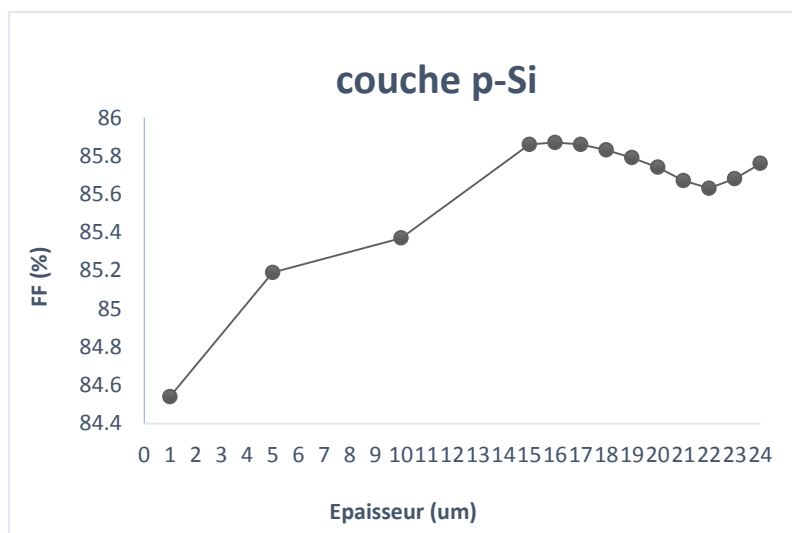


Figure III.23. La variation de FF en fonction de l'épaisseur de la couche en p-Si.

A partir des résultats trouvés par la simulation (tableau .III.15), On note que la différence d'épaisseur a un effet beaucoup plus important sur le rendement, qui augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du p-Si.

Tableau III.16. Les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

n-ZnSiP ₂ (μm)	p-ZnSiP ₂ (μm)	n-Si (μm)	p-Si (μm)
0.02	0.01	13	24

Tableau III.17. Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche.

Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
27.98	0.8011	19.22	85.76

III.4.2.2. Effet du dopage de chaque couche sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

a) Effet du dopage de la couche en n-ZnSiP₂

Tableau .III.18. L'effet de dopages de la couche n-ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche n-ZnSiP ₂ (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10 ¹⁵	27.98	0.812	19.09	85.17
10 ¹⁶	27.98	0.812	19.09	85.18
10 ¹⁷	27.98	0.812	19.10	85.19
10 ¹⁸	27.98	0.811	19.12	86.78

10^{19}	27.98	0.811	19.12	86.78
10^{20}	27.98	0.811	19.24	86.87

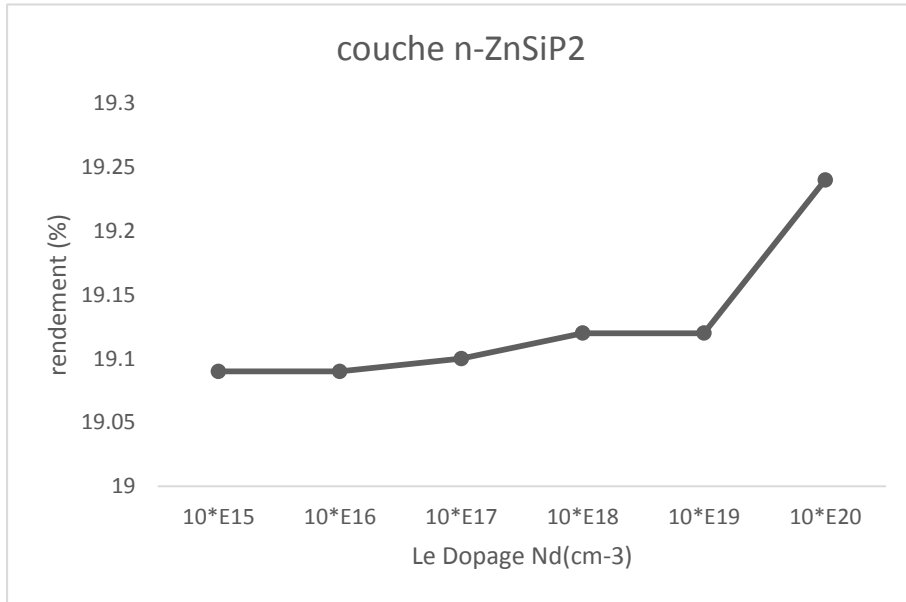


Figure III.24.La Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en n-ZnSiP₂.

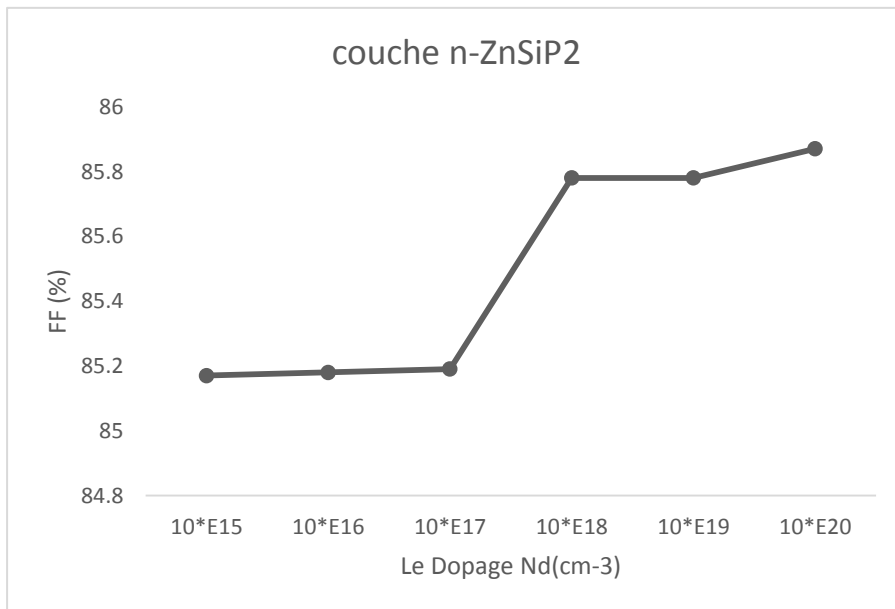


Figure III.25.La variation du facteur de forme en fonction du dopage de la couche en n-ZnSiP₂.

L'effet de la concentration du dopage de la couche n-ZnSiP₂ illustré dans le tableau (III.18) et les figures (III.24), (III.25). L'augmentation de l'épaisseur influe ne change rien dans les caractéristiques électriques de la structure proposée.

b) Effet du dopage de la couche en p-ZnSiP₂

Le tableau III.19. l'effet de dopages de la couche p- ZnSiP₂ sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche p-ZnSiP ₂ (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10 ¹⁵	27.9830	0.8011	19.22	85.78
10 ¹⁶	27.9830	0.8011	19.22	85.77
10 ¹⁷	27.9830	0.8011	19.22	85.77
10 ¹⁸	27.9830	0.8012	19.09	85.74
10 ¹⁹	27.9830	0.9184	0.003	39.85

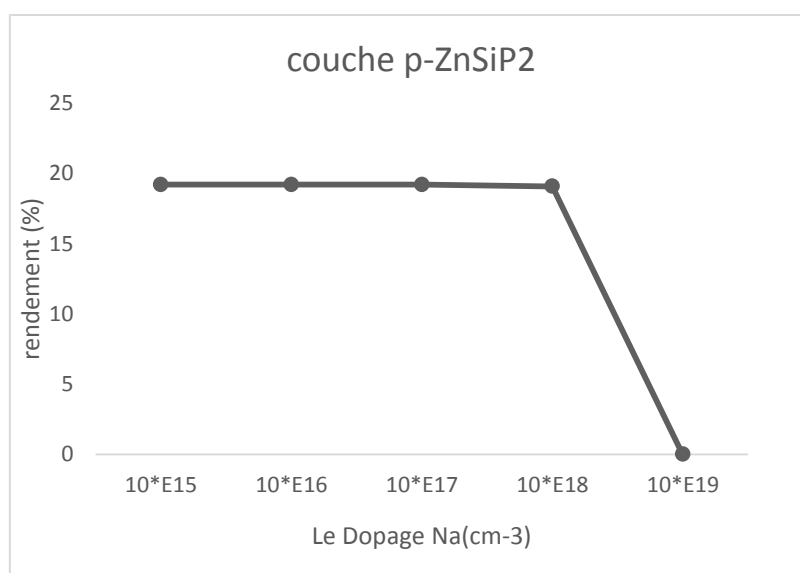


Figure III.26. La variation du rendement en fonction de dopage de la couche en p-ZnSiP₂.

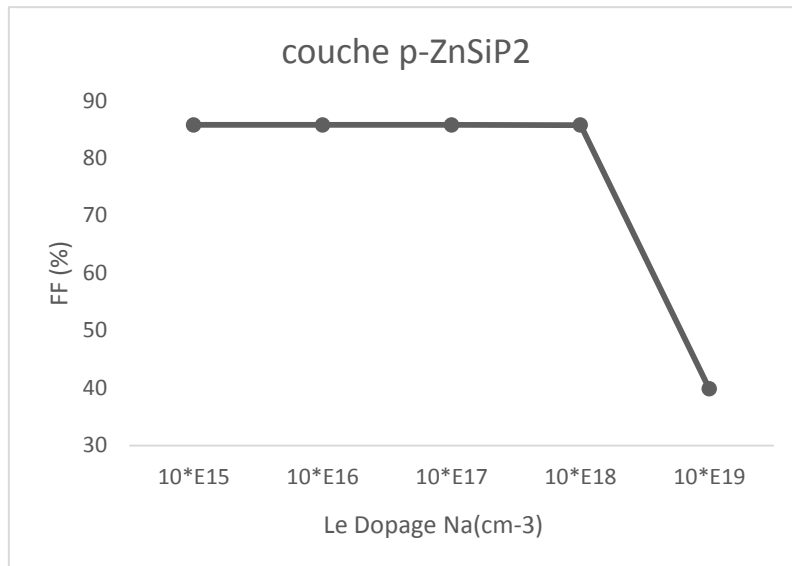


Figure III.27. La variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en p-ZnSiP₂.

On observe que l'augmentation du dopage dans la couche de p-ZnSiP₂ a un effet beaucoup plus important sur le dopage. On peut dire que la valeur de dopage optimale pour p-ZnSiP₂ est de 10¹⁵ cm⁻³. Pour obtenir une efficacité supérieure de 19,22%

c) Effet du dopage de la couche en n-Si

Tableau III.20. L'effet des dopages de la couche n-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche n-Si (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10 ¹⁴	27.9830	0.8011	19.2224	85.7808
10 ¹⁵	27.9831	0.0811	19.2295	85.7815
10 ¹⁶	27.9831	0.0811	19.2305	85.7862
10 ¹⁷	27.9832	0.0811	19.2333	85.80
10 ¹⁸	27.9835	0.0810	19.24	85.84
10 ¹⁹	27.9840	0.0810	19.26	85.94

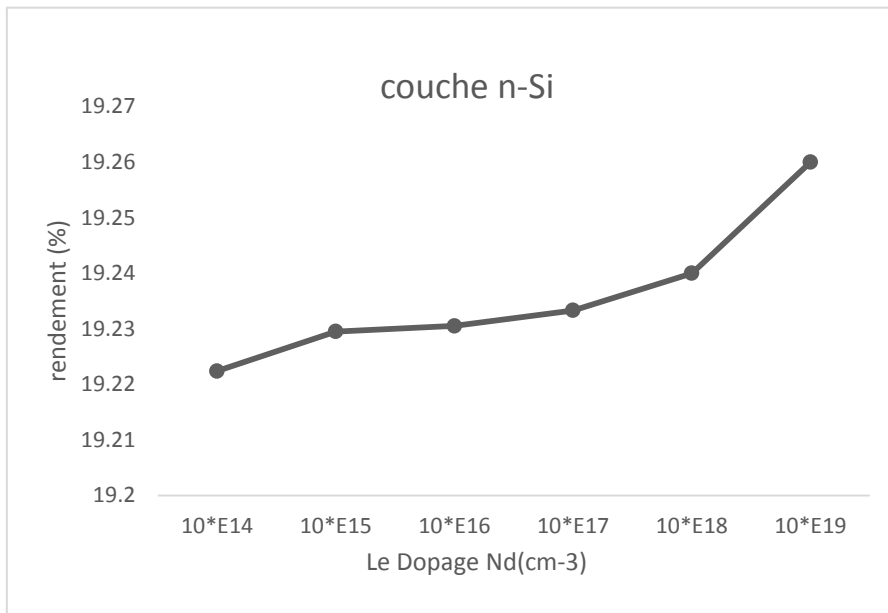


Figure III.28.La variation du rendement en fonction du dopage de la couche

en n-Si.

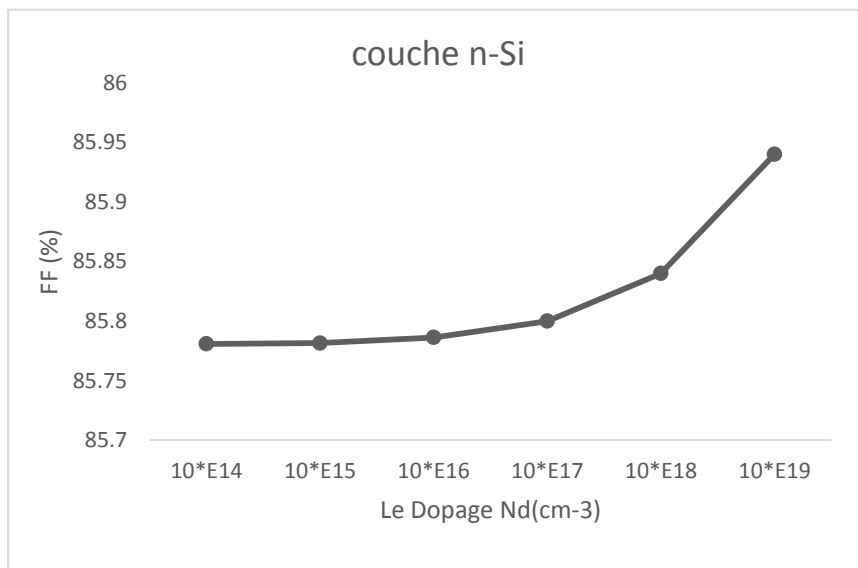


Figure III.29.La variation du facteur de forme en fonction du dopage de la couche

En n-Si

On observe que l'augmentation du dopage dans la couche de n-Si a un effet beaucoup plus important sur le dopage. On peut dire que la valeur de dopage optimale pour n-Si est de 10^{19} cm⁻³. Pour obtenir une efficacité supérieure de 19.26 %

d) Effet du dopage de la couche en p-Si

Tableau III.21.L'effet de dopages de la couche p-Si sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la couche p-Si (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
10 ¹⁵	28.35	0.50	13.00	81.46
10 ¹⁶	28.04	0.62	14.50	83.12
10 ¹⁷	27.99	0.68	16.08	84.27
10 ¹⁸	27.98	0.74	17.67	85.18
10 ¹⁹	27.9840	0.80	19.26	85.94
10 ²⁰	27.9833	0.86	20.85	86.56

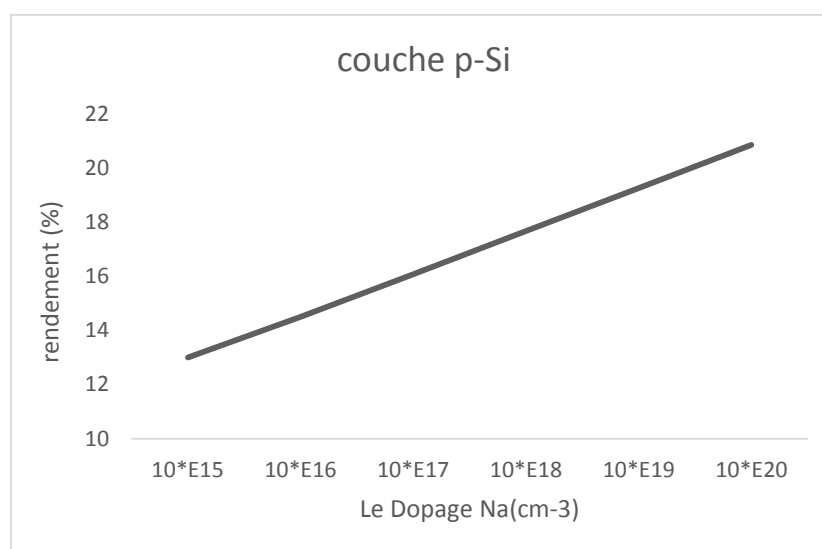


Figure III.30. Variation du rendement en fonction de dopage de la couche en p-Si.

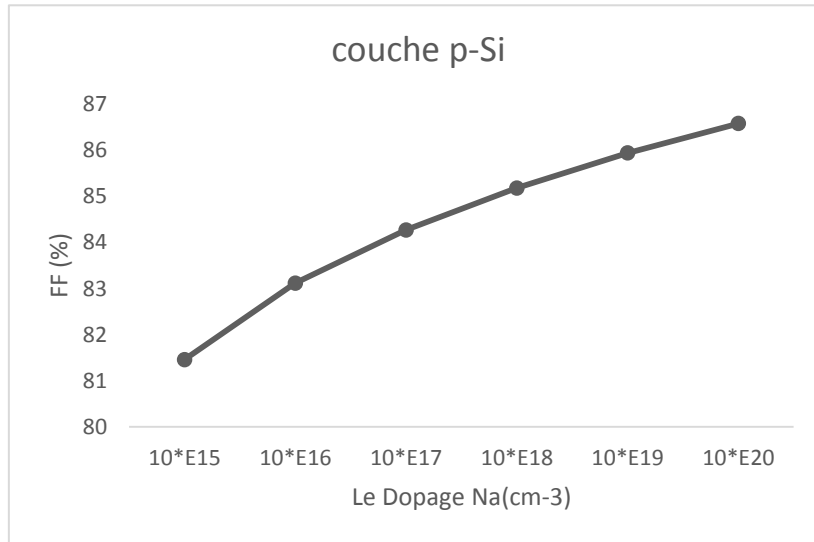


Figure III.31. Variation du facteur de forme en fonction de dopage de la couche en p-Si.

L'effet de la concentration de dopage pour la couche de p-Si indiqué dans le tableau (III.21).

Et le Figure (III.30 et III.31). le rendement augmentent avec l'augmentation de dopage de la couche p-Si. La valeur idéale du rendement est de 20.85% pour le dopage 10^{20} cm^{-3} .

Tableau III.22. Valeurs optimales des dopages pour chaque couche.

Nd(ZnSiP ₂) (cm-3)	(ZnSiP ₂) Na (cm -3)	Nd (Si) (cm -3)	Na (Si) (cm -3)
10^{19}	10^{15}	10^{19}	10^{20}

Tableau III.23. Les performances de la cellule pour les valeurs optimales.

Jsc (mA/cm2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
27.9833	0.86	20.85	86.56

III.4.2.3.L'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque

Tableau III.24. Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.

La température (°K)	Jsc (mA/cm2)	Vco (V)	η (%)	FF (%)
270	27.9834	0.82	21.81	87.81
280	27.9833	0.81	21.5	87.32
290	27.9833	0.80	21.21	87.27
300	27.9833	0.79	20.85	85.68
310	27.9833	0.78	20.56	85.48
320	27.9833	0.77	20.18	85.75
330	27.9833	0.76	19.89	84.59

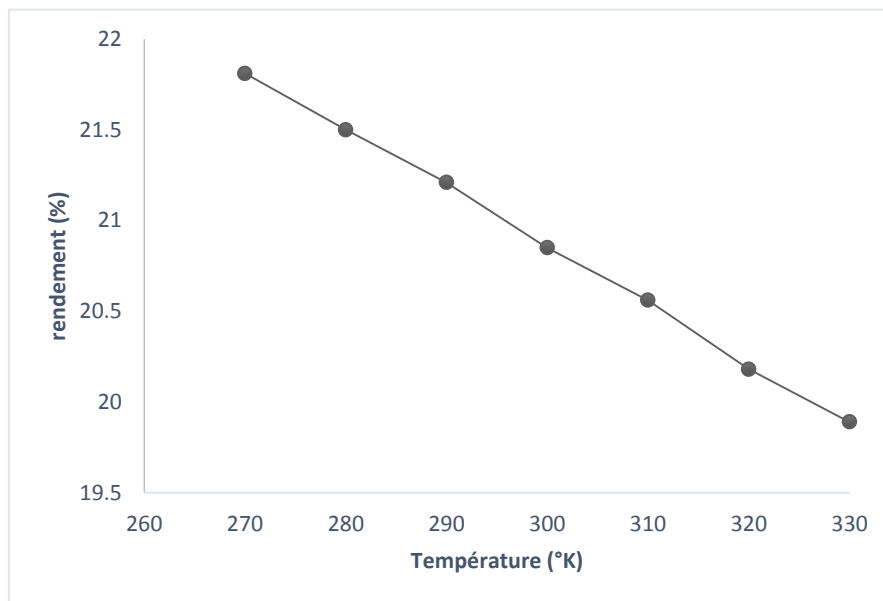


Figure III.32. Variation du rendement en fonction de la température.

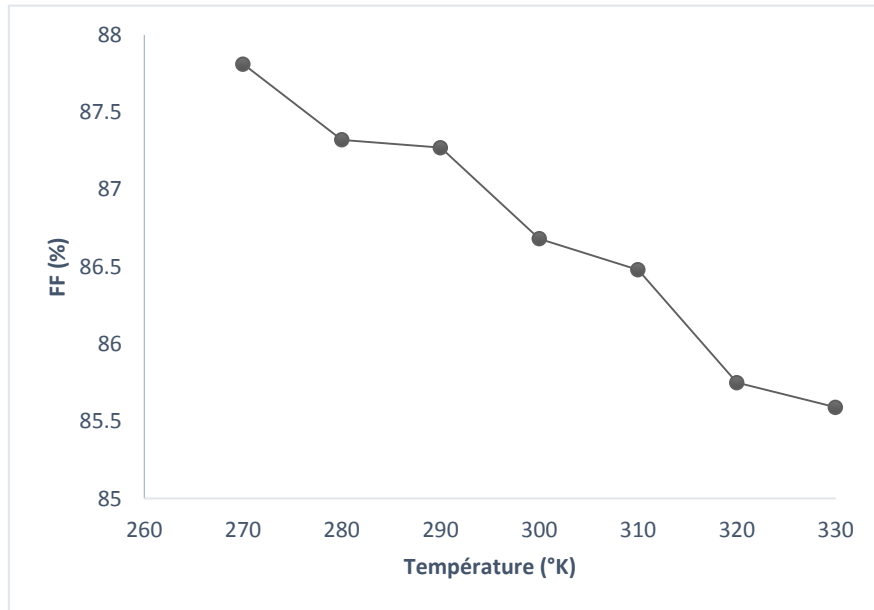


Figure III.33. Variation du facteur de forme en fonction de la température.

La Figure III.32.33 illustre l'allure du rendement de la conversion PV η en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximale de η est au-dessous de la température de 270 ° K. Dans notre gamme de température 270-330 ° K ; La variation de FF avec la température pour les cellules solaires au $ZnSiP_2$ est illustrée dans la Figure III.15. le FF diminue avec l'augmentation de la température. la diminution de FF et le rendement η de la conversion PV est presque linéaire avec la température.

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié et simulé les deux structures photovoltaïques proposées par l'environnement AMPS-1D. Nous avons optimisé les différents paramètres qui sont le dopage et l'épaisseur de chaque couche en essayant de trouver les valeurs optimaux, qui donnent les meilleures caractéristiques électriques car les deux paramètres, ont un effet très significatif sur l'amélioration du rendement de conversion. On a aussi étudié l'effet de la température sur cette performance électrique de notre cellule étudiée. Ensuite, après l'optimisation des paramètres d'entrée d'AMPS-1D, on a comparé les performances électriques de sortie. D'après ces résultats de simulation, on peut dire que ces structures sont des bons choix pour des cellules photovoltaïques en tandem. On peut conclure aussi que la simulation reste un outil très important pour l'étude, la modélisation et la conception des composants électroniques et optoélectroniques, de même chose pour l'AMPS-1D qui représente un environnement intéressant à l'étude des cellules photovoltaïques et notamment les cellules tandem. Donc, on peut dire que nos résultats obtenus sont accordables au comportement ordinaire des cellules photovoltaïques.

III.6.Référence :

[1]	OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou ,2015
[2]	GUITOUNI Samira, «Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques »,Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI- Constantine1, 2017.
[3]	Nafissa MOUSSAOUI, «L'ÉTUDE PAR SIMULATION DE L'INFLUENCE DU DOPAGE SUR LES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES CELLULES SOLAIRES À BASE DE SILICIUM AMORPHE», Laboratoire Physique des matériaux et ses applications, université Med BOUDIAF, M'sila 28000, Algérie 2 Laboratoire d'Optique appliquée, université Ferhat ABBAS, Sétif 19000, Algeria
[4]	YimingLiu , 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.
[5]	DjeghbalaAfaf, «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.
[6]	Y. Liu, D. Heinzl, and A. Rockett, "A revised version of the AMPS simulation code", in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, 2010, pp. 001943- 001947.
[7]	Touafek Naïma, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ », thèse de doctorat, 2015.
[8]	Liu, Heinzl, Rockett, «A revised version of the AMPS simulation code», Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
[9]	DjeghbalaAfaf, «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 Master, Université Med Khider Biskra, 2013.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons fait une étude par la simulation sur une cellule photovoltaïque à base de ZnSiP_2 . Notre travail a été réalisé par la simulation numérique, il effectue à l'aide du l'AMPS-1D. Dans un premier lieu, nous avons présenté les matériaux chalcopyrite et le ternaire ZnSiP_2 , en présentant ses différentes propriétés (structurales et optiques). Ensuite, nous donnons des définitions détaillées sur les cellules photovoltaïques, les différentes technologies photovoltaïques et notamment la technologie PV. Après, pour une étudier bienveillante des performances des cellules photovoltaïques, nous avons réalisé la simulation numérique. On optimise les paramètres physiques et électriques tel que les épaisseurs et les dopages pour chaque couche de la cellule afin de voir leurs influences sur la caractéristique électrique de la structure $n\text{-Si}/p\text{-Si}/p\text{-ZnSiP}_2/n\text{-ZnSiP}_2$. Puis on va détermine les valeurs optimales des épaisseurs et des dopages pour chaque couche, qui donnent les meilleurs performances pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Les résultats qui nous extrairons de cette étude par simulation montre que la structure tandem à base de ZnSiP_2/Si est prometteuse dans la conversion photovoltaïque.