

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Microélectronique

présenté par

Saïd Lydia

&

Bioud Meriem Yasmine

Etude et simulation d'une cellule solaire à triple-jonction à base de InGaP/GaAs/Si

Proposé par : Saïd Nacer

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

A Allah le tout puissant qui, dans sa grâce et sa miséricorde, nous a donné la force nécessaire de pouvoir suivre nos études et élaborer ce modeste travail.

A notre cher promoteur Mr Saïd Nacer;

Vous nous avez profondément marqué de votre professionnalisme et votre sérieux, nous n'oublierons jamais votre soutien et vos précieux conseils tout au long de ce travail, nous ne vous remercierons jamais assez pour votre aide et assistance.

A nos enseignants Mme Zerouk, Mr Aissat, et Mr Bounemri ;

Nous vous remercions d'avoir enrichi nos connaissances et de nous avoir guidés durant nos années d'études.

Merci à tout ce qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour

A celle qui m'a arrosé d'encouragements et qui m'a bénie par
ses prières ... Ma mère

A mon support dans la vie ...Mon père

A mes sœurs et mon frère Manel, Mina, et Mohamed

A mon cher binôme Lydia

A mes chers amis et collègues

Meriem

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents ... aucune dédicace ne saurait exprimer mon
respect, mon amour éternel et ma considération pour les
sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon
bien être.

A mes chers frères et sœurs et belle sœurs ...

A toute ma famille ...

A mon cher binôme Meriem.

A mes meilleurs amis Asma Amina Sabrina Sana Abir Meriem
Fairouz Lyes Oussama Madjid ... je vous considère pas comme amis
mais plutôt sœur et frère, je vous garde au fond de mon cœur.

Lydia

ملخص:

تأتي الطاقة الكهروضوئية الشمسية من التحول المباشر لجزء من الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. يتم تحويل الطاقة هذا من خلال خلية شمسية تعتمد كفاءتها على نطاق الطيف الشمسي الممتص. يتكون هذا العمل من دراسة ومحاكاة خلية شمسية بعد استدعاء مبدأ التشغيل وخصائص الخلية. باستخدام برنامج InGaP / GaAs / Si ثلاثية الوصلات تعتمد على الشمسية ، تم تحديد تأثير السُمك على الخلية. تظهر نتيجة المحاكاة أن كفاءة الخلية الشمسية ثلاثية الوصلات تصل الوصلات من الخلايا المختلفة $W1 = 3\mu\text{m}$ ، $W2 = 4\mu\text{m}$ و $W3 = 100\mu\text{m}$ يمكن أن تصل إلى قيمة 43% للسُمك

: كلمات المفاتيح InGaP/GaAs/Si؛ الخلايا الكهروضوئية؛ ثلاثية الوصلات؛ المحاكاة؛ الكفاءة

Résumé :

l'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire dont le rendement dépend de la gamme du spectre solaire absorbé. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire triple-jonctions à base d'InGaP/GaAs/Si en utilisant le logiciel COMSOL. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence de l'épaisseur sur les caractéristiques des différentes cellules a été déterminé. Le résultat de la simulation montre que le rendement de la cellule solaire triple-jonctions peut atteindre une valeur de 43% pour des épaisseurs $W1=3\mu\text{m}$, $W2=4\mu\text{m}$ et $W3=100\mu\text{m}$ des différentes cellules.

Mots clés : Cellule solaire ; Triple jonction ; Simulation ; Rendement ; InGaP/GaAs/Si.

Abstract :

Solar photovoltaic energy comes from the direct transformation of part of solar radiation into electrical energy. This energy conversion takes place through a solar cell whose efficiency depends on the range of the solar spectrum absorbed. This work consists in studying and simulating a triple-junction solar cell based on InGaP / GaAs / Si using the COMSOL software. After recalling the operating principle and characteristics of a solar cell, the influence of the thickness on the characteristics of the different cells was determined. The result of the simulation shows that the efficiency of the triple-junction solar cell can reach a value of 43% for thicknesses $W1 = 3\mu\text{m}$, $W2 = 4\mu\text{m}$ and $W3 = 100\mu\text{m}$ of the different cells.

Keywords : Solar cell; Triple junction; Simulation ; Efficiency ; InGaP / GaAs / Si.

Listes des acronymes et abréviations

E	Énergie de photon
h	Constant de Planck
ν	Fréquence de la lumière
c	Vitesse de la lumière
λ	Longueur d'onde
AM	Air Masse
F	Irradiation spectrale d'un corps noir
k	Constante de Boltzmann $k = 8,617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$
R_S	Rayon du soleil
d	Distance soleil-terre
T	Température
n	Concentration des électrons dans la bande de conduction
n_i	Concentration des porteurs libres intrinsèques
p	Concentration des trous
A	Constante spécifique du matériau
N_d	Concentration de dopants donneurs ionisés
N_a	Concentration de dopant accepteurs ionisés
E_c	Énergie de la bande de conduction
E_v	Énergie de la bande de valence
E_F	Énergie de niveau de Fermi
E_g	Energie de la bande interdite
E_i	Niveau de Fermi intrinsèque
E_T	Energie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite
m^*	Masse effective
K	Vecteur d'onde
B	Coefficient de recombinaison radiative
R_{Au}	Taux de recombinaison Auger
μ	Mobilité
q	Charge de l'électron
D	Constant de la diffusion
J_n	Densité de courant des électrons
S	Vitesse de recombinaison en surface
Δn	Densité de porteurs excédentaires
R	Coefficient de réflexion
E_c	Energie cinétique
ZCE	Zone de Charge d'espace
V	Potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction
J_{obs}	Densité de courant total traversant la cellule dans l'obscurité
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{CO}	Tension de circuit ouvert
P_{max}	Puissance maximal
V_{max}	Tension maximale

I_{\max}	Courant maximal
FF	Facteur de forme
P_{in}	Puissance incidente
η	Rendement de conversion
A	Section de la cellule solaire
L	Largeur de la cellule solaire simulée
G	Éclairement.
I	Courant fourni par la cellule
V	Tension aux bornes de la cellule.
In	Indium
P	Phosphore
Ga	Gallium
As	Arsenic
Si	Silicium

Table des matières

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre 01 : Généralités

1.1. Introduction	03
1.2. Le soleil.....	03
1.3. Le rayonnement solaire.....	04
1.4. Le spectre solaire	06
1.5. L'air Masse	07
1.6. Radiation d'un corps noir	08
1.7. L'effet photovoltaïque.....	09
1.8. Semi-conducteur	10
1.9. Les matériaux III-V.....	12
1.10. Jonction PN.....	12
1.11. Structure Cristalline.....	13
1.12. Structure des bandes d'énergie	14
1.13. Propriétés électriques	15
1.14. Génération optique	16
1.15. Recombinaison	17
1.15.1. Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH).....	17
1.15.2. Recombinaison radiatives (bande à bande).....	18
1.15.3. Recombinaison Auger.....	18
1.15.4. Recombinaison en surface	19
1.16. Composés binaires III-V.....	19
1.16.1. Propriétés physiques des composés binaires III-V.....	19
1.16.2. Propriétés physiques des composés binaires III-V.....	20
1.17. Composés ternaires III-V.....	22
1.17.1. Le paramètre de maille des alliages ternaire.....	22
1.17.2. Energie du gap.....	23

1.18. Propriétés du matériau ternaire InGaP.....	24
1.19. Propriétés générales du silicium.....	26
1.20. Les équations de semi-conducteur.....	28
1.21. Conclusion.....	29

Chapitre 02 : Physique des cellules solaires

2.1. Introduction.....	30
2.2. La cellule photovoltaïque.....	31
2.3. Schéma de principe d'une cellule solaire.....	32
2.4. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	32
2.4.1. L'équilibre thermodynamique.....	32
2.4.2. Hors équilibre thermodynamique.....	33
2.5. La modélisation d'une cellule solaire.....	34
2.6. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	34
2.7. La caractéristique tension courant I (V).....	35
2.8. Paramètres photovoltaïques	36
2.8.1. Le courant de court-circuit J_{CC}	36
2.8.2. La tension de circuit ouvert V_{CO}	37
2.8.3. Le facteur de forme FF.....	37
2.8.4. La puissance maximale P_{max}	37
2.8.5. Le rendement de conversion d'énergie η	38
2.9. Les cellules multi-jonctions	38
2.10. Utilité des cellules multi-jonctions.....	40
2.11. Structure et principe de base des cellules solaire multi-jonctions.....	41
2.11.1. Structure.....	41
2.11.2. Principe de base	42
2.12. Cellule tandem.....	42
2.13. Cellule cascade.....	43
2.14. Les cellules solaires à triple-jonctions	44

2.15. Cellules solaires triple -jonctions à base d'InGaP/GaAs/Si	46
2.16. Conclusion.....	48

Chapitre 03 : résultats de simulation et discussion

3.1. Introduction	49
3.2. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysiques.....	50
3.3. Présentation de la cellule à étudier.....	51
3.4. Paramètres de simulation.....	52
3.5. Effet de l'épaisseur de la cellule supérieure InGaP	52
3.5.1. Caractéristiques courant tension J(V)	52
3.5.2. Caractéristiques puissance tension P(V).....	53
3.5.3. Courant de court-circuit J_{CC}	53
3.5.4. Tension de circuit ouvert V_{CO}	54
3.5.5. Puissance maximale P_{max}	54
3.5.6. Le rendement η (%).....	55
3.5.7. Le facteur de forme FF	55
3.6. Effet de l'épaisseur de la cellule médiane GaAs.....	56
3.6.1. Caractéristiques courant tension J(V).....	56
3.6.2. Caractéristiques puissance tension P(V)	56
3.6.3. Courant de court-circuit J_{CC}	57
3.6.4. Tension de circuit ouvert V_{CO}	58
3.6.5. Puissance maximale P_{max}	58
3.6.6. Le rendement η	59
3.6.7. Le facteur de forme FF.....	59
3.7. Effet de l'épaisseur de la cellule inférieure Si.....	60
3.7.1. Caractéristiques courant tension J(V)	60
3.7.2. Caractéristiques puissance tension P(V)	60
3.7.3. Courant de court-circuit J_{CC}	61
3.7.4. Tension de circuit ouvert V_{CO}	62
3.7.5. Puissance maximale P_{max}	62
3.7.6. Le rendement η (%)	63
3.7.7. Le facteur de forme FF	63
3.8. Caractéristiques de la cellule InGaP/GaAs/Si cascade.....	64
3.9. Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. L'Irradiation Globale Annuelle Moyenne en Algérie pour la période 2002-2011.

Figure 1.2. Le soleil.

Figure 1.3. Influence de l'atmosphère sur le spectre solaire.

Figure 1.4. Composantes du rayonnement solaire global.

Figure 1.5. Spectre électromagnétique.

Figure 1.6. Définition de l'air masse.

Figure 1.7. Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge) en fonction de la longueur d'onde.

Figure 1.8. L'irradiation d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde.

Figure 1.9. Représentations des bandes d'énergies.

Figure 1.10. Représentation d'une jonction PN.

Figure 1.11. Maille élémentaire de la structure zinc blende.

Figure 1.12. Vue des dessus de la structure zinc blende.

Figure 1.13. Structure des bandes de GaAs.

Figure 1.14. Diagramme des énergies pour un matériau.

Figure 1.15. Schémas représentant les différents mécanismes de recombinaison a, b, c.

Figure 1.16. Evolution du coefficient d'absorption des matériaux InGaP, GaAs, et Si en fonction de la longueur d'onde.

Figure 1.17. Bandes interdites de différents semi-conducteurs utilisés en optoélectronique en fonction de leur paramètre de maille.

Figure 1.18. Evolution du gap du $Ga_xIn_{1-x}P$ en fonction de la composition de gallium x et la focalisation des travaux autour de $x=0.51$.

Figure 1.19. Structure cristalline du Si.

Figure 1.20. Structure de bandes d'énergie du silicium.

Chapitre 2

Figure 2.1. Structure basique d'une cellule solaire.

Figure 2.2. Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Figure 2.3. I_g : courant généré ; I_d : courant de diode ; I : courant disponible.

Figure 2.4. Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Figure 2.5. Caractéristique courant-tension (I-V) en obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.

Figure 2.6. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

Figure 2.7. Le rendement d'énergie en fonction du gap d'énergie.

Figure 2.8. Les performances des cellules PV en fonction de la technologie selon le NREL.

Figure 2.09. Spectre solaire AM1.5 avec les différentes pertes par thermalisation ou par transmission localisées dans une cellule solaire. (a) mono jonctions Si, (b) multi-jonctions GaInP/GaInAs/Ge.

Figure 2.10. Synoptique d'une cellule solaire monolithique.

Figure 2.11. Cellule tandem.

Figure 2.12. Cellule cascade.

Figure 2.13. : Structures cellules solaires tri-jonction (a) avec accord de paramètre de maille entre le Ge et le reste des couches (b) avec désaccord de paramètre de maille.

Figure 2.14. Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une CSTJ.

Figure 2.15. Couche fenêtre (a) avant et (b) arrière.

Chapitre 3

Figure 3.1. Schéma de la structure simulée.

Figure 3.2. Caractéristique courant-tension de la structure InGaP pour différentes épaisseurs W_1 .

Figure 3.3. Puissance délivrée par la cellule InGaP en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_1 .

Figure 3.4. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{CC} en fonction de l'épaisseur W_1 .

Figure 3.5. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_1 .

Figure 3.6. Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_1

Figure 3.7. Représentation du rendement de la cellule InGaP en fonction de l'épaisseur.

Figure 3.8. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_1 .

Figure 3.9. Evolution de la caractéristique courant-tension $J(V)$ de la cellule pour différentes valeurs de W_2 .

Figure 3.10. Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation pour différents W_2 .

Figure 3.11. Variation du courant de court-circuit pour différentes épaisseurs W_2 .

Figure 3.12. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_2 .

Figure 3.13 Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_2 .

Figure 3.14. Représentation du rendement de la cellule GaAs en fonction de l'épaisseur W_2 .

Figure 3.15. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_2 .

Figure 3.16. Evolution de la caractéristique courant-tension $J(V)$ de la cellule inférieure pour différentes valeurs de W_3 .

Figure 3.17. Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation pour différents W_3 .

Figure 3.18. Variation du courant de court-circuit pour différentes épaisseurs W_3 .

Figure 3.19. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_3 .

Figure 3.20. Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_3 .

Figure 3.21. Représentation du rendement de la cellule Si en fonction de l'épaisseur W_3 .

Figure 3.22. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_3 .

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1. Paramètres des composés binaires III-V à 300 K.

Tableau 1.2. Paramètres physiques et optiques du GaAs, InP et GaP à température ambiante (300 K).

Chapitre 3

Tableau 3.1. Données de la structure simulée.

Introduction générale

L'importance de l'énergie dans notre vie est évidente, elle est le pilier du développement économique et social. Ce développement n'a pu se produire que grâce à l'utilisation des combustibles et du nucléaire, cependant, cette utilisation est confrontée à un ensemble de contraintes telles que les effets nuisibles sur le plan environnemental ainsi que l'épuisement de ces ressources dans les décennies à venir.

Les énergies renouvelables sont la réponse. On appelle énergie renouvelable toute énergie qui se régénère rapidement ou qui semble inépuisable à l'échelle humaine, telles que l'hydraulique, l'éolienne, la biomasse et l'énergie solaire. Ces derniers sont essentiellement celles qui sont issues du rayonnement solaire soit directement ou indirectement.

L'Algérie dispose d'un des gisements les plus élevés au monde, avec une durée d'insolation qui dépasse les 2000 heures/an sur les hauts plateaux et le Sahara [1].

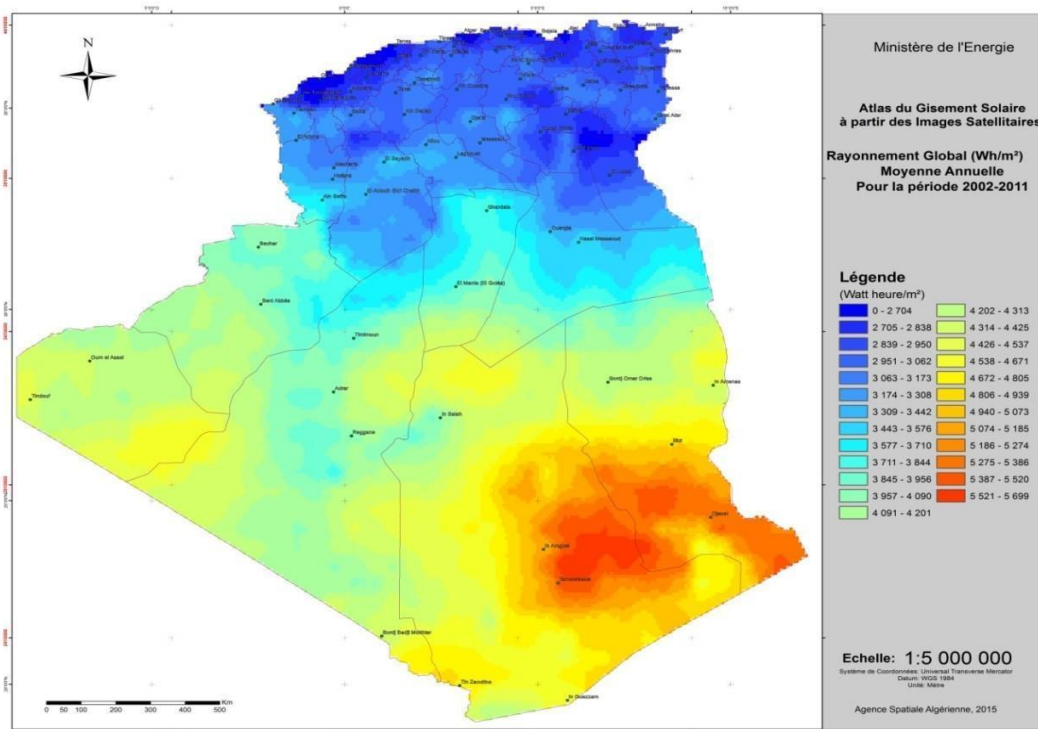


Figure 1.1. L'Irradiation Globale Annuelle Moyenne en Algérie pour la période 2002-2011 [1].

Vu le potentiel national en énergie solaire, l'Algérie considère ce dernier comme une opportunité et un levier de développement et compte de se concentrer sur son exploitation afin de répondre aux besoins de sa population, bien que le développement de l'énergie solaire rencontre quelques obstacles (les coûts de production très élevés, la soumission aux conditions, la productivité réduite, ...etc.).

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

Dans ce sens, nous nous sommes intéressés à la simulation des cellules solaires à triple jonctions à base de semi-conducteurs III-V dans le but d'améliorer leurs performances photovoltaïques, les matériaux qui composent nos cellules sont : GaInP, GaAs, Si.

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

- Premier chapitre : nous rappelons quelques généralités sur la conversion photovoltaïque et sur les matériaux et leurs propriétés (optiques, électriques...etc).
- Deuxième chapitre : est consacré à l'étude de la cellule triple jonctions et ses caractéristiques.
- Troisième chapitre : nous présentons les résultats de simulation obtenus et leurs interprétations.
- Nous terminons ce travail par une conclusion et perspective.

Chapitre 01 Généralités

1.1. Introduction

L'effet photovoltaïque est le phénomène utilisé dans les cellules solaires qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité.

Ce phénomène fut découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, qui constata que le rayonnement lumineux produit sur certains matériaux une étincelle, preuve d'un phénomène électrique [2].

Albert Einstein expliqua le phénomène photovoltaïque en 1912, mais il a fallu attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique.

En 1954, D.M. Chapin, C.S. Fuller et G.L. Pearson fabriquaient la première cellule solaire en Silicium, de rendement 6%, dans les laboratoires Bell [3].

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire, ainsi que quelques notions fondamentales sur la conversion photovoltaïque.

1.2. Le soleil

Le Soleil est une étoile de 1391960 km (soit environ 109 fois la Terre) de diamètre. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température est 10^6 °C et la pression (340 milliards de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer) est si intense que des réactions thermonucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La masse de la particule alpha est environ 70 % de la masse des quatre protons. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium. Dans le processus, cinq millions de tonnes d'énergie pure sont libérées [4].

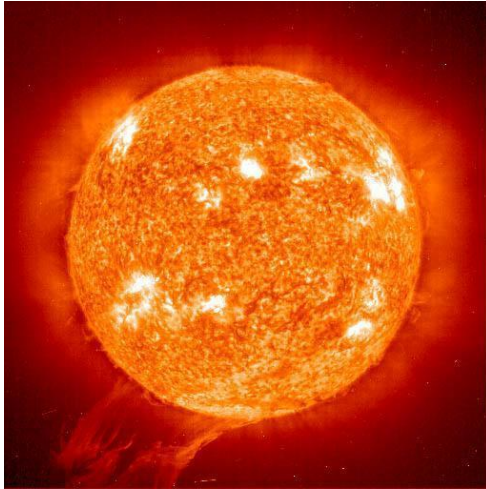


Figure 1.2. Le soleil [5].

1.3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie qui résulte des réactions nucléaires produites au sein du soleil (fusion de l'hydrogène), cette énergie estimée à 1370 W/m^2 en dehors de l'atmosphère n'atteint pas la surface terrestre de manière constante, sa quantité varie au cours de la journée, en fonction des saisons et dépend de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la latitude.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5 \mu\text{m}$), et se décompose approximativement de [6] :

- 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 ($>0,8 \mu\text{m}$).

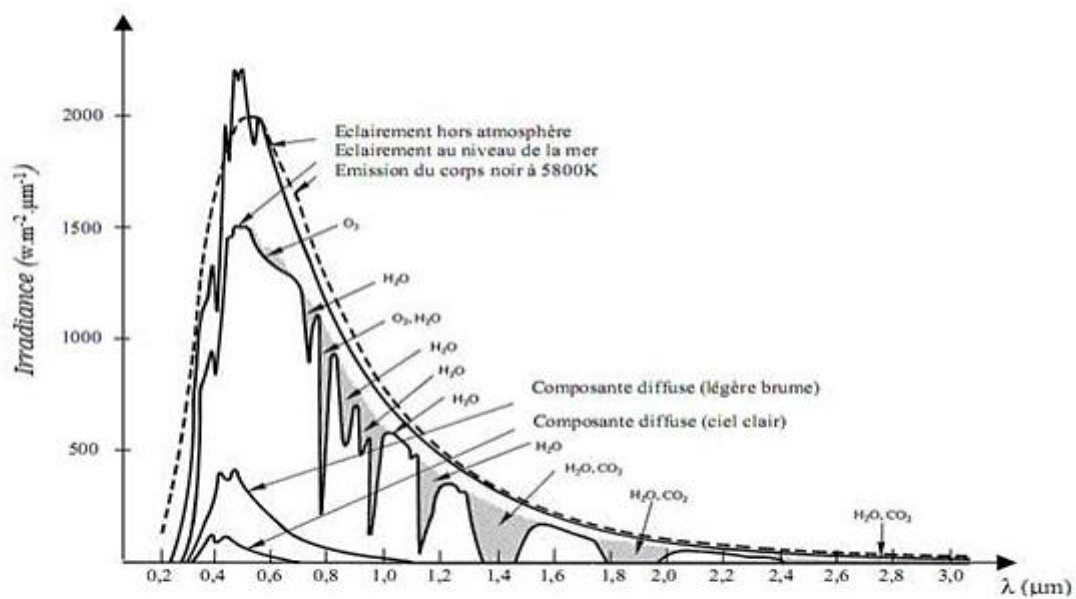


Figure 1.3. Influence de l'atmosphère sur le spectre solaire [7].

Le rayonnement total reçu par une surface d'un mètre carré est appelé rayonnement global et il se compose de trois différents types de rayonnement :

- Le rayonnement direct : est le rayonnement reçu directement du soleil.
- Le rayonnement diffus : est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste, il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.
- Le rayonnement réfléchi : est le rayonnement qui se réfléchit par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface, il dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige,..).

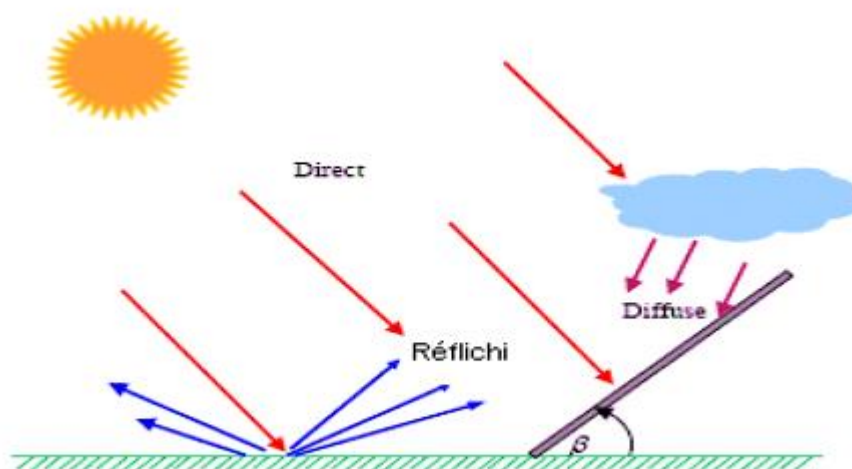


Figure 1.4. Composantes du rayonnement solaire global [8].

1.4. Le spectre solaire

Sur Terre, la principale source de lumière est le soleil. La lumière est une onde électromagnétique qui peut se propager dans le vide sans support matériel, elle est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation [9] :

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1.1)$$

Où h est la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

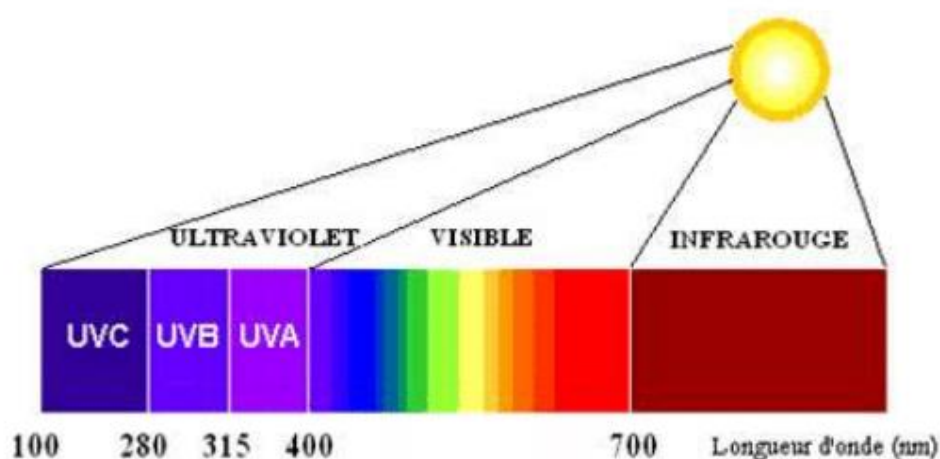


Figure 1.5. Spectre électromagnétique [10].

1.5. L'Air Masse

On appelle l'Air Masse noté (AM), la distance parcourue par le rayonnement lumineux, depuis son entrée dans l'atmosphère jusqu'au sol. Elle varie en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith, et elle est définie comme suit :

$$AM = 1/(\cos \theta) \quad (1.2)$$

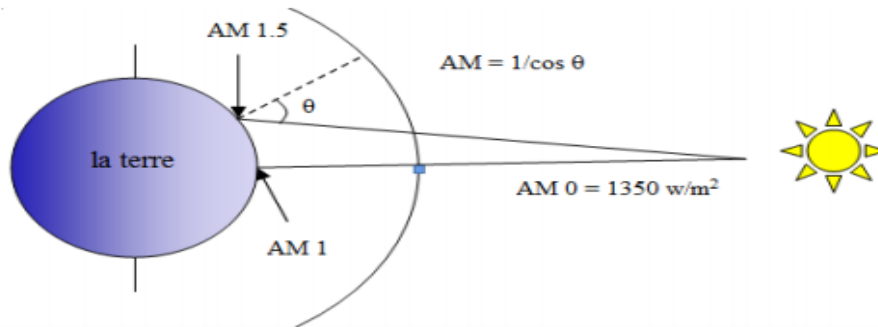


Figure 1.6. Définition de l'air masse.

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, $AM=1$: la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m^2 , mais a été arrondi à 1 kW/m^2 .

L'intensité ID reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [11] :

$$ID = 1,33(0,7^{AM})^{0,678} \quad (1.3)$$

Avec ID en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents.

Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure 1.7.

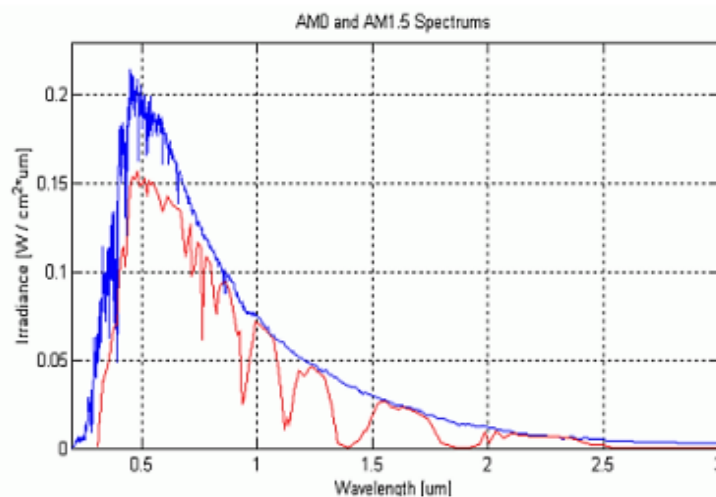


Figure 1.7. Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge) en fonction de la longueur d'onde [12].

1.6. Radiation d'un corps noir

Le soleil est un corps noir, comme tout corps suffisamment épais et non réfléchissant. Un corps noir est défini comme un corps qui absorbe complètement le rayonnement de toutes les énergies photoniques h [13].

L'irradiation d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée par l'équation suivante :

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (1.4)$$

Avec :

$$A = \left(\frac{R_s}{d} \right)^2 \quad (1.5)$$

k désigne la constante de Boltzmann, ν la fréquence de la lumière, T la température, c la vitesse de la lumière dans le vide, R_s le rayon du soleil $R_s=6.96 \times 10^5$ Km, d la distance soleil-terre $d=1,5 \cdot 10^9$ Km, et λ est la longueur d'onde de la lumière.

Un corps noir doit également émettre l'énergie qu'il absorbe, sinon il ne serait pas en équilibre et absorberait une quantité d'énergie presque infinie, il émet un rayonnement à une longueur d'onde qui dépend de sa température et est complètement indépendante des longueurs d'onde du rayonnement absorbé. On ne peut pas emmener un thermomètre sur une planète ou une étoile, pour mesurer sa température, mais on peut la dériver en regardant le rayonnement du corps noir qu'il émet. Ce rayonnement (spectre lumineux) a une forme caractéristique et s'appelle une courbe de corps noir ou courbe de Planck.

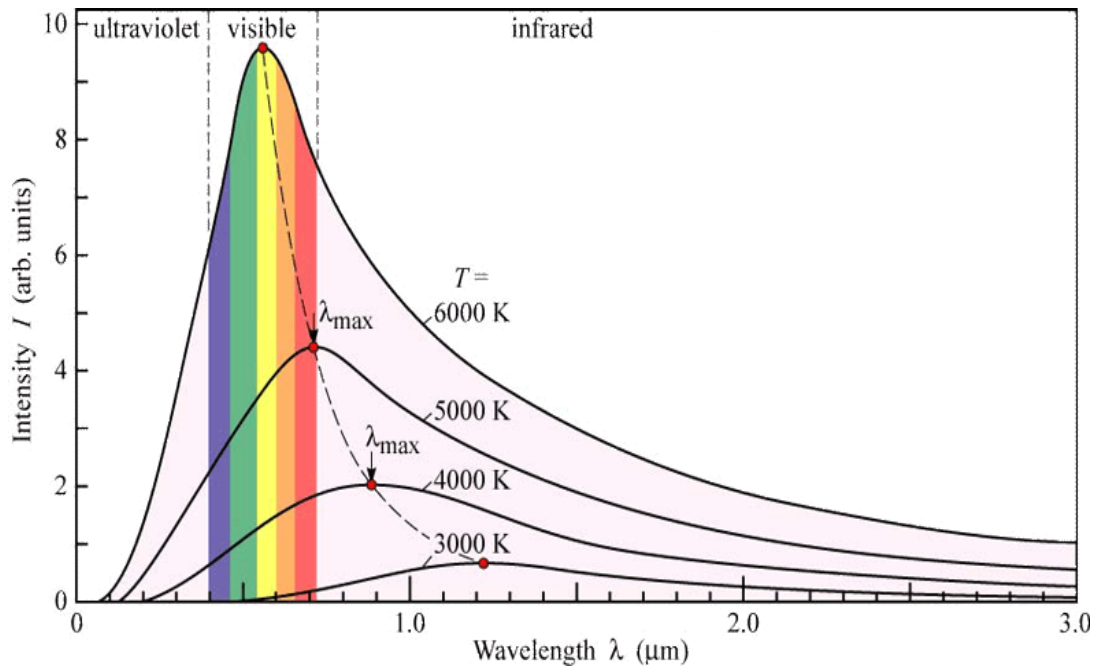


Figure 1.8. L'irradiation d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde [14].

La figure 1.8 montre la courbe de Planck pour quatre étoiles avec des températures de surface comprises entre 3 000 et 6 000 K. La courbe de Planck pour chaque étoile culmine à une longueur d'onde différente. Plus l'étoile est chaude, plus la longueur d'onde de son pic d'émission est courte [14].

1.7. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Henri Becquerel. L'idée d'Henri Becquerel commença à être étudiée un siècle plus tard et aboutit à l'invention des panneaux solaires photovoltaïques. Cette énergie est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie « Bell Téléphone ».

En 1958, une cellule avec un rendement de 9% est mise au point et en même temps, les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière à des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et même réfrigérateurs solaires [15].

L'effet photovoltaïque est la transformation instantanée de la lumière en électricité. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron.

L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron-trou, c'est la génération des charges libres [16].

Il 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.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collection de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

1.8. Semi-conducteurs

Un semi-conducteur, n'est ni tout à fait un conducteur d'électricité, ni tout à fait un isolant. Il peut être soit l'un, soit l'autre selon diverses conditions.

Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes, chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique.

Les électrons des atomes peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atomes :

- Électrons de cœur : ceux-ci sont proches du noyau et n'interagissent pas vraiment avec les autres atomes,
- Électrons de valence : ils sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et de former les molécules,
- Électrons de conduction : ils sont responsables de la circulation du courant électrique [17].

On peut schématiser l'ensemble sous la forme de couches. Sur le schéma suivant figure 1.9, on a représenté les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction :

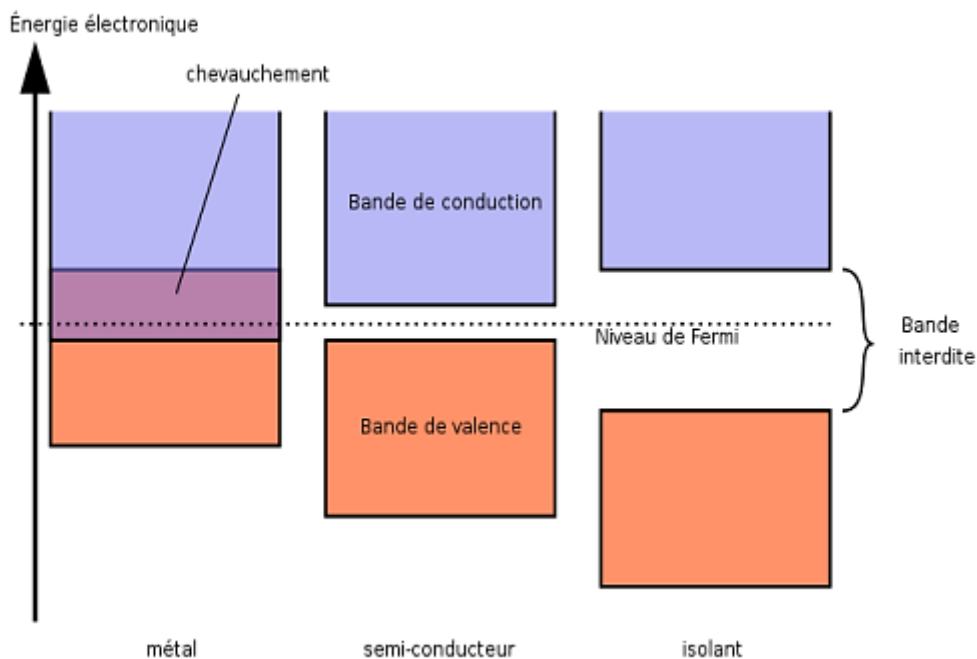


Figure 1.9. Représentations des bandes d'énergies.

On note que dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement-physico-chimique.

Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé « bande interdite » : cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver. Dans le cas des isolants, les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction : ces matériaux ne peuvent donc pas conduire l'électricité.

Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une bande interdite aussi, mais ce dernier est très fin. Il suffit de donner de l'énergie aux électrons, en les excitant pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-conducteur conducteur. Un semi-conducteur est donc un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence. Ceci peut se faire soit en chauffant le matériau, soit en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie.

1.9. Les matériaux III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3^{ème} colonne et d'un élément de la 5^{ème} colonne de la classification périodique. Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bande, montre que les éléments les plus légers donnent des composés à large bande interdite, dont les propriétés se rapprochent de celles des isolants, et à structure de bande indirecte. L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne.

Les matériaux III-V offrent donc des multiples possibilités, aussi bien pour la microélectronique rapide que pour l'optoélectronique, par la grande variété des composés réalisables et l'ouverture qu'ils donnent sur la conception des dispositifs totalement nouveaux par l'ajustement des structures des bandes "band gap engineering". L'arséniure de gallium GaAs est un composé semi-conducteur utilisé dans certaines diodes, dans les transistors à effet de champ (FET), et dans les circuits intégrés. Les porteurs de charge, qui sont principalement des électrons, se déplacent à grande vitesse entre les atomes. Cela rend les composants GaAs utiles à des fréquences radio ultra-hautes et dans les applications de commutation électronique rapide. Les dispositifs GaAs génèrent moins de bruit que la plupart des autres types de composants semi-conducteurs. Le phosphure de gallium indium (InGaP), également appelé le phosphure d'indium gallium (GaInP), est un semi-conducteur composé d'indium, de gallium et de phosphore. Il est utilisé dans de hautes puissances et hautes fréquences de l'électronique en raison de sa vitesse des électrons supérieure par rapport aux semi-conducteurs plus fréquents, le silicium Si et l'arséniure de gallium GaAs. Il est utilisé pour la fabrication des cellules solaires de haut rendement pour les applications spatiales et, en combinaison avec l'aluminium (alliage AlGaInP) pour la construction de LED à haute luminosité.

1.10. Jonction PN

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs. Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte, lorsqu'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre.

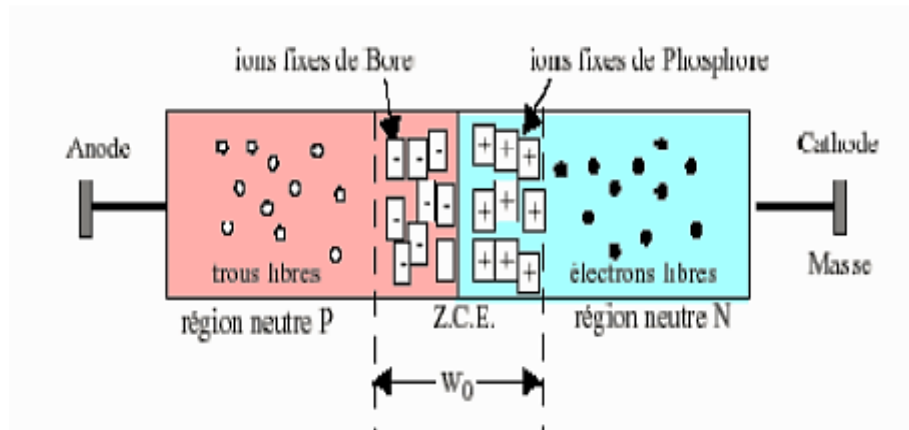


Figure 1.10. Représentation d'une jonction PN [18].

Les trous de la région P vont migrer vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives.

Il apparaît ainsi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives, qu'on appelle la zone de charge d'espace (ZCE). Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [19].

1.11. Structure cristalline

Les matériaux semi-conducteurs III-V cristallisent suivant la structure sphalérite aussi appelée structure Zinc-Blende (ZB). Cette structure consiste en deux sous-réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'une translation de $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$ suivant la direction $\{111\}$. Chaque sous-réseau est constitué exclusivement d'atomes III ou d'atomes V. La stœchiométrie est donc de 1 pour 1 entre les éléments III et V. Les liaisons chimiques entre les atomes sont fortement covalentes avec une mise en commun d'électrons entre les atomes élément III et ceux élément V.

Les liaisons sont formées à partir d'orbitales atomiques hybridées de type sp^3 . Il existe aussi un faible caractère ionique dans ces liaisons en raison de la différence d'électronégativité entre les éléments III et V.

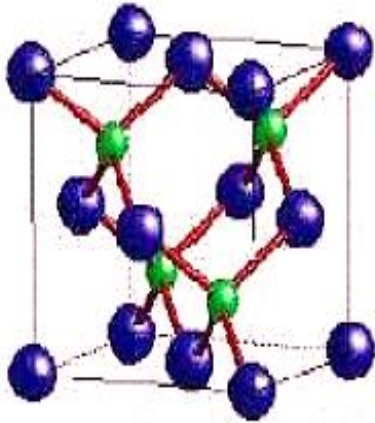


Figure 1.11. Maille élémentaire blende.

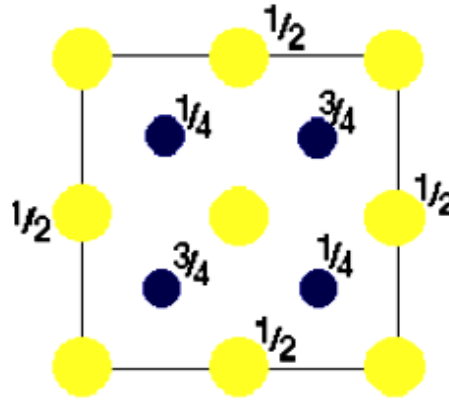


Figure 1.12. Vue de dessus de la structure zinc structure zinc blende.

1.12. Structure des bandes d'énergies

Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leur vecteur d'onde. On les représente donc dans l'espace réciproque, et, pour simplifier, dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin. Elles se décomposent en bandes de valence et bandes de conduction. Ce sont la bande de valence la plus haute, la bande de conduction la plus basse, et la bande interdite qui les sépare qui déterminent principalement les propriétés de transport du semi-conducteur, et ce sont celles-ci que nous considérerons par la suite. L'allure générale des bandes est la même pour tous les composés III-V considérés [20], dont la structure de bande est directe, c'est-à-dire pour lesquelles le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont situés au centre de la zone de Brillouin, en $k = 0$. Le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles. Il existe par ailleurs des minima secondaires en bordure de la zone de Brillouin : quatre vallées L équivalentes, et trois vallées de type X. Ces minima sont beaucoup plus plats, les électrons y ont une masse effective beaucoup plus grande, et donc une faible mobilité.

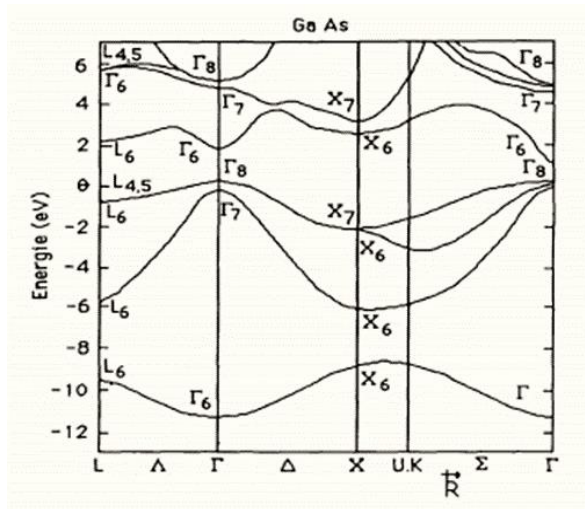


Figure 1.13. Structure de bandes de GaAs [21].

1.13. Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite E_g , et de sa densité de porteurs. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction.

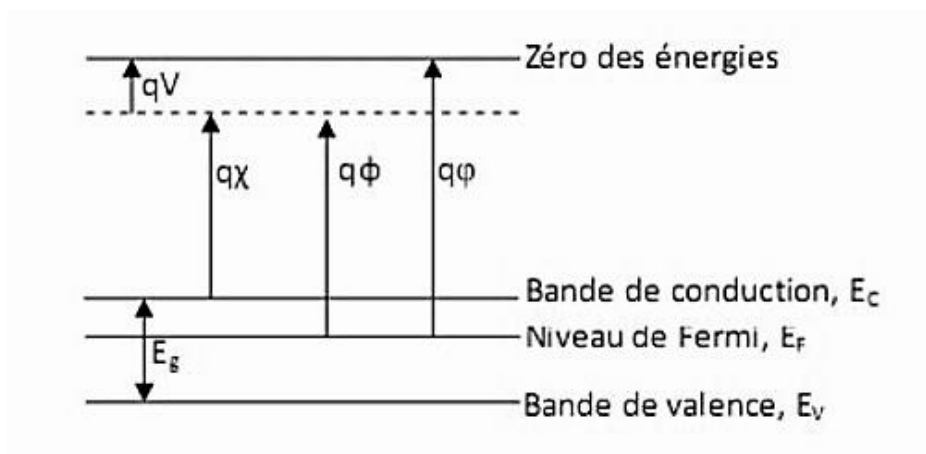


Figure 1.14. Diagramme des énergies pour un matériau [22].

Avec :

q : la charge élémentaire.

V : le potentiel électrostatique pouvant régner dans les matériaux.

χ : l'affinité électronique.

φ : le travail de sortie.

ϕ : le potentiel d'ionisation.

Le bas de la bande de conduction varie spatialement avec le potentiel électrostatique macroscopique V régnant à l'intérieur du matériau. L'affinité électronique χ peut être définie comme la quantité d'énergie dégagée suite à la capture d'un électron par un atome en phase gazeuse. Plus l'affinité électronique est grande plus la capture d'un électron par l'atome dégage de l'énergie et plus cette capture est stable.

Le travail de sortie φ correspond au travail à fournir pour extraire une particule du système sans l'emmener à l'infini, mais en la laissant à proximité immédiate du système ou elle reste soumise au même potentiel électrostatique V . Enfin, le potentiel d'ionisation, est l'énergie nécessaire pour extraire une particule du système et la mettre à l'infini [22].

1.14. Génération Optique

La génération est définie comme un processus par lequel les électrons et les trous sont créés [23]. La génération des électrons et des trous est faite grâce au rayon lumineux. Cette dernière est connue comme une génération optique. Quand la lumière frappe un semi-conducteur, elle excite et génère les porteurs de charge par des transitions de la bande de valence à la bande de conduction (transition directe) dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions indirectes dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque.

Lors du déplacement des porteurs, les paires électrons trous peuvent se recombiner et disparaître. Cette recombinaison évite la création du courant électrique. Il faut, donc séparer ces charges en réalisant la jonction p-n.

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

$$G_{opt} = (1 - R). \alpha. \exp(-\alpha x) \quad (1.6)$$

Avec :

R : est le coefficient de réflexion.

x : est la distance de la surface

α : est le coefficient d'absorption

1.15. Recombinaison

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle est le retour de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, les porteurs en excès accomplissent un rétablissement et retrouvent l'équilibre thermodynamique, en engageant une perte d'énergie.

Les principaux mécanismes de recombinaison dans les semi-conducteurs sont soit les mécanismes de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) dus aux défauts cristallins et les atomes impurifiés, soit les recombinaisons radiatives (bande à bande), soit les recombinaisons Auger ou bien les recombinaisons en surface.

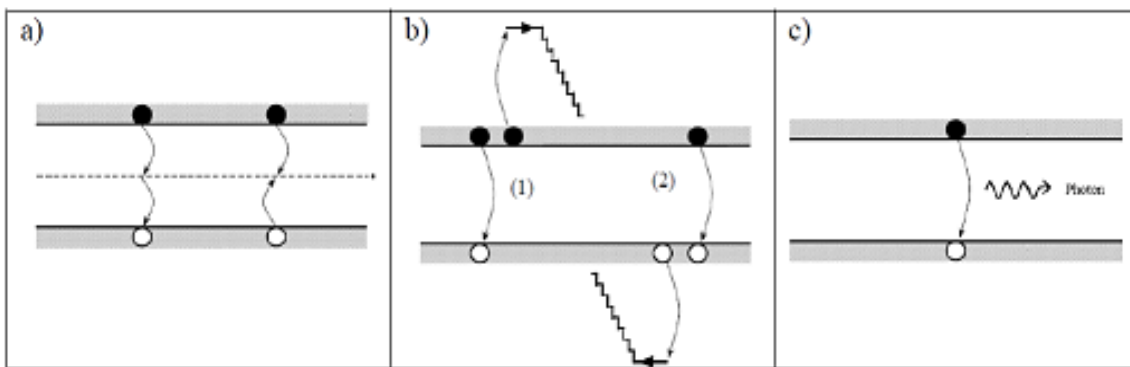


Figure 1.15. Schéma représentant les différents mécanismes de recombinaison.

a)- Recombinaison SRH, b)- Recombinaison Auger, c)- Recombinaison bande à bande.

1.15.1. Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)

Ce mécanisme, appelé aussi indirecte ou assistée (par piège), introduit une étape dans la transition entre les bandes de conduction et de valence, sous forme d'un piège situé à un niveau dans la bande interdite. Elle se produit dans les semi-conducteurs à gap indirect, et le défaut provient des impuretés ou de la structure cristalline du réseau.

Le modèle physique de Shockley-Read-Hall a un seul niveau piège qui décrit cette recombinaison et est donné par la relation :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n(p + n_i)e^{\frac{(E_i - E_T)}{kT}} + \tau_p(n + n_i)e^{\frac{(E_i - E_T)}{kT}}} \quad (1.7)$$

Avec :

R_{SRH} : le taux net de capture.

n_i : la concentration intrinsèque effective.

E_i : le niveau de fermi intrinsèque.

E_T : l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite.

n, p : concentration des porteurs

$\tau_{n,p}$: durée de vie des porteurs

1.15.2. Recombinaisons radiatives (bande à bande) :

A l'inverse du premier mécanisme, la recombinaison radiative est dominante dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure à gap direct. Elle est définie comme le mécanisme inverse de l'absorption optique ; un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron.

Le taux de recombinaison est plus élevé étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, et il est proportionnel à la fois au nombre d'électrons et au nombre de trous :

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (1.8)$$

Avec :

B est le coefficient de recombinaison radiative.

1.15.3. Recombinaisons Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison Auger est donné par :

$$R_{Au} = (n \cdot c_n + p \cdot c_p)(np - n_i^2) \quad (1.9)$$

Avec :

c_n et c_p sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous respectivement.

1.15.4. Recombinaisons en surface

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante ($T=300^{\circ}\text{K}$). La passivation est l'ajout d'une couche de SiO_2 en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur [24].

1.16. Composés binaires III-V

Les semi-conducteurs binaires de la classe (III-V) sont composés d'un élément de la colonne III et d'un autre élément de la colonne V de la classification périodique par exemple : les composées à base Aluminium (AlP, AlAs, AlSb), les composés à base de gallium (GaN, GaSb), ou à base d'indium (InN, InP, InAs, InSb).

Les liaisons atomiques dans les matériaux III-V ne sont pas simplement covalentes comme dans le cas du silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Dans un cristal composé de l'arséniure de gallium, par exemple, chaque atome d'arséniure est entouré de quatre atomes de gallium, et chaque atome de gallium est entouré de quatre atomes d'arséniure. Il se produit alors un échange d'électrons, le cristal se construit avec les ions Ga^- et As^+ , qui ont tous quatre électrons périphériques.

Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires) qui sont orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier.

1.16.1. Propriétés physiques des composés binaires III-V

Le tableau ci-dessous regroupe quelques composés binaires (GaAs, InP, GaP) ainsi que leurs paramètres, bande interdite, masse effective, mobilité et paramètre de maille [25].

Composés III-V	$E_g(\text{eV})$	m^*/m	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$a(\text{\AA})$
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaP	2.26	0.82	110	5.4512

InP	1.35	0.077	4600	5.8686
------------	------	-------	------	--------

Tableau 1.1. Paramètres des composés binaires III-V à 300 K [25].

1.16.2. Propriétés optiques des composés binaires III-V

Les caractéristiques optiques des matériaux sont le coefficient de réflexion R , l'indice de réfraction n et le coefficient d'absorption α .

- **Coefficient de réflexion :**

Le coefficient de réflexion R est lié à l'indice de réfraction n par la relation :

$$R = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2 \quad (1.10)$$

- **Indice de réfraction :**

L'indice de réfraction complexe s'écrit sous la forme :

$$n^* = n - jk_e \quad (1.11)$$

Avec :

n est l'indice de réfraction réel et k_e est le coefficient d'extinction qui sont fonction de la longueur d'onde.

- **Coefficient d'absorption :**

Le coefficient d'absorption α est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau. Il est calculé à partir de la relation [26] :

$$\alpha = \frac{4\pi k_e}{\lambda} \quad (1.12)$$

Avec :

λ est la longueur d'onde.

La variation du coefficient d'absorption α du GaAs en fonction de la longueur d'onde est représentée dans la figure 1.16.

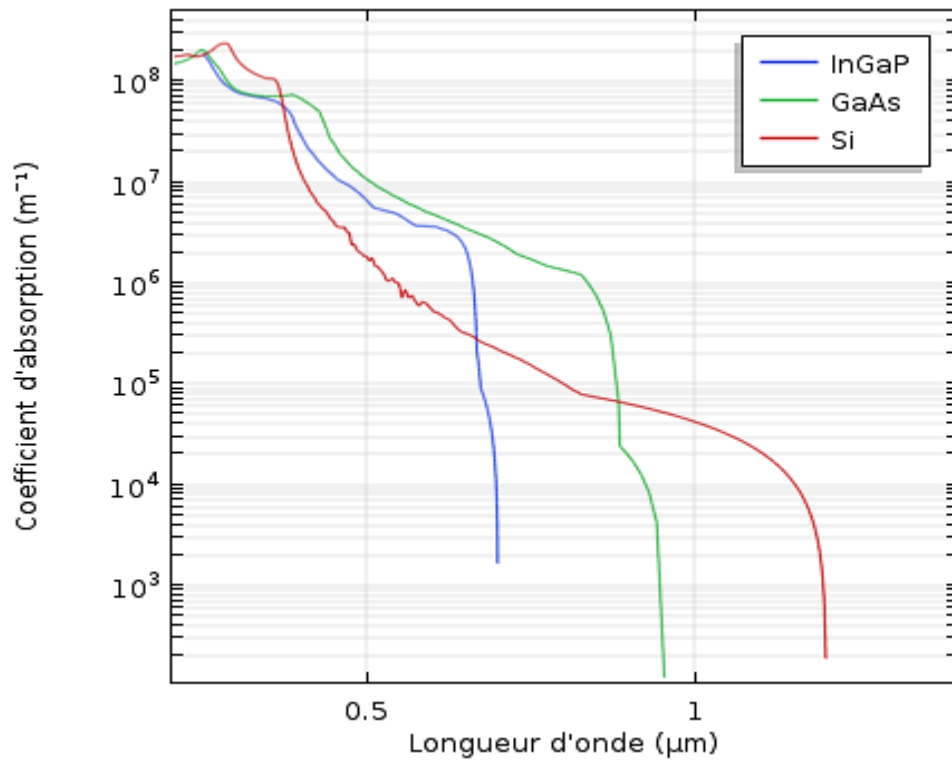


Figure 1.16. Evolution du coefficient d'absorption des matériaux InGaP, GaAs, et Si en fonction de la longueur d'onde.

Le tableau ci-dessous regroupe les propriétés physiques et optiques du GaAs, InP et GaP à 300K.

Propriétés	InP	GaAs	GaP
Structure	Zinc blende	Zinc blende	Zinc blende
Densité $\frac{g}{cm^3}$	4.81	5.32	4.129
Constante diélectrique	12.44	13.18	11.1
$N_c (cm^{-3})$	5.7×10^{17}	4.7×10^{17}	1.99×10^{19}
$N_v (cm^{-3})$	1.1×10^{19}	1.29×10^{19}	1.2×10^{19}
Affinité électronique (eV)	4.5	4.07	3.8

Energie du Gap à 300K (eV)	1.344	1.42	2.272
Concentration intrinsèque des porteurs (cm^{-3})	1.3×10^7	10^{10}	1.6
Mobilité des électrons ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	5000	8500	110
Mobilité des trous ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	150	400	75
Indice de réfraction	3.58	3.30	3.37
Coefficient d'absorption (cm^{-1})	10^4	8×10^5	10^3

Tableau 1.2. Paramètres physiques et optiques du GaAs, InP et GaP à température ambiante (300 K).

1.17. Composés ternaires III-V

Les propriétés des semi-conducteurs III-V sont décrites par un ensemble des lois empiriques et d'approximation, par exemple on applique une relation linéaire entre le paramètre de maille d'un matériau ternaire en fonction de sa composition entre ses deux composés binaires extrêmes, en outre on présente une dépendance de la bande interdite en fonction de la composition x de l'alliage ternaire.

1.17.1. Le paramètre de maille des alliages ternaire

Le cristal ternaire $A_xB_{1-x}C$ est composé des molécules AC avec une fraction molaire x et des molécules BC avec une fraction $(1-x)$.

La constante du réseau est estimée à partir de la loi de Vegard (relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition) [26] :

$$a(x) = xa_{AC} + (1 - x)a_{BC} \quad (1.13)$$

Ou a_{AC} et a_{BC} : sont les constantes du réseau des composés binaires constituant l'alliage.

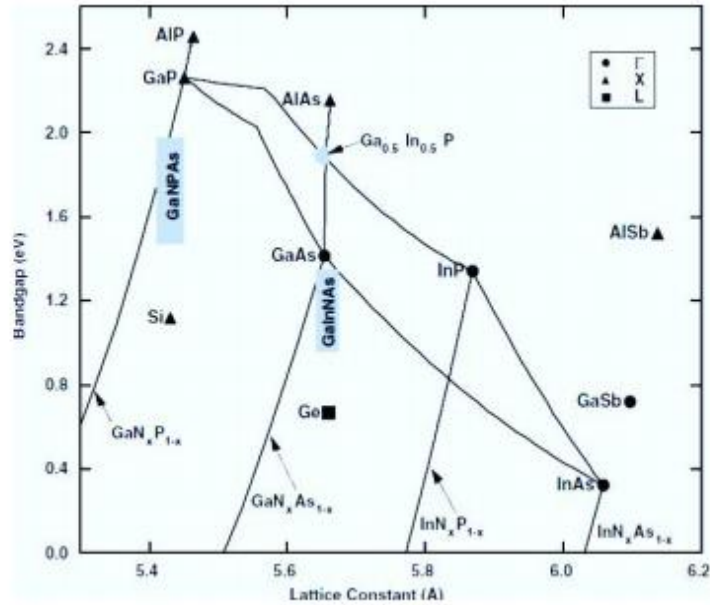


Figure 1.17. Bandes interdites de différents semi-conducteurs utilisés en optoélectronique en fonction de leur paramètre de maille [27].

Les lignes continues représentent les cas intermédiaires (ternaires) entre des composés binaires [27], il constitue une référence générale pour toute conception d'un système optoélectronique. On remarque alors qu'il est possible d'obtenir un paramètre de maille adapté à celui du Ge en utilisant une composition spécifique pour le ternaire InGaAs (faible pourcentage d'indium). D'où la possibilité de faire croître ces matériaux sans engendrer de défauts structuraux majeurs. De plus, les bandes interdites de ces matériaux sont suffisamment bien répartis dans le visible et l'infrarouge, ce qui est intéressant pour la conception de cellules solaires triple jonctions [CSTJ]. On comprend à partir de ce diagramme pourquoi les CSTJ faites d'InGaP/GaAs/Ge attirent autant l'attention des chercheurs et industriels dans la quête de cellules solaires à haut rendement énergétique.

1.17.2. Energie du gap

La possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne, permet d'obtenir des alliages ternaires, qui sont identifiés de la façon $A_xB_{1-x}C$, exemple $In_{1-x}Ga_xP$.

La qualité de la composition de l'alliage dépend des conditions de croissance.

En général, le gap énergétique $E_g(x)$ de l'alliage ternaire est donné par :

$$E_g(x) = xE_{AC} + (1 - x)E_{BC} + bx(1 - x) \quad (1.14)$$

Avec :

E_{AC} est le gap du composé AC, E_{BC} est le gap du composé BC et b étant le paramètre de courbure (bowing) qui est souvent prouvé par l'expérience. L'origine du bowing est dû à l'aspect structural et au désordre compositionnel qui sont très dominants dans les fluctuations de l'alliage ternaire.

1.18. Propriétés du matériau ternaire InGaP

- **Propriétés physiques**

L' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$, matériau ternaire, se situe entre les deux semi-conducteurs binaires le GaP ($x=1$, $E_g = 2.26$ eV) et l'InP ($x=0$, $E_g = 1.344$ eV). Il a un gap direct pour une fraction molaire du Gallium inférieure à 0.74 et un gap indirect sinon. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour $x = 0.51$ [28].

- **Energie de gap**

Généralement, la variation de la largeur de la bande interdite en fonction de la composition du gallium est donnée par une interpolation quadratique. Le terme x est le coefficient stœchiométrique évalué en %.

Pour $0 < x < 0.63$ le gap est direct et s'exprime sous la forme [30] :

$$E_g(x) = -0.2722x^2 + 1.1925x - 1.3399 \quad (1.15)$$

Pour $0.71 < x < 1$ le gap est indirect et s'exprime sous la forme [30] :

$$E_g(x) = xE_g^{\text{GaP}} + (1 - x)E_g^{\text{InP}} \quad (1.16)$$

- **Affinité électronique**

L'évolution de l'affinité électronique χ en fonction du coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [35] :

$$\chi(x) = 4.38 - 0.58x \quad (1.17)$$

- **Constante diélectrique**

L'évolution de la constante diélectrique relative (ou permittivité relative) avec le coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [29] :

$$\varepsilon_r(x) = 12.5 - 1.4x \quad (1.18)$$

- **Masses effectives**

Les masses des électrons et des trous en fonction du coefficient stœchiométrique x sont données par les relations suivantes [30]:

$$m_n^* \frac{(x)}{m_0} = 0.0254x^2 + 0.114x + 0.08 \quad (1.19)$$

$$m_h^* \frac{(x)}{m_0} = 0.19x + 0.6 \quad (1.20)$$

Les densités effectives d'états N_c (cm^{-3}) et N_v (cm^{-3}) sont données par [30] :

$$N_c = 2.5 \times 10^{19} (m_e^*)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.21)$$

$$N_v = 2.5 \times 10^{19} (m_h^*)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.22)$$

La concentration intrinsèque n_i est exprimée par la relation suivante [30] :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.23)$$

La plupart des travaux sur le matériau $In_{1-x}Ga_xP$ ont montré que ce dernier présentait des propriétés intéressantes avec un coefficient stœchiométrique voisin de $x=0.5$ comme le montre la figure 1.18.

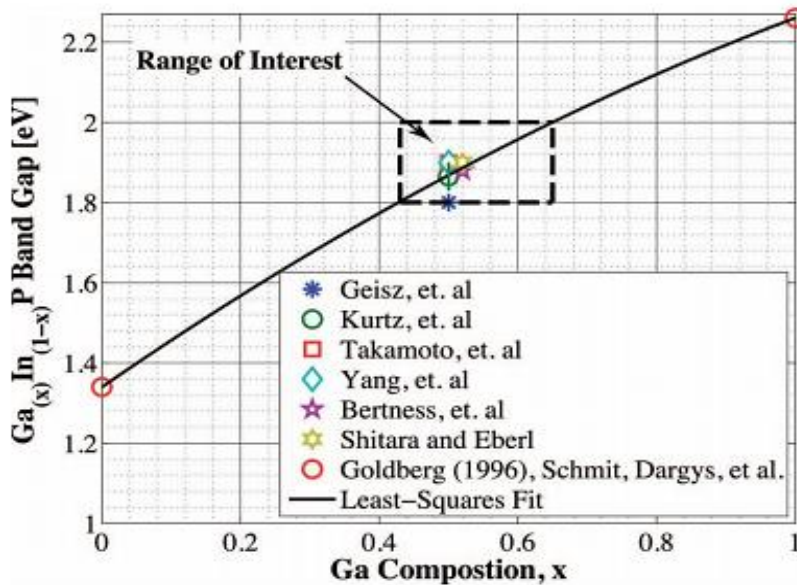


Figure 1.18. Evolution du gap du $Ga_xIn_{1-x}P$ en fonction de la composition de gallium x et la focalisation des travaux autour de $x=0.51$ [34].

- **Propriétés optiques**

On donnera dans cette partie uniquement les propriétés optiques du $In_{1-x}Ga_xP$ pour $x=0.51$.

- **Coefficient d'absorption**

Comme vu précédemment le coefficient d'absorption α est calculé à partir de la relation (1.12).

La variation du coefficient d'absorption α d'InGaP en fonction de la longueur d'onde est représentée dans la figure 1.16.

Le substrat de base utilisé pour la croissance de la cellule solaire tandem triple jonction, InGaP /GaAs/Si, est le Silicium. Il est donc nécessaire de rappeler les principales propriétés physiques et optiques de ce matériau.

1.19. Propriétés générales du silicium

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [30] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Il présente en effet, différents avantages : il est abondant sur la surface du globe car il est facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffise. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,42 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.

Ce semi-conducteur se caractérise par sa forte affinité chimique avec l'oxygène à haute température et il cristallise dans une structure zinc-blende.

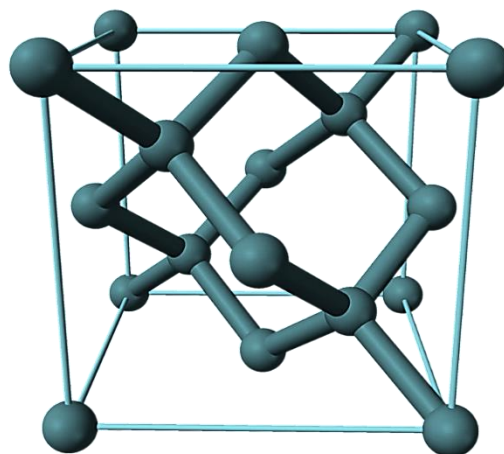


Figure 1.19. Structure cristalline du Si [32].

La figure 1.19. montre la structure cristalline du silicium. Cette structure est typique des éléments de la colonne IV du tableau périodique, mais aussi des composés III –V dans lesquels les sites (0,0,0) et (1/4, 1/4, 1/4) sont occupés par différents types d'atomes. On parle dans ce cas de structure Zinc blende.

Cette structure est similaire à celle du diamant avec une distance interatomique légèrement élevée (2,352Å). Ceci engendre un potentiel périodique dans le cristal créant une différence d'énergie représentée par deux bandes : bande de valence et bande de conduction. Cette différence de bande d'énergie, aussi appelée gap, détermine l'échange des porteurs entre les bandes en fonction des différentes excitations extérieures (température, polarisation, dopage, etc...). Le passage d'une bande à une autre se fait par processus d'absorption ou dégagement d'énergie par les électrons associant le plus souvent des photons ou des phonons. Le diagramme suivant (figure 1.20) illustre les niveaux d'énergie dans les bandes de valence et de conduction.

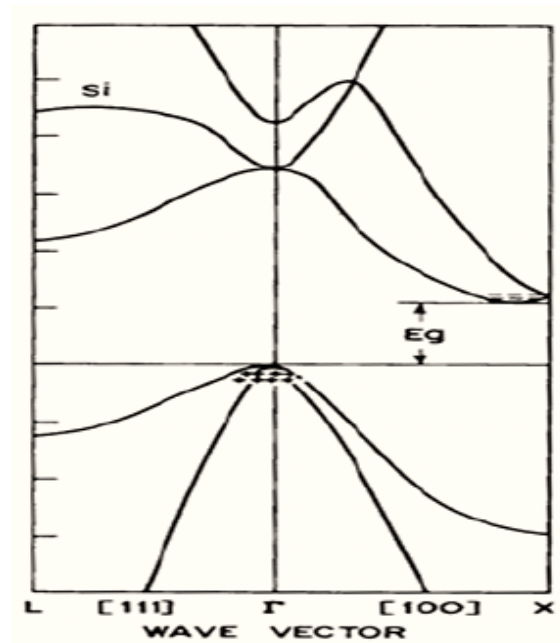


Figure 1.20. Structure de bandes d'énergie du silicium [33].

Dans le cas du silicium, le passage d'une bande à autre ne se fait pas directement. C'est pour cela qu'on parle de gap indirect. Cette propriété rend le silicium inadapté comme semi-conducteur pour les applications optoélectroniques. Cependant la valeur de son gap le rend intéressant pour des composants électroniques classiques. De plus, le silicium présente l'avantage d'être le matériau le moins cher car ses sources d'extraction sont nombreuses et facilement accessibles (sable, zircon, jade, mica, quartz, etc...). D'une manière générale, le silicium y est sous forme d'oxyde de silicium SiO_2 et son obtention nécessite des traitements particuliers (réduction, purification). Dans la technologie microélectronique, le silicium n'est pas seulement utilisé sous la forme cristallisée précédente. Il peut être aussi utilisé en

couches minces sous forme amorphe, poly, micro ou nanocristalline suivant les applications visées. D'une manière générale, sous ces formes cristallines, le silicium est caractérisé par une structure volumique constituée de grains monocristallins de différentes tailles séparés par des joints de grains.

- **Coefficient d'absorption**

Le coefficient d'absorption α est calculé à partir de la relation (1.12), où λ est la longueur d'onde et k le coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde. La variation du coefficient d'absorption α du Si en fonction de la longueur d'onde est représentée dans la figure 1.16.

1.20. Les équations de semi-conducteur

- **Equation de Poisson**

L'équation de Poisson nous permet de calculer le champ électrique et le potentiel électrostatique dans les dispositifs à semi-conducteurs :

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.24)$$

E est le champ électrique, ρ la densité de charges électriques, ϵ la permittivité.

$$E = -\text{grad}\phi \quad (1.25)$$

ϕ est le potentiel électrostatique

$$\text{div}(\epsilon \cdot \text{grad}\phi) = -\rho \quad (1.26)$$

$$\rho = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.27)$$

Donc l'équation de Poisson devient :

$$\text{div}(\epsilon E) = q(p - n + N_d - N_a) \quad (1.28)$$

- **Les équations de continuité des électrons et des trous**

$$\text{div}(J_n) = q(R - G) \quad (1.29)$$

$$\text{div}(J_p) = q(R - G) \quad (1.30)$$

Avec : R taux de recombinaison, G taux de génération.

- **Les densités de courant des électrons et des trous sont données par**

$$J_n = q\mu_n n \frac{\partial E_{Fn}}{\partial X} \quad (1.31)$$

$$J_p = q\mu_p p \frac{\partial E_{Fp}}{\partial X} \quad (1.32)$$

Avec :

- μ_n et μ_p : mobilités des électrons et des trous.
- n et p : concentrations des électrons et des trous.
- E_{Fn} et E_{Fp} : quasi niveaux de Fermi des électrons et des trous.

L'équation de Poisson forme avec les deux équations de continuité un système à trois équations et trois inconnues : le potentiel électrostatique et les densités des électrons et des trous. Ces trois équations sont le point de départ de l'analyse de la plupart des phénomènes électriques et photovoltaïques.

1.21. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des notions importantes sur le rayonnement solaire, ainsi que sur les phénomènes liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et l'irradiation spectrale. Puis on a étudié les caractéristiques structurelles, les propriétés électriques et optiques des matériaux InGaP, GaAs, et Si. Ces connaissances sont indispensables pour déterminer les caractéristiques des cellules solaires.

Chapitre 02 Physique des cellules solaires

2.1. Introduction

La cellule photovoltaïque est l'élément central des installations solaires et permet de convertir l'énergie lumineuse en électricité. Afin d'anticiper la croissance attendue de la consommation mondiale d'électricité, de faire face à la diminution des ressources actuellement utilisées pour la production de l'électricité et de limiter le réchauffement climatique, l'utilisation de plus en plus grande des technologies photovoltaïques est une des solutions à mettre œuvre.

Les principaux matériaux présentant l'effet photovoltaïque sont des semi-conducteurs.

Ces matériaux ont la caractéristique d'être de mauvais conducteurs et de mauvais isolants, ils peuvent être caractérisés par leur gap d'énergie interdite (E_g) c'est-à-dire l'énergie à partir de laquelle ils deviennent absorbants et produisent de l'électricité quand ils sont éclairés par une lumière.

Si un photon arrive sur un semi-conducteur avec une énergie inférieure à son gap d'énergie, il ne sera pas absorbé. Le matériau sera transparent à cette longueur d'onde.

Si l'énergie du photon incident est supérieure au gap d'énergie, le photon sera absorbé et son énergie servira en partie à briser une liaison de valence pour créer une paire électron trou. L'énergie excédentaire sera transformée en chaleur et transmise au réseau (phonons).

Dans ce chapitre, nous allons décrire le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que les expressions des différents paramètres qui vont nous permettre d'évaluer leurs performances.

2.2. La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque qui exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- ✓ de couches semi-conductrices de type P et N (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques)
- ✓ d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires
- ✓ d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode [36]
- ✓ les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement

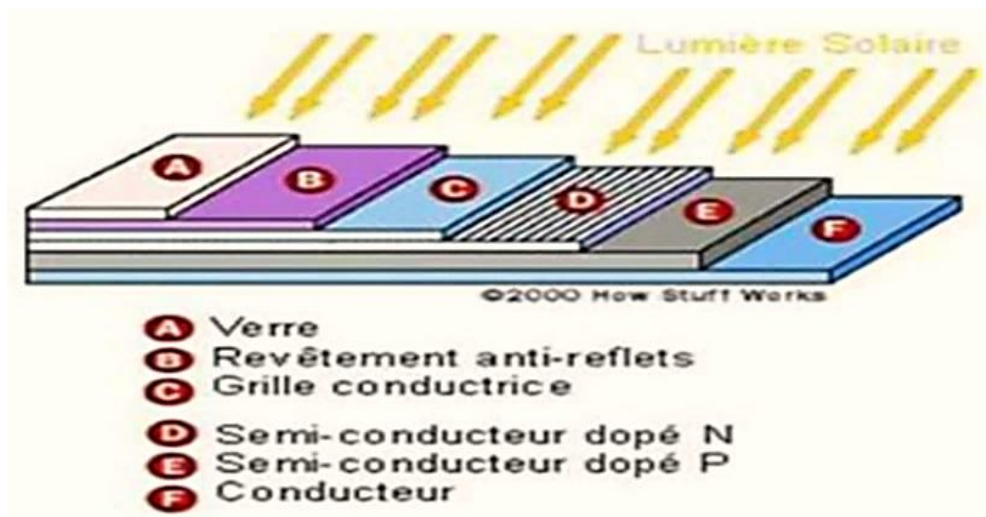


Figure 2.1. Structure basique d'une cellule solaire [36]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

2.3. Schéma de principe d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque (cellule PV), aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de

l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés. La cellule photovoltaïque est schématisée de façon détaillée sur la figure (2.2).

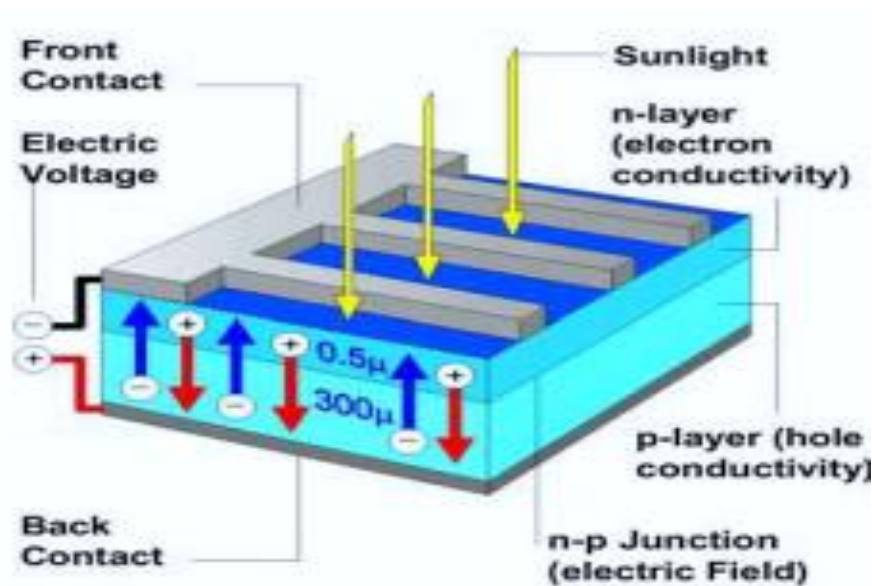


Figure 2.2. Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [37].

2.4. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

2.4.1. L'équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, l'agitation thermique permet à des électrons de bande de valence de passer dans la bande de conduction en laissant un trou dans la bande de valence [38].

- Le potentiel de diffusion de la jonction PN, (V_0) est défini par :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.1)$$

Avec :

V_n et V_p : les potentiels dans les matériaux N et P, respectivement.

k : la constante de Boltzmann.

T : la température.

n_i : la concentration intrinsèque des porteurs libres.

N_d : la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N.

N_a : la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P.

q : la charge de l'électron.

2.4.2. Hors équilibre thermodynamique

On s'éloigne de l'équilibre thermodynamique lorsque la jonction est éclairée, ou lorsque l'on y applique une polarisation. L'équilibre entre les courants de diffusion et inverse est modifié. Pour une excitation lumineuse, la tension d'excitation est appelée tension de circuit ouvert V_{CO} . Dans le cas d'une polarisation directe V aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel qV_0 diminue. En conséquence, le courant des porteurs majoritaires augmente et l'intensité du champ électrique interne diminue. On a alors injection de porteurs minoritaires dans les zones neutres, des électrons dans le matériau P et des trous dans le matériau N.

Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel [39].

$$V_{\text{tot}} = V_0 - V = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) - V \quad (2.2)$$

La largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation (V) s'écrit alors :

$$W = \sqrt{(2\varepsilon q)(V_0 - V) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \quad (2.3)$$

Avec :

V_0 : Le potentiel de diffusion.

V : Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction.

2.5. La modélisation d'une cellule photovoltaïque

On peut modéliser une cellule photovoltaïque éclairée comme ci-dessous :

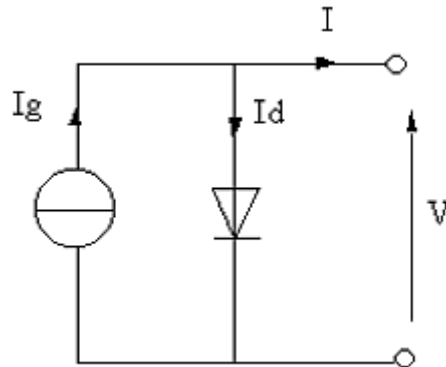


Figure 2.3. I_g : courant généré ; I_d : courant de diode ; I : courant disponible.

Cellule éclairée :

Le courant disponible I sera $I = I_g - I_d$ avec $I_g = K \cdot \Phi$ (K étant une constante due à la fabrication de la cellule et Φ l'ensoleillement en W/m^2). En court-circuit, $V = 0$ donc $I_d = 0$ d'où $I_{cc} = I_g = K \cdot \Phi$. Le courant de court-circuit est donc proportionnel à l'ensoleillement. En circuit ouvert, $I = 0$ et $I_d = I_g$.

2.6. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ❖ Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- ❖ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- ❖ Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 2.4 :

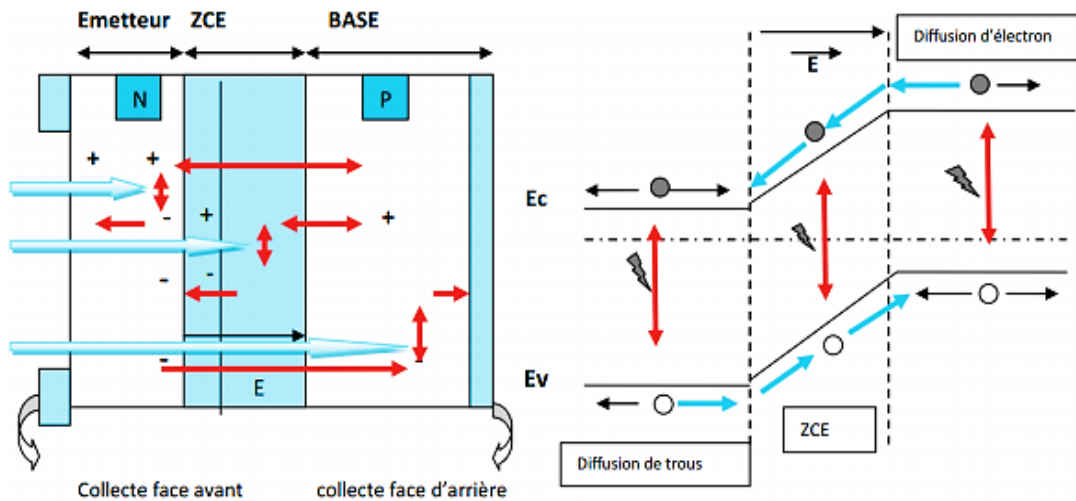


Figure 2.4. Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [40].

Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1, 2 et 3 et le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont directement propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode.

2.7. La caractéristique courant-tension (I-V)

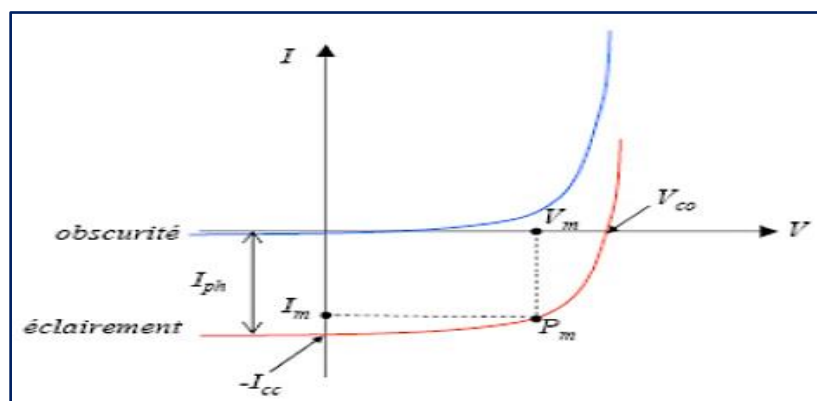


Figure 2.5. Caractéristique courant-tension (I-V) en obscurité et sous éclaircissement d'une cellule PV [41].

Lorsqu'on illumine une jonction PN, on constate une translation de la caractéristique courant tension vers le bas, la caractéristique courant-tension (I-V) ne passe plus par

l'origine des coordonnées des axes. La figure (2.5) représente les caractéristiques courant-tension de la jonction à l'obscurité et sous éclairement.

Le courant résultant est la somme algébrique des composantes de courants dues à l'éclairement, et à celle de l'obscurité qui est le courant de la polarisation en direct de la jonction par la tension V qui apparaît aux bornes d'une résistance de charge. Le courant total s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

où I_{obs} est le courant d'obscurité ($I_{obs} = S \cdot J_{obs}$), I_{ph} le courant photo généré ($I_{ph} = S \cdot J_{ph}$), S la surface du contact métallique de la région du front (émetteur), I_s le courant de saturation et n le facteur d'idéalité.

2.8. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire.

Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$:

- Le courant de court-circuit I_{cc} (obtenu pour $V=0$) ;
- La tension en circuit ouvert V_{co} (obtenu pour $I=0$) ;
- Le facteur de forme FF ;
- La puissance maximale P_m ;
- Le rendement de conversion d'énergie η .

2.8.1. Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

2.8.2. Tension de circuit ouvert V_{co}

Elle représente la tension aux bornes de la cellule solaire sous éclairement sans circuit de charge, V_{co} est donnée par la relation suivante :

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{I_{CC}}{I_S} \right] \quad (2.5)$$

2.8.3. Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_m et la puissance formée par le rectangle ($I_{CC} \times V_{CO}$).

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (2.6)$$

Plus le facteur de forme se rapproche de la valeur de 1, plus le rendement de la cellule est meilleur.

2.8.4. La puissance maximale P_m

La puissance maximale P_m ou bien la puissance optimale fournie par la cellule à partir de la caractéristique I-V, c'est le produit de la tension maximale (V_{max}) qui varie de 0 à (V_{CO}) et du courant max (I_{max}).

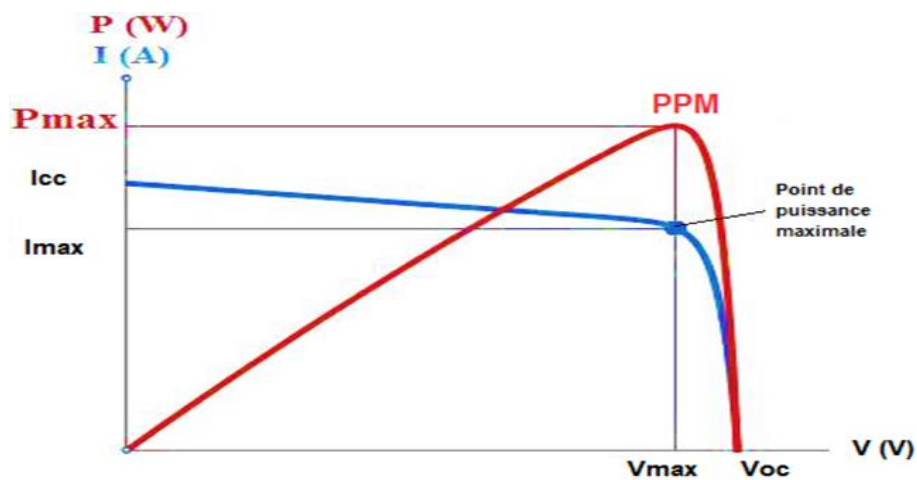


Figure 2.6. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

2.8.5. Le rendement de conversion d'énergie

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

Le rendement est donné par l'équation ci-dessous :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_{in}} \quad (2.7)$$

Le rendement de la cellule solaire est lié de manière indirecte avec le gap d'énergie. Selon les matériaux utilisés et les applications souhaitées les matériaux à semi-conducteurs couvrent une large bande de gap d'énergie qui permet de couvrir toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire.

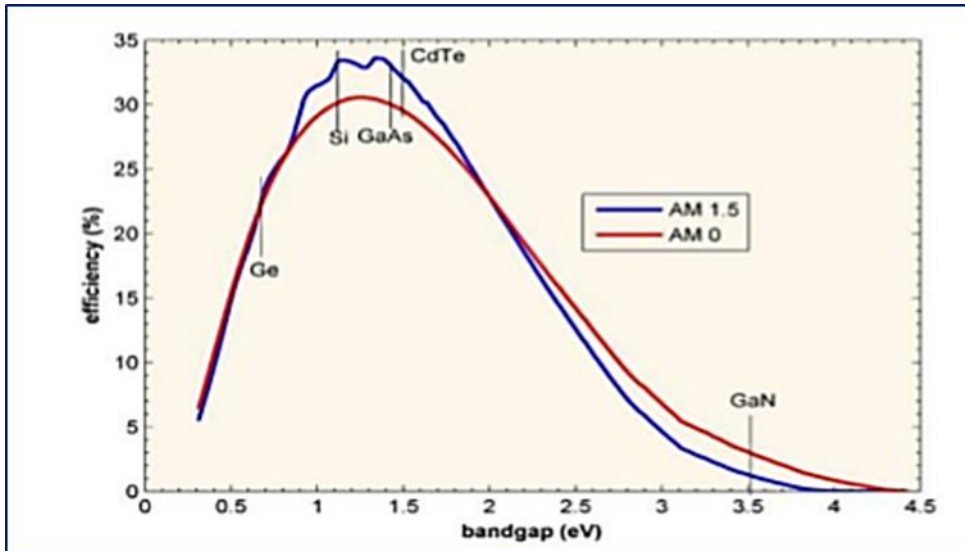


Figure 2.7. Le rendement d'énergie en fonction du gap d'énergie [42].

Pour obtenir une cellule photovoltaïque avec un rendement élevé, il faut donc optimiser l'absorption de la lumière par rapport au spectre incident et le transport des porteurs de charge au sein des matériaux constituant. Un autre moyen d'augmenter le rendement d'une cellule sans en modifier la composition consiste à concentrer le flux lumineux incident.

2.9. Les cellules III-V multi jonctions

Les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs (III-V) sont, de loin, les cellules les plus chères (bâti sous ultraviolet, croissance très lente) mais aussi celles qui ont le meilleur rendement. Le fameux avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations.

Elles dominent le marché de niche du spatial. En utilisant des concentrateurs, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre.

Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïques se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970 (Figure 2.8). Il est à noter que les rendements de conversion présentés dans ce paragraphe constituent les records certifiés.

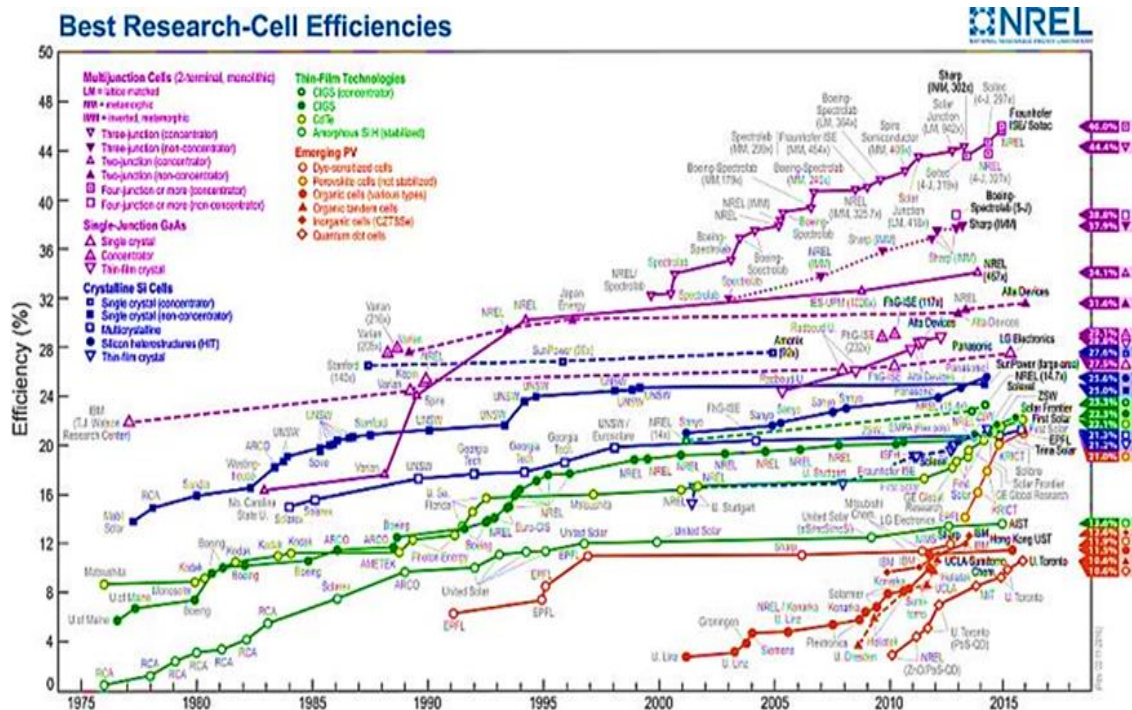


Figure 2.8. Les performances des cellules PV en fonction de la technologie selon le NREL [43].

D'après la figure (2.8), l'amélioration des différentes filières des cellules photovoltaïques augmente le rendement pour la filière de silicium (Silicium poly cristallin, Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe) de 13% jusqu'à 17% depuis les années 1983 à 2003. Pour la filière des cellules organiques, un rendement de 5% jusqu'à 11.3% depuis les années 1992 à 2007. Pour la filière des cellules en couches minces, un rendement de 8% jusqu'à 16% depuis les années 1977 à 2003. Par contre pour la technologie des cellules multi-jonctions qui a été la plus performante parmi les autres technologies, une augmentation de 16% jusqu'à 40% depuis les années 1982 à 2007.

2.10. Utilité des cellules multi jonctions

La lumière du soleil est composée d'un spectre d'ondes continues très riches en photons dont l'énergie varie entre 0 et 4eV [44]. Dans les cellules solaires mono jonction les photons incidents ayant une énergie (hv) inférieure au gap (E_g) du semi-conducteur ne sont pas

absorbés et ceux dont l'énergie est supérieure en restituent une partie en pure perte sous forme de chaleur. Une étude faite par Masden et Backus sur une cellule solaire mono-jonction GaAs [45] prouve que les sources de pertes majeures viennent soit d'un excès ou d'une faiblesse d'énergie des photons (pertes par thermalisation ou par transmission) (figure 2.11) La solution proposée en 1995 par E.D Jackson [46], puis brevetée en Amérique par Wolfen en 1960 [47], donna naissance au concept des cellules à multi-jonction.

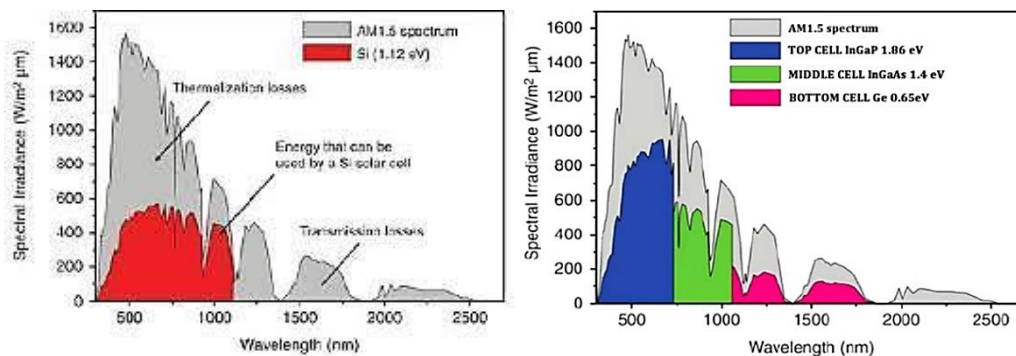


Figure 2.9. Spectre solaire AM1.5 avec les différentes pertes par thermalisation ou par transmission localisées dans une cellule solaire. (a) mono-jonctions Si, (b) multi-jonctions GaInP/GaInAs/Ge.

Dans cette approche l'empilement de plusieurs cellules solaires dans l'ordre décroissant de leur bande interdite assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire, chaque cellule convertissant la partie de spectre qui correspond à son propre gap. Cette méthode permet d'éviter les pertes par thermalisation venant des photons de forte énergie ou par transmission venant des photons de faible énergie.

2.11. Structure et principe de base des cellules solaire multi-jonctions :

2.11.1. Structure

Le concept des cellules solaires multi-jonctions est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maîtrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons sont assurées par des diodes Tunnel. Le deuxième paramètre à maîtriser est l'accord du photo-courant. En effet vu que les tensions de circuit ouvert V_{CO} s'ajoutent, les courant 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'absorbe ni trop ni moins de rayonnement.

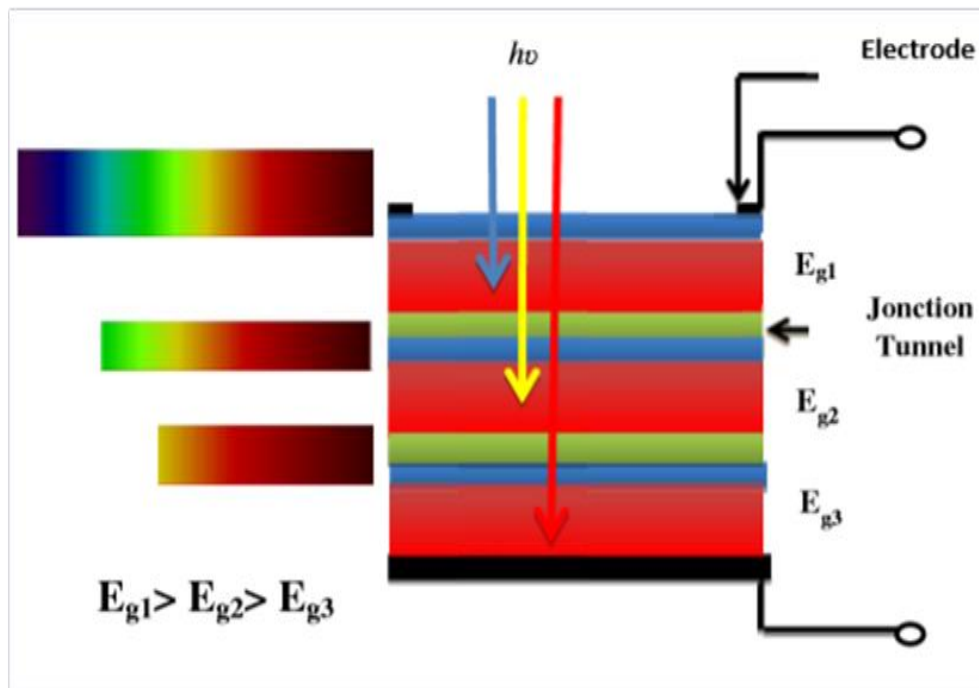


Figure 2.10. Synoptique d'une cellule solaire monolithique.

2.11.2. Principe de base

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multi-jonction comprennent des sous-cellules à simple jonction superposée l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grand gap, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie [48].

L'expérience des cellules solaire multi-jonction a une limitation fondamentale relative à la disponibilité des matériaux possédant des bandes interdites optimales qui permettent simultanément une grande efficacité grâce à sa faible densité des défauts. Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules. Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité a des bandes interdites directes, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [49].

2.12. Cellule tandem

Dans la configuration tandem, les cellules sont placées en série donc reliées électriquement, d'où les contraintes : les matériaux des cellules doivent avoir des paramètres de maille voisins afin que les interfaces soient exemptes de défauts qui piègent les électrons et réduisent donc le rendement de la cellule.

Le courant dans les cellules en série est le même et donc limité par le plus faible courant des différentes cellules.

Le rendement d'une cellule tandem sera donné par :

$$\eta = \frac{V_{co} * \min(J_{cc})}{P_{in}} FF \quad (2.8)$$

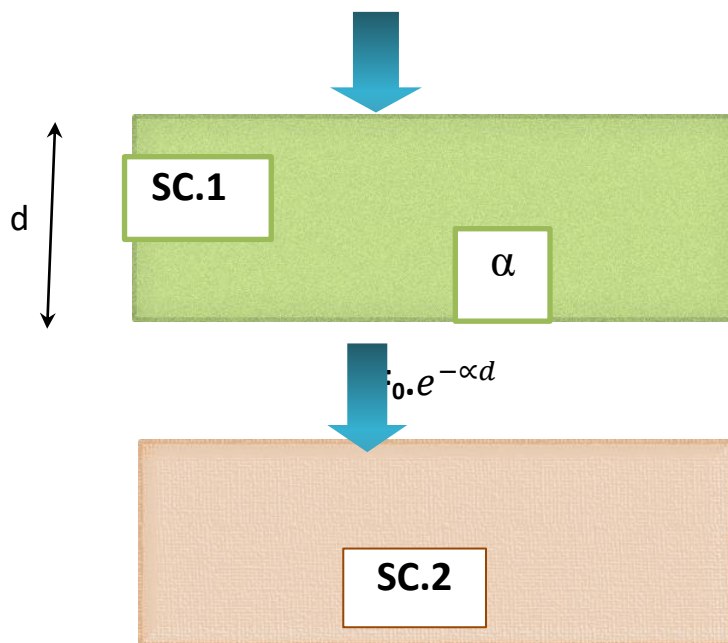


Figure 2.11. Cellule tandem.

2.13. Cellule cascade

Dans la configuration cascade, les cellules sont fabriquées séparément ensuite reliées par une colle transparente. Les cellules sont isolées électriquement et dotées de contacts électriques. Dans cette configuration, on s'affranchit des contraintes citées précédemment. Les matériaux des cellules peuvent avoir des paramètres de maille et des courants différents. Cependant, la réalisation de ces cellules est plus complexe. Le rendement d'une cellule cascade sera donné par :

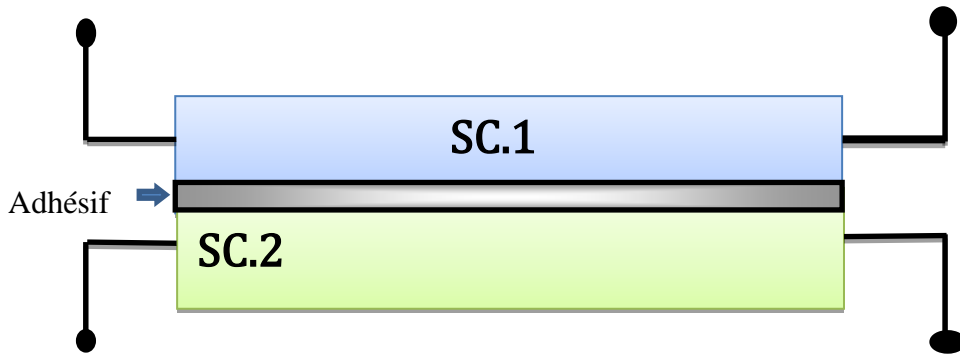


Figure 2.12. Cellule cascade.

2.14. Les cellules solaires à triples-jonctions

Les cellules solaires tri-jonction (CSTJ) sont constituées globalement par trois photodiodes semi-conductrices de bandes interdites différentes séparées par des jonctions tunnels. Les couches de la CSTJ sont de faibles épaisseurs (environ 6 microns au total et 140 microns pour le substrat) dopées aux électrons ou aux trous, épitaxiées les unes après les autres de telle sorte que le matériau à plus grande bande interdite soit en surface, le matériau à E_g intermédiaire au milieu et le matériau à faible E_g au bas de la cellule. Cela permet de réduire les pertes thermiques dues à l'absorption de photons d'énergie très supérieure à E_g . Les jonctions tunnels permettent le passage du courant entre les matériaux à bande interdite différente.

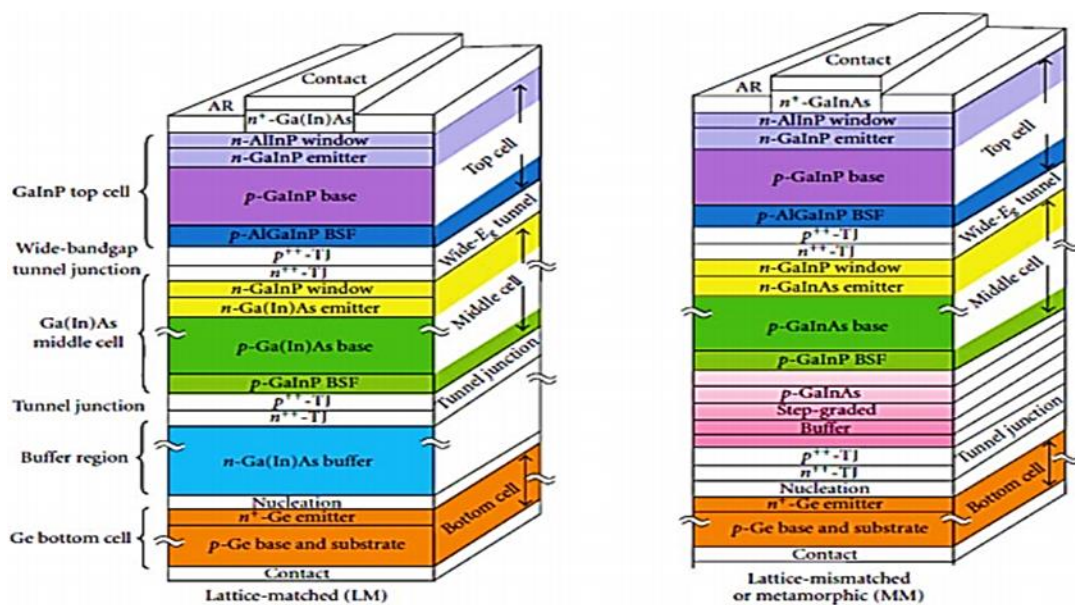


Figure 2.13. : Structures des cellules solaires tri-jonction (a) avec accord de paramètre de maille entre le Ge et le reste des couches (b) avec désaccord de paramètre de maille.

On distingue deux structures solaires triple jonctions (CSTJ) (figure 2.13).

- La première, nommée "lattice matched" (LM ou en accord de maille), est épitaxiée avec une divergence de paramètre de maille relativement faible de sorte qu'aucune dislocation ne se crée dans les couches et les porteurs de charge se propagent sans beaucoup d'obstacles (Figure 2.13. a).

- La seconde structure est épitaxiée avec deux premières couches en désaccord de maille (MM métamorphiques) par rapport à celui du substrat de germanium (Figure 2.13.b). Des couches tampons sont alors successivement rajoutées avec des paramètres de maille variant graduellement entre celui du Ge et celui de l'InGaAs. Cette dernière structure a l'avantage de mieux répartir les E_g des trois photodiodes dans le spectre solaire pour une collection plus efficace de photons [50].

La structure CSTJ comporte d'autres couches dont chacune présente un rôle :

- **Jonctions tunnels entre les cellules**

Les jonctions tunnels ont pour but de séparer électriquement la zone dopée aux trous et la zone dopée aux électrons de deux diodes adjacentes (Figure 2.14). Ce sont aussi des diodes mais de sens inverse aux diodes destinées à la production de courant. Leurs épaisseurs sont très faibles de sorte que les électrons peuvent passer par effet tunnel d'une photodiode à une autre. De plus leurs E_g sont suffisamment grands pour laisser passer la lumière vers les photodiodes suivantes.

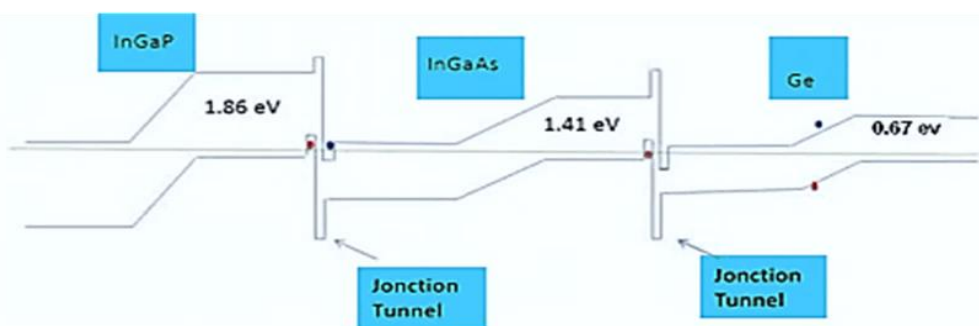


Figure 2.14. Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une CSTJ.

- **Couches « fenêtres »**

Les couches "fenêtres" sont des couches d'encapsulation des jonctions p-n. La couche avant est appelée "window" et la couche arrière est appelée "back-surface-field (BSF)". Elles sont faites de matériaux à plus grand E_g que le matériau des photodiodes. Elles sont donc

transparentes au rayonnement atteignant ces couches, d'où leur nom. Leur rôle est de limiter le taux de recombinaison des porteurs aux interfaces avant et arrière de la jonction p-n.

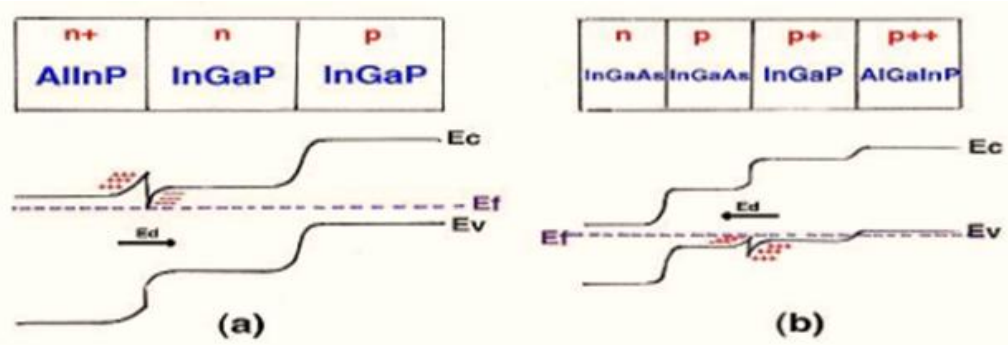


Figure 2.15. Couche fenêtre (a) avant et (b) arrière.

- **Couche tampon**

Cette couche sert à limiter la diffusion des défauts du substrat vers les couches épitaxiées. Dans le cas des structures métamorphiques la couche tampon se situe entre le Ge et l'InGaAs. En effet la relaxation des contraintes dues aux matériaux possédant des paramètres de maille différents se fait par introduction de dislocations dans cette couche tampon. Cette couche est alors épitaxiée entre deux matériaux de très bonne qualité cristalline pour accorder leurs paramètres de maille. Il est à noter que les dislocations ont tendance à bouger à plus hautes températures et ceci constitue un désavantage majeur des structures métamorphiques.

- **Couche antireflet**

Elle permet une meilleure collection de la lumière en diminuant la réflectivité à l'interface air-couche fenêtre de la cellule du haut. Elle est constituée typiquement d'une couche de dioxyde de silicium et d'une couche mince d'oxyde d'indium. Cependant elle fait aussi l'objet de nombreuses recherches. Son choix dépend de la nature de la couche fenêtre de la première diode.

- **Le dopage**

Le dopage des matériaux pour réaliser les CSTJ est celui généralement utilisé pour les semi-conducteurs ternaires. C'est-à-dire des éléments du groupe II pour doper aux trous et des éléments du groupe VI pour doper aux électrons. Des métaux comme le Zn et les éléments du groupe IV sont aussi souvent utilisés comme dopage. Le choix du dopage dépend de la composition du matériau. De plus le niveau de dopage est un paramètre important pour les rendements des CSTJ. Un fort dopage permet de baisser la résistivité des semi-conducteurs. Par ailleurs, les niveaux de dopage p et n de part et d'autre de la jonction tunnel doivent permettre aux porteurs dans une bande de conduction de passer par effet tunnel vers des états accessibles de la bande de valence de la cellule adjacente.

2.15. Cellule solaire triple-jonction à base d'InGaP/GaAs/Si

Les cellules solaires de silicium ont actuellement une part de 90% du marché photovoltaïque, mais elles sont proches de leur limite théorique d'efficacité. L'efficacité des cellules solaires à jonction unique en silicium est intrinsèquement limitée à 29,4%, et pratiquement limitée à environ 27%. Il est possible de surmonter cette limite en combinant le silicium avec des matériaux à bande supérieure, tels que les semi-conducteurs composés III-V, dans un dispositif multi-jonction. Cependant, les défis associés à la combinaison de ces matériaux ont entravé le développement de cellules solaires III-V/Si très efficaces.

Fraunhofer ISE (Institute for Solar Energy Systems), a atteint l'efficacité de conversion élevée de la cellule solaire à jonctions multiples à base de silicium en utilisant le processus de fabrication de microélectronique de liaison directe de plaquettes pour transférer des couches III-V d'une épaisseur de seulement 1,9 μm qui avaient été déposées épitaxialement sur un substrat d'arséniure de gallium (GaAs) sur une cellule solaire de silicium[51].

Les surfaces ont d'abord été désoxydées dans une chambre ComBond EVG580 sous vide élevé avec un faisceau d'ions, puis collées ensemble sous pression. Les atomes à la surface de la sous-cellule III-V forment des liens avec les atomes de silicium, créant un dispositif monolithique. Le substrat GaAs est ensuite enlevé. La cellule solaire multi-jonction III-V/Si se compose spécifiquement d'une séquence de sous-cellules empilées les unes sur les autres.

Une cellule supérieure de phosphure d'indium gallium (GaInP) absorbe la lumière du soleil visible avec des longueurs d'onde de 300-670nm, une sous-cellule d'arsénite de gallium moyen (GaAs) absorbe 500-890nm rayonnement proche infrarouge, et une cellule de silicium inférieure absorbe les plus longues longueurs d'onde de 650-1180nm. L'étendue de la plage d'absorption du spectre solaire augmente considérablement l'efficacité.

Les trois cellules sont reliées à l'intérieur par des diodes tunnels, y compris un contact d'oxyde de tunnel (TOP Con) appliqué sur les surfaces avant et arrière du silicium. En outre, la cellule a un simple contact avant et arrière (comme pour une cellule solaire de silicium classique) et peut donc être intégré dans les modules photovoltaïques de la même manière. Fraunhofer ISE et son partenaire industriel EVG avaient déjà démontré une efficacité de 30,2% en novembre 2016, le portant à 31,3% en mars 2017. Ils ont maintenant à nouveau amélioré l'absorption de la lumière et la séparation de charge dans le silicium, atteignant un record de 33,3% d'efficacité. Plus précisément, un contact dos de diffraction-grille nanostructure est mis en œuvre sur la cellule inférieure de silicium pour prolonger la longueur de chemin de la lumière, et une grille de contact avant et un revêtement anti-réflexion sont également appliqués. On dit que les performances sont semblables aux cellules solaires à triple jonction III-V/Ge standard.

Pour la fabrication industrielle de cellules solaires multi-jonctions III-V/Si en particulier, les coûts de l'épitanie III-V et de la technologie de raccordement au silicium doivent être réduits. Il reste encore de grands défis à relever dans ce domaine, que Fraunhofer ISE entend résoudre par le biais d'enquêtes futures.

« Le nouveau résultat montre comment la consommation de matériaux peut être réduite grâce à des gains d'efficacité plus élevés, de sorte que non seulement les coûts du photovoltaïque peuvent être optimisés, mais aussi que sa fabrication puisse être réalisée de manière conviviale » [51].

Fraunhofer ISE nouveau Centre pour les cellules solaires à haut rendement (en cours de construction à Fribourg) fournira un cadre pour le développement de la prochaine génération III-V et silicium technologies des cellules solaires. L'objectif ultime est de rendre possibles les modules photovoltaïques solaires à haut rendement avec des gains d'efficacité de plus de 30 % à l'avenir.

2.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique, le principe de fonctionnement et l'architecture d'une cellule photovoltaïque. Aussi nous avons présenté les caractéristiques principales ainsi que les paramètres essentiels d'une cellule solaire. Enfin nous avons abordé les cellules III-V multi-jonctions (cellule triple-jonctions) en présentant leur structure et leur principe.

Chapitre3 résultats de simulation et discussion

3.1. Introduction

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement de ces systèmes avec des modèles rigoureux. La simulation a donc été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement.

La simulation numérique est une série d'opérations effectuées sur un ordinateur et produisant un phénomène. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène physique, comme s'il était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film.

La simulation numérique présente les avantages suivants :

- ✓ Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents ;
- ✓ Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres) ;
- ✓ On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

Dans notre travail nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics de simulation numérique. Ce logiciel permet de simuler quasiment tous les phénomènes physiques et de nombreuses applications en ingénierie.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les caractéristiques électriques d'une cellule solaire triple-jonctions (InGaP/GaAs/Si).

À partir des caractéristiques J-V, on peut déterminer les valeurs des facteurs caractérisant la cellule tels que le courant de court-circuit J_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF, et le rendement de conversion d'énergie R.

3.2. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

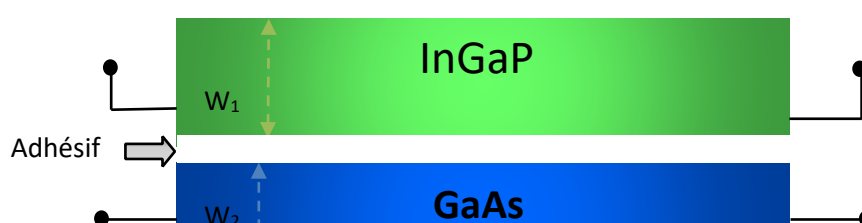
COMSOL est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ces logiciels, les équations différentielles sont exprimées dans des petits volumes permettant leur expression sous forme de différences simples et transformant le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues pouvant se résoudre avec des techniques d'algèbre linéaire. On comprend intuitivement que plus le volume de discrétisation sera petit plus le modèle discret approchera le modèle continu.

C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisée et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL®. COMSOL Multiphysics® comprend l'interface COMSOL Desktop®, l'utilisateur graphique (GUI) et un ensemble d'interfaces d'utilisateur prédéfinies avec des outils de modélisation associés, appelés interfaces de physique, pour la modélisation des applications courantes. Une suite de produits add-on élargit cette plate-forme de simulation multiphysique pour la modélisation des domaines d'application spécifiques ainsi que l'interface avec des logiciels tiers et de leurs capacités. COMSOL Multiphysics est nécessaire pour exécuter l'un des produits add-on.

La notion de multi-physique est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. On peut décrire mathématiquement des phénomènes physiques très différents par les mêmes équations générales. Alors que des géométries et des phénomènes complexes nécessitent la modélisation avec des équations complexes et des conditions aux limites, COMSOL Multiphysics offre un couplage des différentes formulations physiques (multiphysics) simple. Le résultat de ses systèmes sont des équations qui peuvent être résolues de façon séquentielle ou dans une formulation entièrement couplée. Multiphysics étendus: Physiques dans différentes géométries peuvent être facilement combinées. Ces variables de couplage peuvent également être utilisées pour lier des physiques ou des géométries différentes comme dans notre cas. Lors de la modélisation et les simulations, ces descriptions sont basées sur les lois de la physique.

3.3. Présentation de la cellule à étudier

Dans notre travail nous allons étudier la structure à base d'InGaP/GaAs/Si cascade pour réaliser des cellules solaires de haut rendement. La figure (3.1) montre la structure de la cellule étudiée.



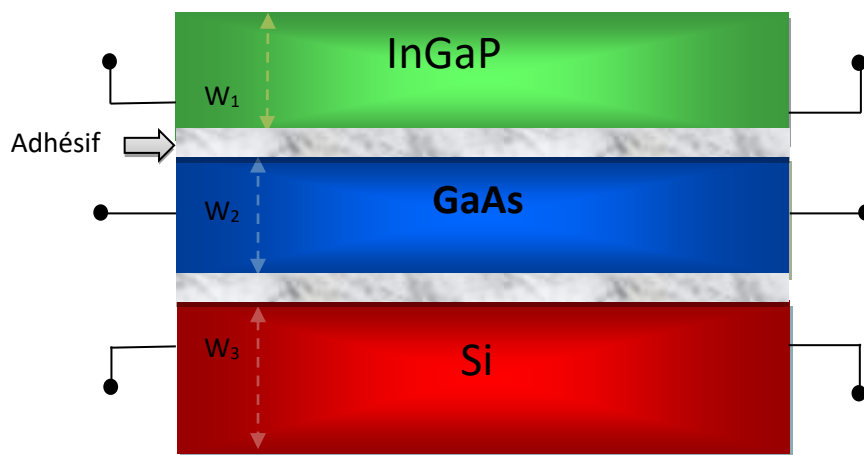


Figure 3.1. Schéma de la structure simulée.

3.4. Paramètres de simulation

Les paramètres utilisés dans la simulation sont regroupés dans le tableau (3.1) :

Matériaux Paramètres	InGaP	GaAs	Si
Dopage de l'émetteur (cm^{-3})	5.10^{16}	5.10^{16}	5.10^{16}
Epaisseur de l'émetteur (μm)	3	4	100
$E_g(\text{eV})$	1.9	1.42	1.12
$N_c(\text{m}^{-3})$	$6.5.10^{23}$	$4.7.10^{23}$	$2.86.10^{25}$
$N_v(\text{m}^{-3})$	$1.45.10^{25}$	$1.29.10^{25}$	$2.66.10^{25}$
Affinité électronique (V)	4.47	4.07	4.05
Mobilité électronique ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2500	8500	1450
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	80	400	500

Permittivité relative	11.05	12.9	11.7
Durée de vie (s)	1.10^{-7}	1.10^{-6}	1.10^{-5}

Tableau 3.1. Données de la structure simulée.

3.5 Effet de l'épaisseur 0 de la cellule supérieure InGaP

3.5.1 Caractéristiques courant-tension

La figure (3.2) représente l'évolution de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation (V) pour différentes épaisseurs de la cellule supérieure W_1 . On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur W_1 , la tension de circuit ouvert V_{CO} varie très peu alors que la densité de courant augmente jusqu'à $W_1=3 \mu\text{m}$ et ensuite elle sature.

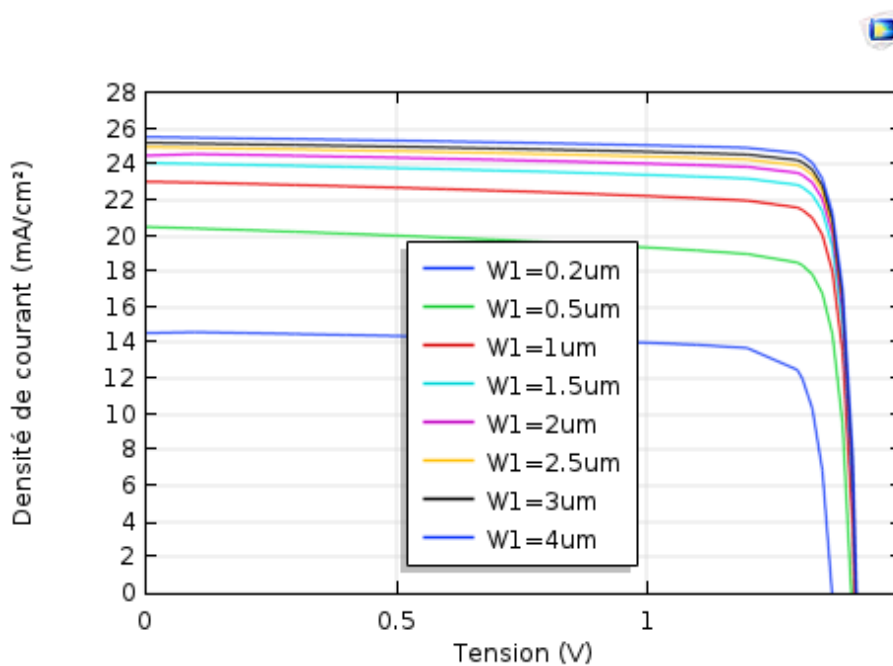


Figure 3.2. Caractéristiques courant-tension de la structure InGaP pour différentes épaisseurs W_1 .

3.5.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

Sur la figure (3.3) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_1 . Ces courbes présentent des maximums correspondant aux puissances maximales P_{max} .

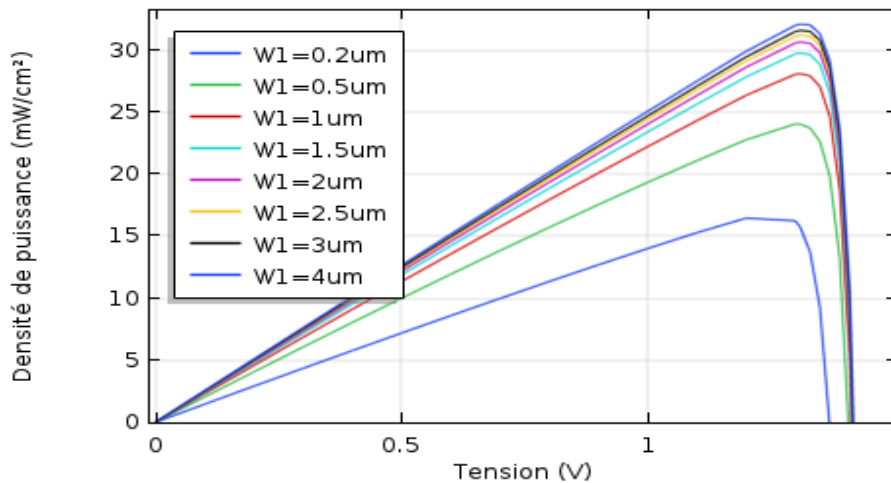


Figure 3.3. Puissance délivrée par la cellule InGaP en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_1 .

3.5.3 Courant de court-circuit J_{CC}

Dans la figure (3.4), nous avons reporté l'influence de l'épaisseur W_1 de la cellule supérieure sur la densité de courant de court-circuit J_{CC} . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une augmentation de la densité de courant de court-circuit jusqu'à une épaisseur $W_1=3 \mu\text{m}$, ensuite elle sature à environ $26 \text{mA}/\text{cm}^2$.

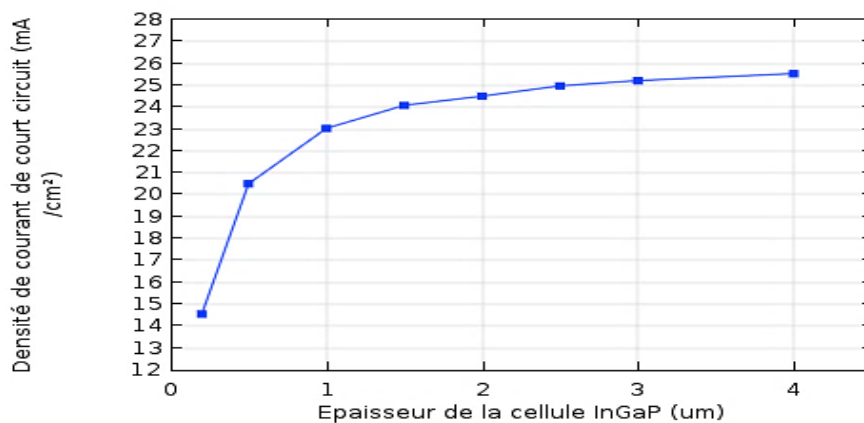


Figure 3.4. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{CC} en fonction de l'épaisseur W_1 .

3.5.4 Tension de circuit ouvert V_{CO}

Dans la figure (3.5), nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule supérieure engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert V_{CO} , notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à $1 \mu\text{m}$. Au-delà de $1 \mu\text{m}$, la tension V_{CO} reste constante égale à $1,415 \text{V}$. Donc l'influence de l'épaisseur W_1 est négligeable.

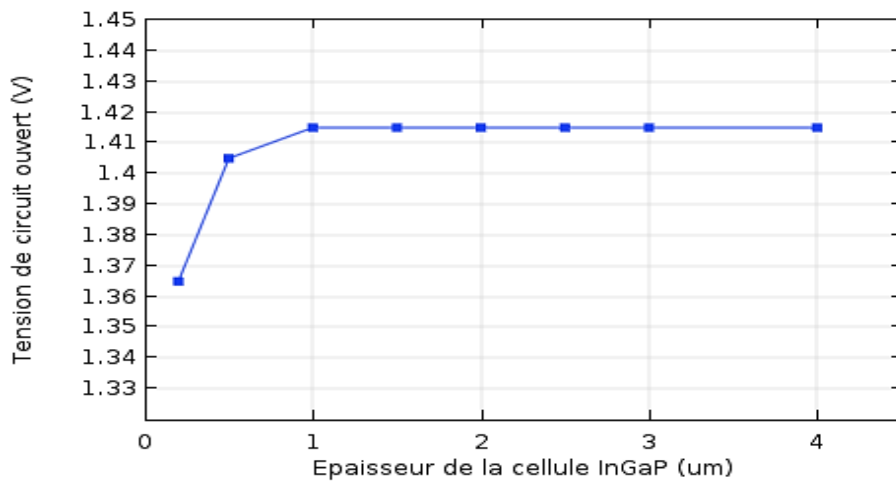


Figure 3.5. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_1 .

3.5.5 Puissance maximale P_{max}

La figure (3.6) représente la variation de la puissance maximale P_{max} en fonction de l'épaisseur W_1 . P_{max} atteint sa valeur optimale qui vaut 32 mW/cm^2 pour une valeur de l'épaisseur W_1 de l'ordre $4 \mu\text{m}$.

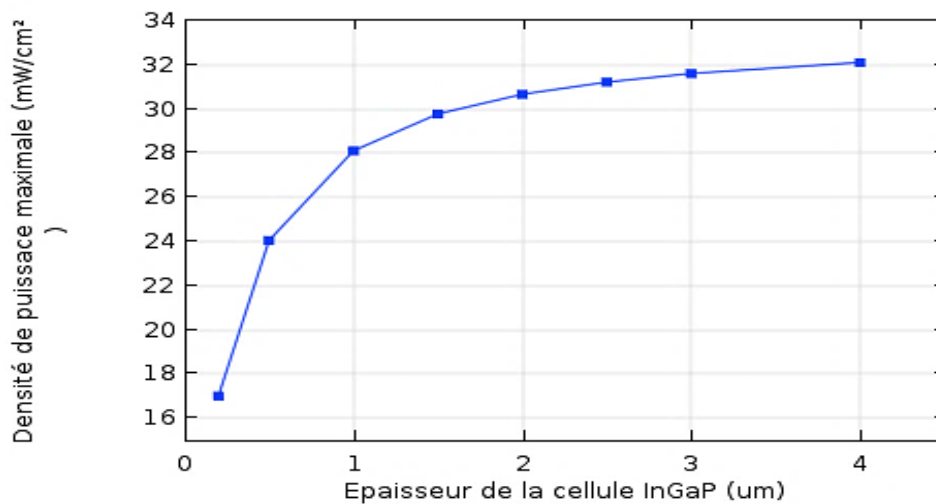


Figure 3.6. Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_1 .

3.5.6 Le rendement η

La figure (3.7) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur W_1 . Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur $3 \mu\text{m}$, ensuite le rendement sature et atteint une valeur maximale de $24,7\%$.

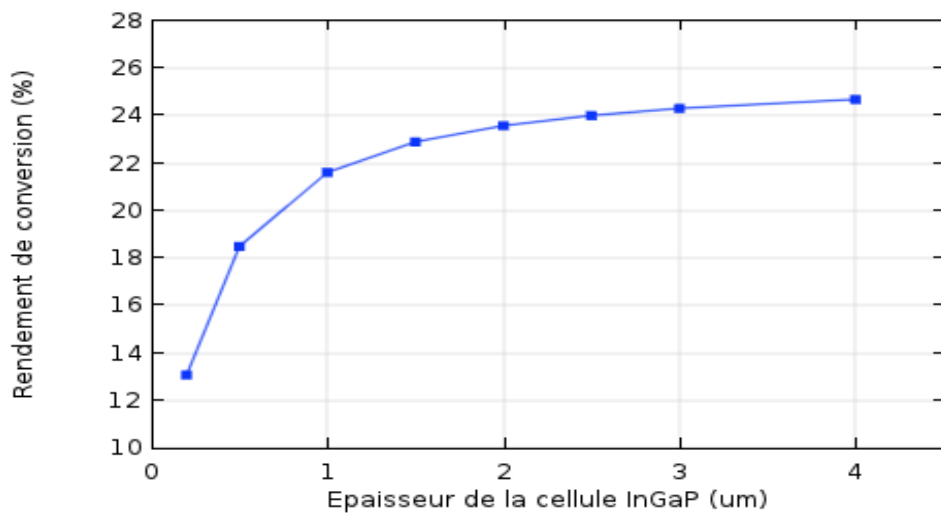


Figure 3.7. Représentation du rendement de la cellule InGaP en fonction de l'épaisseur.

3.5.7 Facteur de forme FF

La figure (3.8) représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_1 . Nous remarquons que l'augmentation de W_1 a pour conséquence une faible variation de FF qui est compris entre 0,85 et 0,9.

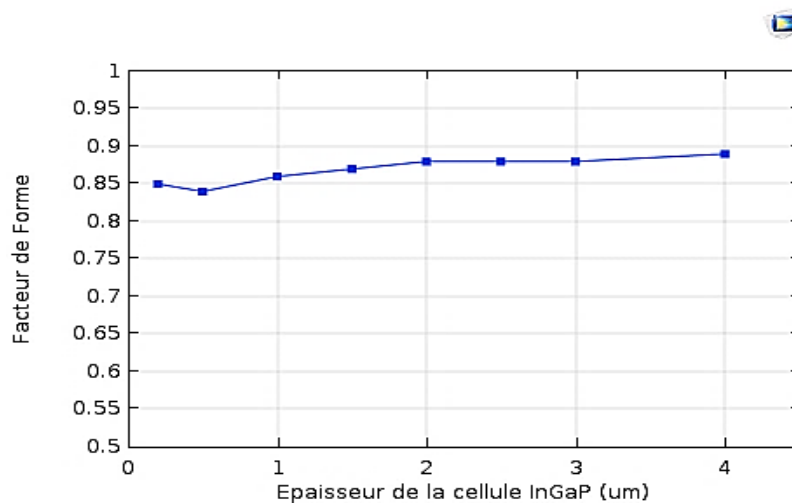


Figure 3.8. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_1 .

3.6 Effet de l'épaisseur de la cellule médiane GaAs

3.6.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.9) représente les caractéristiques courant-tension de la cellule solaire simulée pour différentes valeurs de l'épaisseur de cellule médiane W_2 . On constate que lorsque

l'épaisseur W_2 augmente la caractéristique se déplace vers le haut, la tension de circuit ouvert V_{CO} varie très peu alors que la densité de courant augmente jusqu'à $W_2=4\ \mu\text{m}$ et ensuite elle sature à une valeur d'environ $20\text{mA}/\text{cm}^2$.

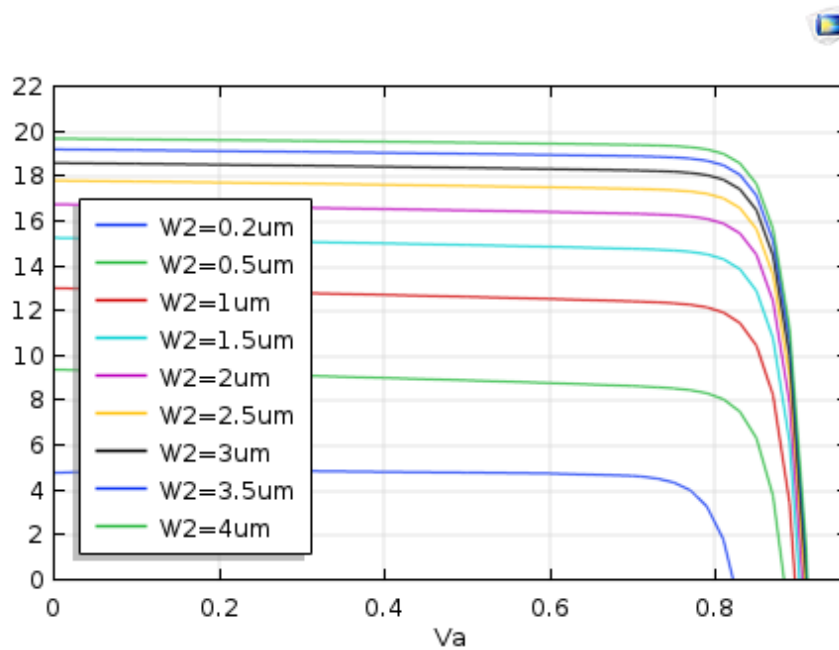


Figure 3.9. Evolution de la caractéristique courant-tension $J(V)$ de la cellule médiane pour différentes valeurs de W_2 .

3.6.2 Caractéristiques puissance tension $P(V)$

La figure (3.10) représente la variation de la puissance en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_2 . Ces courbes présentent des maximums

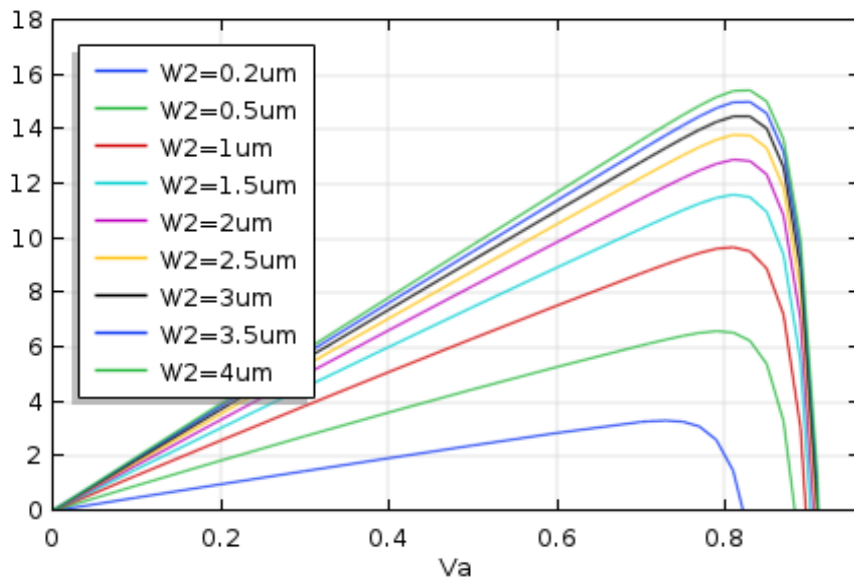


Figure 3.10. Puissance délivrée par la cellule médiane en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_2 .

3.6.3 Courant de court-circuit J_{cc}

Dans la figure (3.11), nous avons reporté l'influence de l'épaisseur W_2 de la cellule médiane sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une augmentation de la densité de courant de court-circuit jusqu'à une épaisseur $W_2=4\ \mu\text{m}$, ensuite elle sature à environ $20\text{mA}/\text{cm}^2$.

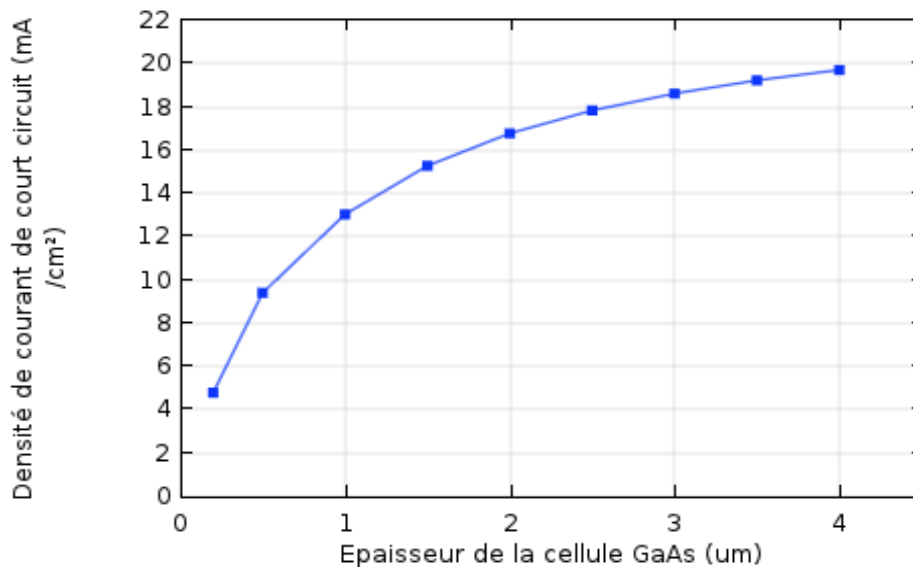


Figure 3.11. Variation du courant de court-circuit pour différentes épaisseurs W_2 .

3.6.4 Tension de circuit ouvert V_{CO}

Dans la figure (3.12), nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule médiane engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert V_{CO} , notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à $1\ \mu\text{m}$. Au-delà de $1\ \mu\text{m}$, la tension V_{CO} varie faiblement entre 0,9 et 0,92V. Donc l'influence de l'épaisseur W_2 est négligeable.

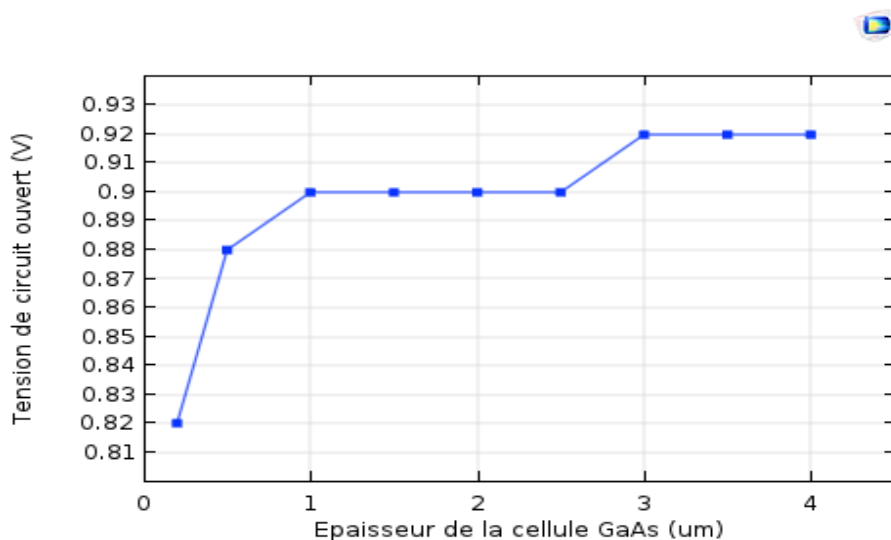


Figure 3.12. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_2 .

3.6.5 Puissance maximale P_{max}

La figure (3.13) représente la variation de la puissance maximale P_{max} en fonction de l'épaisseur W_2 . P_{max} atteint sa valeur optimale qui vaut $15\ \text{mW}/\text{cm}^2$ pour une valeur de l'épaisseur W_2 de l'ordre $4\ \mu\text{m}$.

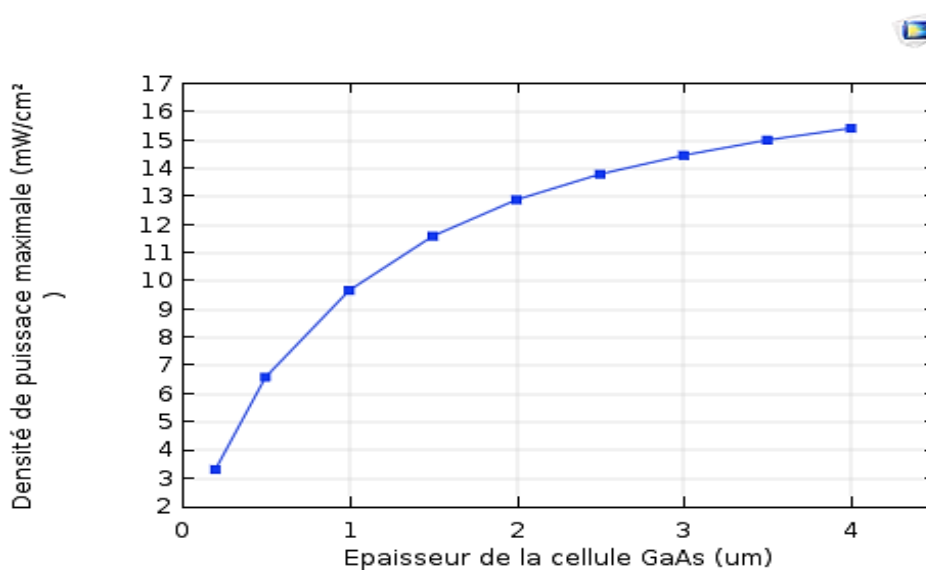


Figure 3.13 Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_2 .

3.6.6 Le rendement η (%)

La figure (3.14) représente la variation du rendement de la cellule médiane en fonction de l'épaisseur W_2 . Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur $W_2=4 \mu\text{m}$, le rendement atteint une valeur maximale de 12%.

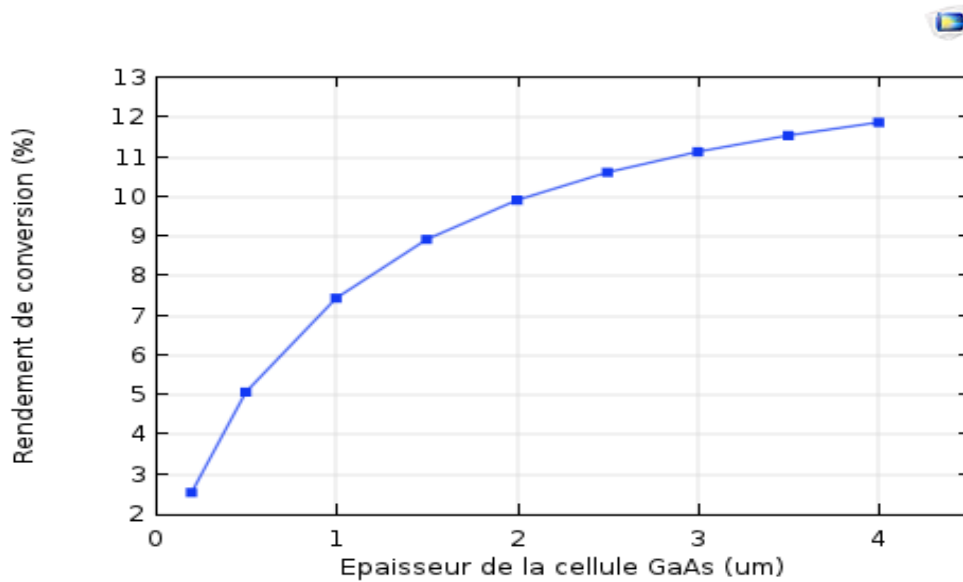


Figure 3.14. Représentation du rendement de la cellule GaAs en fonction de l'épaisseur W_2 .

3.6.7 Le facteur de forme FF

La figure (3.15) représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_2 . On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur W_2 , le facteur de forme varie faiblement et est de l'ordre de 85%.

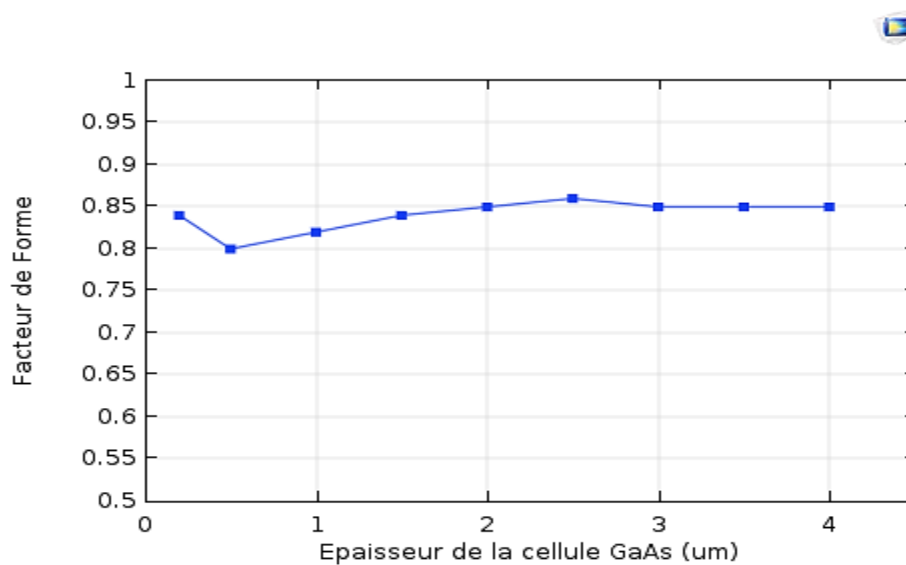


Figure 3.15. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_2 .

3.7 Effet de l'épaisseur de la cellule inférieure Si

3.7.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.16) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation de la cellule inférieure pour différentes valeurs de l'épaisseur W_3 . On constate que lorsque l'épaisseur W_3 augmente la caractéristique se déplace vers le haut, le courant de court-circuit augmente et la tension de circuit ouvert augmente faiblement.

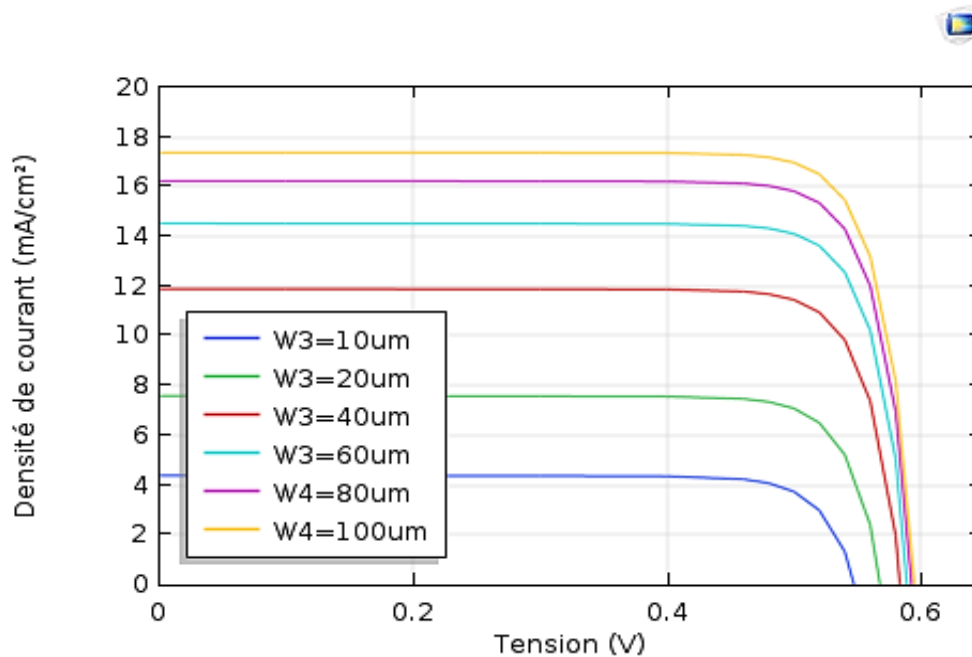


Figure 3.16. Evolution de la caractéristique courant-tension J(V) de la cellule inférieure pour différentes valeurs de W_3 .

3.7.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure (3.17) représente la variation de la puissance en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W_3 . Ces courbes présentent des maximums P_{\max} .

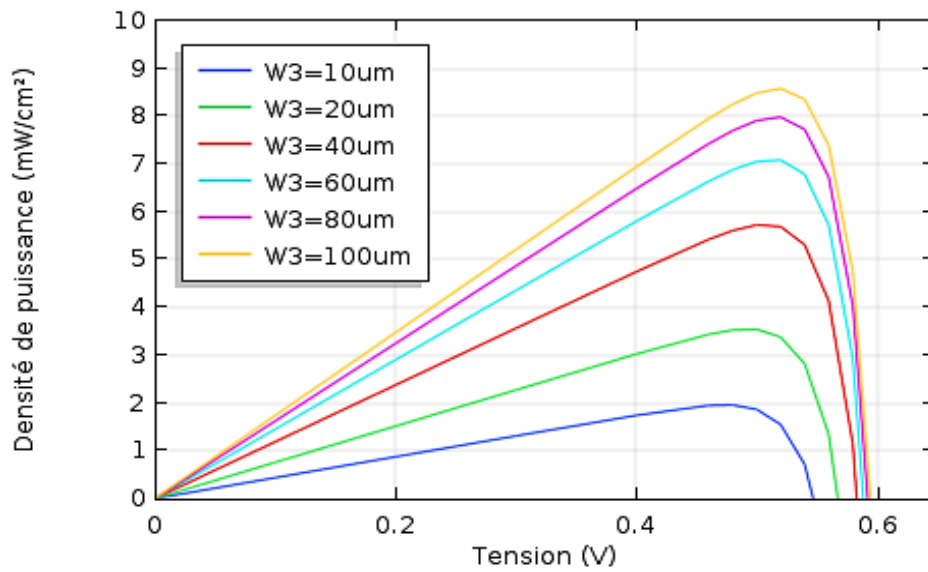


Figure 3.17. Puissance délivrée par la cellule inférieure en fonction de la tension de polarisation pour différents W_3 .

3.7.3 Courant de court-circuit J_{cc}

Dans la figure (3.18), nous avons reporté l'influence de l'épaisseur W_3 de la cellule inférieure sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une augmentation de la densité de courant de court-circuit jusqu'à une épaisseur $W_3=100\ \mu\text{m}$, ensuite elle sature à environ $18\text{mA}/\text{cm}^2$.

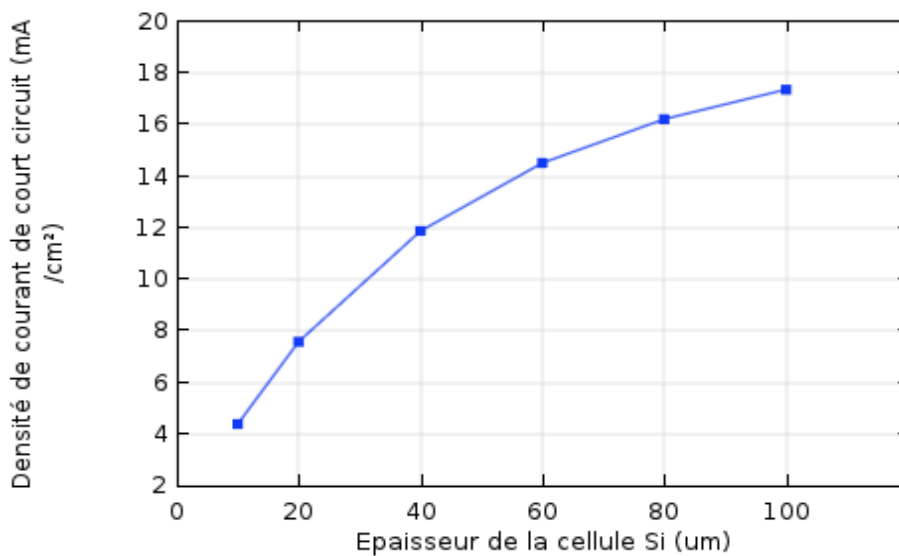


Figure 3.18. Variation du courant de court-circuit pour différentes épaisseurs W_3 .

3.7.4 Tension de circuit ouvert V_{CO}

Dans la figure (3.19), nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule inférieure engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert V_{CO} , notamment pour les épaisseurs supérieures ou égales à $40\ \mu\text{m}$, la tension V_{CO} reste constante égale à $0,59\text{V}$. Donc l'influence de l'épaisseur W_3 est négligeable.

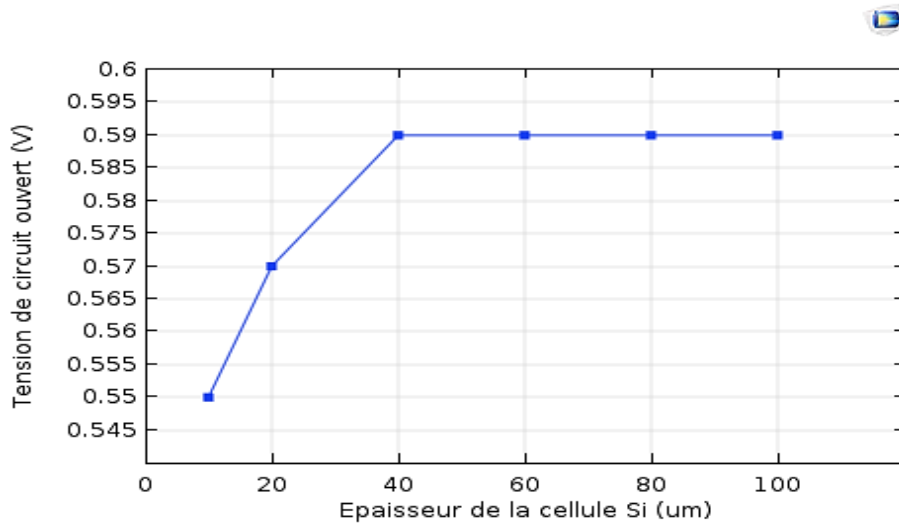


Figure 3.19. Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur W_3 .

3.7.5 Puissance maximale P_{max}

La figure (3.20) représente la variation de la puissance maximale P_{max} en fonction de l'épaisseur W_3 . P_{max} atteint sa valeur optimale qui vaut $8,5\text{mW}/\text{cm}^2$ pour une valeur de l'épaisseur W_3 de l'ordre $100\ \mu\text{m}$.

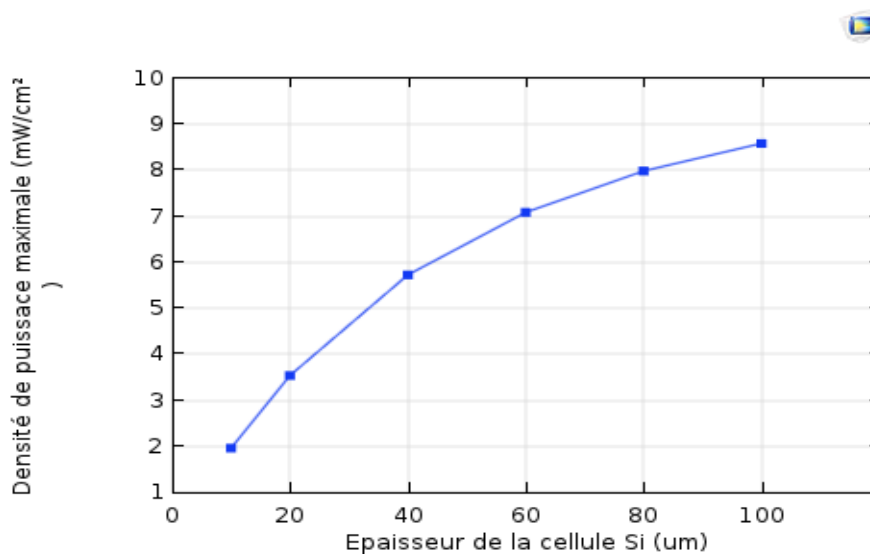


Figure 3.20. Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur W_3 .

3.7.6 Le rendement η (%)

La figure (3.21) représente la variation du rendement de la cellule inférieure en fonction de l'épaisseur W_3 . Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur 100 μm , le rendement atteint une valeur de 6,61%.

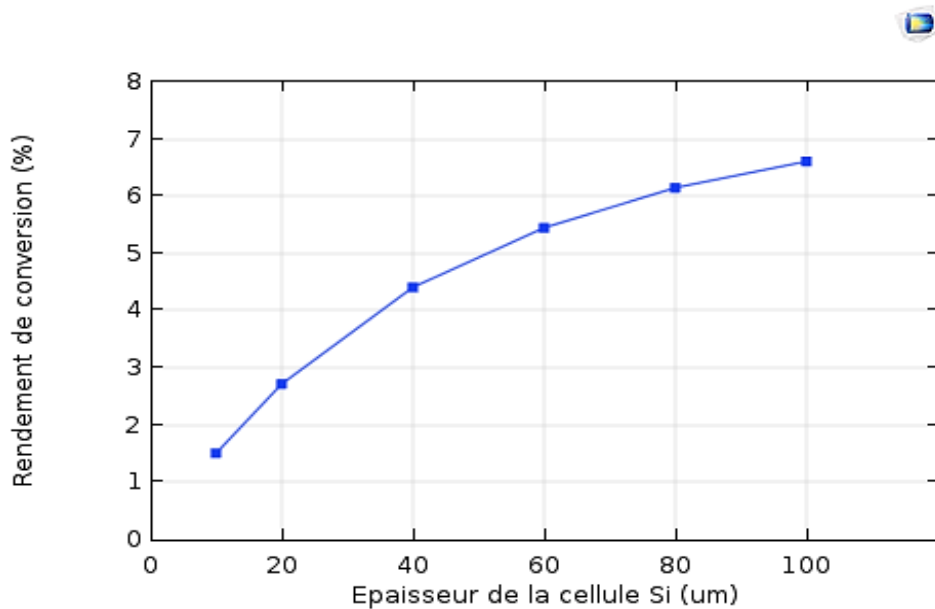


Figure 3.21. Représentation du rendement de la cellule Si en fonction de l'épaisseur W_3 .

3.7.7 Le facteur de forme FF

La figure (3.21) représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_3 . On remarque que lorsqu'on augmente l'épaisseur W_3 , le facteur de forme varie entre 0,8 et 0,85.

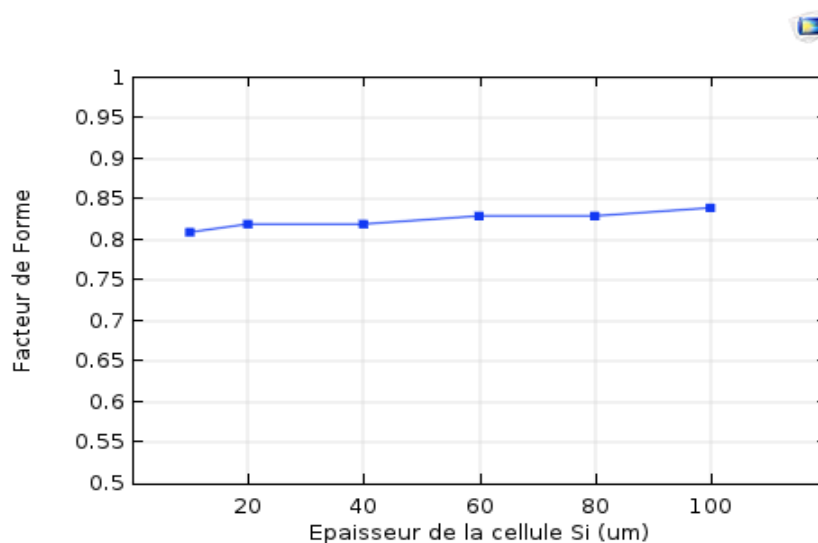


Figure 3.22. Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W_3 .

3.8 Caractéristiques de la cellule InGaP/GaAs/Si cascade

Les figures 3.23 et 3.24 représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des cellules supérieure, médiane et inférieure pour les épaisseurs optimales ($W_1=3\mu\text{m}$, $W_2=4\mu\text{m}$ et $W_3=100\mu\text{m}$).

Nous obtenons une puissance maximale optimale de l'ordre de $56\text{mW}/\text{cm}^2$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 43%.

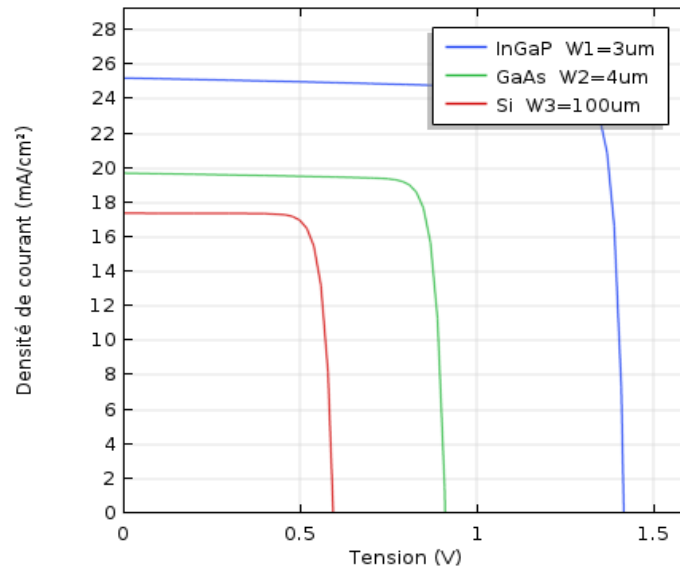


Fig.3.23. Caractéristiques courant-tension de la structure InGaP/GaAs/Si cascade.

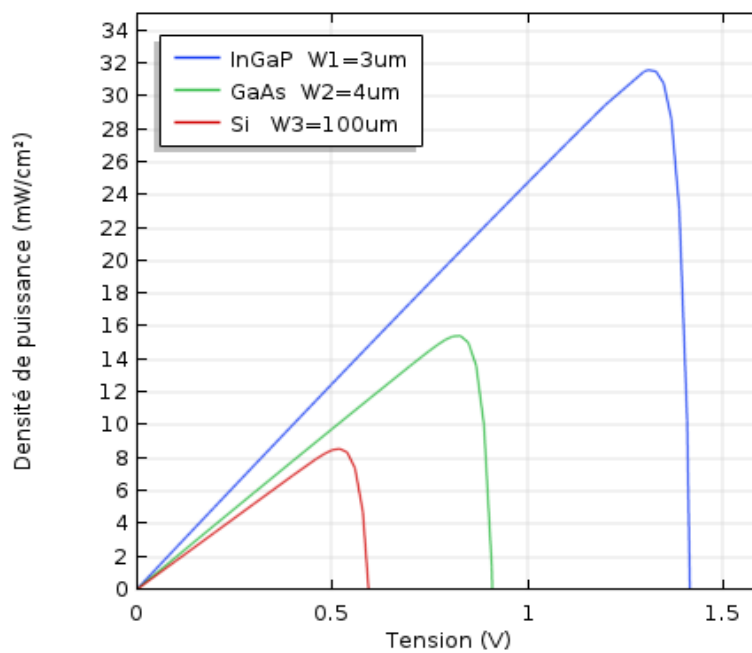


Fig.3.24. Caractéristiques puissance-tension de la structure InGaP/GaAs/Si cascade.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser les performances de la cellule solaire triple-jonctions InGaP/GaAs/Si en utilisant le logiciel COMSOL.

Nous avons étudié l'influence des épaisseurs des sous-cellules sur les caractéristiques de la cellule (le courant de court-circuit J_{cc} , la caractéristique $J(V)$, la caractéristique $P(V)$, la tension de circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale P_{max} , le facteur de forme FF, et le rendement η).

Finalement, La simulation réalisée dans ce chapitre montre que pour la cellule solaire triple- jonctions InGaP/GaAs/Si, le rendement maximum est de l'ordre de 43 % pour des épaisseurs des sous-cellules $W_1= 3\mu\text{m}$, $W_2=4\mu\text{m}$ et $W_3=100 \mu\text{m}$.

Conclusion générale

Les cellules solaires à base de matériaux III-V peuvent, avec les développements des technologies d'élaboration microélectronique, constituer des dispositifs prometteurs dans le domaine de la conversion photovoltaïque.

Notre travail concerne l'optimisation du rendement des cellules photovoltaïques triples jonction à base d'InGaP/GaAs/Si, en considérant l'influence des épaisseurs sur les paramètres caractéristiques de la cellule.

Nous avons réalisé la simulation à l'aide du logiciel COMSOL. Ce dernier nous fournit les caractéristiques $J(V)$ et les valeurs des paramètres photovoltaïques (J_{CC} , V_{CO} , P_{max} , FF , η).

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé en premier lieu quelques généralités sur l'énergie photovoltaïque, sur le soleil et les propriétés de son rayonnement ainsi que les propriétés des matériaux InGaP/GaAs/Si.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la physique de la cellule triple jonctions, son principe de fonctionnement, ainsi que ses caractéristiques principales.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation obtenus et leurs interprétations. L'influence des épaisseurs sur les différents paramètres de la cellule photovoltaïque a été étudiée et ainsi on a pu déterminer les valeurs optimales du rendement de conversion.

Les résultats obtenus montrent que pour une cellule triple jonctions cascade à base de InGaP/GaAs/Si, le rendement optimal est de 43% pour des épaisseurs $W_1=3\mu\text{m}$, $W_2=4\mu\text{m}$ et $W_3=100\mu\text{m}$ des différentes cellules.

En perspective, nous pouvons envisager l'étude d'une cellule triple jonction InGaP/GaAs/Si monolithique. L'optimisation d'une telle cellule est obtenue en déterminant les épaisseurs des différentes cellules qui assurent le même courant (current matching).

Bibliographie

- [1] <https://www.energy.gov.dz/>
- [2] Stephen J.Fonash “Solar Cell Device Physics”, Second edition, Elsevier, 2010.
- [3] P.Rapport, “The photovoltaic effect and its utilisation in solar cells”, C.E.Bacchus, New York. IEEE Press, P.14, 1976.
- [4] J.P.Rivet, Introduction à l’astronomie, CNRS, 2009.
- [5] <https://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/Solar/Events/erupt2.jpg>
- [6] CaRREAU.c,DUFOUR.M,GIBILISCO.M, les énergies renouvelables dans l’habitat, France 2001.
- [7] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.
- [8] Borden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [9] M.overt, les piles solaires le composant et ses application, Masson, Paris, 1985.
- [10] N.A.Sharp,NOAO/NSO/KiHpeak FTS/AURA/NSF.
- [11] Honsberg C.Bowden, Photovoltaics: Devices, systems and applications [CDROM]. Sydney (Aus) : Univ.of New South Wales, 1998.
- [12] P. Michalopoulos, Mémoire de master, Naval Post-graduate School, Monterey, California USA (2002).
- [13] Peter Würfel, “Physics of solar cells: from principles to new concepts”, WILEY-VCH Verlag Gmbtt&Co.KGaA, Weimheim, 2005.
- [14] <http://nasaphysics.cet.edu/blackbody-radiation.html>
- [15] <http://www.luxol.fr/project-toiture-solaire/14-effect-photovoltaïque.html>
- [16] A-Labouret, M.Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, Dunod Paris, 2006.
- [17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>
- [18]<http://ifips.projet.free.fr/index.php?page=conversion&contenu=EO>
- [19] P.Chabloz, “Les couches épaisses en silicium amorphes,application comme détecteurs de rayon X”, thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne.1996.
- [20] Blackmore.J.S., Appl.Phys.53(1982) R 123.
- [21] S.Laval.Physique des semi-conducteurs III-V, Ecole d’été d’optoélectronique, Institut d’Electronique Fondamentale, CNRS(URA 022), Université Paris Sud, F.91405, Orsay Cedex, France.

- [22] V.GORGE,"Caractérisation de matériaux III-V et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des élément "thèse de doctorat, université Paris-sud 11,2012. (s.d).
- [23] F.Boudjerad,"Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS",Mémoire de master 2013.
- [24] A. Laugier,"les photopiles solaires : du matériau ou dispositif,du dispositif du dispositif aux applications",technique et documentation,Paris,1981.
- [25] Mathieu H, Bretagnon T, Lefebvre P, « Physique des Semiconducteurs et des Composants Électroniques, Problèmes Résolus », Dunod, 2001.
- [26] J. D. Majumdar, I. Manna, "Laser-Assisted Fabrication of Materials", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [27] Geisz J, Friedman D, "III–N–V semiconductors for solar photovoltaic applications", Semiconductor Science and Technology, 17(8):769, 2002.
- [28] A. Haas, J. Wilcox, J. Gray, and R. Schwartz , “ Design of A GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy output ”, Journal of Photonics for Energy Vol. 1, 2011.
- [29] H. Mathieu,"Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 5 ème édition Dunod (2001)
- [30] Y. A. Goldberg, “Handbook Series on Semiconductor Parameters”, Vol.2, Word Scietific, London, 1999.
- [31] Ouddah.M. Magister :Etude du silicium poreux destiné aux cellules solaires. Université de Constantine (2009).
- [32] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium#/media/Fichier:Silicon-unit-cell-3D-balls.png>
- [33] Jorge PY.Etudes des propriétés opto-électroniques de structures et de composants à base de nanostructures de Si, TY - JOUR AU - De la Torre.
- [34] A. Haas, J. Wilcox, J. Gray, and R. Schwartz , “ Design of A GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy output ”, Journal of Photonics for Energy Vol. 1, 2011.
- [35] M. Leleyter et P. Joyes Laboratoire de Physique des Solides , Bâtiment 510, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France.
- [36] N.Mchalikh et C.Hmada. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.
- [37] Bruxelles Environnement .IBGE-Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement. INFOS FICHE-Energie. Le photovoltaïque-Module3 –Fonctionnement et Technologie. Novembre 2010
- [38] Pierre, Balthazar LECHÊNE, THÈSE doctorat « Conception, caractérisation et durée de vie de cellules photovoltaïques organiques tandems à base de PCDTBT » université de Grenoble.

- [39] HELALI KAMELIA ; Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Thème « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative » UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU.
- [40] H. Mathieu : « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 2ème édition, Masson ,1990.
- [41] M. Green, D. Emerry, Y. Hishikawa, « Solar cell efficiency tolde », version 37, progression PV, No1, 2011.
- [42] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance>.
- [43] Michallon, « Étude et optimisation de l'absorption optique et du transport électronique dans les cellules photovoltaïques », Université Grenoble Alpes, (2015).
- [44] J.M. Olson, D.J. Friedman and S. Kurtz, « High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells », Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley and Sons, 2003.
- [45] G. W Masden and C.E.Backus,« increased photovoltaic conversion efficiency through use of spectrum splinting and multiple cells », Proc. 13 IEEE Photovoltaic specialist conf, 1978.
- [46] A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, « Fundamentals of solar cells photovoltaic energy conversion », New York : Academic Press ,p.522, 1983
- [47] E. D. Jackson U.S Patent 1960.
- [48] B. Burnett , « The basic physics and desing of III-V multijunction solar cells », 2002
- [49] M.Yamaguchi, « Present status of R and D super high efficiency III–V compound solar cells in japan»
- [50] H.Cotale, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, Yoon and H. N. Karam, « III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics », Energy Envir.
- [51] http://www.semiconductor-today.com/news_items/2018/apr/fhg-ise_030418.shtml