

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

AMRARREDOUANE

&

MADOUI FATEH

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Micro-optoélectronique

Thème

Etude et simulation d'une cellule solaire double jonction à base de GaAs/Ge

Proposé par : Mr NACER SAID

Année Universitaire 2015-2016

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles et qui ont prié Dieu pour moi, et qui ont su m'entourer de toute leur affection et amour.

Puis je tourne vers les personnes qui ont contribué et qui ont fait part de ma modeste réussite. Je remercie infiniment mes professeurs de master pour leur encouragement et leur soutien

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

Je vous exprime ma sincère gratitude pour tous ce que vous m'avez apportés de près ou de loin. Merci infiniment.

Amrar Redouane

&

Madoui Fateh

Remerciement

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Puis – faut il le souligner- ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans la précieuse aide et le rigoureux encadrement de Mr NACER Said.

Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Mes sentiments de profonde gratitude vont à mes professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leurs savoirs sans réserve.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenus, à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire et à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

ملخص:

الطاقة الشمسية الضوئية هي تحويل مباشر لجزء من الاشعة الشمسية إلى الطاقة الكهربائية، هذا التحويل الطاقوي يتم عن طريق الخلية الشمسية والتي مردودها متعلق بنوعية الطيف الشمسي الممتص. هذا العمل هو دراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية على أساس تقاطعات المزدوجة المواد GaAs والجرمانيوم (Ge). بعد أن ذكر مبدأ التشغيل وخصائص الخلايا الشمسية، تم تحديد تأثير سمك الخلية العليا (GaAs) على خاصية الخلية، وتأثير معدلات إعادة التركيب. مدة حياة الناقلين وتأثير درجة الحرارة. وتظهر نتائج المحاكاة سمك الخلية العليا يؤثر بشكل كبير على أداء الخلية، كما تم تحقيق الكفاءة المثلى من 31.7% لسمك الخلية العليا من 2 ميكرون في الخلايا جنباً إلى جنب والعائد من 33.7%. تم الحصول عليها لنفس سمك الخلية العليا لخلية تتالي.

كلمات المفاتيح: الخلية الشمسية; تقاطع متعدد Ge; ; GaAs; الخلايا جنباً إلى جنب; الخلية تتالي.

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 double jonctions à base du matériau GaAs et Germanium. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence de l'épaisseur de la cellule du haut (GaAs) sur les caractéristiques de la cellule a été déterminée, ainsi que l'influence des vitesses de recombinaisons, de la durée de vie des porteurs et l'effet de la température. Les résultats de simulation montrent que l'épaisseur de la cellule du haut influence considérablement sur le rendement de la cellule, aussi un rendement optimal de 31,7% a été obtenu pour une épaisseur de la cellule du haut de 2 μm en cellule tandem, et un rendement de 33,7% a été obtenu pour la même épaisseur de la cellule du haut en cellule cascade.

Mots clés : cellule solaire ; multijonction ; GaAs ; Ge ; tandem ; cascade.

Abstract: Photovoltaic solar energy is the direct conversion of a portion of solar radiation into electrical energy. This energy conversion is performed through a solar cell whose efficiency depends on the range of the solar spectrum absorbed. This work aims to study and simulate a double junction solar cell basically made of GaAs and Germanium material. After recalling the principle of operation and characteristics of a solar cell, the influence of the thickness of the top cell (GaAs) on the cell characteristic was determined, the influence of the recombination speed and duration life carriers and the effect of temperature. Simulation results show that the thickness of the top cell significantly affects the performance of the cell, as optimum efficiency of 31.7% was achieved for a thickness of the top cell of 2 μm in tandem cell and a yield of 33.7% was obtained for the same thickness of the top cell cascade cell.

Keywords: solar cell; multijunction ; GaAs ; Ge ; tandem ; cascade.

Listes des acronymes et abréviations

UV Ultraviolet

AM Masse d'air

C vitesse de la lumière dans le vide

ν La fréquence de la lumière.

K La constante de Boltzmann

T La température

d distance soleil-terre

R_s Rayon du soleil

E L'énergie de photon incident

ψ le potentiel électrostatique pouvant régner dans les matériaux

q la charge élémentaire

χ l'affinité électronique

Φ le travail de sortie

φ le potentiel d'ionisation

N_c La densité d'Etat des électrons

N_v La densité d'Etat des trous

m_n^* Masse effective des électrons

m_p^* Masse effective des trous

m_0 Masse des électrons

x_j Profondeur de la jonction

τ La durée de vie des porteurs

D la constante de diffusion des porteurs

μ La mobilité des porteurs

λ la Longueur d'onde

α Coefficient d'absorption

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

n_i la concentration intrinsèque des porteurs libre

N_d la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

N_a la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P

W La Largeur de la zone de charge d'espace

R coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

F Flux des photons incidents

ZCE Zone de charge d'espace

J_n La densité de courant d'électrons

J_p La densité courant de trous

J_d La densité de courant photoélectrique

J_{ph} Le photo-courant

J_{tot} La densité de courant totale

J_{obs} Le courant d'obscurité

J_{cc} Densité de courant de court-circuit

V_{co} Tension de circuit ouvert

h Constante de Planck

V_0 Le potentiel de diffusion

J_0 courant de saturation

μ_n mobilité des électrons

μ_p mobilité des trous

L_p Longueur de diffusion des trous dans le matériau N

L_n Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P

τ_p et τ_n les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous

D_n le coefficient de diffusion des électrons

D_p le coefficient de diffusion des trous

λ_{\min} la longueur d'onde la plus petite du spectre solaire

λ_{\max} la longueur d'onde la plus grande du spectre solaire

I_{cc} Courant de court-circuit

FF Facteur de forme

V_m Tension maximale correspondant à P_{\max}

I_m Courant maximale correspondant à P_{\max}

P_i Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

S La surface de la cellule PV

η Rendement

Ga Gallium

As Arsenic

Ge Germanium

n_0 La concentration d'électrons à l'équilibre

c La vitesse de la lumière dans le vide $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

S_n La vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la Surface avant

S_p La vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface Arrière

E_g Energie de la bande interdite

E_c Energie de la bande de conduction

E_v Energie de la bande de valence

ΔE_c Décalage de bande de conduction

ΔE_v Décalage de bande de valence

Liste des figures

Chapitre 1 Généralités	3
Figure 1.1. Composantes du rayonnement solaire.....	7
Figure 1.2. Définition de la Masse d'aire AM_x	9
Figure 1.3. Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 et AM1.5.	12
Figure 1.4. L'irradiation spectrale (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde.....	13
Figure 1.5. Réseau cristallin de la structure Zinc-Blende pour GaAs	17
Figure 1.6. Diagramme des énergies pour un matériau.....	18
Figure 1.7. Structure de bande de GaAs.....	21
Figure 1.8. Structure de bande schématique d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect	22
Figure 1.9. Les transitions optiques directes et indirectes.....	24
Figure 1.10. La structure diamant	26
Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques	30
Figure 2.1. Structure et diagramme de bande d'une cellule Photovoltaïque sous éclairement	30
Figure 2.2. Composition d'une cellule photovoltaïque.	33
Figure 2.3. a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée; b) Plaque de silicium après texturation.	34
Figure 2.4. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure 2.5. caractéristique courant-tension $I = f(V)$ en obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.....	40
Figure 2.6. Le rendement en fonction du gap d'énergie.	43
Figure 2.7. cellule tandem.	45

Figure 2.8. cellule cascade.....	46
Chapitre 3 Simulations.....	49
Figure 3.1. Schéma de la structure simulée.....	48
Figure 3.2. Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ à $T = 6000$ K.....	50
Figure 3.3. Variation du coefficient d'absorption α du $GaAs$ en fonction de la longueur d'onde λ	51
Figure 3.4. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur d_1	52
Figure 3.5. Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur d_1	52
Figure 3.6. Caractéristique courant-tension de la structure $GaAs$ pour différentes épaisseurs d_1	53
Figure 3.7. Puissance délivrée par la cellule $GaAs$ en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs épaisseurs d_1	54
Figure 3.8. Représentation du rendement de la structure $GaAs$ en fonction de l'épaisseur d_1	55
Figure 3.9. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur d_1	56
Figure 3.10. Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur d_1	56
Figure 3.11. Caractéristique courant-tension de la structure Ge pour différentes épaisseurs d_1	57
Figure 3.12. Puissance délivrée par la cellule Ge en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs épaisseurs d_1	58
Figure 3.13. Représentation du rendement de la structure Ge en fonction de l'épaisseur d_1	59
Figure 3.14. variation de la tension de circuit ouvert total V_{co} de la structure $GaAs/Ge$ en fonction de l'épaisseur d_1	59

Figure 3.15. Représentation du rendement pour une cellule tandem <i>GaAs/Ge</i> en fonction de l'épaisseur d_1	60
Figure 3.16. Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure <i>GaAs/Ge</i> en fonction et de l'épaisseur d_1	61
Figure 3.17. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	62
Figure 3.18. Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	63
Figure 3.19. Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	64
Figure 3.20. Caractéristique courant-tension de la structure <i>Ge</i>	64
Figure 3.21. Puissance délivrée par la cellule <i>Ge</i> en fonction de la tension de polarisation	65
Figure 3.22. Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure <i>GaAs/Ge</i> en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	66
Figure 3.23. Représentation du rendement pour une cellule tandem <i>GaAs/Ge</i> en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	67
Figure 3.24. Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure <i>GaAs/Ge</i> en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$	68
Figure 3.25. Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la température.....	69
Figure 3.26. Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la température.....	69
Figure 3.27. Caractéristique courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes températures.....	70
Figure 3.28. Puissance délivrée par la cellule <i>GaAs</i> en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs Températures	71

Figure 3.29.Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction de la température.....	72
Figure 3.30.Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la température.....	72
Figure 3.31.Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la température.....	73
Figure 3.32.Caractéristique courant-tension de la structure <i>Ge</i> pour différentes températures.....	74
Figure 3.33.Puissance délivrée par la cellule <i>Ge</i> en fonction de V pour plusieurs Températures.....	74
Figure 3.34..Représentation du rendement de la structure <i>Ge</i> en fonction de la température.....	75
Figure 3.35.Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure <i>GaAs/Ge</i> en fonction de la température.	76
Figure 3.36.Représentation du rendement pour une cellule tandem <i>GaAs/Ge</i> en fonction de la température.	77
Figure 3.37.Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure <i>GaAs/Ge</i> en fonction de la température.	78
Figure 3.38.Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction des durées de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$	79
Figure 3.39.Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la durée de vie $\tau_n = \tau_p$	79
Figure 3.40.Caractéristiques courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes valeurs de $\tau_n = \tau_p$	80
Figure 3.41.Puissances délivrées par la cellule <i>GaAs</i> en fonction de V pour plusieurs valeurs de durée de vie $\tau_n = \tau_p$	81
Figure 3.42.Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$	82

Figure 3.43.Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure $GaAs/Ge$ en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$	82
Figure 3.44.Représentation du rendement pour une cellule tandem $GaAs/Ge$ en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$	83
Figure 3.45.Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure $GaAs/Ge$ en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$	84

Liste des tableaux

Chapitre 1 Généralités	3
Tableau 1.1 Résumé des différentes distributions spectrales.....	11
Tableau 1.2 Propriétés physiques du GaAs et du Ge.	27
Chapitre 3 Simulations.....	48
Tableau 3.1. Données de la structure simulée.	49

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Energie Solaire photovoltaïque	4
1.2.1 Unités utilisées	6
1.3 Le rayonnement solaire.....	6
1.4 Masse d'air	8
1.5 Radiation d'un corps noir	12
1.6 Dualité de la lumière	14
1.7 LES Matériaux III-V (GaAs).....	15
1.7.1 Caractéristique structurelles.....	17
1.7.2 Propriétés électriques	18
1.7.3 Longueur de diffusion	22
1.7.4 Propriétés optiques.....	23
1.8 Semiconducteurs IV (Germanium)	25
1.8.1 Structure cristalline du Germanium.....	26
1.8.2 Propriétés physiques du Germanium	26
1.9 Conclusion	28
Chapitre 2 Physique des Cellules photovoltaïques	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	29
2.3 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	31
A L'équilibre thermodynamique	31
B Hors équilibre thermodynamique.....	32

2.4	Architecture de la cellule photovoltaïque.....	33
2.4.1	Texturation de la surface	34
2.4.2	Les contacts face avant et face arrière	34
2.4.3	La couche antireflet.....	35
2.4.4	La passivation	35
2.4.5	Champ électrique dans la zone arrière (BSF)	35
2.5	Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	36
2.5.1	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	36
a	courant de court-circuit I_{cc}	41
b	Tension de circuit ouvert V_{co}	41
c	Facteur de forme (Facteur de remplissage), FF	41
d	Rendement de conversion d'énergie	42
2.6	Les cellules III-V multi-jonctions.....	44
a	cellule tandem.....	44
b	cellule cascade	46
2.7	Conclusion.....	47
Chapitre 3 Simulations.....		48
3.1	Introduction.....	48
3.2	Description de la structure simulée	48
3.3	Irradiation d'un corps noir.....	50
3.4	L'absorption.....	50
3.5	Influence de l'épaisseur de la cellule du haut (GaAs).....	51
3.5.1	Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs	51
3.5.2	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs	52
3.5.3	Caractéristiques J(V) de la structure GaAs	53

3.5.4	Puissance délivrée par la structure GaAs	53
3.5.5	Le rendement de la cellule GaAs.....	54
3.5.6	Densité decourant de court-circuit J_{cc} de la cellule du bas (Ge)	55
3.5.7	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure Ge	56
3.5.8	Caractéristiques $J(V)$ de la structure Ge.....	57
3.5.9	Puissance délivrée par la structure Ge.....	57
3.5.10	Le rendement de la structure Ge	58
3.5.11	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge	59
3.5.12	Le rendement de conversion	60
3.6	Influence de la vitesse de recombinaison en surface.....	62
3.6.1	Densité decourant de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs.....	62
3.6.2	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs	62
3.6.3	Le rendement de la cellule GaAs.....	63
3.6.4	Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure Ge	64
3.6.5	Puissance délivrée par la structure Ge	65
3.6.6	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge	65
3.6.7	Le rendement de conversion	66
3.7	Influence de température	68
3.7.1	<i>Densité de courant</i> de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs	68
3.7.2	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs	69
3.7.3	Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure GaAs	70
3.7.4	Puissance délivrée par la structure GaAs	70
3.7.5	Le rendement de la cellule GaAs.....	71
3.7.6	<i>Densité decourant</i> de court-circuit J_{cc} de la structure Ge	72
3.7.7	Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure Ge	73
3.7.8	Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure Ge	73

3.7.9 Puissance délivrée de la structure Ge	74
3.7.10 Le rendement de la structure Ge	75
3.7.11 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge	75
3.7.12 Le rendement de conversion	76
3.8 Influence de la durée de vie des porteurs.....	78
3.8.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs.....	78
3.8.2 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs	79
3.8.3 Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure GaAs	80
3.8.4 Puissance délivrée par la structure GaAs	80
3.8.5 Le rendement de la cellule GaAs.....	81
3.8.6 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge	82
3.8.7 Le rendement de conversion	83
3.9 Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	86
Bibliographie	88

Conclusion générale

Le spectre solaire est un spectre très large pour être exploité par un seul semi-conducteur, de vastes recherches sont faites afin de trouver des matériaux à moins coût et avec des rendements maximales pour les différents technologies des cellules photovoltaïques.

Les objectifs tracés dans le cadre de notre travail consistent à étudier et simuler une structure photovoltaïque à base de matériaux Germanium et GaAs, afin d'absorber le maximum du rayonnement solaire et de délivrer aussi un maximum d'énergie électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques. Les caractéristiques cristallines, électriques et optiques des matériaux GaAs et Ge y sont présentées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la physique, le principe de Fonctionnement, l'Architecture d'une cellule photovoltaïque ainsi que ses caractéristiques principales. Enfin nous avons abordé les cellules III-V multi-jonctions (cellule tandem et cellule cascade).

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de nos simulations. L'influence de plusieurs paramètres (l'épaisseur de la cellule du haut d_1 , les vitesses de recombinaison, la durée de vie des porteurs ainsi que la température) sur les différentes caractéristiques de la cellule solaire a été étudiée, ce qui nous a permis de déterminer des valeurs optimales du rendement de conversion.

Les simulations réalisées dans ce chapitre montrent que pour une cellule à double jonction, le rendement est optimal de l'ordre de 32.4 % en cellule tandem et 35.3 % en cellule cascade.

Conclusion générale

L'amélioration de ce travail peut être envisagée en considérant une cellule à trois jonctions (GaInP/GaAs/Ge) en ajoutant une jonction GaInPa notre structure déjà étudié (GaAs/Ge) avec une concentration d'indium adéquate qui permettrait d'améliorer considérablement le rendement de conversion.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Le mot " photovoltaïque "vient du grec" photo "qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique.[25]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie en produisant un courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Les cellules solaires à base de GaAs marquent le record mondial de la conversion photovoltaïque à cause de leur rendements supérieur de 25% , et cela pour les applications terrestre et spatiale. [3]

Chapitre 1 Généralités

Les premières cellules solaires en GaAs, fabriquées par Jenny et al en 1956 étaient sous forme de homojonction p-n avec une efficacité de conversion de 3 à 6 % seulement [4,5]. En 1970 Alferov et Adreev élaborent une cellule solaire à hétérostructure en GaAs [6], ensuite en 1984 Gale et al ont réussi à élaborer une cellule homojonction de GaAs qui a donné un rendement de 22 % pour le spectre AM1. [7]

La conversion photovoltaïque a été conçue pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction **PN** au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif comme le germanium. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque

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

Donc, un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

1.2 Energie Solaire photovoltaïque

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la chute des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgente la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple).

Chapitre 1 Généralités

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante :

La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique).
- Relais de communication,
- Pompage de l'eau

Chapitre 1 Généralités

1.2.1 Unités utilisées

L'éclairement ou irradiance est défini comme une puissance reçue par une surface.

Il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.

L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $J.m^{-2}$ (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI). [8]

1.3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons Cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ $1370W/m^2$. Cette grandeur est appelée constante solaire.

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires se situe entre $0.25\mu m$ et $2.5\mu m$, l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total.

Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est de l'ordre de $1000 w/m^2$. [9]

Chapitre 1 Généralités

Cette grandeur variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur, de l'intensité et de la durée d'ensoleillement.

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement: le rayonnement solaire direct défini comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages. Et le rayonnement solaire diffus correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui-même, et les nuages.

La figure (1.1) montre que le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit. Le rayonnement solaire global est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre.

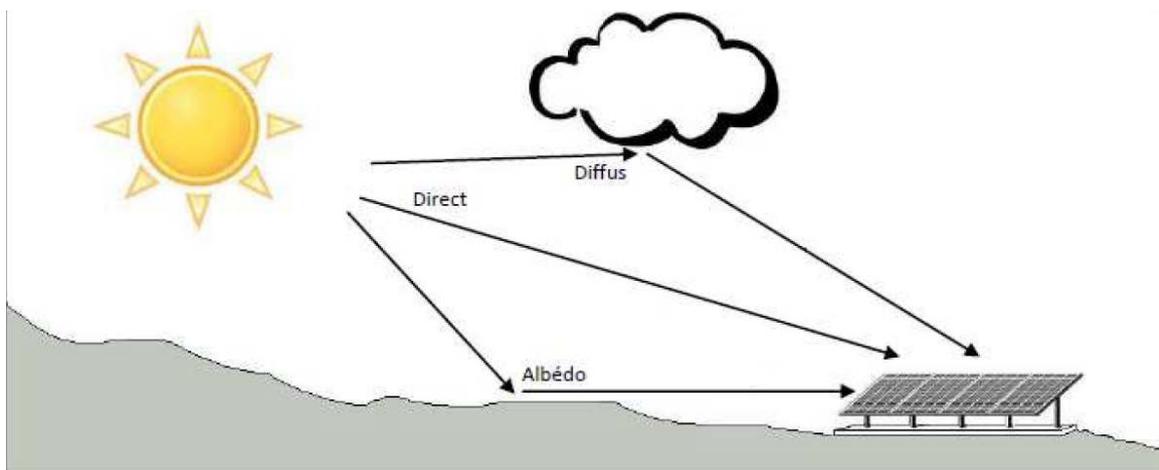


Figure (1.1) : Composantes du rayonnement solaire.[4]

Chapitre 1 Généralités

La distance parcourue par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son maximum aux premières heures de la matinée et en fin d'après-midi. Par contre, il est à son minimum lorsque le soleil est au zénith. Pour cette même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, le rayonnement solaire global reçu au cours d'une journée peut varier de 0.5 KWh/m² pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordique a plus de 6.0Kwh/m² pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

Evidemment, par temps couvert le rayonnement solaire au sol peut tomber pratiquement à zéro. En revanche, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement dégagé, le rayonnement solaire diffus tombant au sol peut atteindre 15 à 20 % du rayonnement global, mais avec un ciel couvert, le rayonnement parvenant au sol est en totalité un rayonnement diffus.

1.4Masse d'air

La figure (1.2) montre quePlus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle masse d'air ou Air Masse en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair) et l'épaisseur traversée au vertical du lieu [10].

La longueur du trajet d'un rayon solaire incliné par rapport à l'horizontale d'un angle h est donné par la formule [11]:

Chapitre 1 Généralités

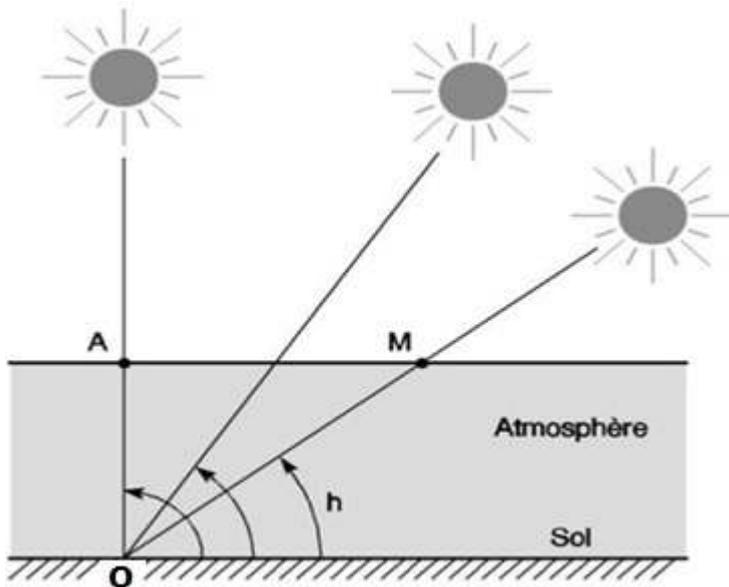


Figure (1.2) : Définition de la Masse d'air AM_x

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad \text{et} \quad AM = \frac{OM}{OA} \Rightarrow AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.1)$$

Par définition, AM0 correspond au rayonnement solaire hors atmosphère [12]. Le rayonnement signalé comme rayonnement de la masse d'air « 1 » (ou AM1) est celui qui accède au niveau de la mer à midi dans un ciel clair, son irradiance sera à ce moment précis de 1000 W/m^2 . La perte d'énergie peut être provoquée par une perte d'altitude du soleil dans le ciel car elle doit à ce moment-là traverser une masse d'air plus importante. Etant donné que le soleil se trouve au zénith pendant une courte durée, l'énergie disponible sera inférieure à 1000 W/m^2 en permanence étant donné que la masse d'air sera plus grande [10].

Chapitre 1 Généralités

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie.

Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

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

AM1.5G ou AM1.5D sont les noms du prisme standard des rayons du soleil sur la surface de la terre octroyés par les scientifiques. Le nombre se trouvant à la suite de « AM » dans ce cas « 1.5 » signifie que la distance de la lumière dans l'atmosphère est supérieure de 1.5 fois la distance lorsque le soleil est au zénith (c'est-à-dire que le soleil se trouve à 45° par rapport au zénith). Les lettres « D » et « G » désignent le rayonnement du soleil. Le « G » correspond au rayonnement 'global' qui comprend le rayonnement direct et le rayonnement diffus alors que le « D » ne correspond qu'au rayonnement direct. [13]

Chapitre 1 Généralités

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueurs d'onde variant de **0.22** à **10microns**. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

– 9% dans la bande des ultraviolets $0.20 \mu m < \lambda < 0.38 \mu m$

– 47% dans la bande visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$

– 44% dans la bande des infrarouges $0.78 < \lambda < 10 \mu m$

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de **1.37kWm²**avec un spectre centré au voisinage de $\lambda=0.48\mu m$.

Hauteur Surface	Position du soleil	Irradiance (intensité, puissance) W/m^2	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère	–	1367	AM0
Surface	$\alpha=90^\circ$	925	AM1
Surface	$\alpha=48^\circ$	963	AM1.5
Surface	$\alpha=60^\circ$	691	AM2

Tableau (1.1) : Résumé des différentes distributions spectrales. [14]

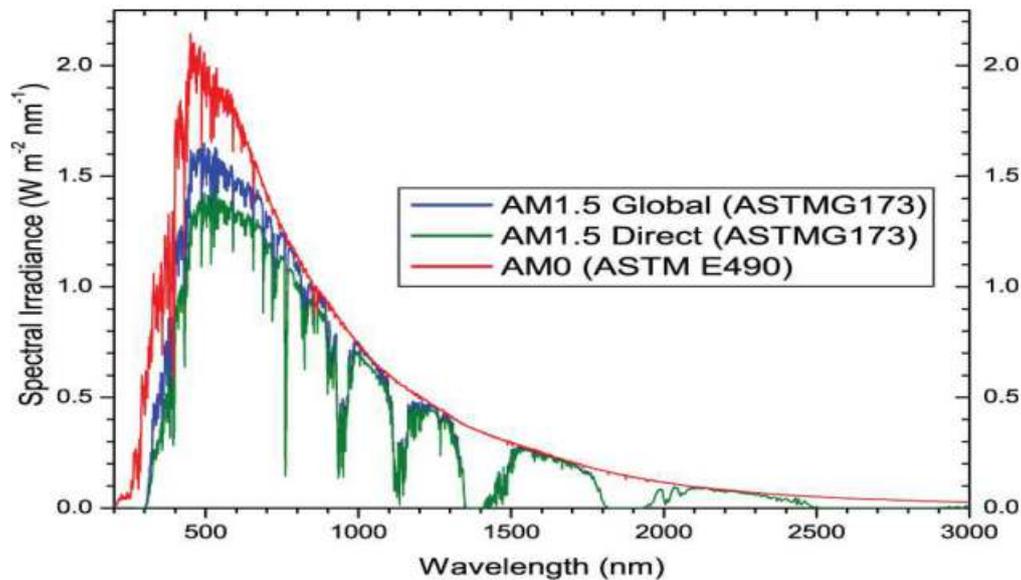


Figure (1.3) : Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (rouge) et AM1.5 (bleu)[15].

1.5 Radiation d'un corps noir

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température. Les sources corps noirs qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible. L'irradiation spectrale d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée par l'équation suivante:

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{C}{\lambda^4 \left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right)} \quad (1.2)$$

Chapitre 1 Généralités

Avec :

$$A = \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \quad (1.3)$$

ν : La fréquence de la lumière.

K : La constante de Boltzmann.

T : La température.

C: vitesse de la lumière dans le vide.

R_s : Rayon du soleil ($R_s=6,96.10^5$ km)

d : distance soleil-terre ($d=1,5.10^9$ km)

λ : longueur d'onde de la lumière

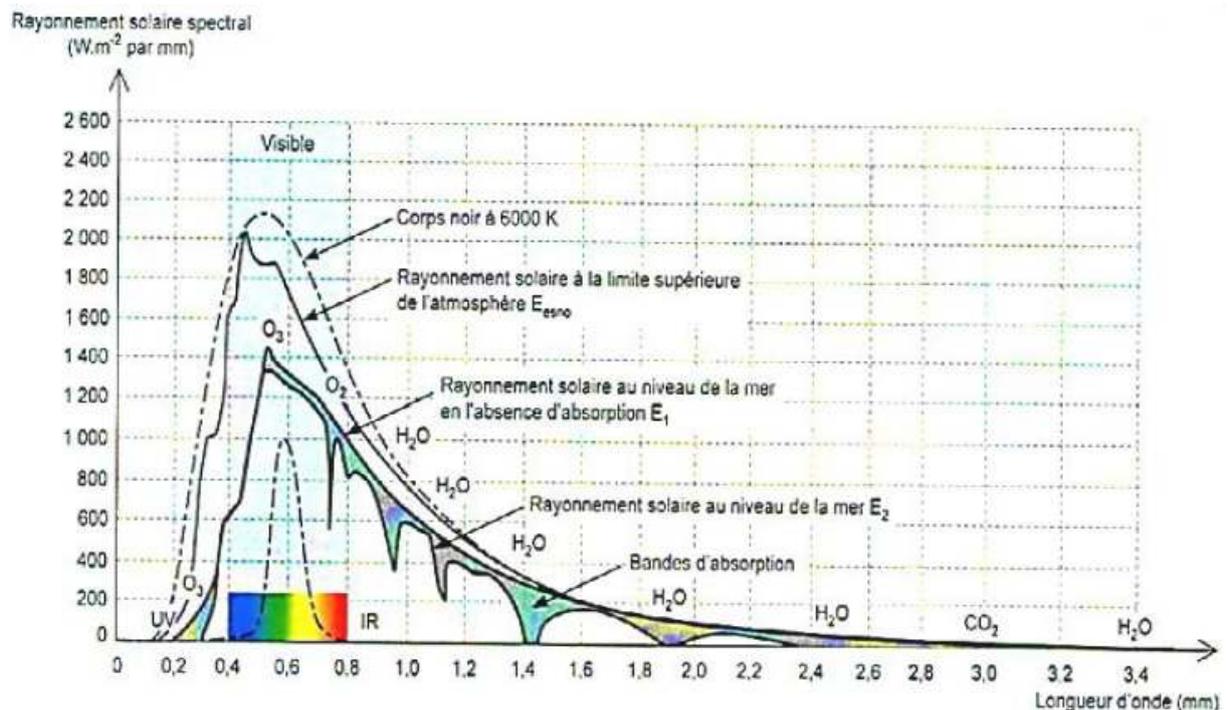


Figure (1.4): L'irradiation spectrale (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde.[5]

Chapitre 1 Généralités

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- de la latitude du lieu et son degré de pollution.
- de la période de l'année.
- de l'instant considéré dans la journée.
- de la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière.

Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.

1.6 Dualité de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ .

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} (1.4)$$

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Chapitre 1 Généralités

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2\mu\text{m}$ (Ultra-violet) et $4\mu\text{m}$ (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5\mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2\mu\text{m}$ et $2,5\mu\text{m}$. De $0,4\mu\text{m}$ à $0,78\mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde, ces photons excitent des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

1.7 Les Matériaux III-V (GaAs)

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en général) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

Chapitre 1 Généralités

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs.

Parmi ces semi-conducteurs, on trouve principalement le L'arséniure de gallium (GaAs) a été reconnu depuis longtemps comme étant un matériau très favorable pour la conversion photovoltaïque grâce à ses propriétés importantes dont on cite: une bande interdite directe de 1.43eV et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de l'ordre de 2-3 μm [16]. L'arséniure de gallium (GaAs) est un semi-conducteur composé d'un mélange de deux éléments, gallium (Ga) et l'arsenic (As). Le gallium est un élément chimique métallique de numéro atomique 31. On le trouve en petite quantités dans certaines variétés de blende, de bauxite, de pyrite, de magnétite et de kaolin. On obtient le gallium comme sous-produits de métallurgie de zinc et des bauxites. Le métal pur est préparé par électrolyse de sels alcalins. Le gallium reste facilement en surfusion. En effet, il peut rester liquide jusqu'à près de 2000 °C. Comme l'eau, il se dilate lors de sa cristallisation. Le gallium est chimiquement proche de l'aluminium: tous deux forment des sels et des oxydes dans lesquels le métal est trivalent. Ils forment également des composés monovalents et divalents.

L'arsenic, est un élément semi-métallique solide, extrêmement toxique, de numéro atomique 33. Il appartient au groupe V de la classification périodique. L'arsenic n'est pas rare, mais il est toxique [17].

1.7.1 Caractéristiques structurales

La figure (1.6) montre la structure tétraédrique de base du GaAs dans laquelle chaque atome de "Ga" a quatre plus proches voisins de "As", et celui-ci a comme plus proches voisins quatre atomes de Ga. Cette figure montre également l'interpénétration des deux sous-réseaux semblables au réseau de diamant avec une constante de réseau $a_0 = 5.6533 \text{ \AA}$ [18].

Les semiconducteurs III-V cristallisent dans la structure zinc-blende. Ce réseau est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées (cfc) interpénétrés, l'un étant formé par les éléments III et l'autre par les éléments V.

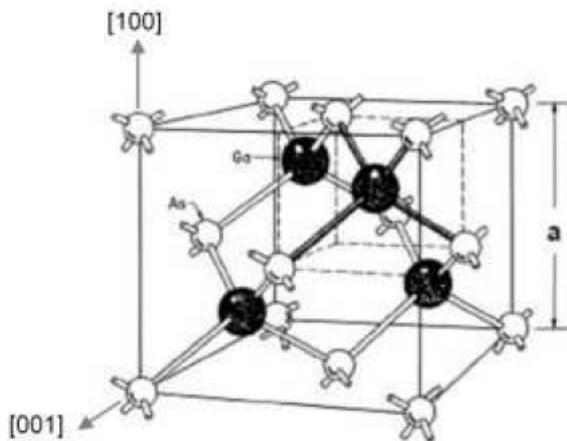


Figure (1.5) : Réseau cristallin de la structure Zinc-Blende pour GaAs

Ces deux sous réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube d'un vecteur $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$, a_0 étant le paramètre cristallin. Chaque atome se trouve ainsi au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce. La maille élémentaire de cette structure zinc-blende est représentée sur la figure (1.6)

1.7.2 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite (E_g), et de sa densité de porteurs. Avant de détailler ces valeurs pour GaAs, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. 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. Le diagramme d'énergie d'un matériau est présenté dans la figure (1.7).

1.7.2.1 Diagramme d'énergie

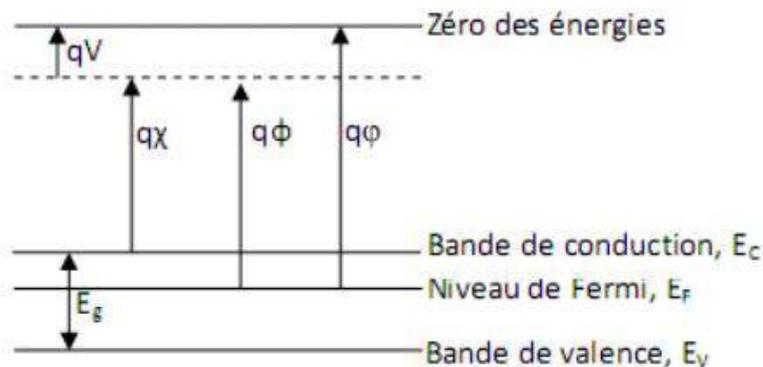


Figure (1.6) : Diagramme des énergies pour un matériau. [19]

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.

Chapitre 1 Généralités

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 [8]. 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 où elle reste soumise au même potentiel électrostatique V . Enfin, le potentiel d'ionisation φ est l'énergie nécessaire pour extraire une particule du système et la mettre à l'infini.

1.7.2.2 Niveau de Fermi

Le niveau de Fermi E_f correspond au plus haut niveau énergétique occupé par un électron à 0K. La probabilité d'occupation d'un niveau énergétique par un électron obéit à la statistique de Fermi-Dirac, définie par l'équation ci-dessous. La probabilité d'occupation de l'énergie E par un trou est $1-F(E)$.

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \quad (1.5)$$

Avec :

E_f : Le niveau de Fermi.

K : La constante de Boltzmann.

T : La température.

1.7.2.3 Densité d'états

Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus, on parle aussi d'états. Le nombre de ces niveaux n'est cependant pas constant à cause des différents niveaux électroniques des atomes. On parle alors de densité d'états. Ces dernières dépendent des caractéristiques du matériau et de la température.

La densité d'Etat des électrons est donnée par :

$$N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m_n^*}{m_o}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ cm}^{-3} (1.6)$$

La densité d'Etat des trous est donnée par :

$$N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m_p^*}{m_o}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ cm}^{-3} (1.7)$$

Avec :

m_n^* : Masse effective des électrons

m_p^* : Masse effective des trous

m_o : Masse des électrons

T : Température (K)

1.7.2.4 Structure de bande d'énergie de GaAs:

Le GaAs est un semi-conducteur III-V, qui comprend aussi 8 électrons par cellule unité (3 provenant du "Ga" et 5 de "As"). Sa structure a un nombre égal de Ga et As distribués sur un réseau de type diamant. Il possède donc, comme le Si et le Ge, 8 bandes dérivées des orbitales SP^3 , dont 4 sont entièrement remplies. Sa structure de bande est donnée dans la figure (1.8). On remarque que dans ce cas le minimum de la bande de conduction est situé au centre de la zone de Brillouin. C'est un semi-conducteur à gap direct situé au point Γ . Si le minimum de la bande supérieure correspond au même vecteur d'onde que maximum de la bande inférieure alors on dit que la bande interdite est directe (gap direct), dans l'autre cas la bande interdite est indirecte voir figure (1.9) [20].

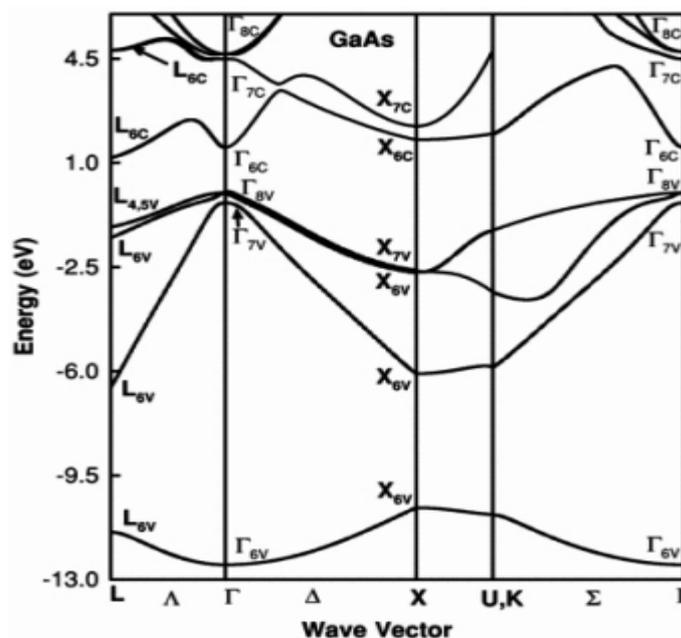


Figure (1.7) : Structure de bande de GaAs

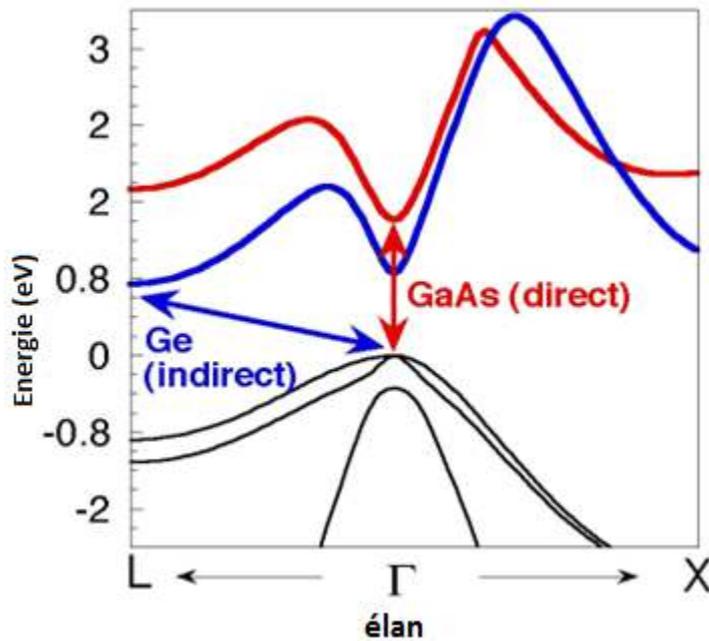


Figure (1.8): Structure de bande schématique d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect.

1.7.3 Longueur de diffusion

La longueur de diffusion (L) est la distance moyenne sur laquelle les porteurs peuvent se déplacer par diffusion. Elle est définie par :

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (1.8)$$

Avec :

τ : La durée de vie des porteurs

D : la constante de diffusion des porteurs, définie par :

$$D = \frac{kT}{q} \mu(1.9)$$

Avec :

μ : *La mobilité des porteurs*

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées.

1.7.4 Propriétés optiques

L'interaction d'un électron avec un photon se fait, comme toute interaction, avec conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. Le vecteur d'onde du photon étant très inférieur à celui des électrons, les transitions optiques directes entre la bande de valence et la bande de conduction apparaissent verticales dans le diagramme de bande des électrons. Dans le cas d'un semi-conducteur à bande interdite indirecte, les transitions optiques à travers le gap ne peuvent avoir lieu que grâce à une interaction supplémentaire, par exemple celle d'un phonon.

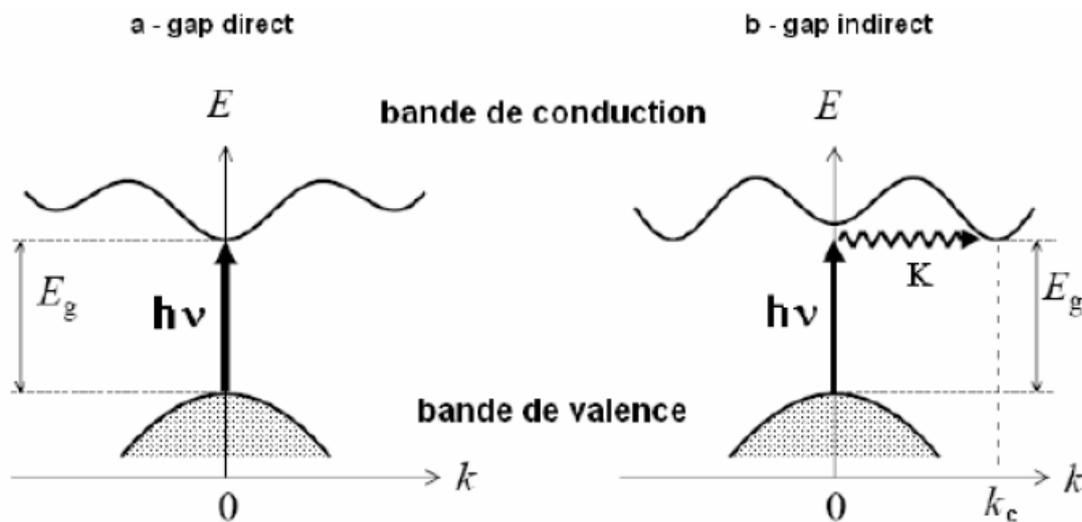


Figure (1.9) : les transitions optiques directes et indirectes. [21]

Un semi-conducteur à bande interdite indirecte comme le GaP, est un très mauvais émetteur de lumière et c'est pourquoi le Silicium qui a eu tant de succès en microélectronique n'est pas un bon matériau pour l'optoélectronique. En revanche, un matériau à bande directe comme le GaAs, pour lequel électrons et trous se retrouvent sur les maxima de leurs bandes respectives qui sont tous les deux au point $k = 0$ (voir Figure 1.10), est un très bon émetteur de lumière [19].

1.7.4.1 Absorption

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau.

1.7.4.2 Etude du coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption (α), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau.

Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite (E_g), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$, pour une énergie E supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (1.10)$$

Avec:

k : Le coefficient d'atténuation, ou d'extinction

λ : Longueur d'onde

1.8 Semiconducteurs IV (Germanium)

Les semiconducteurs IV sont des corps d'éléments de la colonne IV du tableau périodique de Mendeleïev. Cette colonne comprend les éléments C, Si, Ge, Sn et Pb. Tous ces éléments n'ont pas le même intérêt dans l'industrie de la microélectronique : sont principalement utilisés le silicium et le germanium pour leurs propriétés semiconductrices lorsqu'ils se trouvent à l'état pur et monocristallin. Nous nous focaliserons dans la suite sur le Ge. [22].

1.8.1 Structure cristalline du Germanium

Le germanium est un matériau qui cristallise dans une structure diamant elle est illustrée sur la figure (1.11).

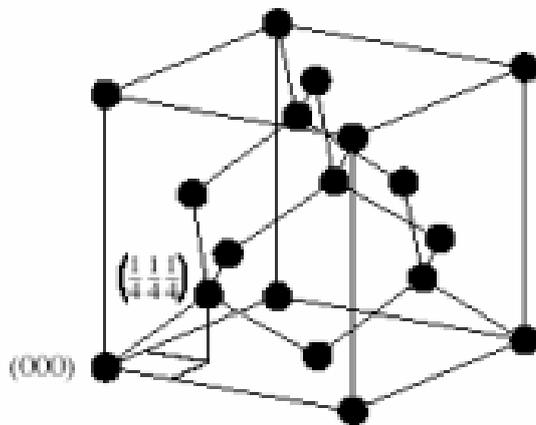


Figure (1.10) : La structure diamant [18].

1.8.2 Propriété physiques du Germanium

✓ Hauteur de la bande interdite

La température entraîne une variation du gap selon une loi dite de Varshni. Elle est donnée par l'expression :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{(T+b)} \quad (1.11)$$

Où : $E_g(T)$ est la valeur du gap à une température donnée et a et b sont des valeurs empiriques déterminées pour chaque semiconducteur.

Chapitre 1 Généralités

Le tableau (1.2) regroupe les propriétés physiques de l'arséniure de gallium et du Germanium.

Propriétés	GaAs	Germanium
Structure	zinc-blende	Diamant
Constante diélectrique	12.9	16,2
$N_c(\text{cm}^{-3})$	$4,336 \cdot 10^{17}$	$1,04 \cdot 10^{19}$
$N_v(\text{cm}^{-3})$	$7,547 \cdot 10^{18}$	$6,0 \cdot 10^{18}$
$E_g(0)$ Energie de Gap à 0°K (eV)	1,51	0.75
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,424	0,67
a (eV/K)	$0,5405 \cdot 10^{-3}$	$0.477 \cdot 10^{-3}$
b (K)	204	235
Affinité électronique(eV)	4,07	4,0
Concentration intrinsèque des porteurs (cm^{-3})	$2,1 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Duré de vie minoritaire (ns)	$\tau_n = \tau_p = 40 \text{ ns}$	$\tau_n = \tau_p = 5 \cdot 10^4 \text{ ns}$
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\mu_n = 8500$	$\mu_n = 3950$
Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\mu_p = 400$	$\mu_p = 1900$
Paramètre de maille (°A)	5,6533	5,658
Indice de réfraction	3,3	3,97

Tableau(1.2) : Propriétés physiques du GaAs et du Ge. [23]

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé des notions importantes sur le gisement solaire. Ensuite, nous avons présenté les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et l'irradiation spectrale.

Puis nous avons étudié les caractéristiques structurelles, les propriétés électriques et optiques du matériau GaAs et du Germanium.

Ces connaissances sont indispensables pour la détermination des caractéristiques des cellules solaires.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

2.1 Introduction

Les principaux matériaux présentant l'effet photovoltaïque sont les 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 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

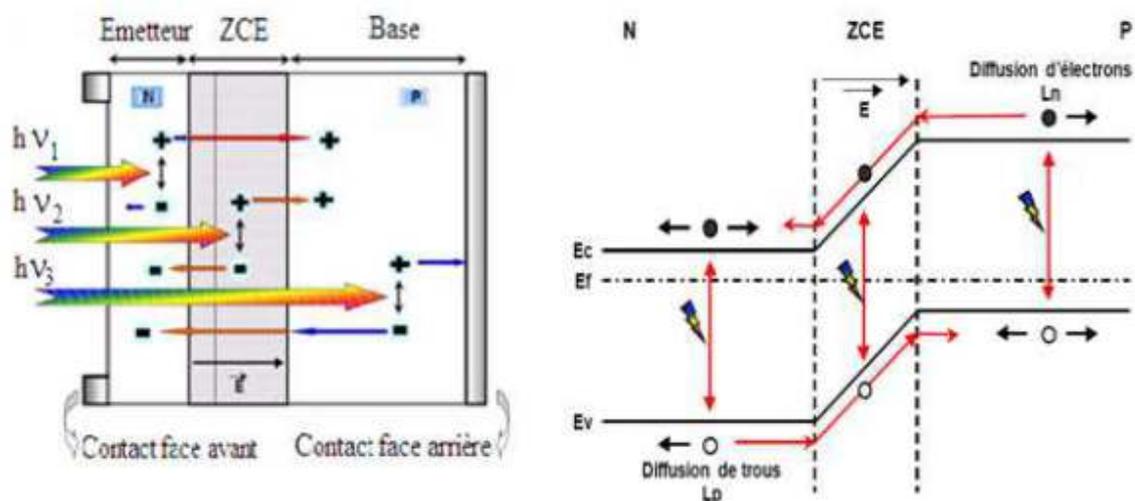
Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, ou encore photopile, est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La figure (2.1) montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque avec les principales régions (Emetteur, Zone de Charge d'Espace et Base) dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

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, donnant naissance à un courant de génération [24].

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi simultanément :

- L'absorption d'un maximum de photons possible.
- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres.
- La collecte sans perte de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.



Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semi-conducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [25] (figure 2.1). Si l'on prend un semi-conducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infrarouge. Pour absorber un maximum de photons,

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

il faudrait donc un semi-conducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap, et donc la puissance de la photopile ($P=I \times V$), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV.

Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison. Quant au troisième, c'est l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

2.3 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

A - l'équilibre thermodynamique

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

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

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

La largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre égale à: $W = x_n + x_p$

Avec :

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

K : La constante de Boltzmann

T : La température

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

n_i : La concentration intrinsèque des porteurs libre

N_a :La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

N_d : La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P

q : La charge de l'électron.

B - 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_d 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.

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

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

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

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

Avec :

V_0 = Le potentiel de diffusion

V = Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

2.4 Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche antireflet et le champ de contact arrière.

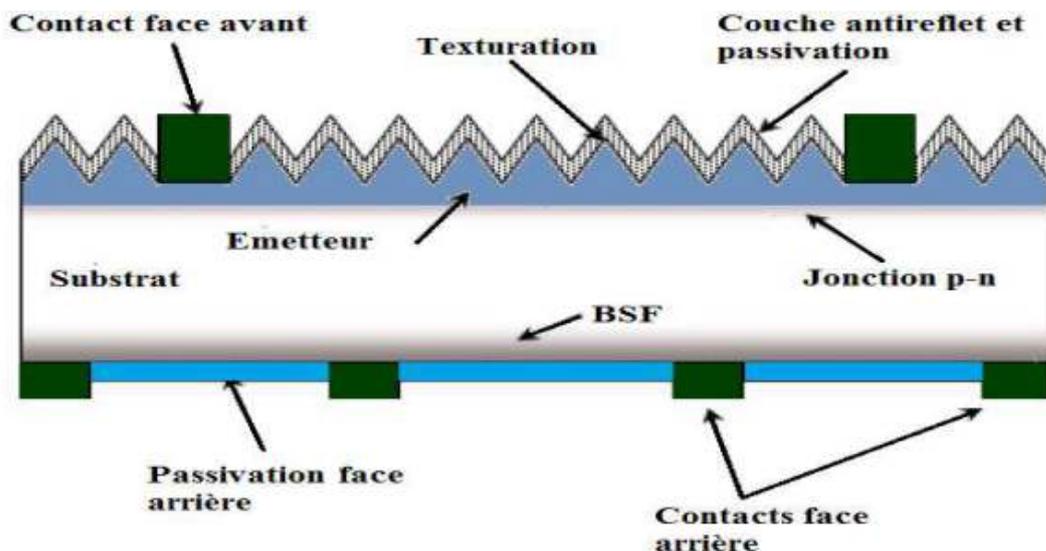


Figure (2.2): Composition d'une cellule photovoltaïque [26].

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

2.4.1 Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40% à moins de 10% [27].

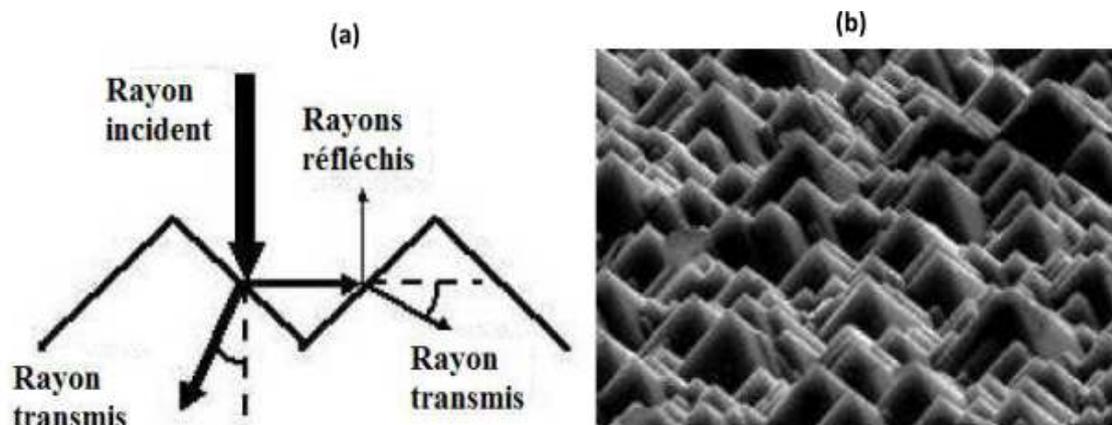


Figure (2.3): a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée;
b) Plaque de silicium après texturation.

2.4.2 Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

forterésistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

2.4.3 La couche antireflet

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet (CAR) est ajoutée. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quart d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

2.4.4 La passivation

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface, en neutralisant les sites actifs. Des matériaux tels que le SiN, le SiO et le SiN_xO_y permettent de passiver une grande partie de ces défauts.

2.4.5 Champ électrique dans la zone arrière (BSF)

Afin de collecter les paires électron-trou créés par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [29].

2.5 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

2.5.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

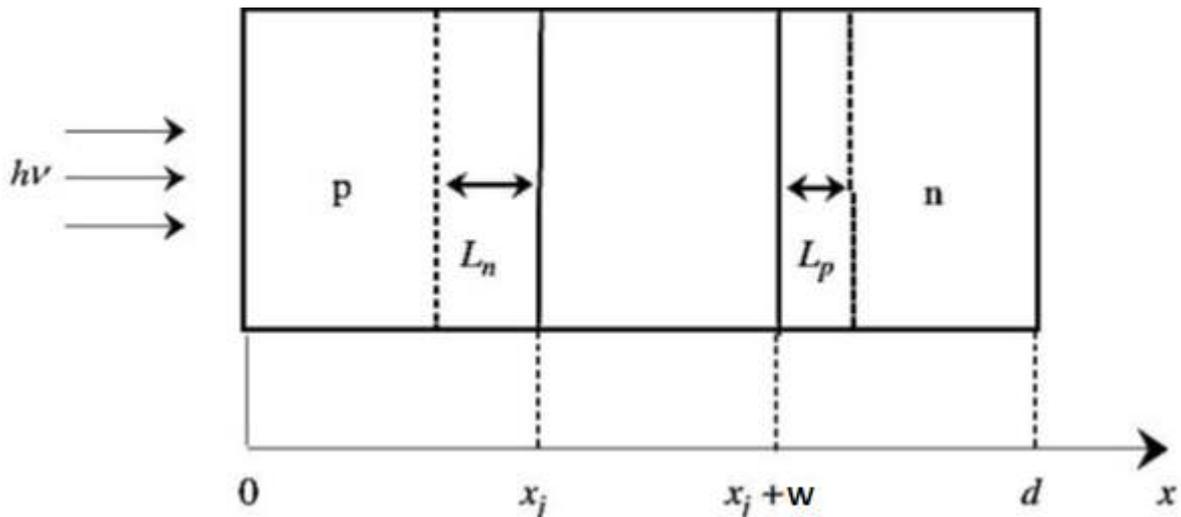


Figure (2.4) : Structure d'une cellule photovoltaïque

Lorsque la lumière entre par le côté de l'émetteur (Figure 2.4), un nombre d'électrons et de trous sont générés à une distance (x), avec un taux de génération qui s'écrit par la loi suivante :

$$G = \alpha F(1 - R) e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

Avec :

α : Coefficient d'absorption de la lumière

R : coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

F : Flux des photons incidents

La densité de photo-courant résultant dans la jonction P-N est l'intégrale de la somme de trois Composantes (J_n, J_p, J_d) sur toutes les longueurs d'ondes. La densité de courant de

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

diffusion des photoélectrons de la région de type p (J_n), la densité de courant de Photo génération dans la zone de charge d'espace (J_d) et la densité de courant de diffusion des Photo trous de la région de type n (J_p).

La densité de courant d'électrons dans l'émetteur est donnée par :

$$J_n = qF(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2} \cdot \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n \right)}{\left[\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \cdot \sinh \frac{X_j}{L_n} \right] + \cosh \frac{X_j}{L_n}} \right] - \left[\alpha L_n + \frac{\left[\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \cdot \cosh \frac{X_j}{L_n} + \sinh \frac{X_j}{L_n} \right]}{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(\sinh \frac{X_j}{L_n} \right) + \cosh \frac{X_j}{L_n}} \right] \cdot e^{-\alpha X_j}$$

(2.5)

La densité de courant des trous est donnée par :

$$J_p = \left[\alpha L_p - \frac{\left[\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \cdot \cosh \frac{d}{L_p} + \sinh \frac{d}{L_p} \right]}{\frac{S_p L_p}{D_p} \left(\sinh \frac{d}{L_p} \right) + \cosh \frac{d}{L_p}} \right] - \left[\frac{\left(\frac{-S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \cdot e^{\alpha d}}{\left[\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \cdot \sinh \frac{d}{L_p} \right] + \cosh \frac{d}{L_p}} \right] \cdot e^{-\alpha(X_j+W)} \cdot qF(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1}$$

(2.6)

Etant donné que le champ électrique dans la région de charge d'espace est élevé, les électrons et les trous générés dans ces régions sont accélérés vers les directions opposées. La densité de courant photoélectrique dans la région de charge d'espace est donnée par :

$$J_d = qF(1 - R)(e^{-\alpha X_j} - e^{\alpha(X_j+W)}) \quad (2.7)$$

X_j : Profondeur de jonction

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

w : Largeur de la ZCE

La densité de photon-courant J_{ph} est calculé en intégrant sur l'ensemble du spectre solaire, de sorte que :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.8)$$

La densité de courant totale est donnée par :

$$J_{tot} = J_{ph} - J_{obs} \quad (2.9)$$

Avec :

J_{obs} : Densité de courant d'obscurité est donné par

$$J_{obs} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

J_0 : Densité de Courant de saturation

$$J_0 = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (2.11)$$

n_i : concentration intrinsèque

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{2KT} \right)} \quad (2.12)$$

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

μ_n : mobilité des électrons

$$\mu_n(T) = \mu_n(300) \left(\frac{300}{T}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.13)$$

μ_p : mobilité des trous

$$\mu_p(T) = \mu_p(300) \left(\frac{300}{T}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

L_n : Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P, avec :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.15)$$

L_p : Longueur de diffusion des trous dans le matériau N, avec :

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (2.16)$$

τ_n et τ_p et : les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous, Respectivement.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

D_n : Le coefficient de diffusion des électrons

D_p : Le coefficient de diffusion des trous

λ_{min} : La longueur d'onde la plus petite du spectre solaire

λ_{max} : La longueur d'onde la plus grande du spectre solaire

La densité de courant de court-circuit est le courant délivré par la cellule solaire pour une tension nulle :

$$J_{cc} = J_{tot}(0) \quad (2.17)$$

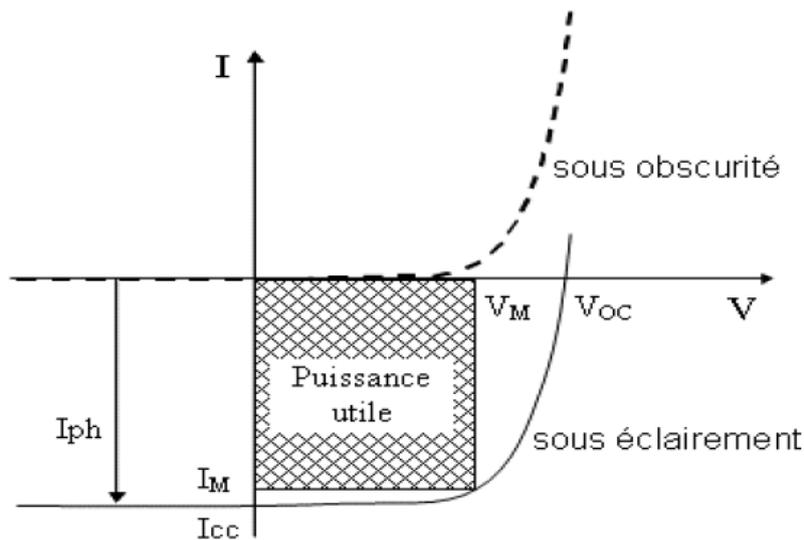


Figure (2.5) : caractéristique courant-tension $I = f(V)$ en obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [30].

La figure (2.5) montre la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement. On distingue le courant de court-circuit pour une tension nulle ainsi que la tension de circuit ouvert pour un courant nul.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

a – courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du 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, et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

b - Tension de circuit ouvert V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.18)$$

c – Facteur de forme (Facteur de remplissage), 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 facteur de forme (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le produit ($I_{cc} \times V_{co}$).

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.19)$$

d-Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_i . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_i .

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

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (2.20)$$

Avec :

P_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

S : La surface de la cellule PV

FF : Facteur de Forme.

I_m : Le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

U_m : La tension correspondante à la puissance maximale fournie.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

Le rendement de la cellule solaire est déterminé comme étant la fraction de la puissance incidente qui est convertie en électricité.

Le rendement 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.

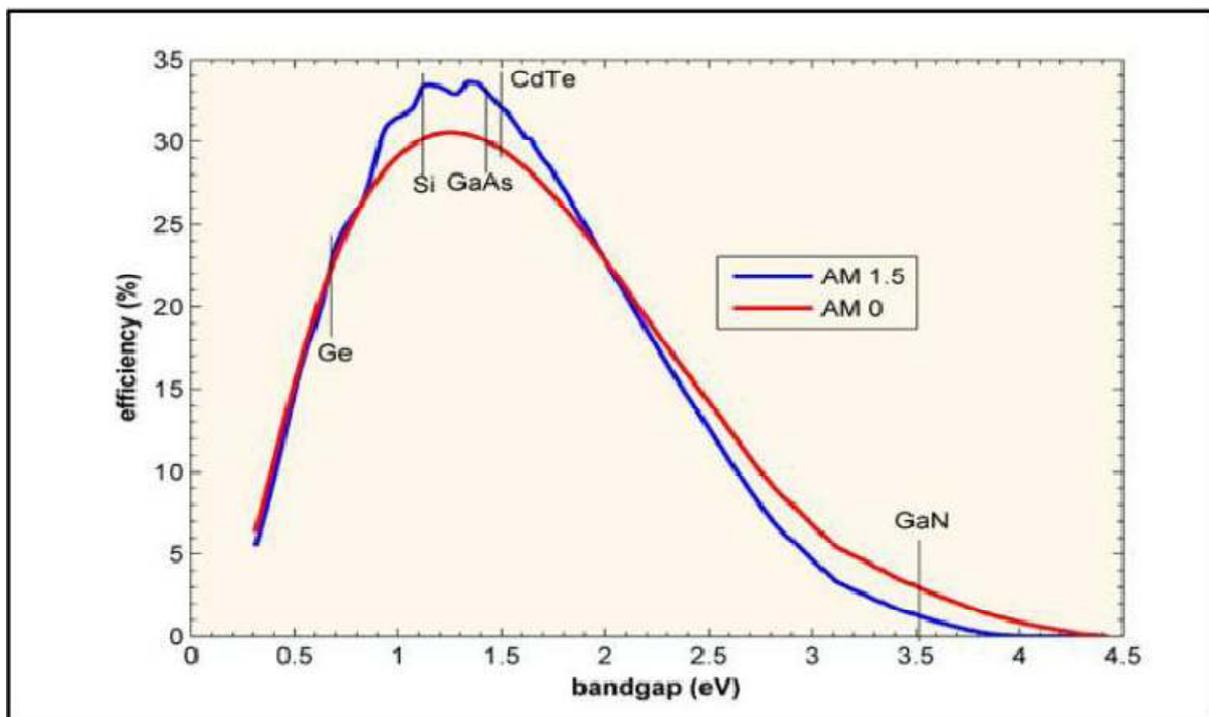


Figure (2.6): Le rendement en fonction du gap d'énergie. [30]

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

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

decharge au sein des matériaux constitutants. Un autre moyen d'augmenter le rendement d'une cellule sans en modifier la composition consiste à concentrer le flux lumineux incident.

2.6 Les cellules III-V multi-jonctions

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

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

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

a – 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.

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

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 :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} * \min(J_{cc})}{P_i} FF \quad (2.21)$$

F_0 : Flux incident

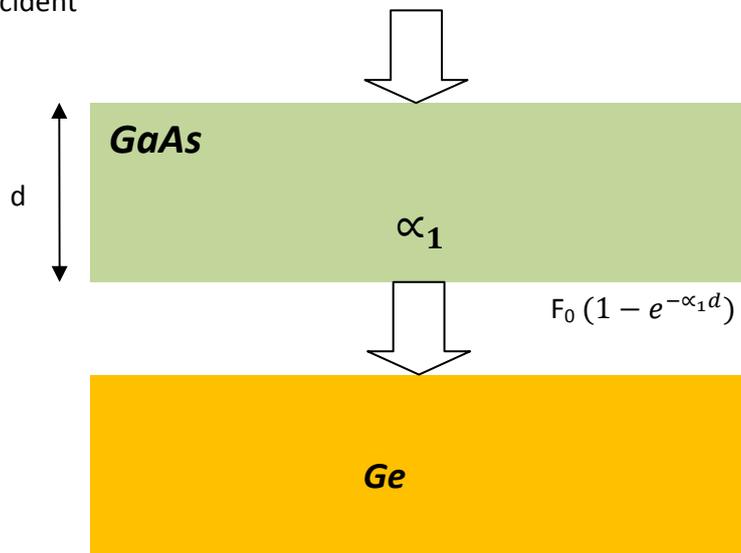


Figure (2.7) : cellule tandem

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

b – 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 :

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \quad (2.22)$$

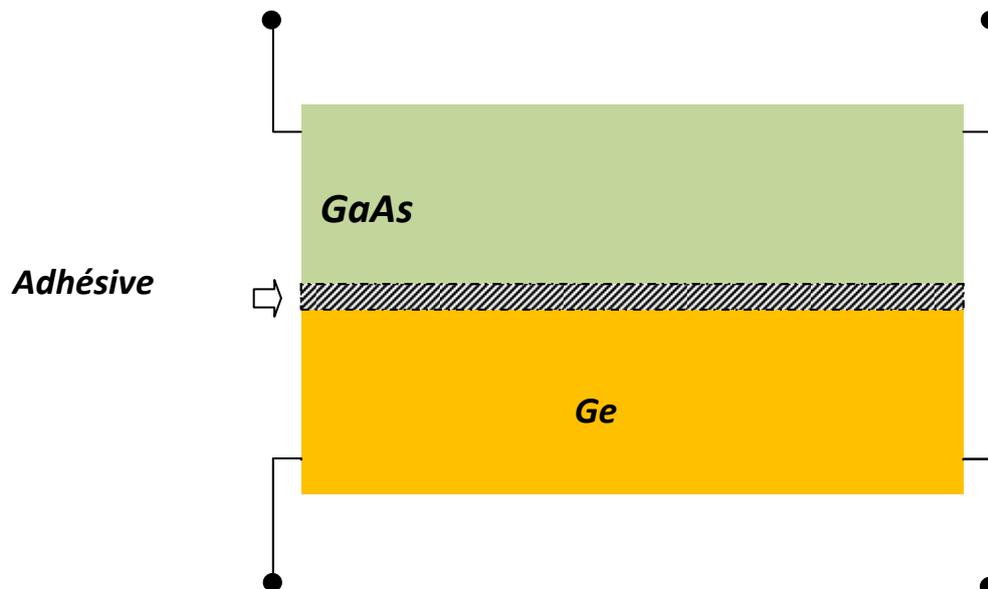


Figure (2.8) : cellule cascade

Chapitre 2 Physique des cellules photovoltaïques

Dans les deux configurations, le flux incident sur la cellule du bas est égal à $F_0 e^{(-\alpha d)}$, α et d sont le coefficient d'absorption et l'épaisseur de la cellule du haut respectivement.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique, 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 ($I_{cc}, V_{co}, FF, P_{max}$). Enfin nous avons abordé les cellules III-V multi-jonctions (cellule tandem et cellule cascade).

3.1 Introduction

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

Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles.

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel MATHCAD dans nos simulations. Ce logiciel permet de réaliser des calculs scientifiques.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les caractéristiques d'une cellule solaire double jonctions *GaAs/Ge*.

3.2 Description de la structure simulée

La figure (3.1) représente la structure simulée et le tableau (3.1) regroupe les données utilisées dans nos simulations.



Figure (3.1) : Schéma de la structure simulée

Chapitre 3 Simulations

Paramètre	GaAs	Ge
Dopage	$N_a = N_d = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_a = N_d = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Mobilité des électrons	$\mu_n = 8500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$	$\mu_n = 3950 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$
Mobilité des trous	$\mu_p = 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$	$\mu_p = 1900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$
Durée de vie des porteurs	$\tau_n = \tau_p = 40 \text{ ns}$	$\tau_n = \tau_p = 5.10^4 \text{ ns}$
Vitesse de recombinaison (cm/s)	$S_n = S_p = 10^3$	$S_n = S_p = 10^3$
Coefficient de diffusion des électrons	$D_n = 219,73 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_n = 102,2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Coefficient de diffusion des trous	$D_p = 10,35 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_p = 49,16 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Epaisseur de l'émetteur (μm)	$X_j = 0,1$	$X_j = 0,1$
a (°A)	5,6533	5,658
$E_g (eV)$	1,424	0,67
$m_e (m_0)$	0,067	0,082
$m_{hh} (m_0)$	0,45	0,28
$m_{lh} (m_0)$	0,082	0,044
$N_c (\text{cm}^{-3}) \text{ à } 300^\circ\text{K}$	$4,336. 10^{17}$	$1,04. 10^{19}$
$N_v (\text{cm}^{-3}) \text{ à } 300^\circ\text{K}$	$7,547. 10^{18}$	$6,0. 10^{18}$
Permittivité relative	$\epsilon_r = 12,9$	$\epsilon_r = 16,2$

Tableau (3.1) : Données de la structure simulée

3.3 Irradiation d'un corps noir

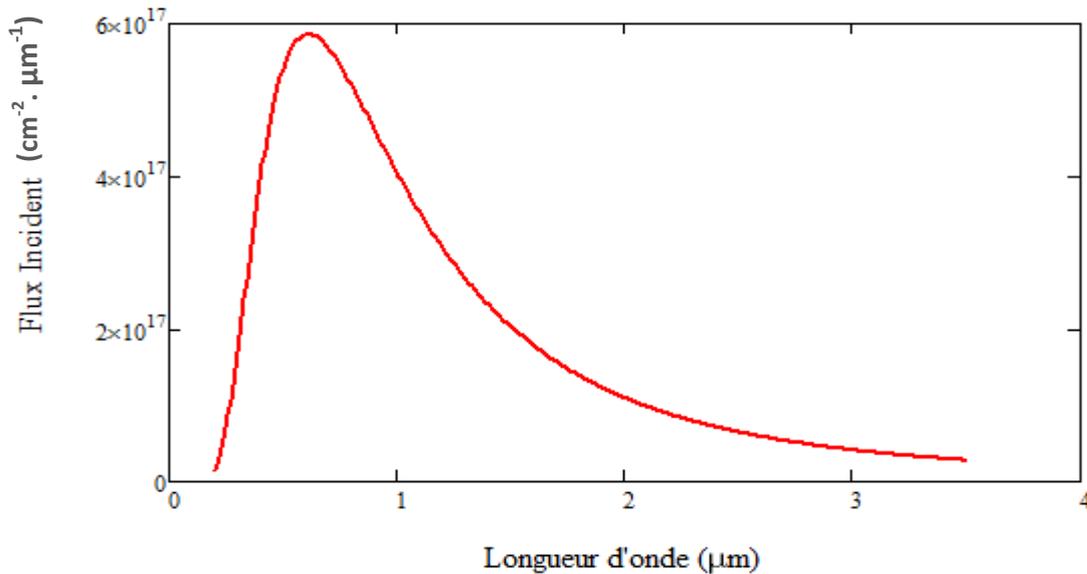


Figure (3.2) :Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ à $T = 6000$ K.

La figure (3.2) représente le flux d'un corps noir pour une température $T=6000$ K. Ce flux varie avec la longueur d'onde λ et présente un maximum pour $\lambda=0,8\mu\text{m}$.

Dans nos simulations nous avons utilisé l'irradiation d'un corps noir à $T=6000$ K qui correspond à l'émission solaire hors atmosphère.

3.4 L'absorption

Sur la figure (3.3), nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption α du *GaAs* en fonction de la longueur d'onde λ . Cette courbe a été tracée à partir de mesures expérimentales de l'indice de réfraction.

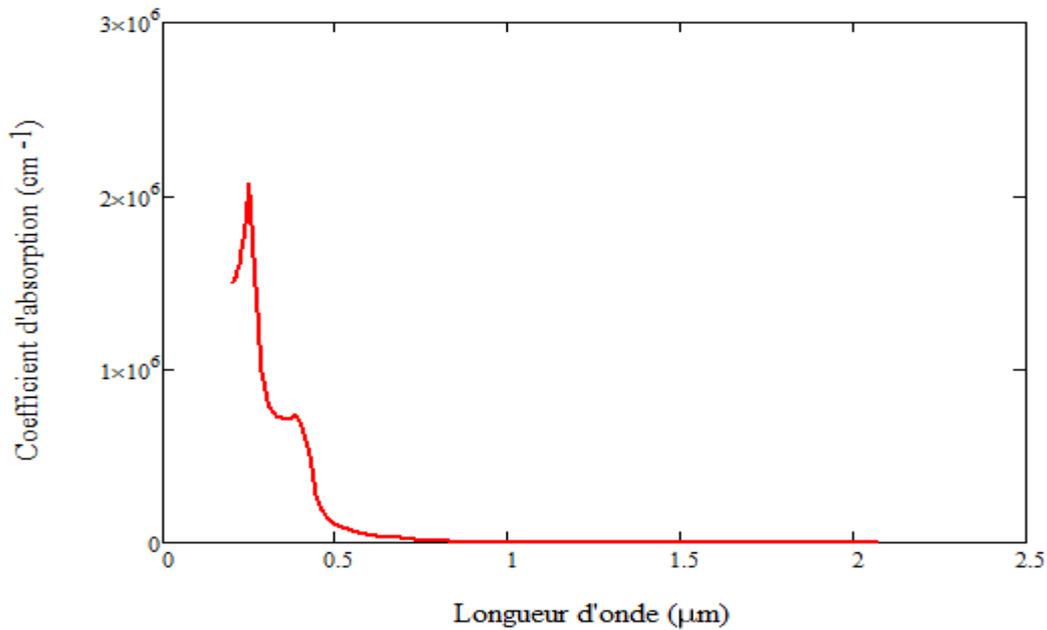


Figure (3.3) : Variation du coefficient d'absorption α du GaAs en fonction de la longueur d'onde λ .

3.5 Influence de l'épaisseur de la cellule du haut (GaAs)

3.5.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs

Dans la figure (3.4), nous avons reporté l'influence de l'épaisseur d_1 de la cellule sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une amélioration nette dans la densité de courant de court-circuit, notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à $2 \mu\text{m}$. Au-delà de $2 \mu\text{m}$, la densité de courant J_{cc} devient presque constante. Lorsque l'épaisseur d_1 augmente, le nombre de photons absorbés augmente entraînant l'augmentation du courant. Pour une certaine épaisseur ($2 \mu\text{m}$) tous les photons seront absorbés et le courant sature.

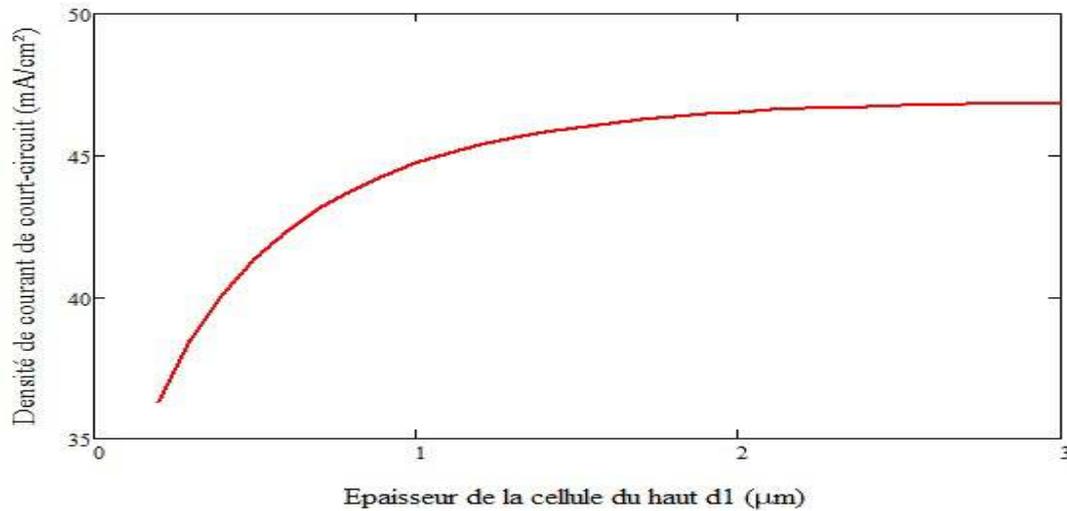


Figure (3.4) : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs

Dans la figure (3.5), nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à 2 μm. Au-delà de 2 μm, la tension V_{co} reste constante. Donc l'influence de l'épaisseur d_1 est négligeable.

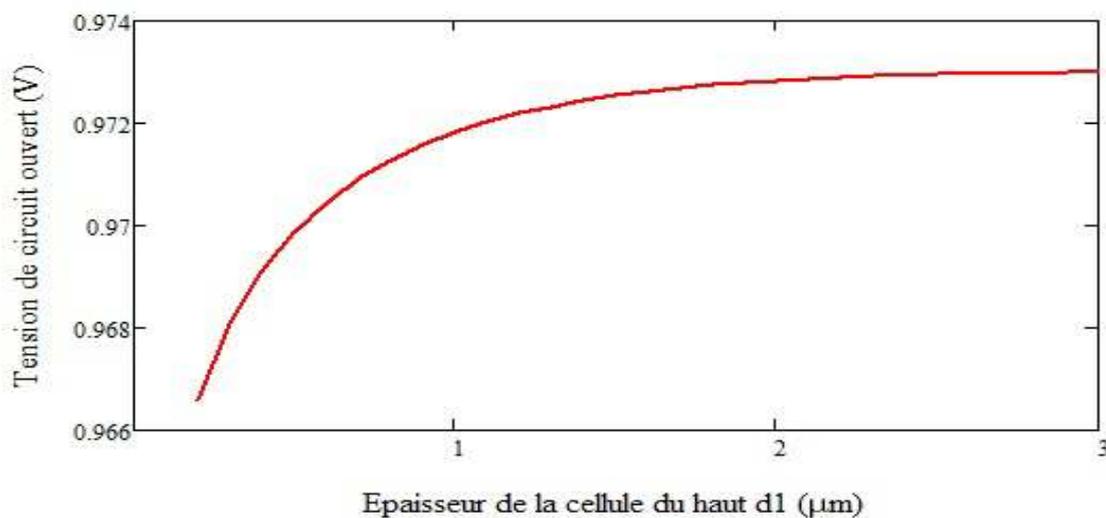


Figure (3.5): Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.3 Caractéristiques $J(V)$ de la structure GaAs

Sur la figure (3.6) sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes épaisseurs. On remarque que lorsque on augmente l'épaisseur d_1 , la tension V_{co} varie très peu alors que la densité de courant de court-circuit J_{cc} augmente jusqu'à $d_1=2 \mu\text{m}$ et ensuite il sature.

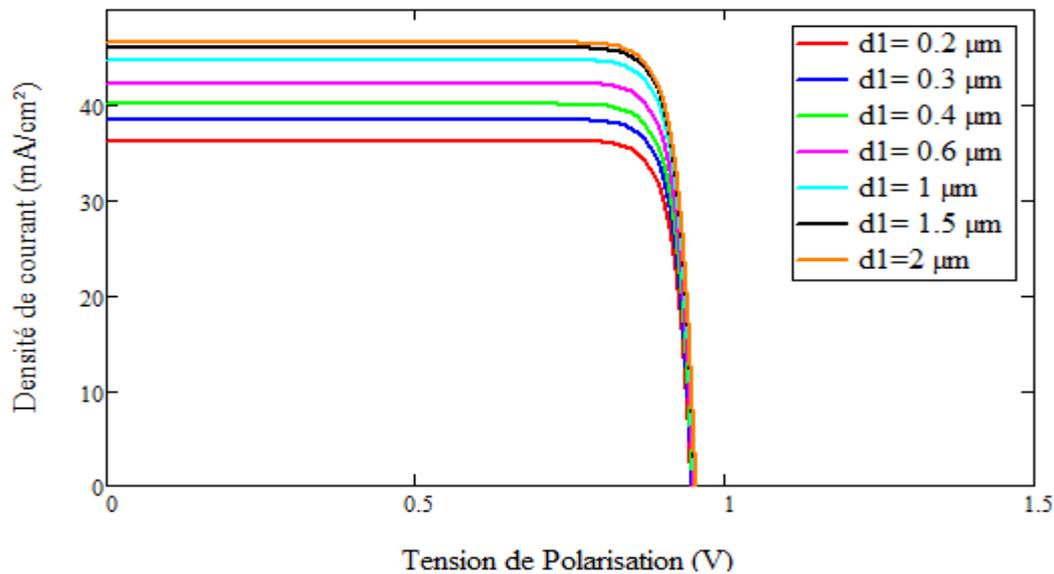


Figure (3.6) : Caractéristique courant-tension de la structure GaAs pour différentes épaisseurs d_1 .

3.5.4 Puissance délivrée par la structure GaAs

Sur la figure (3.7) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs d_1 . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{max} .

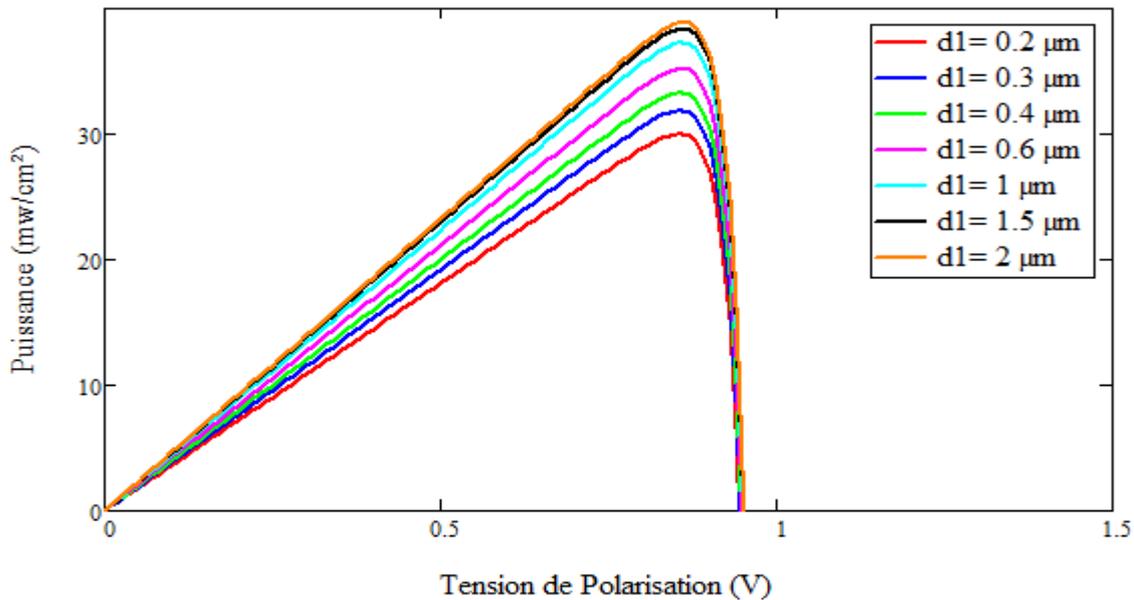


Figure (3.7) : Puissance délivrée par la cellule *GaAs* en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs épaisseurs d_1 .

La puissance maximale atteint sa valeur optimale qui vaut 38,88 mW/cm² pour une valeur de l'épaisseur d_1 de l'ordre de 2 μm

3.5.5 Le rendement de la cellule GaAs

La figure (3.8) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur d_1 . Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur 1,5 μm . Le rendement atteint une valeur maximale de 25,8% pour une épaisseur d_1 , égale à 1,5 μm après il reste constant.

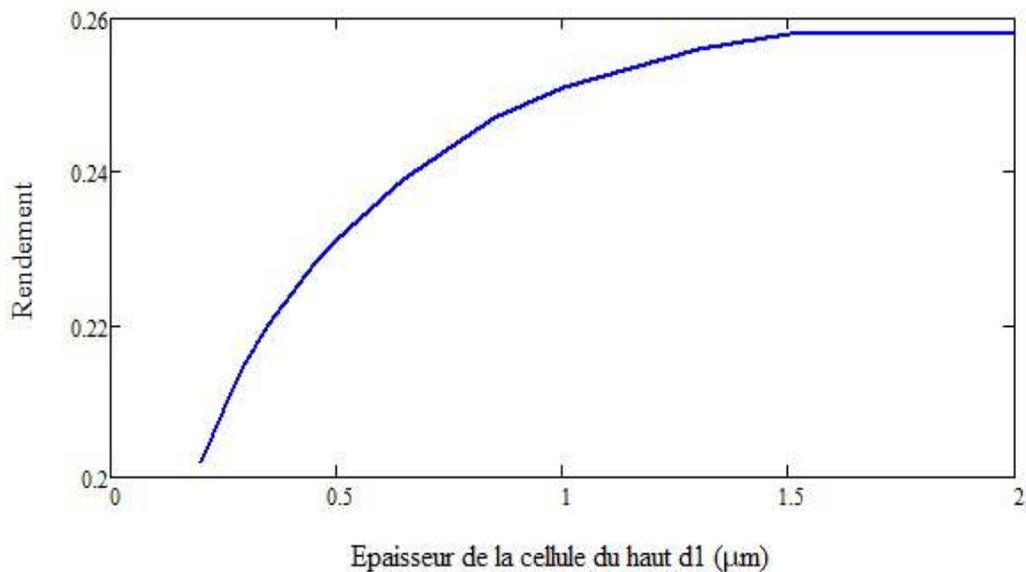


Figure (3.8): Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.6 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la cellule du bas (Ge)

Dans La figure (3.9), nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de la cellule du haut d_1 sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur d_1 engendre un abaissement net dans la densité de courant de court-circuit, notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à 2 μm. Au-delà de 2 μm, la densité de courant J_{cc} devient presque constante. Lorsque l'épaisseur d_1 augmente, le nombre de photons transmis diminue entraînant l'abaissement du courant.

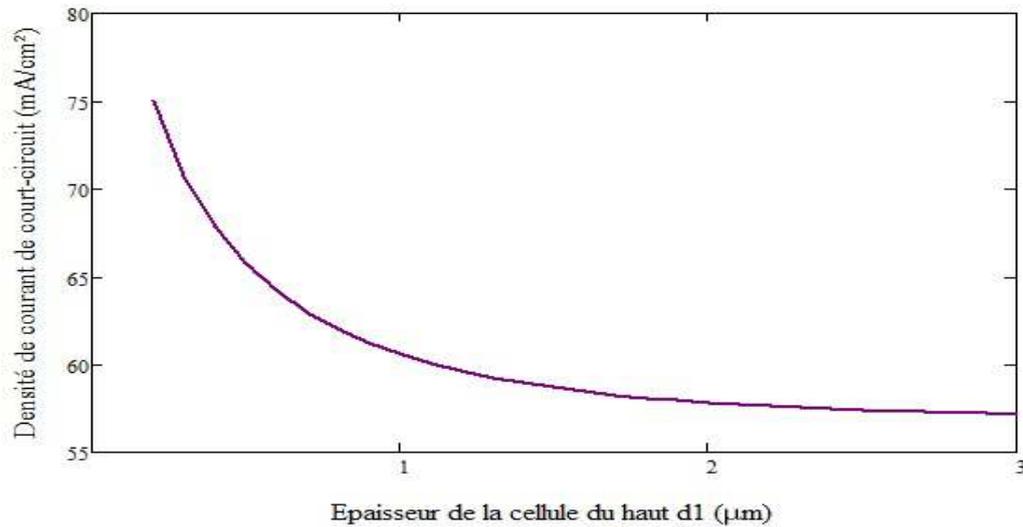


Figure (3.9) : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.7 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure Ge

Dans la figure (3.10) Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur d_1 engendre une faible atténuation de la tension de circuit ouvert V_{co} , notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à 2 μm. Au-delà de 2 μm, la tension V_{co} reste constante. Donc l'influence de l'épaisseur d_1 est négligeable.

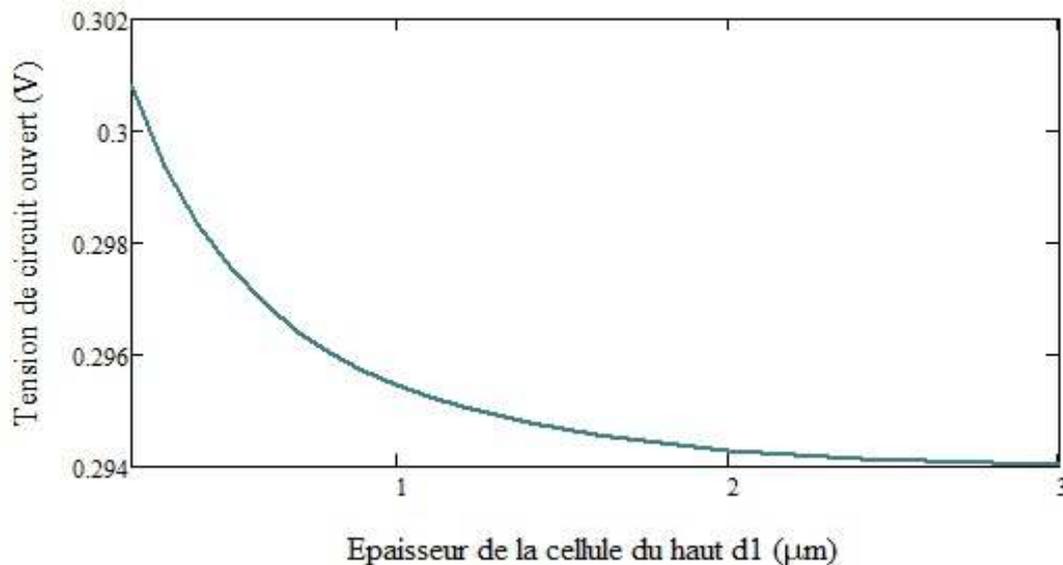


Figure (3.10): Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.8 Caractéristiques $J(V)$ de la structure Ge

Sur la figure (3.11) sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes épaisseurs. On constate que lorsque on augmente l'épaisseur $d1$ la tension V_{co} varie très peu alors que la densité de courant de court-circuit J_{cc} diminue jusqu'à $d1 = 2 \mu\text{m}$ et ensuite elle sature.

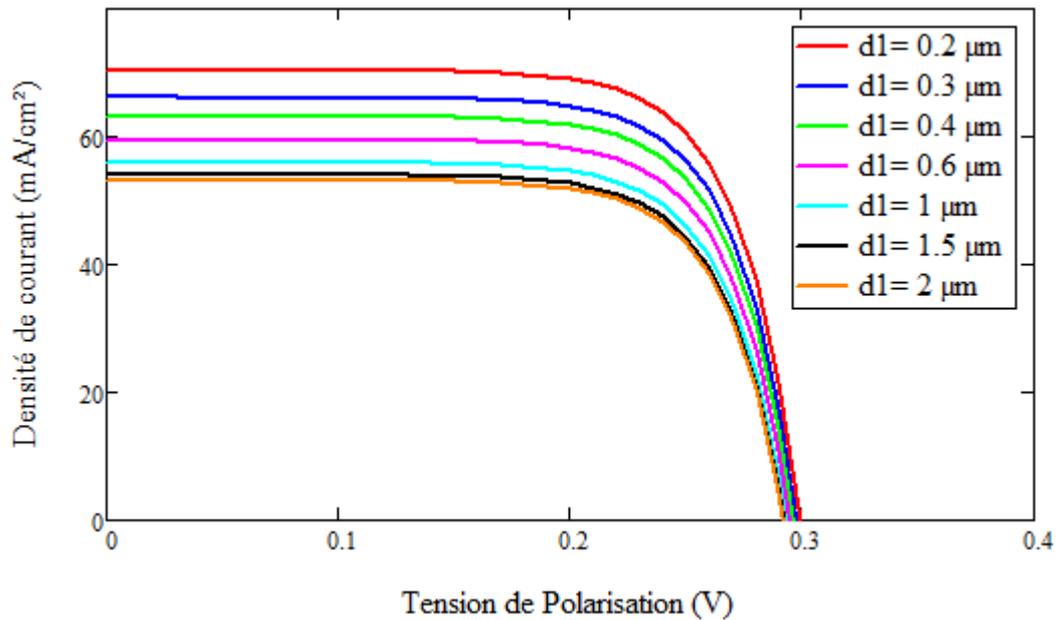


Figure (3.11) : Caractéristique courant-tension de la structure Ge pour différentes épaisseurs $d1$.

3.5.9 Puissance délivrée par la structure Ge

Sur la figure (3.12) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs $d1$. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{max} .

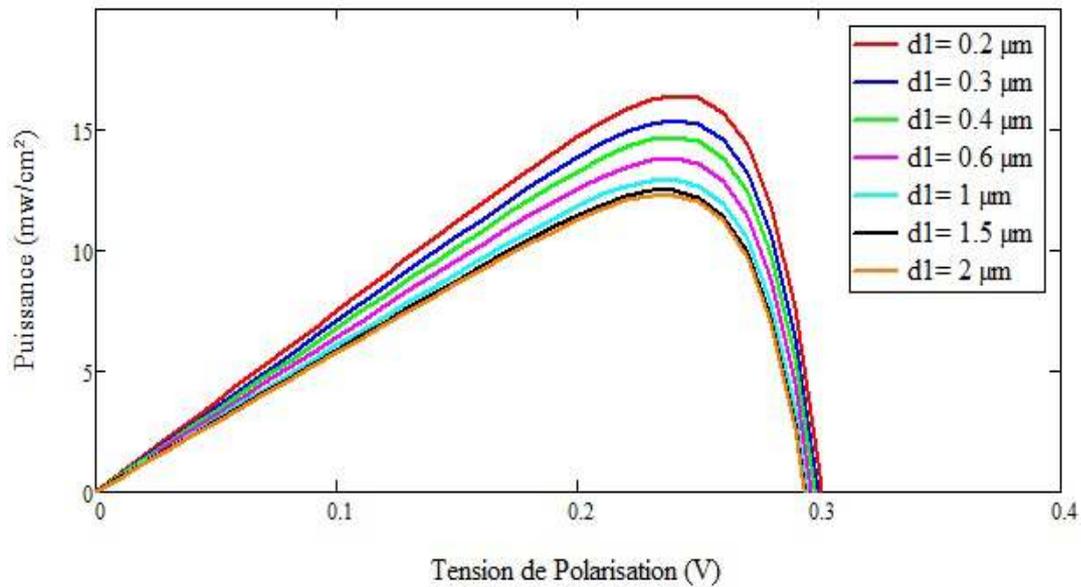


Figure (3.12) : Puissance délivrée par la cellule *Ge* en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs épaisseurs d_1 .

La puissance maximale atteint sa valeur optimale qui vaut 15,30 mW/cm² pour une valeur de l'épaisseur d_1 de l'ordre de 0.2 μm

3.5.10 Le rendement de la structure Ge

La figure (3.13) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur d_1 . Nous remarquons une atténuation nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur 1,5 μm . Le rendement varie de 10,4 % et atteint une valeur minimale de 7,9 % pour une épaisseur d_1 , égale à 1,5 μm , après il reste constant.

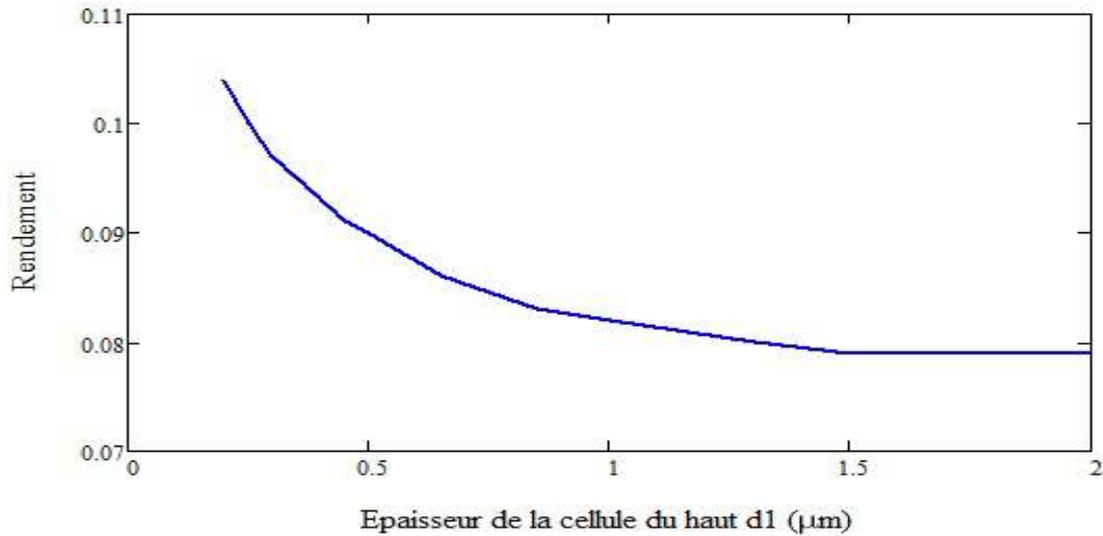


Figure (3.13): Représentation du rendement de la structure G_{e} en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.11 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure $GaAs/Ge$

Dans la figure (3.14) Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur d_1 engendre une très faible atténuation de la tension de circuit ouvert V_{co} , notamment pour les épaisseurs supérieures ou égales à $0,4\mu\text{m}$.

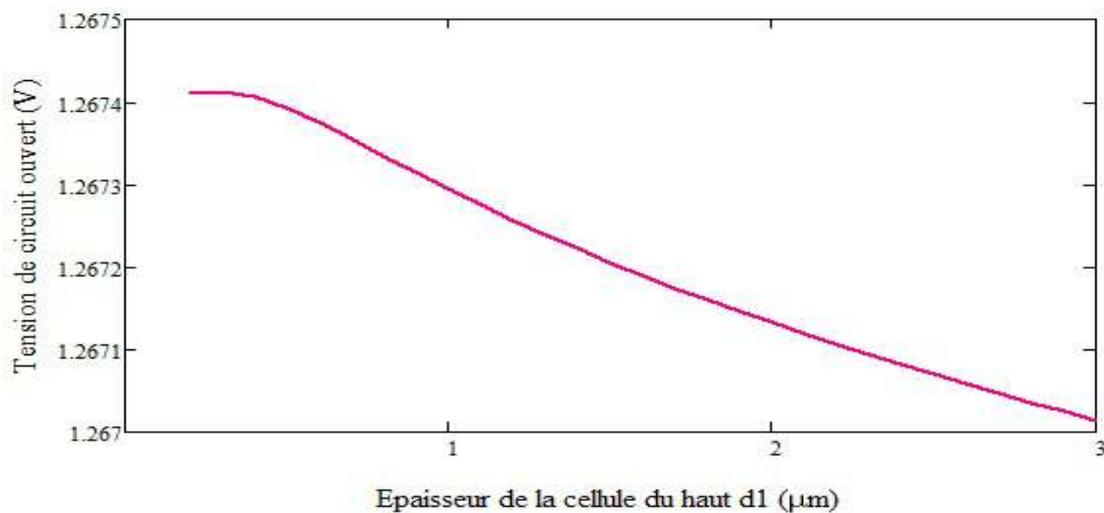


Figure (3.14): Variation de la tension de circuit ouvert total V_{co} de la structure $GaAs/Ge$ en fonction de l'épaisseur d_1 .

3.5.12 Le rendement de conversion

- **Rendement d'une cellule tandem**

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure (3.15) qui présente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur d_1 . Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur $2 \mu\text{m}$. Le rendement atteint une valeur maximale de 31,7% pour une épaisseur $d_1 = 2 \mu\text{m}$. Après il reste constant

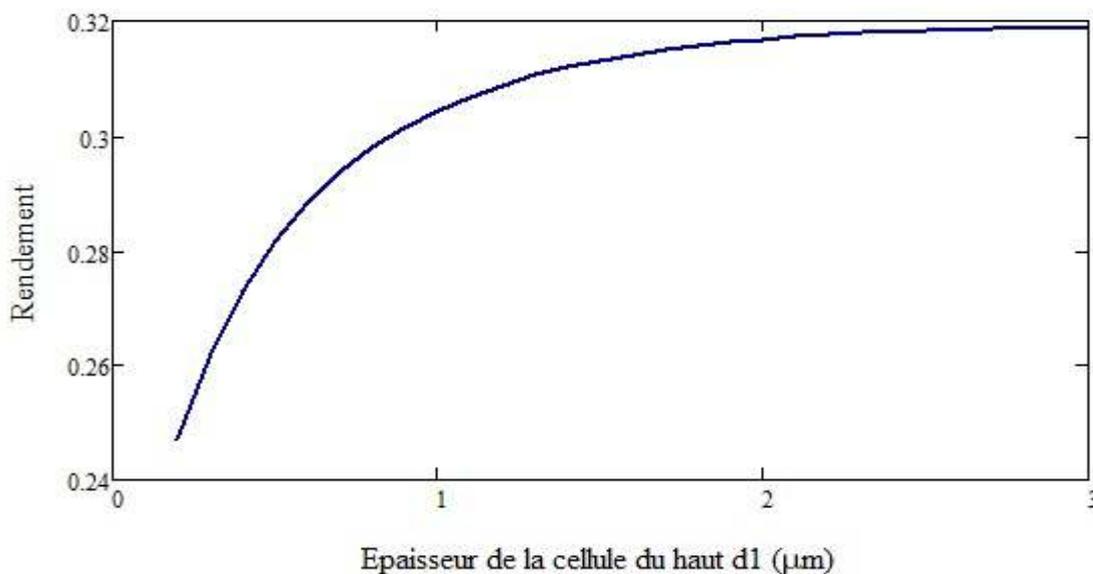


Figure (3.15) : Représentation du rendement pour une cellule tandem *GaAs/Ge* en fonction de l'épaisseur d_1 .

Un rendement théorique de 31,7% est important pour une cellule solaire. Ce rendement résulte d'une unification des différents paramètres, ainsi que des propriétés électriques et optiques des matériaux GaAs et Germanium.

- **Rendement d'une cellule cascade**

La figure (3.16) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur d_1 . Le rendement atteint une valeur maximale de 33,7% pour une épaisseur $d_1 = 1,5\mu\text{m}$.

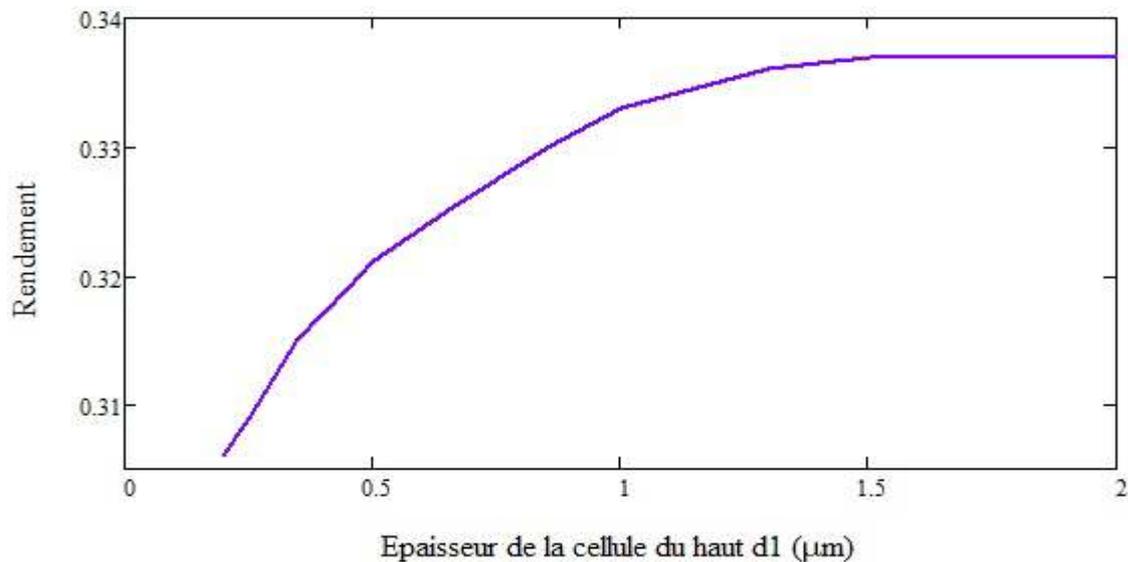


Figure (3.16) : Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure $GaAs/Ge$ en fonction et de l'épaisseur d_1 .

On note que le rendement d'une cellule cascade est plus important que celui d'une cellule tandem.

3.6 Influence de la vitesse de recombinaison en surface

3.6.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure GaAs

Dans la figure (3.17), nous avons reporté l'influence des vitesses de recombinaisons S_n et S_p sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous constatons que pour une augmentation de la vitesse de recombinaisons de 0 à 10^4 cm/s, la densité de courant de court-circuit reste constante. Au-delà de cette valeur il ya une atténuation nette dans la densité du courant de court-circuit.

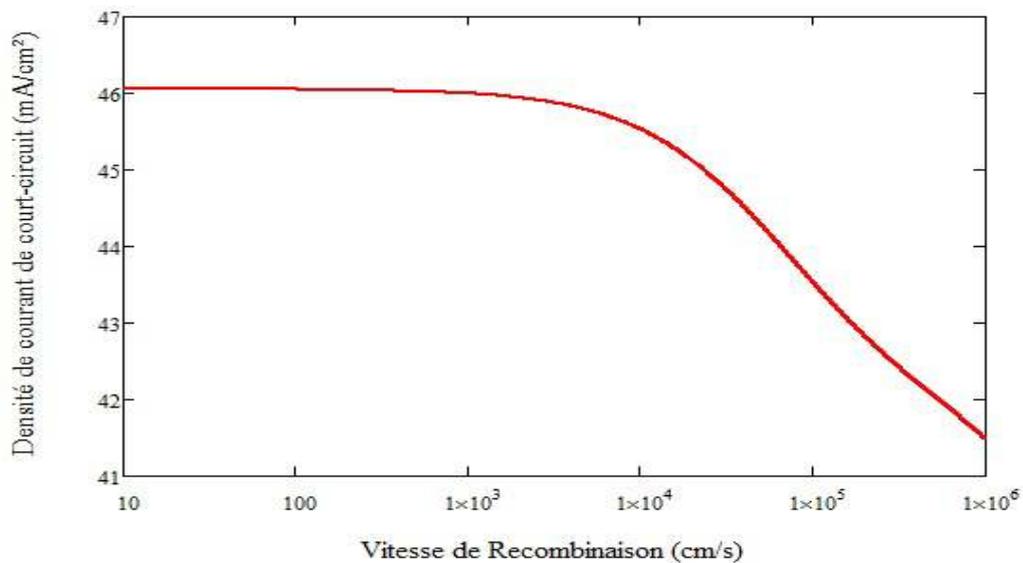


Figure (3.17) : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

3.6.2 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs

Dans la figure (3.18), nous avons reporté l'influence de la vitesse de recombinaisons S_n et S_p sur la tension de circuit ouvert V_{co} . Nous constatons que pour une augmentation de la vitesse de recombinaisons de 0 à 10^4 cm/s, la tension de circuit ouvert V_{co} reste constante. Au delà cette valeur il ya une légère atténuation de la tension de circuit ouvert V_{co} .

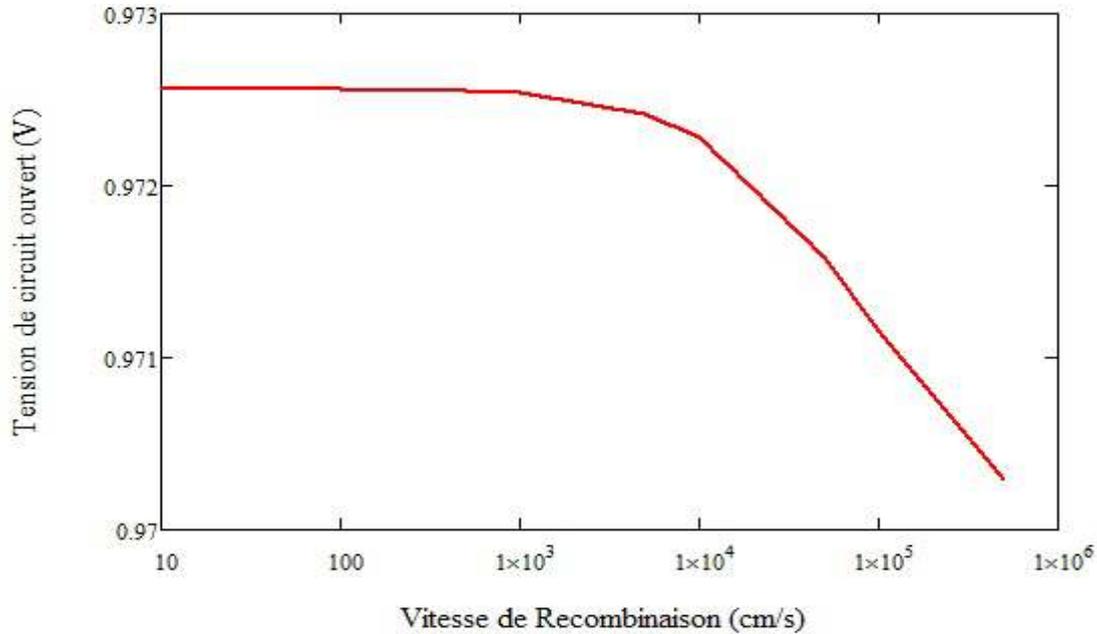


Figure (3.18) :Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

3.6.3 Le rendement de la cellule GaAs

La figure (3.19) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$. Nous remarquons une stabilité du rendement jusqu'à $S_n = S_p = 10^3$ cm/s, après une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaisons. Le rendement atteint une valeur maximale de 25,8% pour une vitesse nulle de $S_n = S_p$.

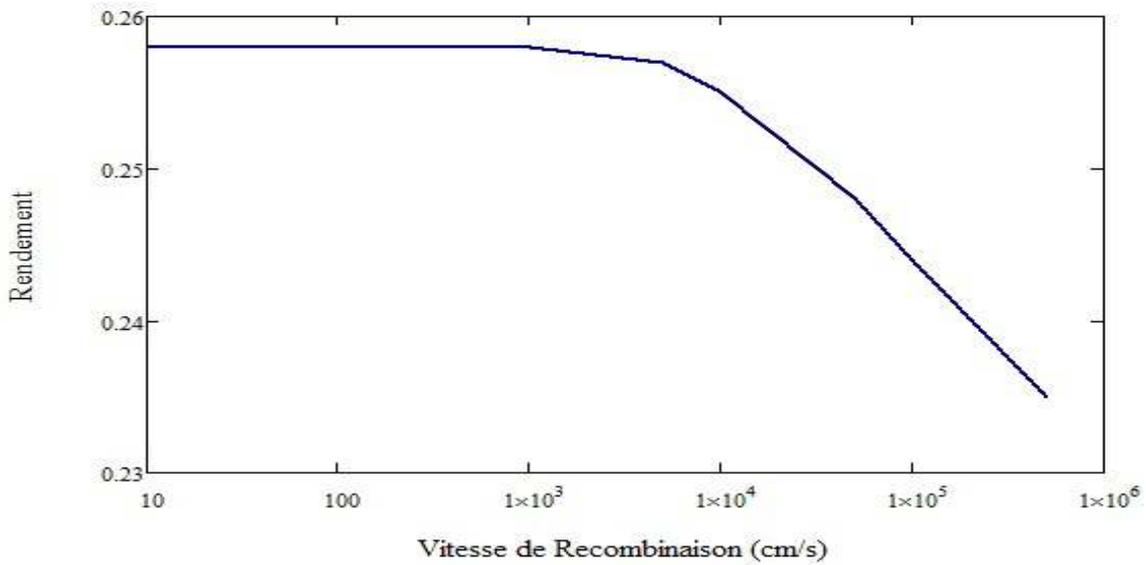


Figure (3.19) : Représentation du rendement de la structure *GaAs* en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

3.6.4 Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure *Ge*

La courbe représente la caractéristique $J(V)$ de la cellule *Ge* qui ne varie pas avec les vitesses de recombinaisons en surface

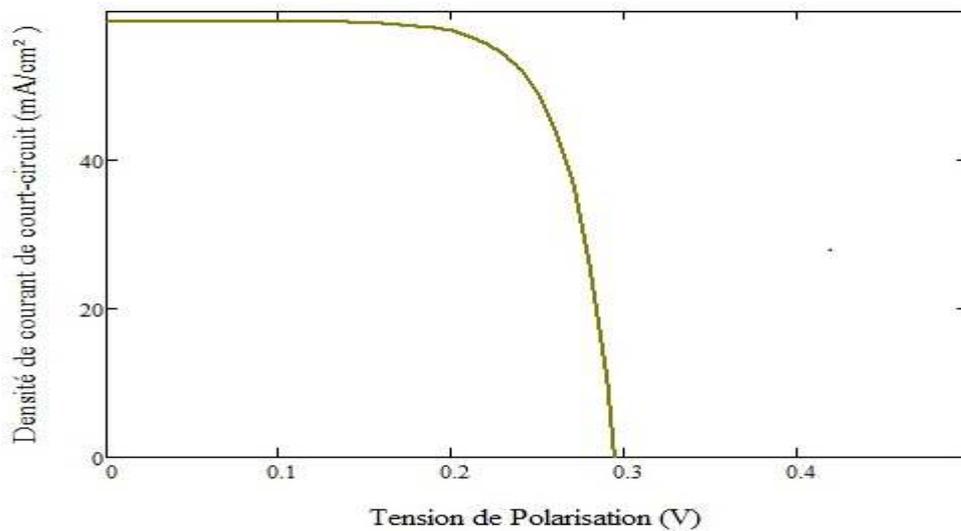


Figure (3.20) : Caractéristique courant-tension de la structure *Ge*.

3.6.5 Puissance délivrée par la structure Ge

La courbe représente la caractéristique $P(V)$ de la cellule Ge qui ne varie pas avec les vitesses de recombinaisons en surface

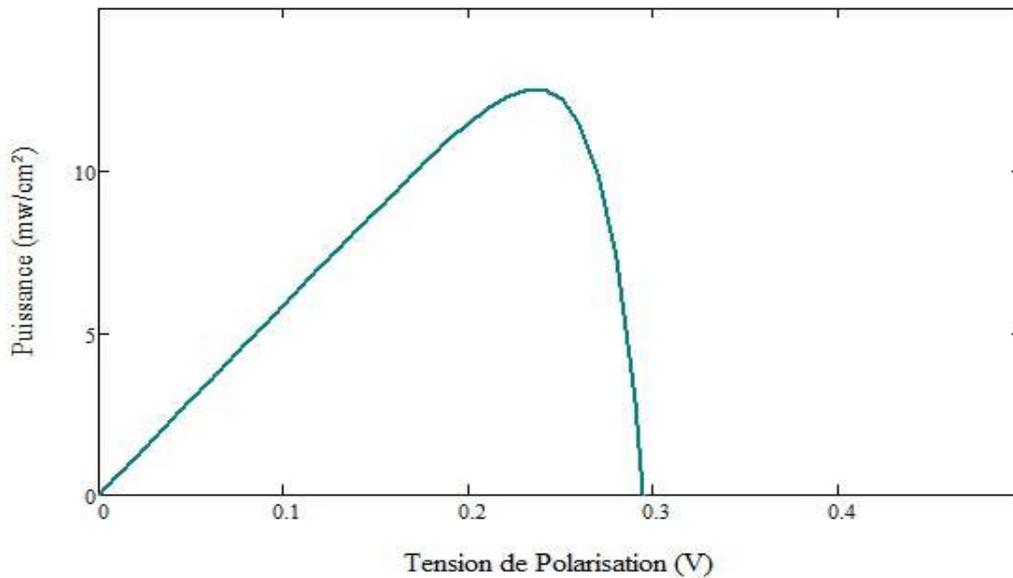


Figure (3.21) : Puissance délivrée par la cellule Ge en fonction de la tension de polarisation.

3.6.6 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge

Dans la figure (3.22), nous avons reporté l'influence de la vitesse de recombinaisons S_n et S_p sur la tension de circuit ouvert V_{co} . Nous constatons que pour une augmentation de la vitesse de recombinaisons de 0 à 10^4 cm/s, la tension de circuit ouvert V_{co} reste constante. Au-delà de cette valeur il ya une légère atténuation de la tension de circuit ouvert V_{co} .

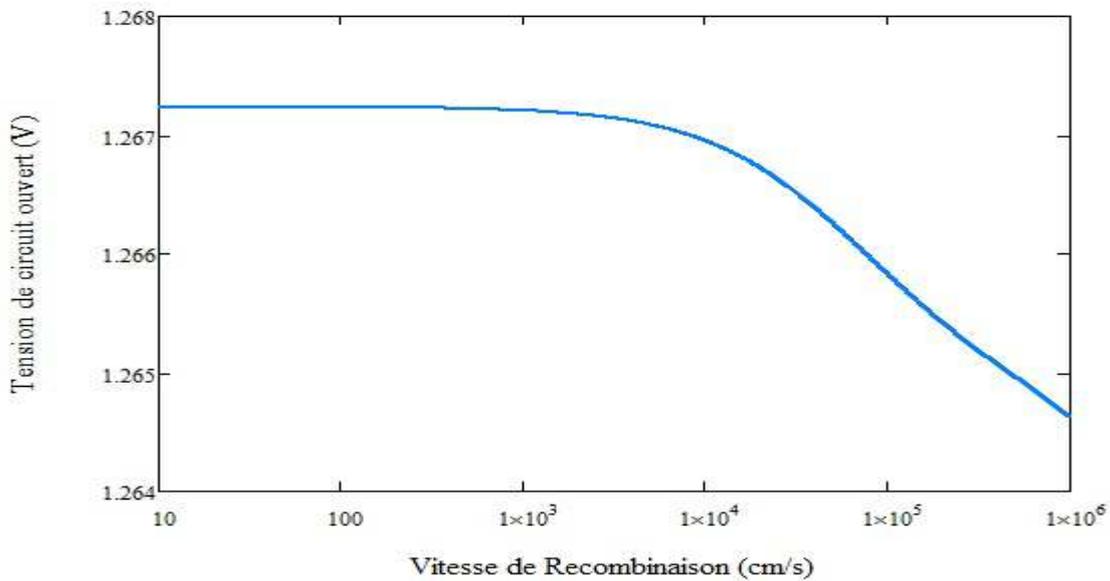


Figure (3.22) :Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure $GaAs/Ge$ en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

3.6.7 Le rendement de conversion

- **Rendement d'une cellule tandem**

La figure (3.23) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$. Nous remarquons une stabilité du rendement jusqu'à $S_n = S_p = 10^3 \text{ cm/s}$, après une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaisons. Le rendement atteint une valeur maximale de 31,4 % pour une vitesse nulle de $S_n = S_p$.

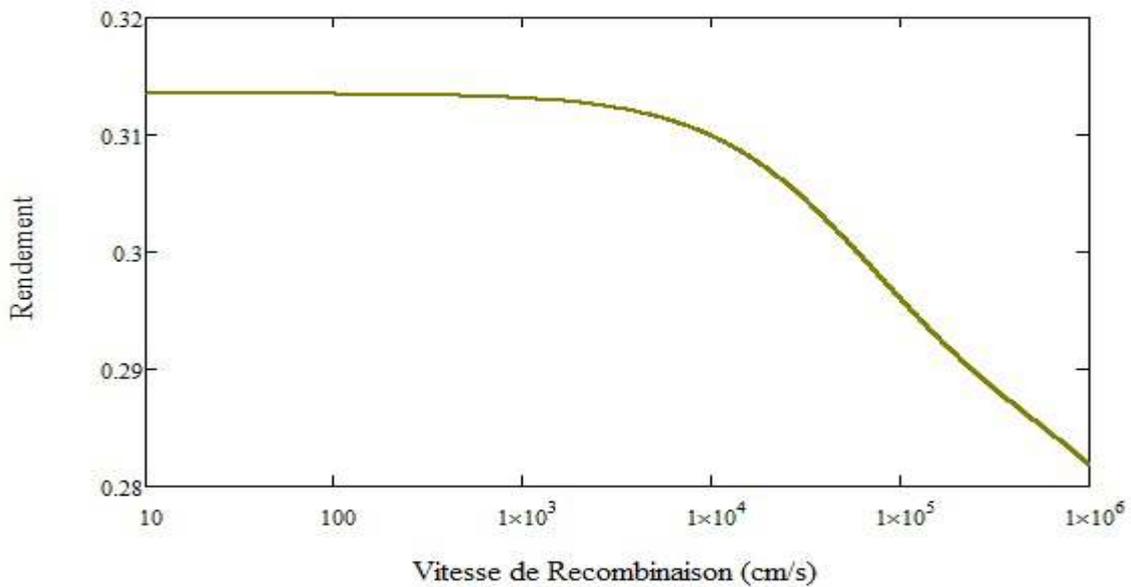


Figure (3.23) : Représentation du rendement pour une cellule tandem *GaAs/Ge* en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

- **Rendement d'une cellule cascade**

La figure (3.24) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$. Nous remarquons une stabilité du rendement jusqu'à $S_n = S_p = 10^4$ cm/s, après une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaisons. Le rendement atteint une valeur maximale de 34 % pour une vitesse nulle de $S_n = S_p$.

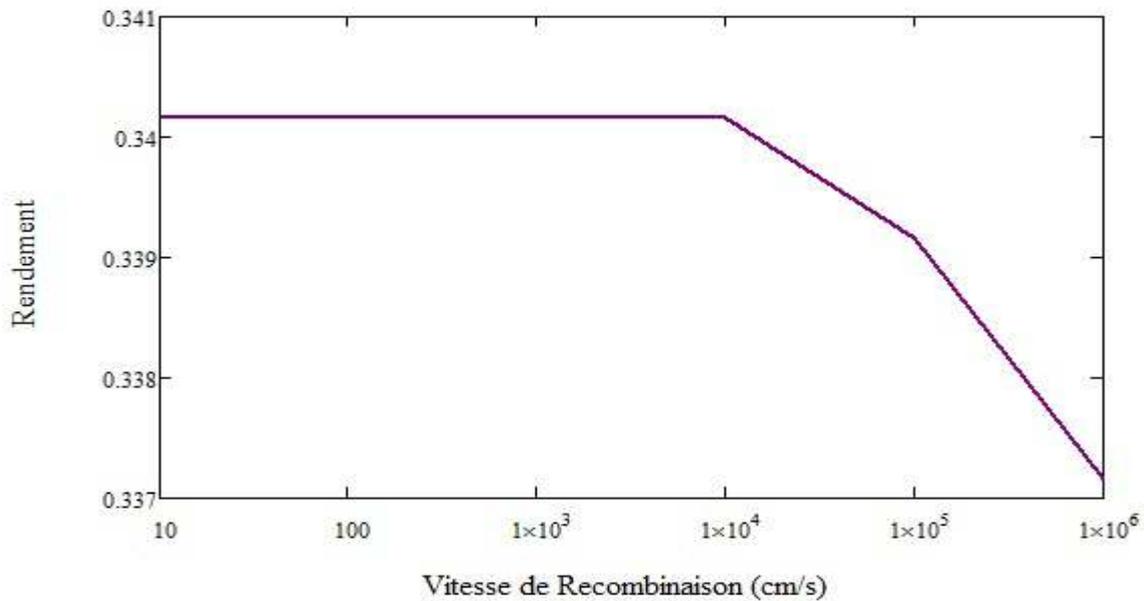


Figure (3.24) : Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure *GaAs/Geen* fonction des vitesses de recombinaisons $S_n = S_p$.

On note que le rendement d'une cellule cascade est plus important que celui d'une cellule tandem.

3.7 Influence de la température

3.7.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure *GaAs*

Le Figure (3.25) représente la réaction de la cellule à la variation de la température, On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur de la densité de courant de court-circuit

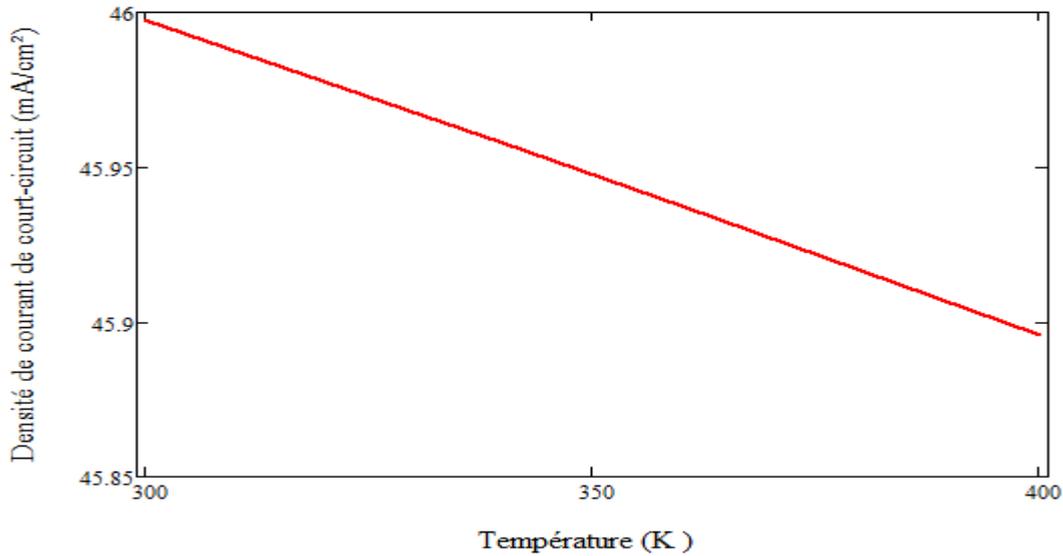


Figure (3.25) : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la température.

3.7.2 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs

Dans la figure (3.26) nous remarquons que l'augmentation de la température de la cellule engendre une baisse importante de la tension de circuit ouvert V_{co} , due à l'augmentation de la concentration intrinsèque n_i et par suite du courant de saturation J_o voir l'équation (2.11).

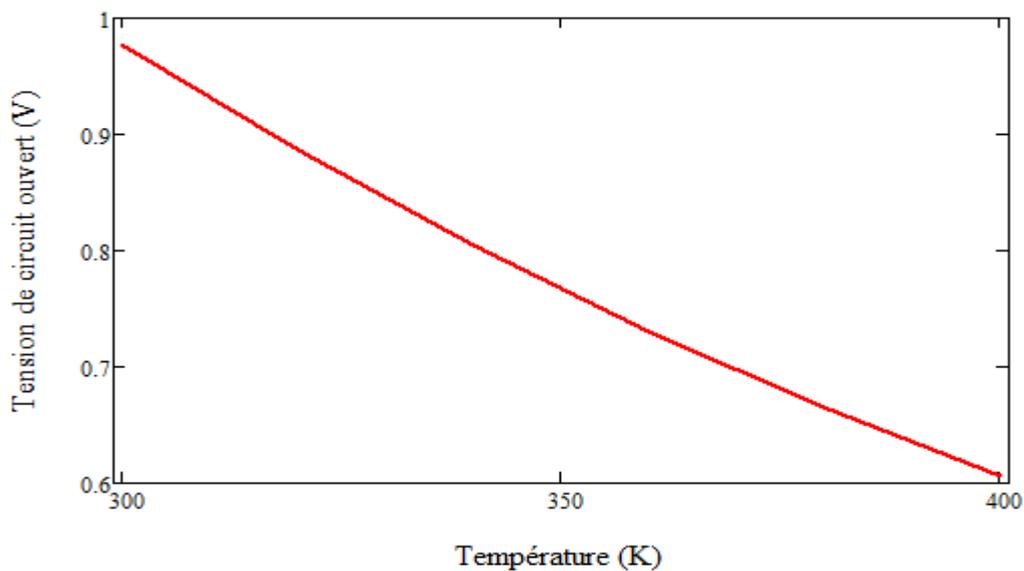


Figure (3.26) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la température.

3.7.3 Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure GaAs

La Figure (3.27) représente la variation de la caractéristique $J(V)$ avec la température. On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur de la densité de courant de court-circuit. Par contre, la tension de circuit ouvert diminue fortement lorsque la température augmente.

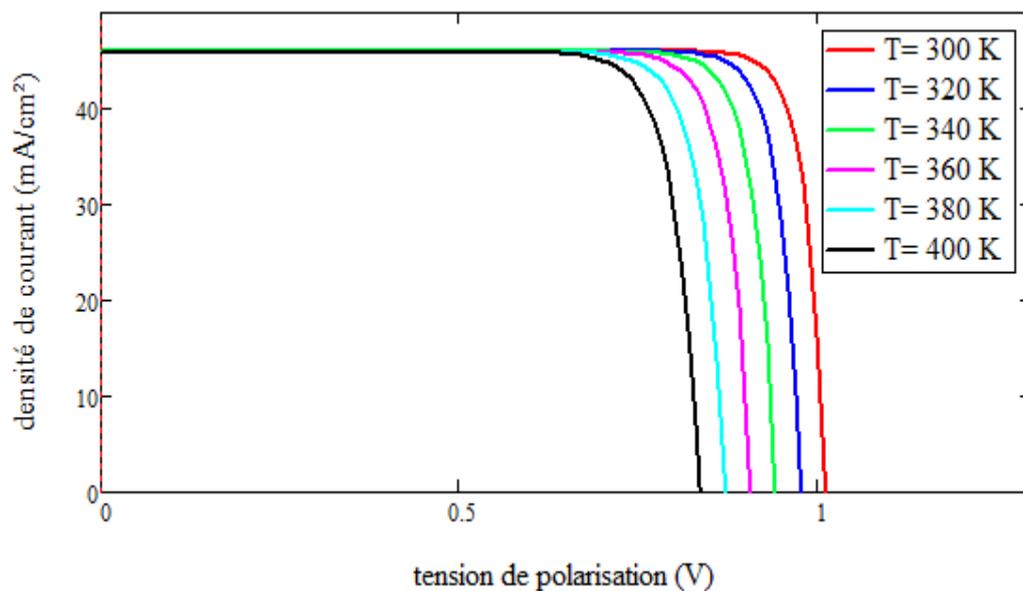


Figure (3.27) :Caractéristique courant-tension de la structure GaAs pour différentes températures.

3.7.4 Puissance délivrée par la structure GaAs

Sur la figure (3.28) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes températures. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{max} .

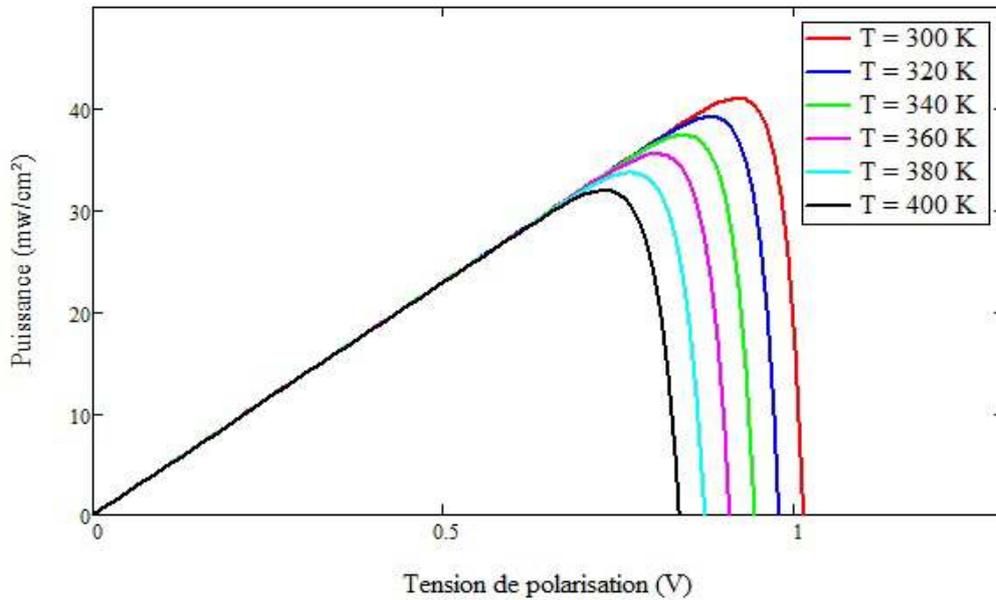


Figure (3.28) : Puissance délivrée par la cellule *GaAs* en fonction de la tension de polarisation pour plusieurs Températures.

La puissance maximale atteint sa valeur optimale qui vaut 40,07 mW/cm² pour une valeur de température de l'ordre de 300 K

3.7.5 Le rendement de la cellule GaAs

La figure (3.29) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la température. Nous remarquons une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la température. Le rendement varie de 26% à 20,2% lorsque la température varie de 300 à 400°K.

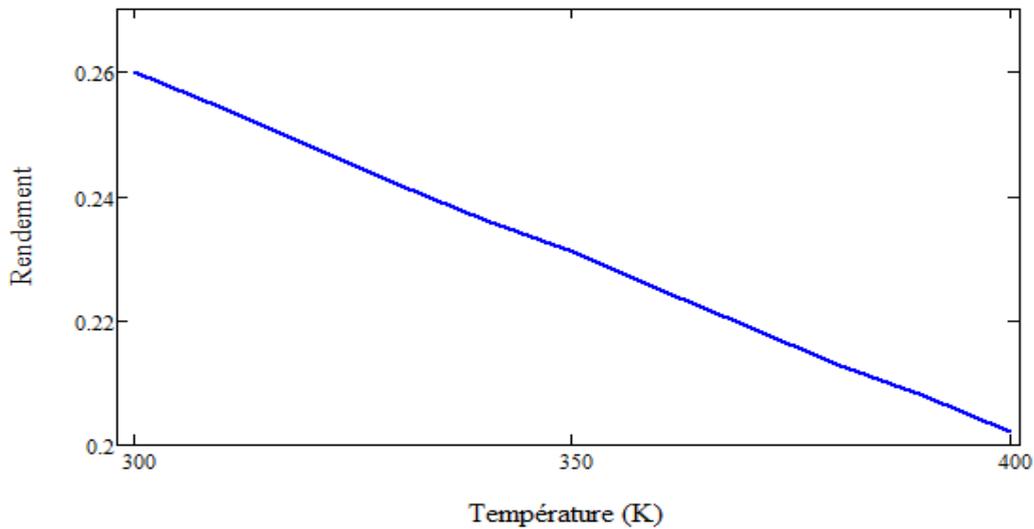


Figure (3.29): Représentation du rendement de la structure $GaAs$ en fonction de la température.

3.7.6 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure Ge

Le Figure (3.30) représente la réaction de la cellule à la variation de la température, On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur de la densité de courant de court-circuit

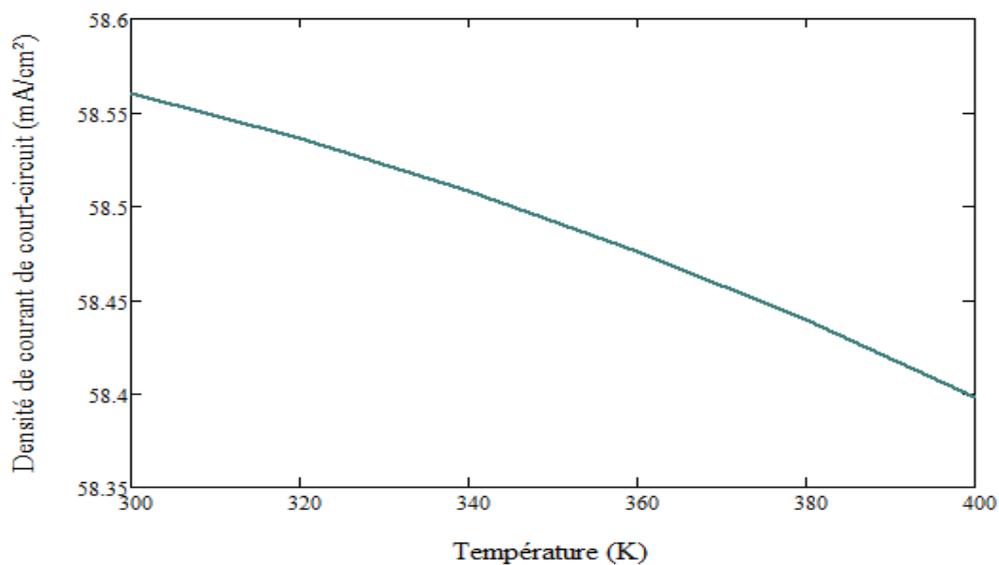


Figure (3.30) : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de la température.

3.7.7 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure Ge

Dans la figure (3.31) nous remarquons que l'augmentation de la température de la cellule engendre une atténuation importante de la tension de circuit ouvert V_{co} .

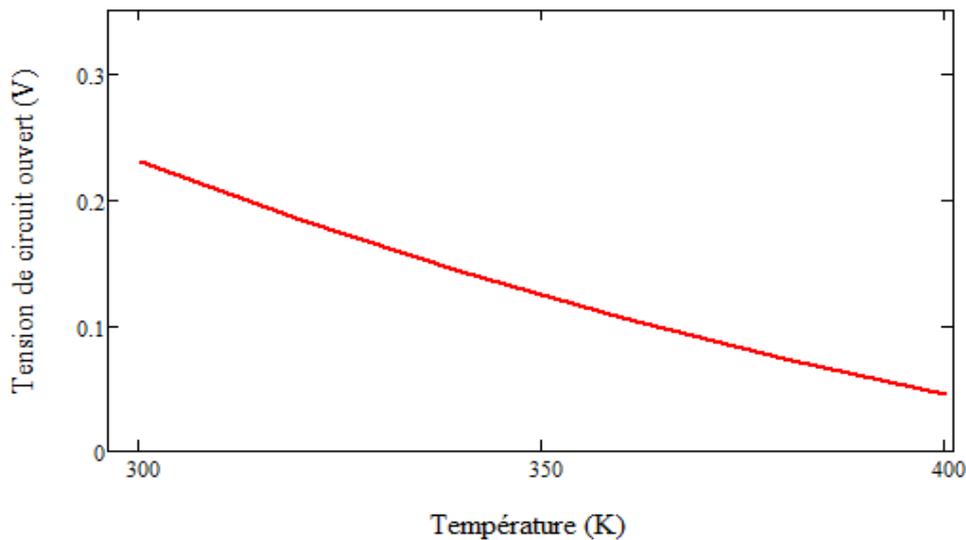


Figure (3.31) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la température.

3.7.8 Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure Ge

La Figure (3.32) représente la variation de la caractéristique $J(V)$ avec la température, On constate que la température a une influence négligeable sur la valeur de la densité de courant de court-circuit. Par contre, la tension de circuit ouvert diminue considérablement lorsque la température augmente.

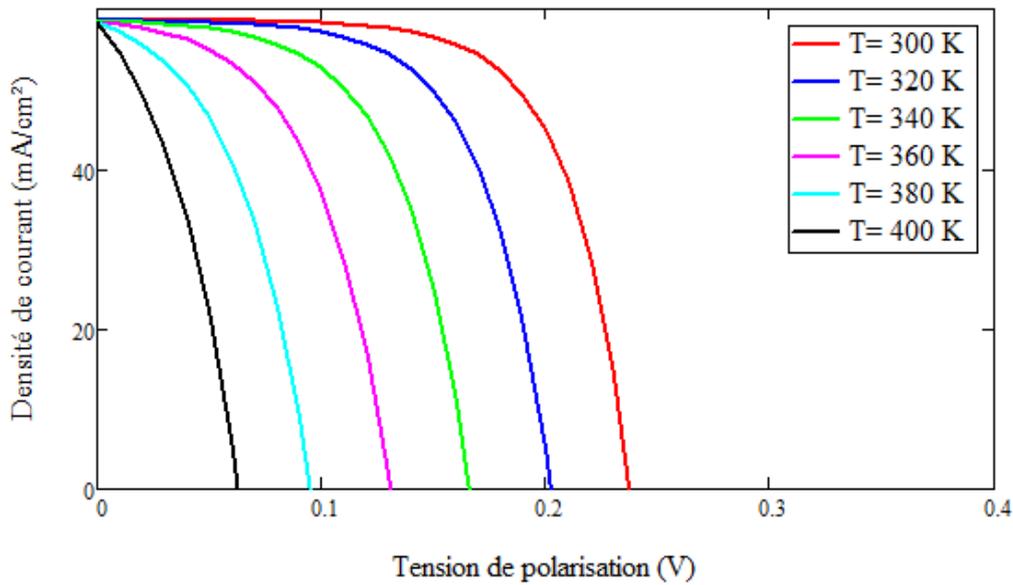


Figure (3.32) : Caractéristique courant-tension de la structure *Ge* pour différentes températures.

3.7.9 Puissance délivrée par la structure *Ge*

La puissance maximale atteint sa valeur optimale qui vaut 9,4 mW/cm² pour une valeur de température de l'ordre de 300 K

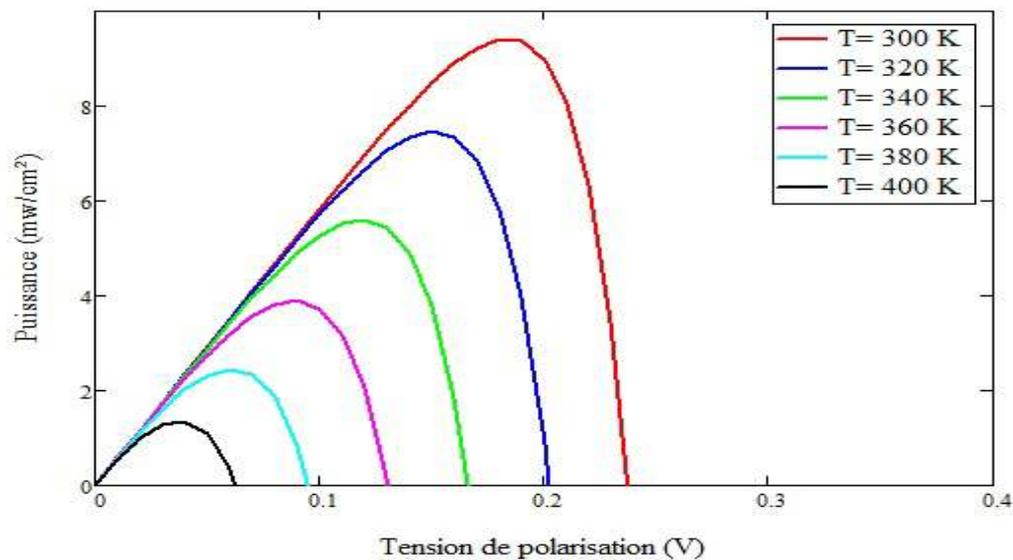


Figure (3.33) : Puissance délivrée par la cellule *Ge* en fonction de V pour plusieurs Températures.

3.7.10 Le rendement de la structure Ge

La figure (3.34) représente la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la température. Nous remarquons une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la température. Le rendement varie de 7,6% à 2,5% lorsque la température varie de 300 à 400°K.

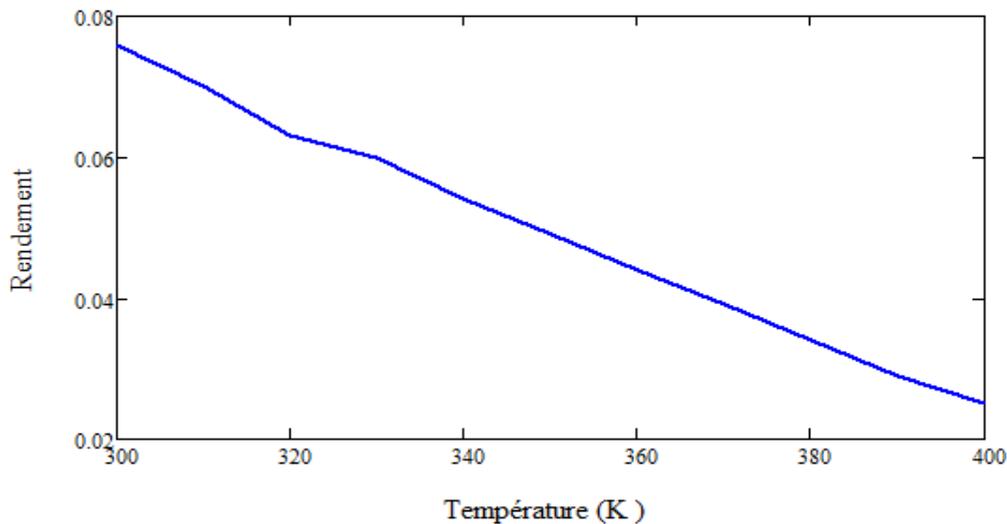


Figure (3.34): Représentation du rendement de la structure Ge en fonction de la température.

3.7.11 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs/Ge

Dans la figure (3.35), nous avons reporté l'influence de la température sur la tension de circuit ouvert V_{co} , nous constatons que l'augmentation de la température engendre une diminution considérable dans la tension de circuit ouvert.

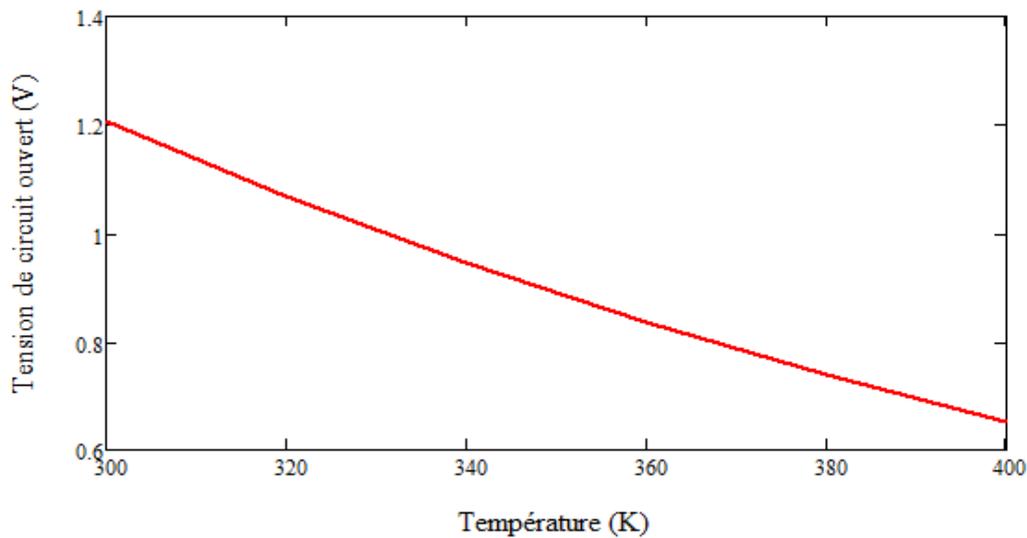


Figure (3.35) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure *GaAs/Ge* en fonction de la température.

3.7.12 Le rendement de conversion

- **Rendement d'une cellule tandem**

La figure (3.36) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction de la température. Nous remarquons une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la température. Le rendement varie de 31,3 % à 17,5 % lorsque la température varie de 300 à 400°K.

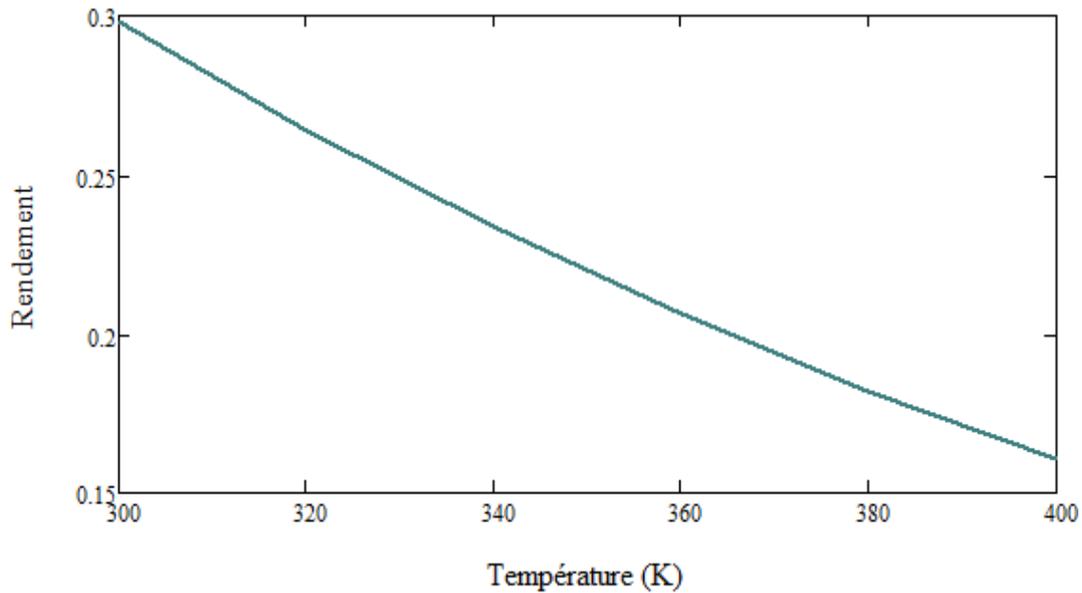


Figure (3.36) : Représentation du rendement pour une cellule tandem *GaAs/Ge* en fonction de la température.

- **Rendement d'une cellule cascade**

La figure (3.37) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction de la température. Nous remarquons une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la température. Le rendement varie de 33,6 % à 22,7% lorsque la température varie de 300 à 400°K.

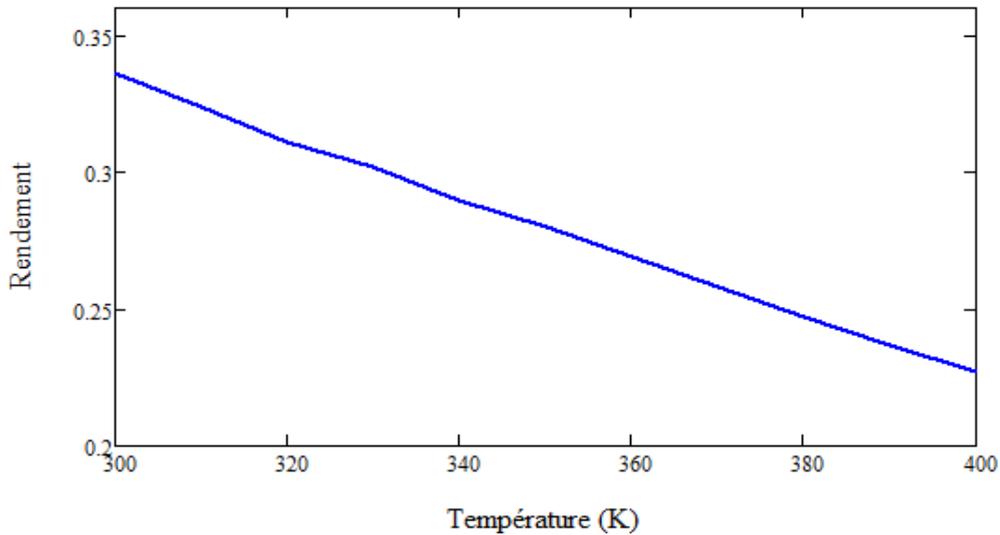


Figure (3.37) : Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure *GaAs/Geen* fonction de la température.

3.8 Influence de la durée de vie des porteurs

3.8.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} de la structure *GaAs*

Dans la figure (3.38) nous avons reporté l'influence de la durée de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$ sur la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Nous remarquons que l'augmentation de la durée de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$ engendre une légère amélioration dans la densité du courant de court-circuit, notamment pour les valeurs inférieures ou égales à 25 ns. Au-delà de 25 ns, la densité de courant J_{cc} devient presque constante.

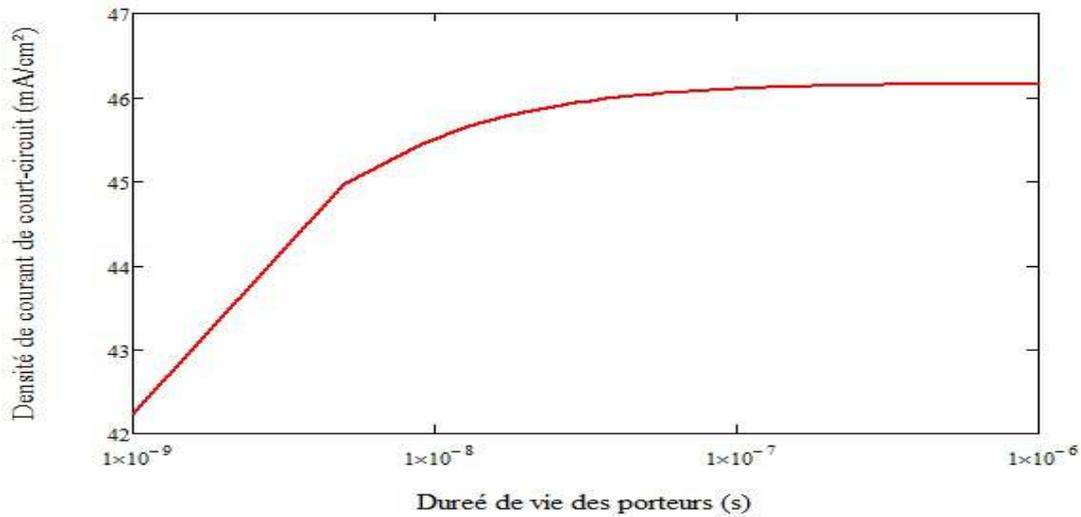


Figure (3.38) :Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction des durées de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$.

3.8.2 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure GaAs

Dans la figure (3.39), nous avons reporté l'influence de la durée de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$ sur la tension de circuit ouvert V_{co} . Nous constatons que l'augmentation de $\tau_n = \tau_p$ engendre une faible amélioration dans la tension de circuit ouvert.

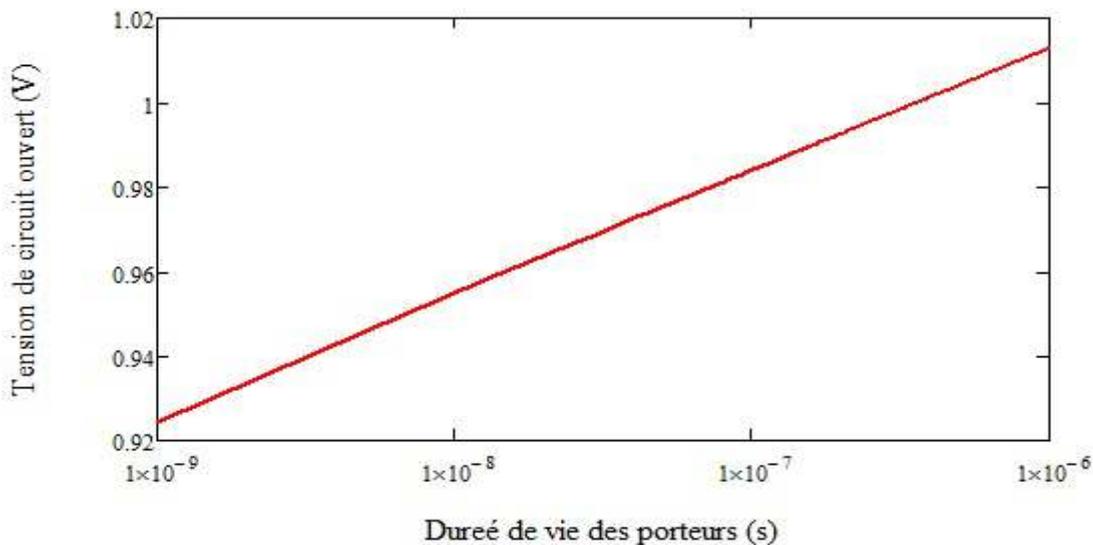


Figure (3.39) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de la durée de vie $\tau_n = \tau_p$.

3.8.3 Caractéristiques courant-tension $J(V)$ de la structure GaAs

Sur la figure (3.40) sont représentés les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de $\tau_n = \tau_p$. On remarque que la densité de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} augmentent légèrement lorsque les durées de vie augmentent.

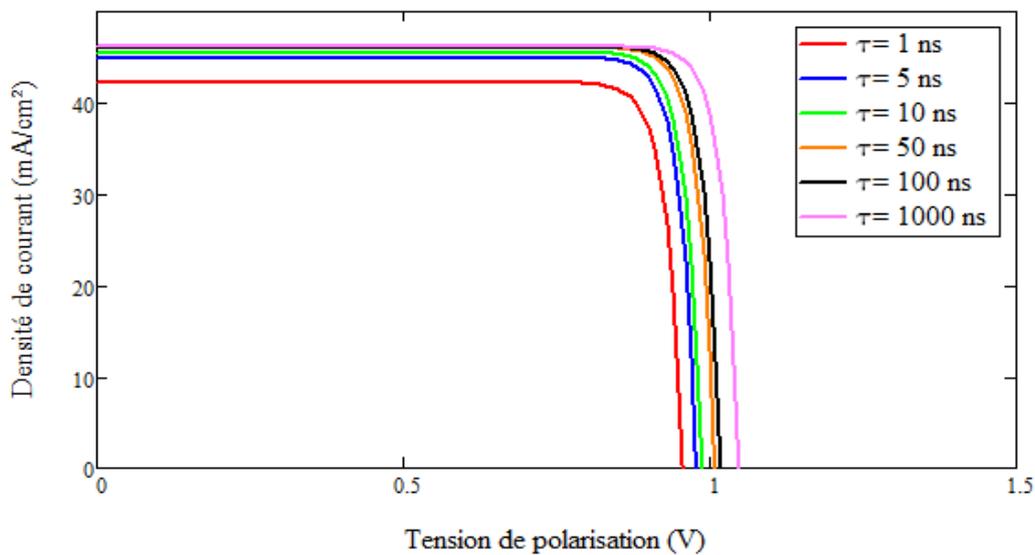


Figure (3.40) :Caractéristiques courant-tension de la structure GaAs pour différentes valeurs de $\tau_n = \tau_p$.

3.8.4 Puissance délivrée par la structure GaAs

Sur la figure (3.41) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation V pour différentes valeurs des durées de vie $\tau_n = \tau_p$. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales P_{max} .

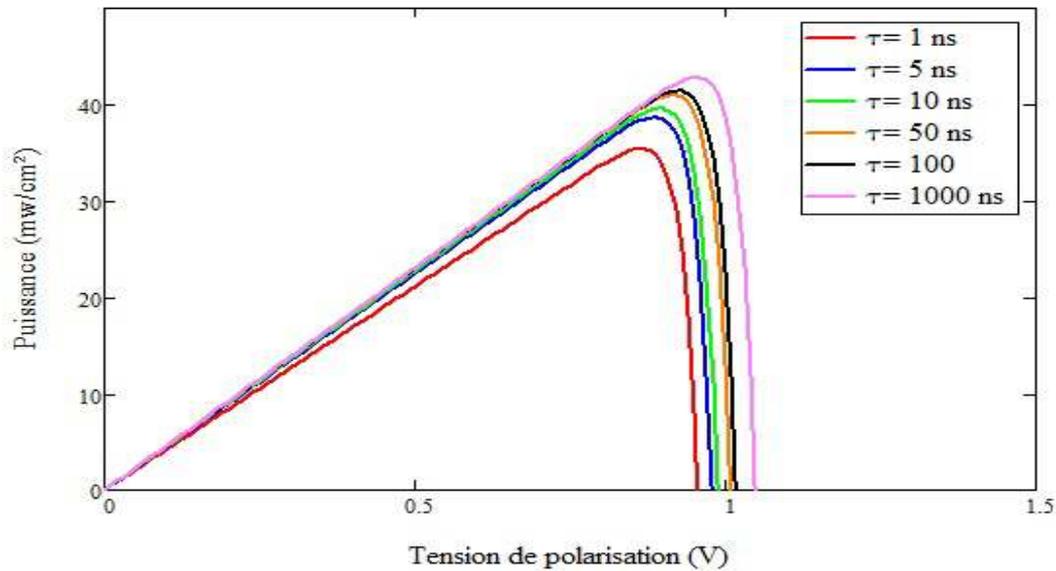


Figure (3.41) : Puissances délivrées par la cellule *GaAs* en fonction de V pour plusieurs valeurs de durée de vie $\tau_n = \tau_p$.

La puissance maximale atteint sa valeur optimale qui vaut $42,82 \text{ mW/cm}^2$ pour une valeur de durée de vie de l'ordre de $\tau_n, = \tau_p = 10^3 \text{ ns}$

3.8.5 Le rendement de la cellule *GaAs*

La figure (3.42) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des durées de vie. Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de la durée de vie. Le rendement atteint une valeur maximale de $27,1 \%$ pour une valeur de durée de vie égale à 10^3 ns

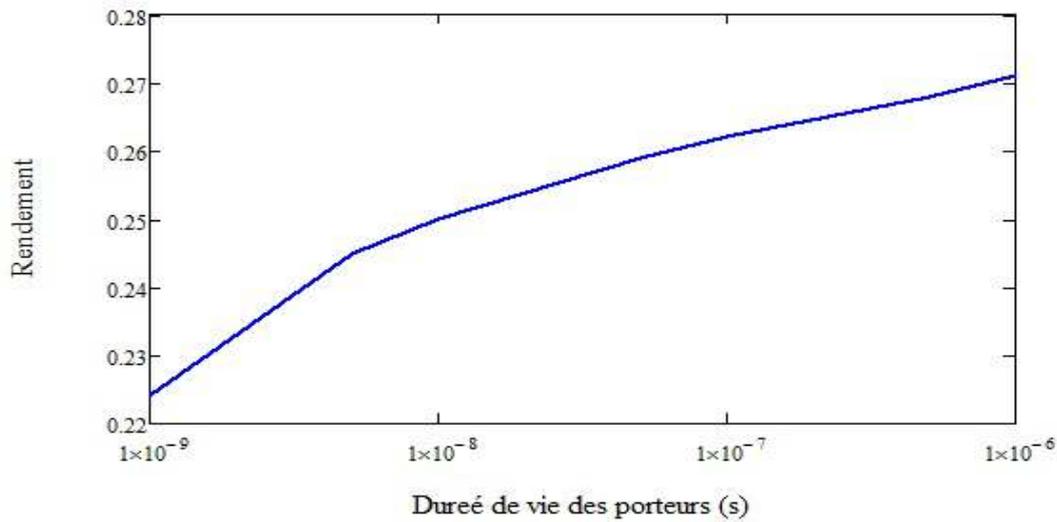


Figure (3.42) : Représentation du rendement de la structure *GaAs* en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$

3.8.6 Tension de circuit ouvert V_{co} de la structure *GaAs/Ge*

Dans la figure (3.43), nous avons reporté l'influence de la durée de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$ sur la tension de circuit ouvert V_{co} . Nous constatons que l'augmentation de $\tau_n = \tau_p$ engendre une amélioration considérable dans la tension de circuit ouvert.

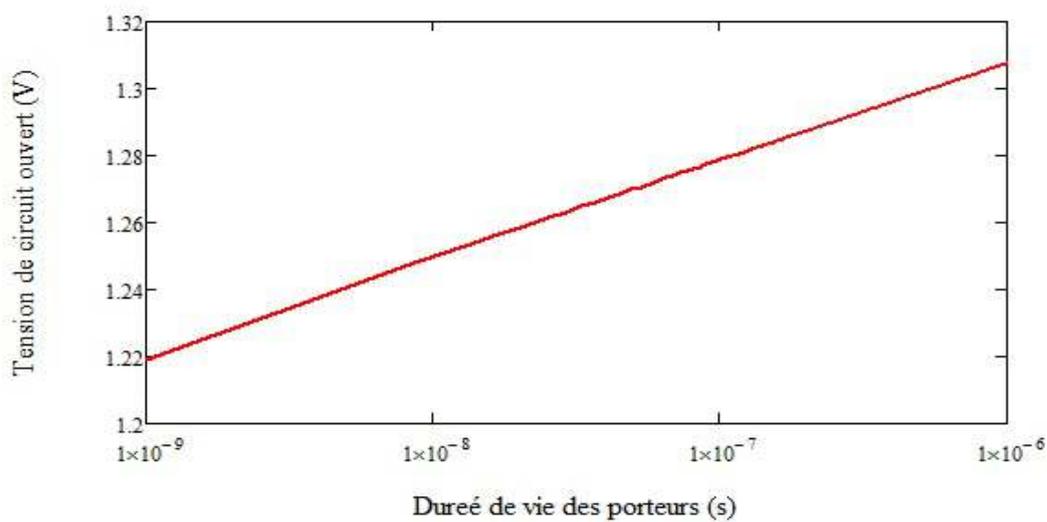


Figure (3.43) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} de la structure *GaAs/Ge* en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$.

3.8.7 Le rendement de conversion

- **Rendement d'une cellule tandem**

La figure (3.44) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des durées de vie. Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de la durée de vie. Le rendement atteint une valeur maximale de 32,4 % pour $\tau_n = \tau_p = 1 \mu s$.

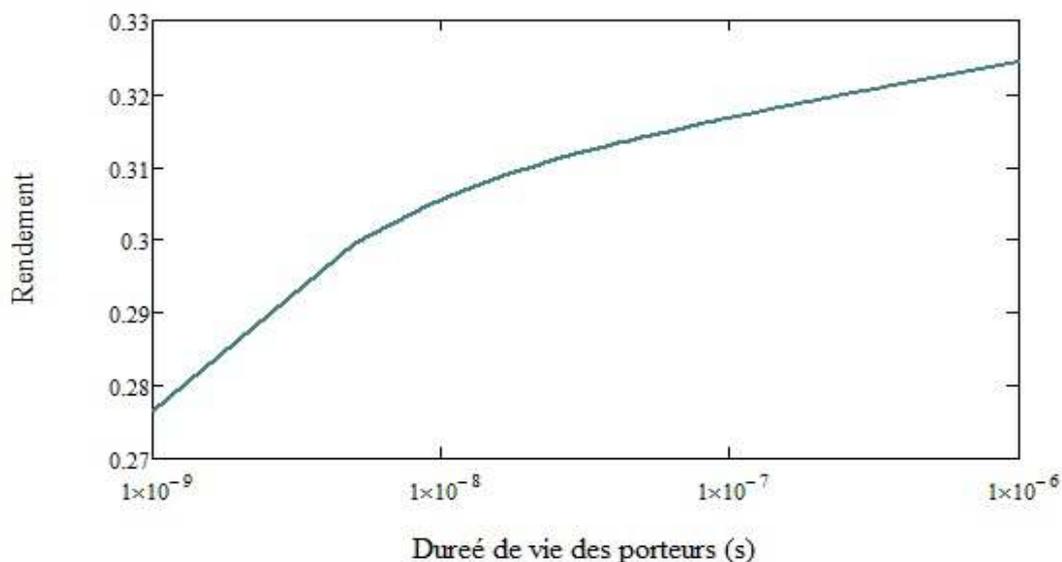


Figure (3.44) : Représentation du rendement pour une cellule tandem *GaAs/Ge* en fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$.

- **Rendement d'une cellule cascade**

La figure (3.45) représente la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des durées de vie. Nous remarquons une augmentation considérable du rendement avec l'augmentation de la durée de vie. Le rendement atteint une valeur maximale de 35,5 % pour $\tau_n = \tau_p = 1 \mu s$.

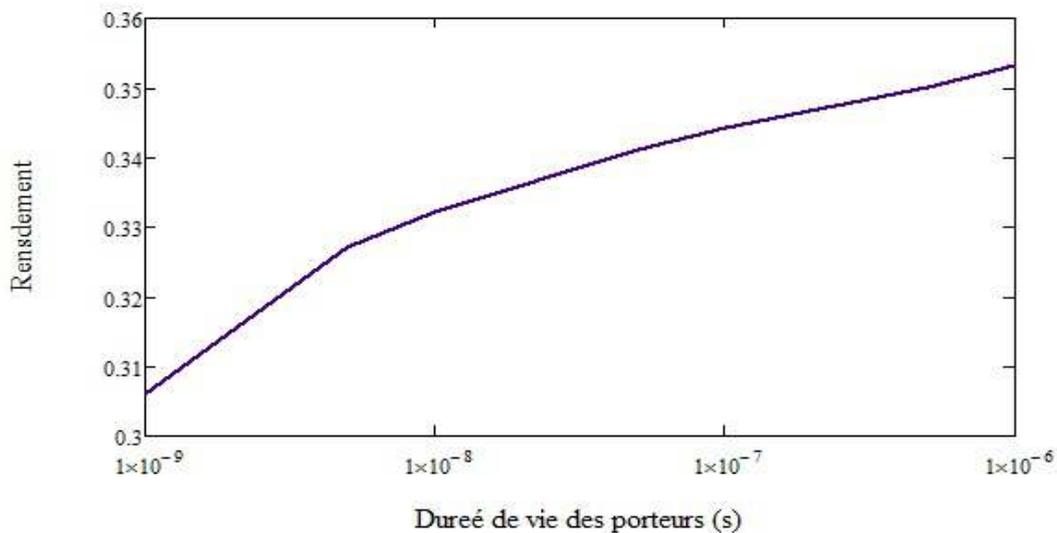


Figure (3.45) : Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure *GaAs/Geen* fonction des durées de vie $\tau_n = \tau_p$.

On note que le rendement d'une cellule cascade est plus important que celui d'une cellule tandem.

3.9 Conclusion

Les performances optimales de la cellule solaire à double jonctions *GaAs/Ge* ont été simulées en calculant le rendement avec différents paramètres de la structure : l'épaisseur de la cellule du haut *GaAs* et la durée de vie des porteurs ainsi que la vitesse de recombinaison et la température.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation et à l'analyse des résultats du modèle que nous avons adopté. Nous avons tracé le courant de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la caractéristique $J(V)$, la caractéristique $P(V)$ et le rendement η à travers un programme de simulation.

Nous avons aussi constaté l'influence de plusieurs paramètres sur la caractéristique courant tension et la caractéristique $P(V)$, ce qui nous a permis de déterminer les différentes valeurs optimales de ces paramètres pour le bon fonctionnement de la cellule solaire.

- La variation de l'épaisseur de la cellule du haut de 0,2 à 1,5 μm a entraîné une augmentation du rendement de conversion de la cellule de 3,2% (de 30,5 à 33,7 %) en cellule cascade et de 7 % (de 24,7 à 31,7 %) en cellule tandem.
- L'augmentation de la vitesse de recombinaison $S_n = S_p$ de 10^3 à 10^4 cm/s induit une diminution dans le rendement de conversion de la cellule de 0,3% (de 34 à 33,7 %) en cellule cascade et de 3,2 % (de 31,4 à 28,2 %) en cellule tandem.
- L'augmentation de la température de 300K à 400K engendre une diminution rapide du rendement de conversion de la cellule de 10,9 % (de 33,6 à 22,7%) en cellule cascade et de 13,8 % (de 31,3 à 17,5 %) en cellule tandem.
- L'augmentation de la durée de vie des porteurs $\tau_n = \tau_p$ de 10^{-3} à 1 μs induit une croissance dans le rendement de conversion de la cellule de 4,7 % (de 30,6 à 35,3 %) en cellule cascade et de 4,7 % (de 27,7 à 32,4 %) en cellule tandem.

Introduction générale

La consommation totale de l'énergie dans le monde est en très forte croissance dans toutes les régions du monde avec une consommation de 81% provenant des combustibles fossiles [1]. L'exploitation de ces ressources non renouvelables est le fait que la demande de l'énergie est en augmentation. Notre dépendance actuelle sur ces énergies entraînera des conséquences dévastatrices non seulement ces ressources d'énergie ne sont pas inépuisables mais de plus l'environnement subit une augmentation des émissions de CO₂ liée à la production et à la consommation d'énergie par combustion des fossiles. Si le pendule de la production d'énergie ne se déplacera pas vers les énergies renouvelables il y'aura des conséquences importantes, les plus évidentes comprennent le réchauffement climatique et la crise économique. Parmi les alternatives aux énergies fossiles, l'énergie hydraulique et l'énergie solaire qui demeurent une solution idéale.

L'Algérie dispose d'un rayonnement solaire assez impressionnant pour qu'elle s'engage pleinement à exploiter l'énergie solaire photovoltaïque et d'en profiter pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population beaucoup plus que d'autres exploitations d'énergies[2].

Cependant, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité. La recherche est très active dans ce domaine afin d'arriver à une meilleure exploitation de l'énergie solaire, les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires est considérée comme la plus importante tâche à être développée pour mieux utiliser l'énergie solaire et produire de l'électricité. Cette dernière nécessite l'optimisation de la structure et des propriétés de la cellule solaire.

Introduction générale

Les cellules mono-jonction de 1^{er} et 2^{ème} génération ont atteint leur limite en termes de rendement. Les recherches actuelles s'orientent vers de nouveaux concepts, telles que les cellules multi-jonction qui permettent d'améliorer considérablement le rendement.

C'est dans ce contexte que rentre ce travail, qui consiste à étudier les cellules solaires à double jonction.

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'une cellule solaire double jonctions à base de GaAs/Ge par le logiciel MATHCAD.

Dans le premier chapitre, nous présentons les caractéristiques du soleil tels que le spectre solaire, le corps noir, le flux incident ainsi que l'étude des matériaux GaAs et Ge et leurs caractéristiques structurelles, électriques et optiques.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques d'une cellule solaire ainsi que les équations nécessaires aux simulations.

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de GaAs/Ge.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion.

Bibliographie

- [1] Office of Integrated Analysis and Forecasting. International Energy Outlook 2014. Energy Information Administration, 2014.
- [2] 15^{ème} Inventaire des énergies renouvelables. 2013. Source <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algerie.pdf>
- [3] S.M. Vernon, S.P.Tobin, S.J. Wojtczuk, C.J. Keavney, C. Bajgar, M.M.Sanfacon, J.T.Daly and T.M.Dixon, III-V solar cell research at pire corporation, Solar Cells, Vol.27 (1989)107-120
- [4] D.R. di valdalerbo : 'La recherche énergétique européenne : pont de coopération sur la méditerranée'. Liaison énergie – francophonie, N°71 (énergie et développement durable en méditerranée) ,2^{em} trimestre 2006, page 71-76
- [5] P.Michalopoulos, " A novel approach for the development and optimisation of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
- [6] A.Luque and S.Hegedus, "Handbook of photovoltaic": Science and Engineering, 2003
- [7] M.Orgeret, les piles solaires le composant et ses applications, Masson, paris, 1985.
- [8] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07, Page 2
- [9] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, le rayonnement solaire, conversion thermique et application. thechnique et documentation, Paris, 1979.
- [10] B. Zouak, « Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité », mémoire de magister, 2012, Université de Tizi-Ouzou.

Bibliographie

- [11] M. Adaika, « Étude par Simulation Numérique de L'effet des Couches Surdopées Coté Contacts Avant et Arrière sur Les Caractéristiques Électriques d'une Cellule Solaire n /p en Silicium», thèse de master, 2012, Université de Biskra.
- [12] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.
- [13] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997.presses polytechniques et universitaires romandes
- [14] Singh, Semiconductor Devices: Basic Principles, John-Wiley, 2001.
- [15] S.M. Sze, « VLSI Technology», 2nd edition, McGraw-Hill International Editions (1988).
- [16] K.P.pande,DH.Reep,SK.Shastry,AS.Weigner,J.M.Borrego and S.k.Ghandhi, "The preparation and properties of thin polycrystallineGaAs. Solar with.grain boundary Edge passivation", IEEE .Trans.Electron.Dev, (1980), ED.27, Vol.4, pp.635-640.
- [17] H.C.Hamaker, C.W.Ford, J.G.Werthen, G.F.Virshup, N.R.Kaminar, D.L.King and J.M.Gee, 26,
- [18] Donald A.Neamen, McGraw-Hill, "Semiconductor physics and devices basic principles",Third Edition, 2003.
- [19] M. Bouafia&L.Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [20] B. Equer, "Energie solaire photovoltaïque ", vol.1, 1993. Ellipses
- [21] F.D.Murnaghanproc.natl.acad.sci.usa 30 5390 (1944)

Bibliographie

- [22] IoffePhysico-Technical Institute. InN - Indium Nitride. New Semiconductor Materials. Characteristics and properties. [Online] [Cited: 12 13, 2011.]
<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InN/index.html>. (s.d.).
- [23] <http://ipn2.epfl.ch/LNM/cours/solide/pres/9.pdf>
- [24] A. Bouloufa, "Etude et Caractérisation des Semi-conducteurs Ternaires et Quaternaires $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ par Spectroscopie Photo acoustique", Thèse de doctorat d'Etat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2007.
- [25] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités", thèse de doctorat, Institutue nationale des sciences appliquées, Lyon, 2005.
- [26] H.Mathieu " Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques "2 éme édition, Masson 1990.
- [27] N. Ott, M. Nerding, G. Muller, R. Brendel and H. P. Strunk, "Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers", Journal of Applied Physics, vol 95, 2004, p. 497.
- [28] R. G. Lemus, F. B. Hander, C. H. Rodríguez, J.M. Martinez, " Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments ", Mater. Sci. Eng. B, vol 101, 2003, p.249.
- [29] Soga, T., "Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion", Elsevier, . Nagoya, Japan,(First Edition 2006).
- [30] www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance.