

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب 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

DJILLALI MOUNIR

&

BENNIA LYES

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

Thème

Etude et simulation d'une cellule solaire à bandes intermédiaires

Proposé par : Mr NACER SAID

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à remercier et à exprimer notre reconnaissance et nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, Mr NACER SAID, pour son entière disposition, sa patience et sa gentillesse, et de nous avoir orienté, aidé et conseillé.

Nos sentiments de profonde gratitude vont à nos professeurs qui nous ont transmis leur savoir sans réserve tout au long de nos années d'études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font pour avoir accepté d'évaluer notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent mémoire.

Enfin, nous désirons remercier nos familles et nos amis et camarades qui nous ont apporté leur soutien incessant pendant toute la durée de travail.

Dédicaces

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de mes années d'études. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail tout ma reconnaissance tout mon amour.

À mes très chères sœurs.

À mes très chers frères.

À mes cousins.

À toute ma famille.

À mes très chers amis.

*À mes professeurs dans tous les cycles qui m'ont
éclairé la voie du savoir.*

À tous ceux que j'aime.

Mounir.

À mes très chères sœurs.

À mes très chers frères.

À mes nièces et neveux.

À toute ma famille.

À mes très chers amis.

*À mes professeurs dans tous les cycles qui m'ont
éclairé la voie du savoir.*

À tous ceux que j'aime.

Lyes

ملخص: الطاقة الشمسية الضوئية هي تحويل مباشر لجزء من الاشعة الشمسي إلى الطاقة الكهربائية، هذا التحويل الطاقوي يتم عن طريق الخلية الشمسية والتي مردودها متعلق بنوعية الطيف الشمسي الممتص وهذا العمل يهدف الى تحسين امتصاص الخلية. وكانت دراستنا على مستوى طبقة متوسطة بين طبقتين المادة. ولقد درسنا الخلايا الشمسية بطبقة وطبقتين وسيطين. وصلنا الى تبين تأثير الطاقات المتنقلة E_1 و E_2 في المردود فيما سبق ، المردودات المتحصل عليها لخلية بطبقة وطبقتين وسيطين تمثلت فيما يلي 63,2% و 73,3% على التوالي واللذان يفوقان مردودية الخلية التقليدية ، لقد درسنا ايضا الشبكة الفائقة للعلب الكمومية باستخدام نموذج كرونك - بيني ، وقد عرفنا وبينا تأثير الحجم والبعد بين هذه العلب على الطاقة الانتقالية.

كلمات المفاتيح: نقطة الكم، الخلية الشمسية بشريط وسيطي، الطاقة الشمسية.

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 a pour but d'améliorer l'absorption de la cellule en introduisant des bandes intermédiaires dans la bande interdite du matériau. Nous avons étudié les cellules solaires à une et à deux bandes intermédiaires. L'influence des énergies de transitions E_1 et E_2 sur le rendement a été déterminée. Les rendements obtenus pour une cellule à une et à deux bandes intermédiaires sont de l'ordre de 63,2% et 73,3% respectivement qui sont largement supérieurs à celui d'une cellule conventionnelle. Nous avons aussi étudié un superréseau de boîtes quantiques en utilisant le modèle de Kronig-Penney. L'influence des dimensions et de la séparation entre les boîtes sur les énergies de transition a été déterminée.

Mots clés : cellule solaire à bande intermédiaire ; boîtes quantiques ; photovoltaïque.

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 improve the absorption of the cell by introducing intermediate bands in the band gap of the material. We studied the one and two intermediate bands solar cells. The influence of transitions energies E_1 and E_2 on performance was determined. The efficiencies obtained for a cell who has one and two intermediate bands are of the order of 63.2% and 73.3% respectively, which are much higher than that of a conventional cell. We also studied a quantum dots superlattices using the Kronig-Penney model. The influence of the dimensions and separation between dots on transition energies was determined.

Keywords : quantum dots superlattices ; intermediate band solar cell ; photovoltaic.

Listes des acronymes et abréviations

AM : Masse d'air.

h : Constante de Planck.

\hbar : Constante de Planck réduite.

q : Charge élémentaire.

λ : Longueur d'onde.

ν : La fréquence de la lumière.

k_b : La constante de Boltzmann.

T : Température.

c : Vitesse de la lumière dans le vide.

R_s : Rayon du soleil.

d : Distance soleil-terre.

λ : Longueur d'onde de la lumière.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann.

I_s : Courant inverse de la jonction.

I_0 : Courant de saturation.

P_s, P_{out} : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

V_{oc} : Tension de circuit ouvert.

V_{pm} : Tension maximale.

I_{pm} : Courant maximale.

I_{sc} : Courant de court-circuit.

I_{obs} : Le courant d'obscurité.

FF : Facteur de forme.

η : Rendement.

I_{ph} : Le photo-courant.

J_{sc} : Densité de courant de court-circuit.

J : Densité de courant.

ZCE : Zone de charge d'espace.

S : Surface de la cellule photovoltaïque.

V_0 : Potentiel du puits quantique.

m_0 : Masse de l'électron libre.

m_1 : Masse effective des porteurs dans le puits.

m_2 : Masse effective des porteurs dans la barrière.

m_e^* : Masse effective des électrons.

Ψ : Fonction d'onde.

L : Largeur de la boîte quantique.

H : Distance entre les boîtes quantiques.

D : Potentiel périodique du modèle de Kronig-Penney.

x, y, z : Vecteurs.

E_n : Energie de quantification.

E_g : Energie de gap.

E_c : Bande de conduction.

E_v : Bande de valence.

E_{QD1} : Premier niveau de quantification dans le puits.

E_{Bar} : Energie de gap de la barrière.

E_{QD} : Energie de gap du puits.

E_1 : Energie de transition de la bande de valence à la bande intermédiaire.

E_2 : Energie de transition de la bande intermédiaire à la bande de conduction.

\dot{N} : Flux de photons émis.

\dot{E} : Flux de l'énergie émis.

\dot{N}_g : Est le flux de photons absorbés.

\dot{N}_r : Est le flux de photons réémis.

μ : Potentiel chimique.

$h\nu$: Energie de photons.

T_s : Température caractéristique de l'absorption du corps noir.

T_a : Température caractéristique ambiante d'émission du corps noir.

CBO : Offset de la bande de conduction.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur les cellules solaires	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Histoire du solaire photovoltaïques	3
1.3 Le soleil	4
1.3.1 Caractéristiques générales.....	4
1.3.2 Energie solaire.....	5
1.3.3 Spectre du rayonnement solaire.....	6
1.4 Masse d'air	7
1.5 Dualité de la lumière	8
1.6 Radiation d'un corps noir	9
1.7 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
1.7.1 Structure des cellules photovoltaïques.....	11
1.7.2 Principe de fonctionnement	12
1.7.3 L'interaction photon/semi-conducteur	12
1.7.4 Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	15
1.7.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	16
1.7.6 Facteur limitant le rendement	18
1.8 Avantages et inconvénients	20
a Avantages.....	20
b Inconvénients.....	20
1.9 Conclusion	21
Chapitre 2 Cellules Solaires à Bande Intermédiaire	22
2.1 Introduction.....	22

2.2	Modèle de Kronig-Penney	24
2.3	Cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques.....	26
2.3.1	Les boîtes quantiques	27
2.3.2	Calcul de l'énergie d'un réseau de boîtes quantiques.....	27
2.4	Le Flux.....	30
2.5	Théorie de la limite de la balance détaillée	30
2.5.1	Limite du rendement d'une cellule solaire classique	31
a	Hypothèses du bilan détaillé du rendement.....	31
2.6	Balance détaillée d'une cellule solaire à une bande intermédiaire	33
2.6.1	Définition d'une cellule solaire à bande intermédiaire	33
2.6.2	Physique d'une cellule solaire à bande intermédiaire.....	34
2.6.3	Principe de fonctionnement d'une IBSC	35
2.6.4	La limite du rendement d'une IBSC à une IB	36
a	Hypothèses du bilan détaillé du rendement pour une IBSC.....	36
b	Paramètres caractéristiques d'une IBSC à une IB	37
2.7	Cellule solaire à deux bandes intermédiaires	39
2.7.1	Balance détaillée d'une cellule solaire à deux bandes intermédiaires.	39
a	Paramètres Caractéristiques d'une IBSC à deux IB.....	41
2.8	Conclusion	42
Chapitre 3 Simulations.....		43
3.1	Introduction.....	43
3.2	Cellule solaire à une simple jonction.....	44
3.2.1	Rendement maximal en fonction du gap.....	44
3.2.2	Caractéristiques courant-tension et puissance	45
3.2.3	Facteur de forme FF	46
3.2.4	Résumé des résultats obtenus pour une simple jonction	47

3.3	Cellule solaire à une bande intermédiaire	48
3.3.1	Contour du rendement en fonction des énergies de transitions	48
3.3.2	Caractéristiques courant-tension et puissance pour une IBSC.....	49
3.3.3	Facteur de forme FF	50
3.3.4	Résumé des résultats obtenus pour une cellule solaire à une bande intermédiaire	50
3.4	Cellule solaire à deux bandes intermédiaires	51
3.4.1	Caractéristique courant-tension et puissance pour une cellule solaire à deux bandes intermédiaires	52
3.4.2	Facteur de forme.....	53
3.4.1	Résumé des résultats obtenus pour une Cellule Solaire à deux bandes intermédiaires.....	53
3.5	Cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques avec une bande intermédiaire	54
3.6	Conclusion	57
	Conclusion générale	58
	Bibliographie.....	60

Liste des figures

Chapitre 1	Généralités sur les cellules solaires	3
Figure 1.1.	Puissance du rayonnement solaire suivant le site géographique [11]......	6
Figure 1.2.	Spectre solaire. [13]	7
Figure 1.3.	Différentes masse d'air AM.	8
Figure 1.4.	Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde. [15]	10
Figure 1.5.	Schéma d'une jonction P-N.	11
Figure 1.6.	Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas (a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas (b) à un gap indirect [18]......	13
Figure 1.7.	Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après [19]......	14
Figure 1.8.	Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.....	15
Figure 1. 9.	Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.	18
Chapitre 2	Cellules Solaires à Bande Intermédiaire	22
Figure 2.1.	Représentation de la conversion du spectre lumineux entre une cellule solaire conventionnelle classique et une cellule solaire à bande intermédiaire.[29]	23
Figure 2.2.	Maille élémentaire du superréseau. Les épaisseurs de couche des semi-conducteurs SC I et SC II sont L et H.	24
Figure 2.3.	Un graphe de $f(E)$, montre les énergies de E qui seront prises selon $f(E)=\pm 1$	26
Figure 2.4.	Les fonctions d'onde d'une boîte quantique simple et un ensemble de boîtes quantiques couplées.....	27

Figure 2.5. Superréseau de boites quantiques, avec un réseau de boites espacées régulièrement.	28
Figure 2.6. Modèle de Kronig-Penney, qui montre les mini-bandes des boites quantiques (IB), et de la barrière.....	28
Figure 2.7. Diagramme énergétique montrant les mini-bandes formées dans la structure superréseau de boites quantiques.	29
Figure 2.8. Représentation des transitions entre les bandes d'une cellule solaire à une bande intermédiaire.	34
Figure 2.9. Représentation des trois potentiels chimiques (μ_{ci} , μ_{iv} et μ_{cv}).	35
Figure 2.10. Représentation des transitions dans une cellule solaire à deux bandes intermédiaires.....	40
Chapitre 3 Simulations.....	43
Figure 3.1. Représentation du rendement maximal d'une simple jonction en fonction du gap E_g	44
Figure 3.2. Représentation de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à simple Jonction.	45
Figure 3.3. Représentation graphique de la puissance de sortie P en fonction de la tension V d'une cellule à simple Jonction.....	46
Figure 3.4. Représentation du facteur de forme FF.	47
Figure 3.5. Contour de rendement en fonction des deux transitions énergétiques E_1 et E_2	48
Figure 3.6. Représentation de la courbe du courant J généré par la cellule solaire à bande intermédiaire, en fonction de de la tension V.....	49
Figure 3.7. Représentation de la puissance de sortie en fonction de la tension V d'une cellule solaire à bande intermédiaire.	50
Figure 3.8. Contour qui représente le rendement pour chaque configuration énergétique de E_1 et E_2 . ($E_3=1,5eV$).	51

Figure 3.9. Représentation du courant généré par une cellule solaire à deux bandes intermédiaires en fonction de la tension V	52
Figure 3.10. Représentation de la puissance maximale délivrée par une cellule solaire à deux bandes intermédiaires.....	53
Figure 3.11. Contour de l'énergie de la première transition E_1 en fonction de L et H	55
Figure 3.12. Contour de l'énergie de la deuxième transition E_2 en fonction de L et H	55
Figure 3.13. Contour qui représente le rendement en fonction de L et H	56

Liste des tableaux

Chapitre 1	Généralités sur les cellules solaires	3
	Tableau 1.1 Répartition du spectre solaire.....	7
Chapitre 3	Simulations.....	43
	Tableau 3.1. Paramètres de InAsN/GaAsSb.....	54
	Tableau 3.2. Tableau récapitulatif des résultats obtenus pour différents types de cellules solaires.	57

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.

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 à bandes intermédiaires de troisième génération qui permettent d'améliorer considérablement le rendement.

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

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les caractéristiques de la source lumineuse (Le soleil) définie par le spectre solaire, ainsi que la structure, le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire.

Dans le deuxième chapitre, on décrit brièvement la solution de l'équation de Schrödinger par le modèle de Kronig-Penney pour un superréseau de boîtes quantiques. Ensuite, nous présentons la théorie de la balance détaillée de Shockley and Queisser utilisée pour le calcul du rendement des différentes cellules solaires (cellule solaire à simple jonction, cellule solaire à une bande intermédiaire et cellule solaire à deux bandes intermédiaires).

Dans le chapitre trois, nous présentons les résultats de nos simulations.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion.

Chapitre 1 Généralités sur les cellules solaires

1.1 Introduction

La technologie photovoltaïque (PV) transforme l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de semi-conducteurs. C'est la technologie qui a le plus grand potentiel, mais aussi qui nécessite le plus de développement technique.

Cette technologie est à la base des cellules solaires photovoltaïques qui ont sérieusement commencé à être étudiées depuis les années 1950 quand la première cellule solaire à base de silicium cristallin, avec un rendement de 6%, a été développée dans les laboratoires Bell. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques pendant des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules solaires trouvèrent leurs premières applications dans l'alimentation des satellites.[3]

1.2 Histoire du solaire photovoltaïques

Parmi les dates marquantes des découvertes sur l'énergie photovoltaïque, citons les suivantes [3] :

1839 : Le physicien français Edmond becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissant cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

1.3 Le soleil

1.3.1 Caractéristiques générales

Le Soleil est une étoile dont l'énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800°K. Son diamètre est d'environ 1391000 km. Elle est placée à 150 millions de km de la terre. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublions pas que la lumière a une vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde [4]. Son volume, pourrait contenir 1300000 Terres. Sa masse est de 333000 fois celle de la Terre ($2 \cdot 10^{30}$ tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes ne représente que le millième du Soleil [5].

Le soleil et le système solaire tournent avec une vitesse d'environ 250 Km/s, il leur faut environ 240 millions d'années pour effectuer le tour de Galaxie (Galaxie : Vaste ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaires, isolé dans l'espace, dont la cohésion est assurée par la gravitation), en traversant des densités variables de Poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre [6]. Sa lumière est 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir) et il est visible à une distance de 60 al (année-lumière). Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des

autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical éthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... [7].

1.3.2 Energie solaire

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire (thermonucléaire: la très haute température, provoque la fusion de noyaux d'atome légers avec un dégagement considérable d'énergie exprimée en Mégawatts) dont la puissance, émise sous forme de photons, est d'environ 3.82×10^{26} Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis-en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes (5×10^{-9}) de cette puissance [8]. Cette bombe thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne) [9]. Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, [10].

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par Convection. La zone de convection est limitée par la photosphère (la surface lumineuse habituellement visible), épaisse d'environ 100 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection.

La taille d'une granule peut dépasser celle de Tamanrasset et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille [10]. Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes

pour arriver sur Terre. Comparativement aux neutrinos, fabriqués en même temps, sortent instantanément et absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre [10].

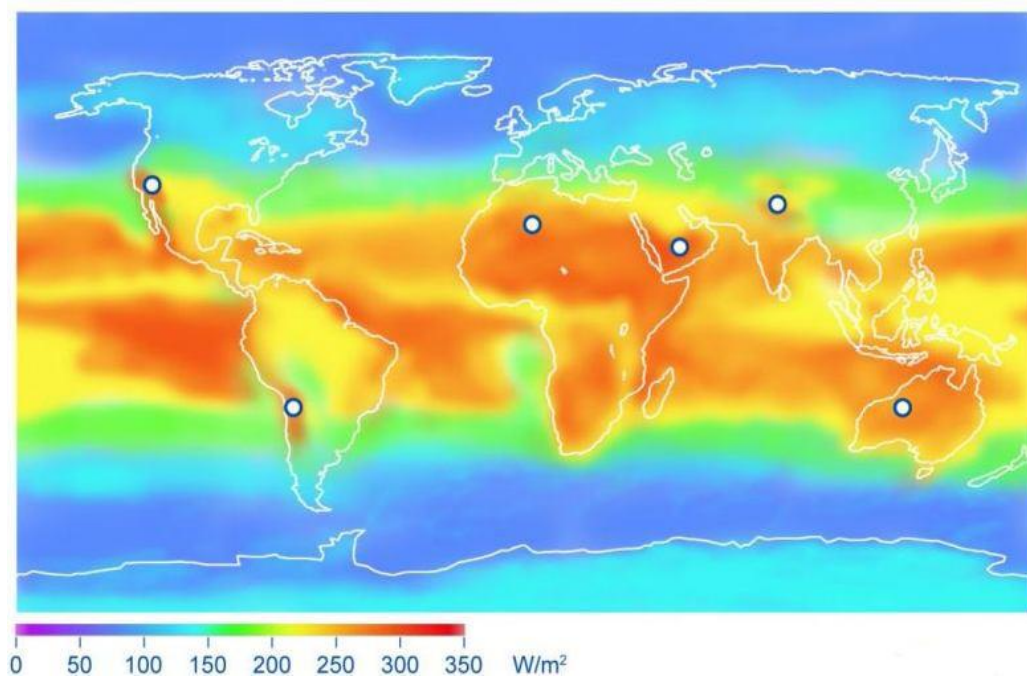


Figure 1.1. Puissance du rayonnement solaire suivant le site géographique [11].

1.3.3 Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés Photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les Satellites, est désignée sous le nom de AM_0 . Sa distribution en énergie est répartie en [12]:

Ultraviolet UV (6.4%)	Visible (48.0%)	Infrarouge IR (45.6%)
$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$

Tableau 1.1 Répartition du spectre solaire.

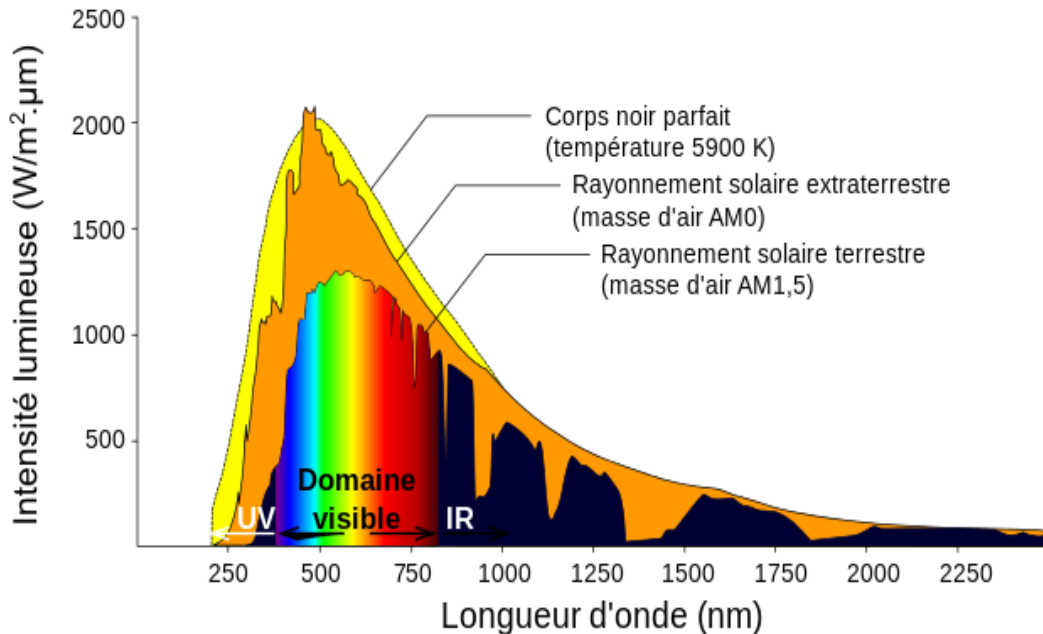


Figure 1.2. Spectre solaire. [13]

1.4 Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations.

On appelle « masse d'air », AM, ou *Air Mass* en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer.

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000 W/m^2 , la correspondant à nos latitudes.

Soleil au zénith (Au niveau de la mer) : AM 1.

Soleil à 48° : AM 1.5.

Rayonnement solaire hors atmosphère : AM 0.

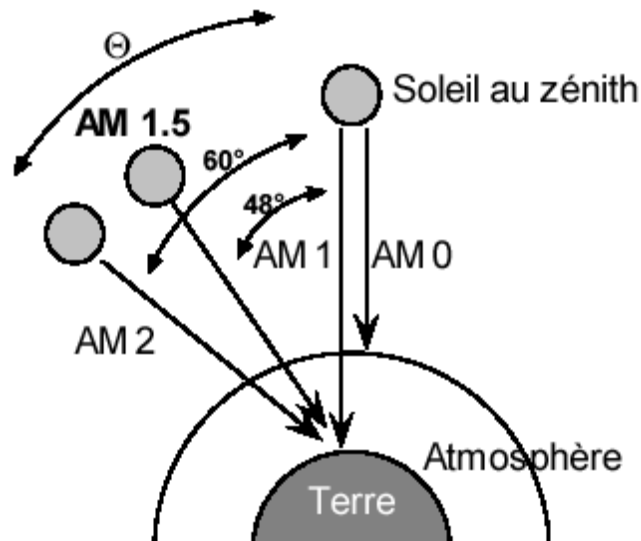


Figure 1.3. Différentes masse d'air AM.

1.5 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 par la relation suivante : [14]

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (1.1)$$

Où

h : est la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : longueur d'onde.

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

1.6 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:

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

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

Avec :

ν : La fréquence de la lumière.

k_b : 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 ($d=1,5.10^8 Km$).

λ : Longueur d'onde de la lumière.

La densité de puissance totale d'un corps noir est déterminée en intégrant l'irradiation spectrale sur toutes les longueurs d'onde qui donne :

$$P_s = \sigma T^4 \quad (1.4)$$

Avec :

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, elle est égale à $5,67. 10^{-8} W/m^2 K^4$

Les équations ci-dessus et la figure (1.4) montrent que la distribution spectrale et la puissance de la lumière émise augmentent en fonction de la température d'un corps noir. Par exemple, à la température ambiante, un émetteur de corps noir va émettre un rayonnement de faible puissance à des longueurs d'onde en majorité supérieur à 1 μm , bien au-delà de la portée visuelle de l'observation humaine. Si le corps noir est chauffé à 3000K, il s'allume en rouge car le spectre de la lumière émis se déplace vers des énergies plus élevées dans le spectre visible. Si la température du filament est en outre augmentée à 6000K, Le rayonnement est émis à des longueurs d'onde dans le spectre visible allant du rouge au violet et la lumière apparaît blanche. Le graphique ci-dessous illustre plus clairement la variation du spectre de corps noir émis en fonction de la température.

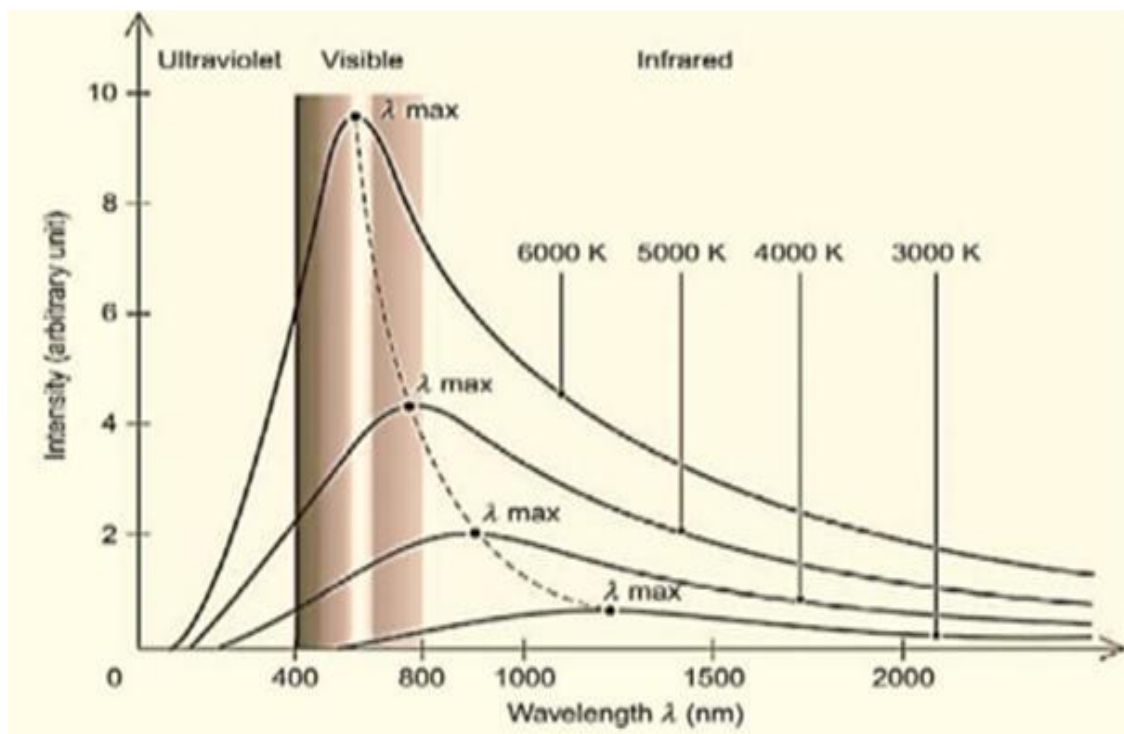


Figure 1.4. Variations du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde. [15]

1.7 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.7.1 Structure des cellules photovoltaïques

Pour obtenir une cellule photovoltaïque il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n dans un matériau de silicium dopé en volume avec un élément tel que le bore qui le rend positif (zone p) et contre-dopé dans une zone superficielle avec du phosphore qui le rend négatif (zone n). Le champ électrique qui règne à la jonction de ces deux zones dopées différemment sépare les charges électriques photo-générées par la lumière solaire (paires d'électrons-trous) et assure leur évacuation du cristal (les électrons par la cathode et les trous par l'anode) sous une tension de l'ordre de 0,5 Volt et un courant continu de l'ordre de 30 mA pour chaque cm^2 de capteur sous un ensoleillement maximum de 1 kW/m^2 . [16]

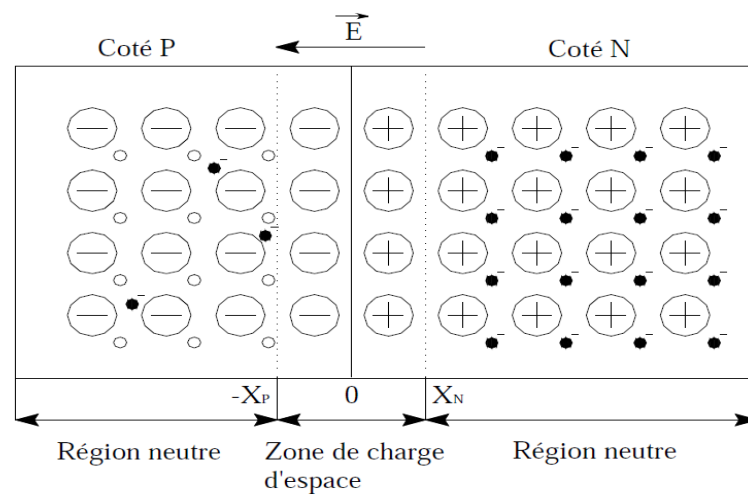


Figure 1.5. Schéma d'une jonction P-N.

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N, le courant d'obscurité dans une telle structure est donné par la formule :

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nk_bT}\right) - 1 \right) \quad (1.5)$$

Le facteur I_s , appelé courant inverse de la jonction P-N, a deux composantes :

- le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le facteur n , compris entre 1 et 2, représentant le coefficient d'idéalité de la jonction P-N, permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction P-N :

- Les composantes dues aux recombinaisons dans la région N et P constituent les courants de la diffusion des électrons et des trous ($n=1$).
- La composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ($n=2$).

1.7.2 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% [17]. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

1.7.3 L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure 1.6 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure 1.6.a). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs

binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure 1.6.b). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

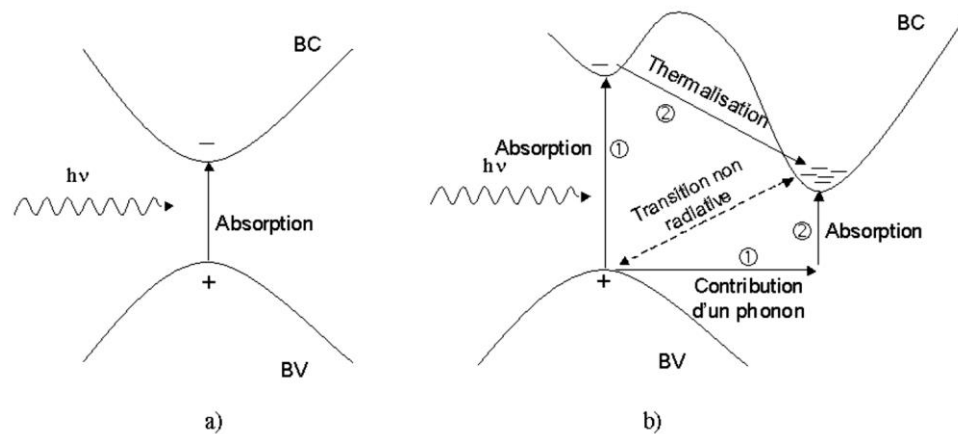


Figure 1.6. Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas (a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas (b) à un gap indirect [18].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure 1.7 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'onde inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'onde plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons

entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

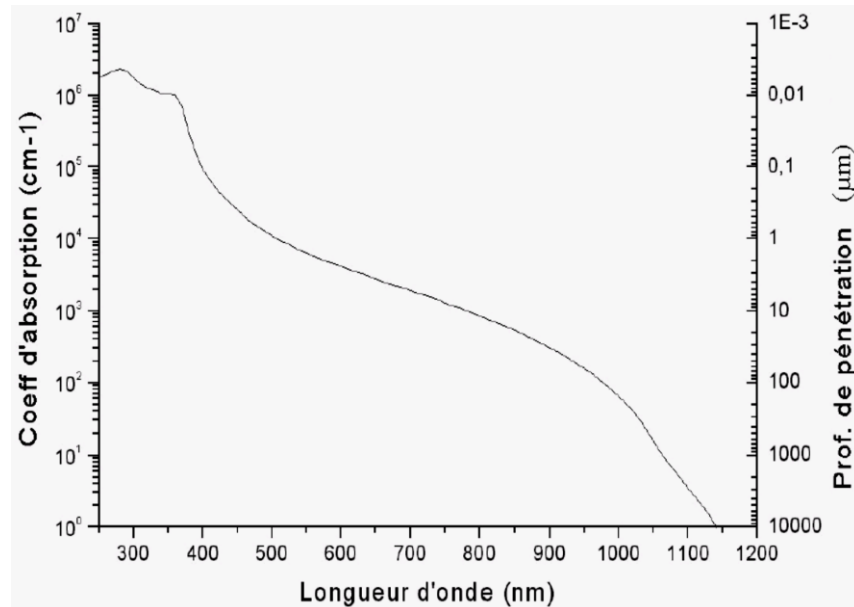


Figure 1.7. Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après [19].

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

1.7.4 Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

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

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

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 1.8.

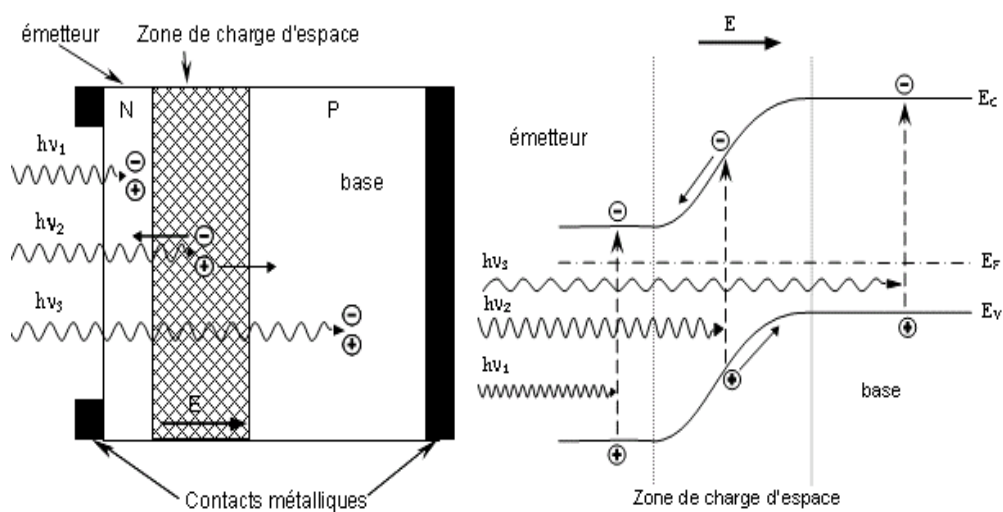


Figure 1.8. Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

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

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

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

1.7.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

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

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (1.6)$$

Avec

I_{ph} : densité de courant photogénéré et I_{obsc} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation 1.6 peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s(\exp(qV/k_bT) - 1) \quad (1.7)$$

Avec,

I_s : courant de saturation de la diode,

q : charge élémentaire,

k_b : constante de Boltzmann,

T : température.

Dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure 1.9.

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

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

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

I_{pm} : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_{pm} : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

η : rendement de conversion (Puissance électrique maximale fournie / Puissance solaire incidente)

$$\eta = \frac{V_{pm}I_{pm}}{P_s S} = \frac{FFV_{oc}I_{sc}}{P_s S} \quad (1.8)$$

Avec

P_s : puissance d'éclairement reçue par unité de surface ;

S : surface de la cellule photovoltaïque.

Facteur de forme $FF = (\text{Puissance maximale délivrée sur la charge}) / (V_{oc} \times I_{sc})$,

$$FF = \frac{V_{pm}I_{pm}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (1.9)$$

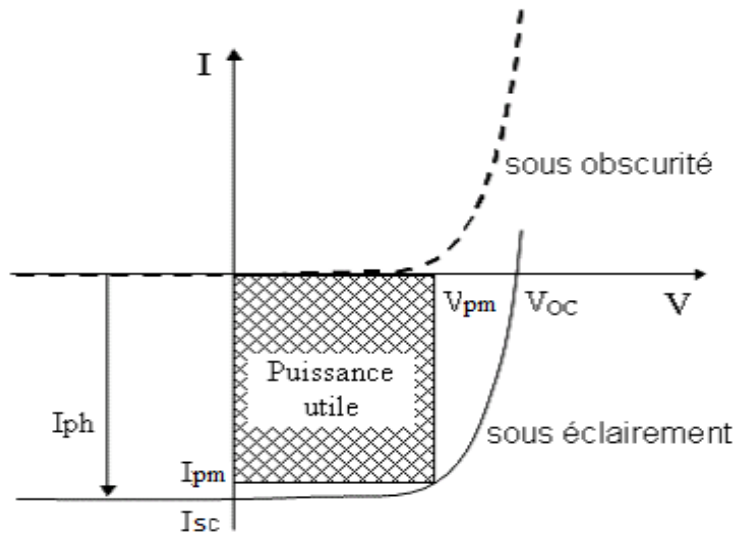


Figure 1. 9. Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque.

1.7.6 Facteur limitant le rendement

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Ces pertes sont évoquées ci-après :

La première limitation correspond aux photons utiles dans la conversion. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron/trou, et sont donc perdus. Un modèle plus détaillé du phénomène permet toutefois de considérer les mécanismes d'absorption assistée par phonons (voir figure 1.6.b). Ceci repousse la limite de l'énergie du gap du silicium de 1,124 eV à 1,052 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon [20].

Les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire électron trou. L'excès d'énergie est perdu par thermalisation. Sous un éclaircissement d'AM1.5, cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium [21].

La tension maximale aux bornes de la cellule (V_{oc}) ne pourra pas dépasser la tension de gap E_g/q . De plus, en raison des recombinaisons Auger, V_{oc} ne pourra dépasser 0,65 V pour le silicium, sauf dans le cas de cellules très minces ($V_{oc}=0,72$ V pour une cellule de 20 μm) [22].

Le facteur de forme FF, même dans le cas d'une cellule idéale, ne peut dépasser 0,89 [9], puisque les équations courant/tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle : $\exp(qV/k_bT)$. Il ne pourra donc pas exister de courbe courant/tension rectangulaire (voir la caractéristique courant/tension de la figure 1.9). Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc.... [23].

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons γ pénétrant. Cette quantité est limitée par le coefficient de réflexion R de la surface de la cellule, qui pondère toutes les équations des courants photo-générés par un coefficient (1-R). Afin de diminuer les réflexions, la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche antireflet.

De manière analogue, le taux d'ombrage tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts métalliques de la face avant. Par contre, pour certaines structures de cellules, le taux d'ombrage est égal à zéro. Il y a une partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés (voir figure 1.8). Ce terme devient important quand la cellule est très fine (<100 μm), et peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière). Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photogénéré. Ce terme tient donc compte des recombinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire).

1.8 Avantages et inconvénients

a Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [24].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques du spectre solaire, le principe de fonctionnement ainsi que les caractéristiques d'une cellule solaire. Ces connaissances sont indispensables pour la partie simulation.

Chapitre 2 Cellules Solaires à Bande Intermédiaire

2.1 Introduction

Les cellules solaires sont fabriquées à partir des semi-conducteurs dont leur capacité à répondre à la lumière est déterminée par leurs gap E_g . Au premier chapitre nous avons vu que les différentes couleurs ont des énergies différentes, et jusqu'à présent aucun semi-conducteur n'a un gap qui peut répondre à la gamme complète de la lumière du soleil, de l'infrarouge à une faible énergie, de la lumière visible à l'ultraviolet à haute énergie, c'est une des limite qui se distingue des autres limites (Voir Figure 2.1).

Le traitement de conversion de l'énergie solaire d'une simple jonction p-n présenté par Shockley et Queisser [25] représente les limites fondamentales atteignables par les cellules solaires à semi-conducteurs qui correspondent à 40,7%.

En 1997, Luque et Marti ont proposé un nouveau concept d'une cellule photovoltaïque, Cellule Solaire à Bande Intermédiaire (IBSC), qui donne un rendement théorique de 63,2% à une pleine concentration de lumière [26][27] ce qui est une amélioration significative du rendement maximal par rapport à une cellule solaire à une simple jonction p-n.

Dans la limite radiative, la IBSC montre un rendement limite de 63,2%, nettement plus élevé que le rendement d'une cellule solaire classique (40,7%), et d'une cellule solaire à double jonction (55,4%), exploité à leur limite radiative. [25][27][28].

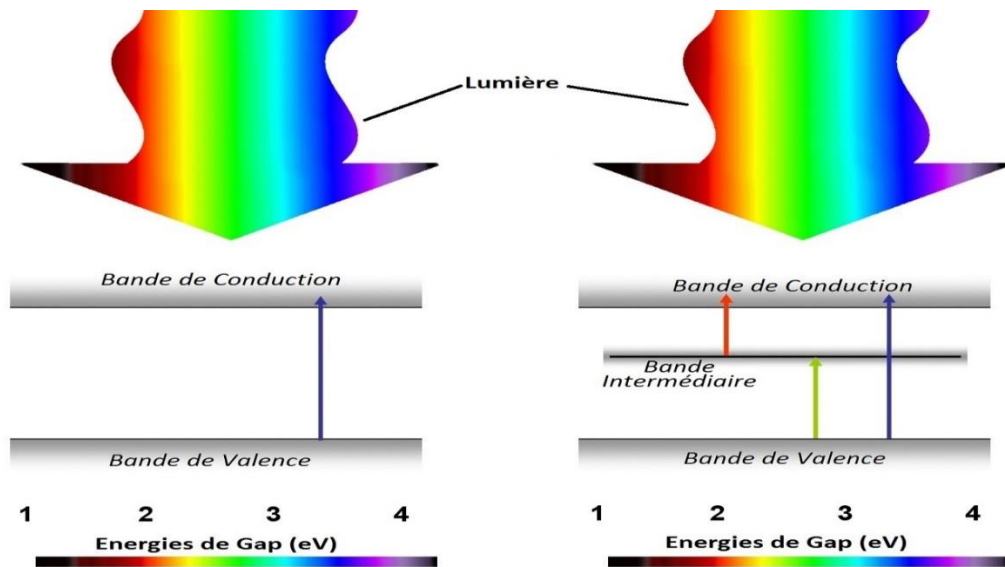


Figure 2.1. Représentation de la conversion du spectre lumineux entre une cellule solaire conventionnelle classique et une cellule solaire à bande intermédiaire.[29]

Dans ce chapitre on présente le modèle de Kronig-Penney pour déterminer les énergies des mini-bandes. La théorie de la limite de la balance détaillée y est développée. En se basant sur cette théorie, nous étudions une cellule solaire conventionnelle à une jonction, une cellule solaire à une bande intermédiaire (IBSC), une cellule solaire à deux Bandes Intermédiaires et enfin une cellule solaire à base de boîtes quantiques.

2.2 Modèle de Kronig-Penney

Nous présentons un modèle de mécanique quantique simple de l'état solide, qui donne directement la structure électronique des superréseaux. Ce modèle a été formulé en premier par R. de L. Kronig et W. G. Penney en 1930 [30], appelé le modèle de Kronig-Penney.

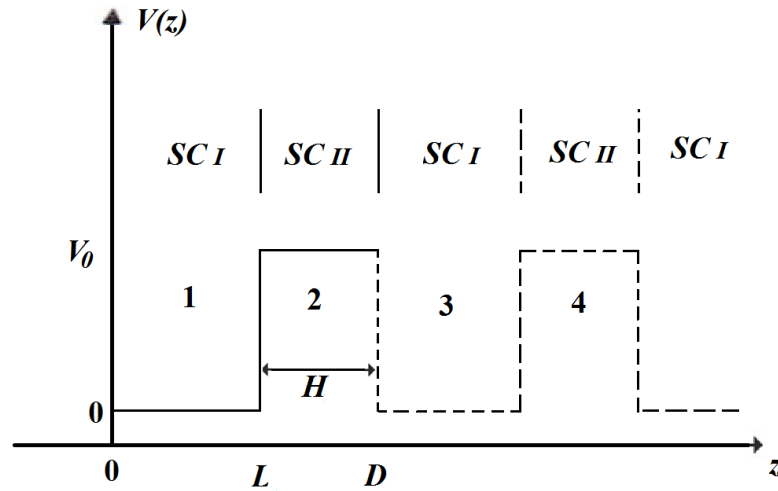


Figure 2.2. Maille élémentaire du superréseau. Les épaisseurs de couche des semi-conducteurs SC I et SC II sont L et H .

La bande de conduction se présente dans la direction du superréseau, comme une succession de puits quantiques de profondeur $V_0 = \Delta E_c$, de largeur L et distante de H . Ce potentiel périodique, de période $D = L + H$, correspond tout à fait au modèle de Kronig-Penney.

Considérons la maille élémentaire du superréseau représentée sur la figure 2.2. L'équation de Schrödinger des électrons est, dans l'approximation de la masse effective, de forme

$$\left(-\frac{\hbar^2 d^2}{2m_e dz^2} + V(z) \right) \Psi(z) = E \Psi(z) \quad (2.1)$$

Avec $V(z) = 0$ et $m_e = m_1$ dans la région I correspondant au semi-conducteur SC_1 et $V(z) = V_0$ et $m_e = m_2$ dans la région II correspondant au semi-conducteur SC_2 . Dans chacune des régions, l'équation (2.1) s'écrit respectivement

Région I

$$\frac{d^2\Psi(z)}{dz^2} + K_1^2\Psi(z) = 0 \quad (2.2)$$

Région II

$$\frac{d^2\Psi(z)}{dz^2} - K_2^2\Psi(z) = 0 \quad (2.3)$$

Dans la mesure où on ne s'intéresse qu'aux états d'énergie $E < V_0$,

$$K_1 = \frac{\sqrt{2m_1E}}{\hbar} \quad (2.4.a)$$

$$K_2 = \frac{\sqrt{2m_2(V_0 - E)}}{\hbar} \quad (2.4.b)$$

Les solutions des équations (2.2 et 2.3) sont respectivement de la forme

$$\Psi_1(z) = A_1 \cos K_1 z + B_1 \sin K_1 z \quad (2.5.a)$$

$$\Psi_2(z) = A_2 \operatorname{ch} K_2(z - L) + B_2 \operatorname{sh} K_2(z - L) \quad (2.5.b)$$

En outre en raison de la périodicité du superréseau, les fonctions d'onde électroniques et leurs dérivées doivent satisfaire au théorème de Bloch.

$$\Psi_3(z) = e^{ikD} \Psi_1(z - D) \quad (2.6)$$

La solution de l'équation de Schrödinger avec les conditions de continuité donnent l'équation aux valeurs propres

$$\cos(KD) = \operatorname{ch}(K_2H) \cdot \cos(K_1L) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{K_2m_1}{K_1m_2} - \frac{K_1m_2}{K_2m_1} \right) \operatorname{sh}(K_2H) \cdot \sin(K_1L) \quad (2.7)$$

Compte tenu des expressions de K_1 et K_2 , l'expression (2.7) est de la forme

$$f(V_0, L, H, m_1, m_2, E) = \cos(KD) \quad (2.8)$$

Dans la mesure où le cosinus est toujours compris entre -1 et +1, l'expression (2.8) détermine les valeurs permises de l'énergie, par la simple condition $|f(V_0, L, H, m_1, m_2, E)| \leq 1$. Cette condition délimite les bandes permises. Au contraire, les bandes d'énergie correspondant à $|f(V_0, L, H, m_1, m_2, E)| > 1$ sont des bandes interdites.

La fonction $f(E)$, est en fonction de l'énergie E pour un potentiel V_0 fixe, il est possible de résoudre cette équation graphiquement et avoir les énergies des mini-bandes. Voir la figure 2.3.

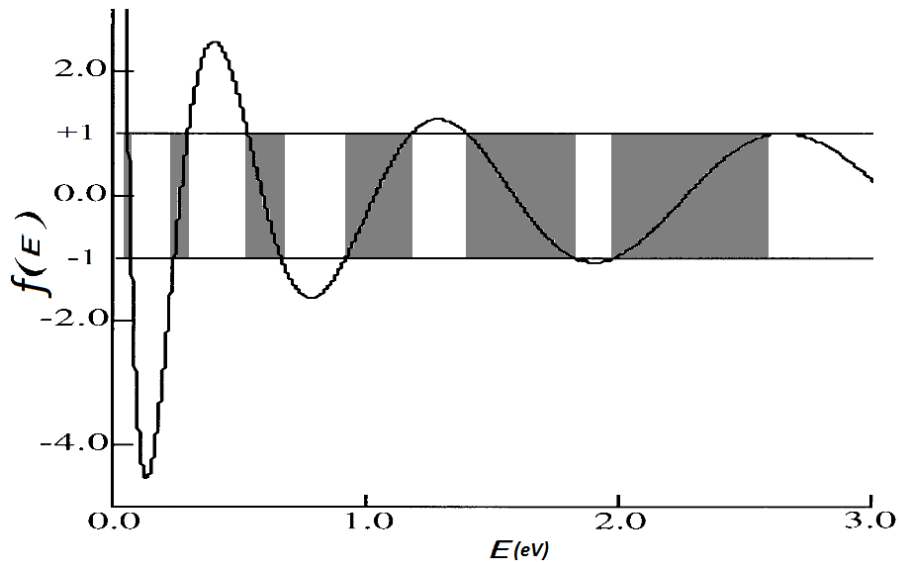


Figure 2.3. Un graphe de $f(E)$, montre les énergies de E qui seront prises selon $f(E)=\pm 1$.

2.3 Cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques

Les cellules solaire à superréseau de boîtes quantiques à une bande intermédiaire (QD-IBSCs) sont le nouveau type des cellules solaires, proposé par Green, Mart, Cuadra and Luque [31][32].

2.3.1 Les boîtes quantiques

Les boîtes quantiques sont des nanoparticules faites d'un matériau semi-conducteur, habituellement dans la gamme de 2 à 10 nm de diamètre. En raison de leur petite taille, elles présentent des propriétés optiques et électroniques uniques, qui sont différentes de celle du matériau massif. Un contrôle précis de la taille des boîtes quantiques permet le contrôle de la longueur d'onde à laquelle elles émettent ou elles absorbent.

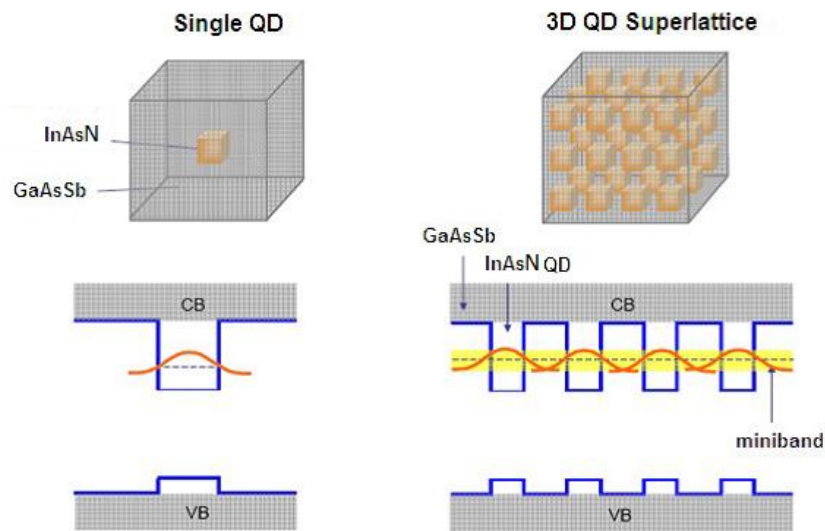


Figure 2.4. Les fonctions d'onde d'une boîte quantique simple et un ensemble de boîtes quantiques couplées.

2.3.2 Calcul de l'énergie d'un réseau de boîtes quantiques

L'énergie de la bande de conduction d'une version idéalisée d'un superréseau de boîtes quantiques tridimensionnelle peut être calculée en utilisant l'approche de la masse effective [33].

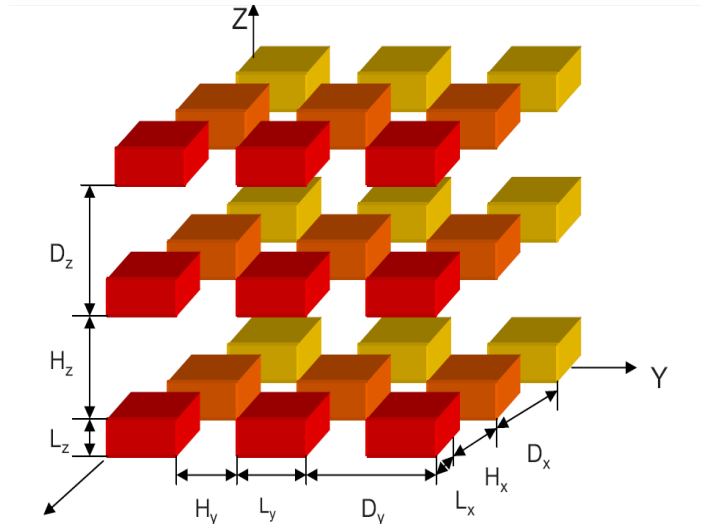


Figure 2.5. Superréseau de boîtes quantiques, avec un réseau de boîtes espacées régulièrement.

La solution de l'équation de Schrödinger des électrons dans l'approximation de la masse effective peut être exprimée en termes de solutions du modèle Kronig-Penney unidimensionnel simple [34]. La relation de dispersion d'énergie est alors obtenu à partir de :

$$E(k) = E_x(k_x) + E_y(k_y) + E_z(k_z) \quad (2.9)$$

En utilisant le modèle de Kronig-Penney pour une solution graphique, on obtiendra les énergies des bandes (voir la figure 2.6).

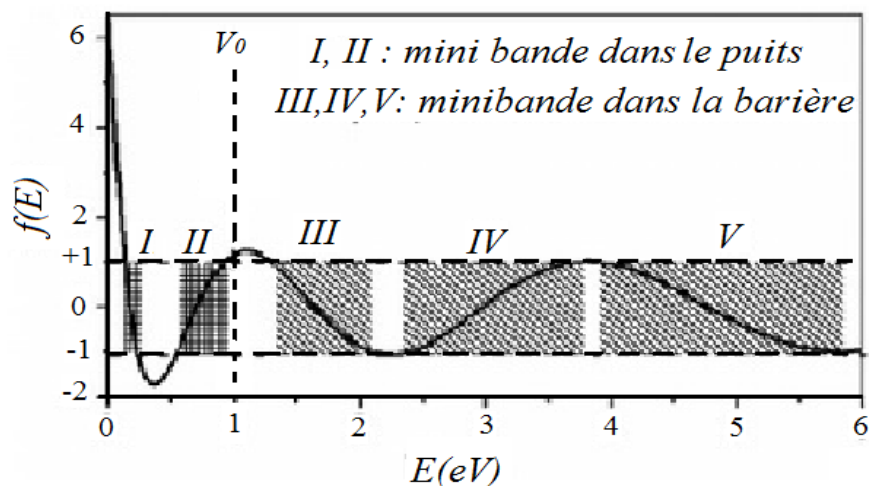


Figure 2.6. Modèle de Kronig-Penney, qui montre les mini-bandes des boîtes quantiques (IB), et de la barrière.

Afin d'avoir un simple calcul, la largeur de la boîte quantique L et la largeur de la barrière H du superréseau à boîtes quantiques sont considérées comme identiques pour chaque direction. Ainsi la distribution des « mini-bandes » pour chaque direction x, y et z est la même. [35].

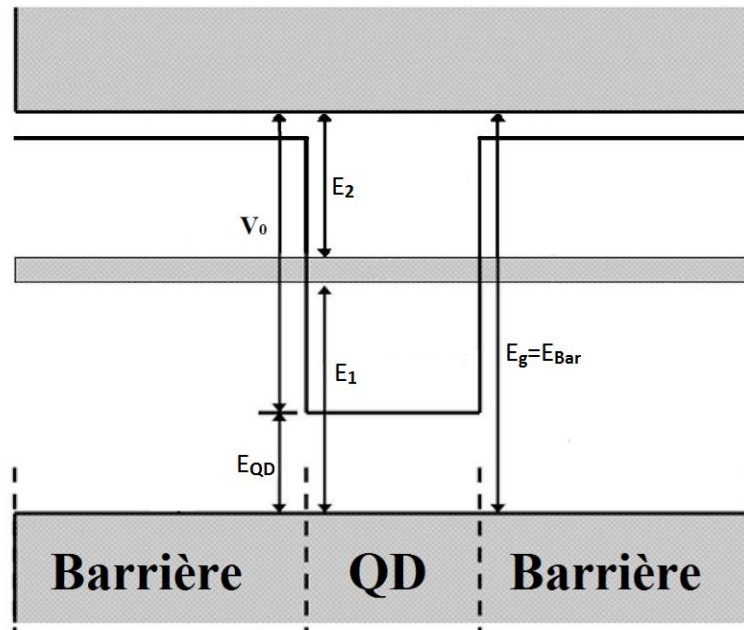


Figure 2.7. Diagramme énergétique montrant les mini-bandes formées dans la structure superréseau de boîtes quantiques.

Les transitions énergétiques sont données par [35]

$$E_1 = E_{QD} + (3 \cdot E_{QD1}) \quad (2.10.a)$$

$$E_2 = E_{bar} - E_1 \quad (2.10.b)$$

$$E_g = E_1 + E_2 \quad (2.10.c)$$

Où E_{QD1} représente le premier niveau de quantification dans le puits donné par le modèle de Kronig-Penney à une dimension.

2.4 Le Flux

Pour effectuer ce calcul, nous modélisons le soleil comme un corps noir qui a une température de surface $T_s = 6000$ K. Par conséquent, les flux de photons et d'énergie émis dans la gamme d'énergie E_1 et E_2 sont donnés par la loi de Planck [36]:

$$\dot{N} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_1}^{E_2} \frac{E^2}{e^{\left(\frac{E}{k_b T}\right)} - 1} dE \quad (2.11.a)$$

$$\dot{E} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_1}^{E_2} \frac{E^3}{e^{\left(\frac{E}{k_b T}\right)} - 1} dE \quad (2.11.b)$$

Où, T est la température k_b est la constante de Boltzmann. En faisant une intégration sur l'ensemble des énergies (Equation.2.11.b), on obtient la puissance totale émise par le soleil $P_s = \sigma_s T_s^4$, avec σ_s est la constante de Stefan.

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5 k_b^4}{15 h^3 c^2} \quad (2.12)$$

Théoriquement, à la surface de l'atmosphère terrestre, la puissance d'entrée qui tombe sur un dispositif photovoltaïque à pleine concentration est égale à $P_s = 7.335 \times 10^7$ (W/m²).

2.5 Théorie de la limite de la balance détaillée

En 1961, Shockley et Queisser ont publié un article historique visant à déterminer une limite justifiable du rendement théorique supérieure [26]. Avant cela, le traitement du rendement photovoltaïque était basé sur des valeurs empiriques pour les constantes décrivant les caractéristiques du dispositif de conversion. En général, ils étaient tous assez cohérents avec les valeurs observées et ont été acceptés comme des limites théoriques. Shockley et Queisser réalisent qu'il existe une limite basée sur une conséquence de la nature des processus atomiques appelant cette limite supérieure du rendement la limite de balance détaillée (Detailed Balance Limit).

Pour déterminer la limite de la balance détaillée, on définit le rendement η comme étant le rapport entre la puissance délivrée P_{out} et l'énergie solaire incidente tombant sur le dispositif P_s .

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_s} \quad (2.13)$$

2.5.1 Limite du rendement d'une cellule solaire classique

Dans l'approche de Shockley et Queisser, le courant électrique produit par le processus de génération-recombinaison des photons est donnée par

$$J = q(\dot{N}_g - \dot{N}_r) \quad (2.14)$$

Où \dot{N}_g est le flux de photons absorbés, et \dot{N}_r est le flux de photons réémis par la cellule à semi-conducteur.

Une forme généralisée de flux de photons similaire à l'équation (2.11.a) sera utilisée pour déterminer la densité de courant due aux flux de photons absorbés et réémis entre les niveaux d'énergie E_1 et E_2 pour un corps noir, elle est donné par

$$N(E_1, E_2, T, \mu) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_1}^{E_2} \frac{E^2}{e^{\left(\frac{E-\mu}{k_b T}\right)} - 1} dE \quad (2.15)$$

La tâche consiste maintenant à déterminer la puissance de sortie délivrée par la cellule solaire. Sachant qu'un circuit délivre une puissance donnée par

$$P(V) = J(V) \cdot V \quad (2.16)$$

Avec $J(V)$ la densité de courant à une certaine tension V . Donc, la tâche est réduite à trouver la densité de courant maximale pour une certaine tension V , qui délivre une puissance maximale.

a Hypothèses du bilan détaillé du rendement

Ce qui suit est une liste d'hypothèses qui sont utilisées dans la détermination du bilan détaillé du rendement [26][36]:

1. Le soleil et la cellule solaire se comportent comme un corps noir qui fonctionne à des températures $T_s=6000\text{K}$ et $T_a=300\text{K}$ respectivement (la cellule est supposée être à la température ambiante $T_a = 300\text{K}$).
2. Uniquement les transitions radiatives se produisent entre les bandes.
3. Tous les photons d'énergies supérieures à la plus basse énergie de gap seront absorbés.
4. La mobilité des porteurs est infinie et en conséquence, Les quasi-niveaux de Fermi sont constants tout au long de la cellule de sorte que $\mu=qV$.
5. Une seule paire électron-trou est créée par un photon.
6. Un miroir parfait est situé à l'arrière du dispositif afin que le rayonnement fasse un double passage à travers la cellule, et ne peut s'échapper qu'à travers la zone avant de l'éclairage.
7. Le flux de photons net (nombre de photons incidents moins le nombre de photons réémis) est égal au nombre de paires de porteurs de charge recueillies sur les contacts (hypothèse du bilan détaillé).

Nous savons que tous les photons avec une énergie plus grande que l'énergie de gap E_g , sont absorbés dans la cellule, et permettront de créer une paire électron-trou (hypothèses 3 et 5). Tous les photons avec une énergie inférieure à l'énergie de gap ne seront pas absorbés dans la cellule. Par conséquent, le flux de photons absorbés dans la cellule sera égal aux électrons excités dans la bande de conduction. Ce flux de photons absorbés sur l'ensemble de l'hémisphère (hypothèses 7) est $N(E_g, \infty, T_s, 0)$.

Cependant, un certain nombre de photons sera réémis, et des électrons (même nombre de photons réémis) se recombinent avec les trous dans la bande de valence. Ces électrons ne contribueront pas au courant. Les photons réémis peuvent donc être calculés par $N(E_g, \infty, T_a, \mu)$ sur l'ensemble de l'hémisphère (hypothèse 6).

La densité de courant total à travers le dispositif peut être alors déterminée par le flux d'électrons net multiplié par la charge élémentaire q ,

$$J(E_g, V) = q[N(E_g, \infty, T_s, 0) - N(E_g, \infty, T_a, qV)] \quad (2.17)$$

Où nous avons fait usage de la fonction définie par l'équation (2.15) et ses variables.

Le premier terme du côté droit de l'équation représente la densité de courant générée par le rayonnement absorbé par la cellule à la température caractéristique T_s , le second terme de l'équation représente la recombinaison des porteurs à travers l'émission des photons à la température caractéristique T_a contenant le potentiel qV qui ne contribue pas à la densité de courant totale. [28][37][38].

On voit que c'est une fonction de, E_g et de V . Pour chaque valeur de, E_g il y aura une tension V dans la gamme de 0 à E_g qui va maximiser la puissance de sortie. En final, le rendement peut être donné par

$$\eta(E_g, V) = \frac{J(E_g, V) \cdot V}{P_s} \quad (2.18)$$

2.6 Balance détaillée d'une cellule solaire à une bande intermédiaire

2.6.1 Définition d'une cellule solaire à bande intermédiaire

Dans une cellule solaire à bande intermédiaire (IBSC), il y a une bande d'états d'électrons discrète qui joue le rôle d'une bande intermédiaire, située dans la bande interdite principale du matériau de la cellule solaire. Cette bande permet aux électrons de transiter de la bande de valence à la bande de conduction dans un processus de deux étapes. La première étape est la transition qui se produit entre la bande de valence et la bande de conduction, la deuxième étape se fait entre la bande de valence et la bande intermédiaires et entre la bande intermédiaire et la bande de conduction. Ce qui fait, qu'avec une seule bande intermédiaire on a trois transitions d'électrons (voir figure 2.8). Idéalement, la bande intermédiaire doit être couplée à la bande de valence et à la bande de conduction optiquement uniquement, ce qui signifie que les électrons ne devraient être autorisés qu'à faire des transitions vers ou depuis la bande intermédiaire tout en absorbant ou en émettant un photon [36, 39]. L'amélioration des performances de cette conception par rapport à la cellule solaire classique est de permettre une photo-conversion d'une plus grande quantité du spectre solaire.

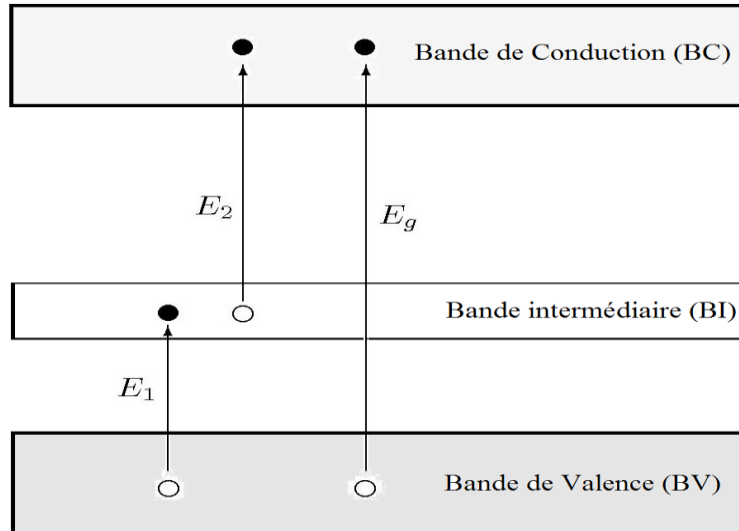


Figure 2.8. Représentation des transitions entre les bandes d'une cellule solaire à une bande intermédiaire.

2.6.2 Physique d'une cellule solaire à bande intermédiaire

Dans une IBSC où il y a une bande intermédiaire située entre la bande de conduction et la bande de valence, un électron de la bande de valence peut être excité pour passer soit à la bande intermédiaire ou à la bande de conduction. En outre, un électron situé dans la bande intermédiaire peut être excité et passer à la bande de conduction. Au total, il y a trois transitions énergétiques dans ce dispositif, E_1 , E_2 et E_g . Avec, E_1 représente la transition de la bande de valence à la bande intermédiaire, E_2 représente la transition de la bande intermédiaire à la bande de conduction, et E_g représente le gap classique entre la bande de valence et la bande de conduction.

Les deux transitions intermédiaires E_1 et E_2 sont indépendantes l'une de l'autre, tandis que la transition de la bande interdite E_g est en fonction de ces deux transitions intermédiaires, $E_g = E_1 + E_2$, en considérant $E_1 < E_2 < E_g$.

2.6.3 Principe de fonctionnement d'une IBSC

Le bon fonctionnement d'une IBSC nécessite que les porteurs de charge ne doivent pas être extraits à partir de la bande intermédiaire [28]. Étant donné que les porteurs de charge seraient extraits uniquement des bandes de valence et de conduction, la IBSC serait exploitée de façon similaire à une cellule solaire classique dans le sens où la tension de fonctionnement serait proportionnelle à E_g .

Lorsque l'IBSC est exposée à la lumière, le niveau d'énergie de Fermi se divisera par le nombre de bande au total. Dans le cas d'une bande intermédiaire, le niveau d'énergie de Fermi se divisera en trois potentiels chimiques μ_c , μ_i , et μ_v qui représentent des solutions pour l'état stable qui permettent le traitement de la dynamique des charges dans les bandes de conduction, intermédiaire, et la bande de valence, respectivement. (Voir la figure 2.9).

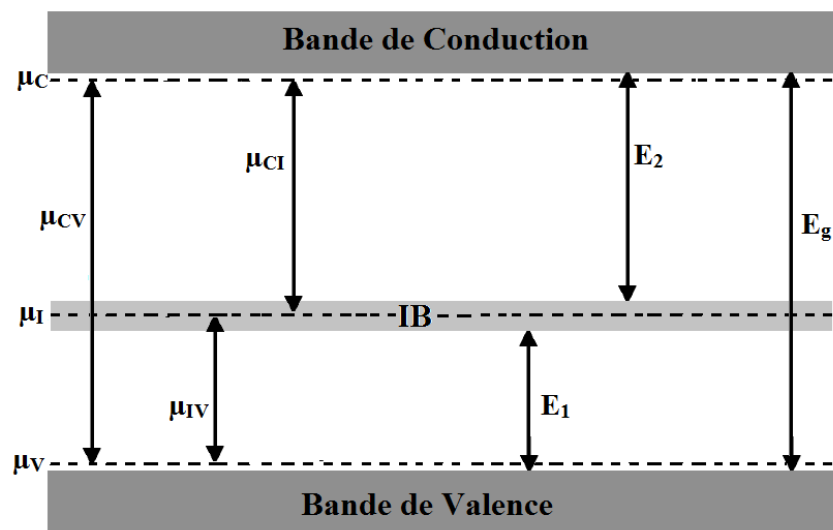


Figure 2.9. Représentation des trois potentiels chimiques (μ_{ci} , μ_{iv} et μ_{cv}).

Chaque bande dans la IBSC doit posséder son propre potentiel chimique. Ces derniers sont reliés par les relations suivantes

$$\mu_{ci} = \mu_c - \mu_i \quad (2.19.a)$$

$$\mu_{iv} = \mu_i - \mu_v \quad (2.19.b)$$

$$\mu_{cv} = \mu_{ci} + \mu_{iv} = qV \quad (2.19.c)$$

2.6.4 La limite du rendement d'une IBSC à une IB

En utilisant les hypothèses de l'IBSC, les calculs de la limite du rendement seront effectués similairement au calcul du bilan détaillé élaboré par Shockley et Queisser.

a Hypothèses du bilan détaillé du rendement pour une IBSC

La liste suivante représente les hypothèses utilisées pour effectuer le calcul de la limite du rendement pour une IBSC [28]:

1. La cellule solaire absorbe le rayonnement du corps noir à une température de $T_s = 6000$ K, et émet un rayonnement du corps noir à la température ambiante $T_a = 300$ K.
2. Seules les transitions radiatives se produisent entre les bandes.
3. Tous les photons d'énergies supérieures à la plus basse énergie de gap seront absorbés.
4. La mobilité des porteurs est infinie et par conséquent, les quasi-niveaux de Fermi sont constants dans toute la cellule de sorte que $\mu_{cv} = qV$.
5. Seule une paire d'électron-trou est créée par un photon.
6. Un miroir parfait est situé à l'arrière du dispositif afin que le rayonnement fasse un double passage à travers la cellule et ne peut s'échapper qu'à travers la zone avant de l'éclairage.
7. Aucun porteur n'est extrait de la bande intermédiaire.
8. Le flux net de photons (nombre de photons incident moins le nombre de photons émis) est égal au nombre de paires de porteurs de charge rassemblées aux contacts (hypothèse du bilan détaillé).

b Paramètres caractéristiques d'une IBSC à une IB

Pour trouver la limite du rendement, notre tâche consiste à trouver les paramètres caractéristiques de la IBSC qui maximisent la puissance délivrée. Pour cela, les photons avec une énergie $E_1 \leq h\nu < E_2$ seront absorbés pour faire transiter un électron à la bande intermédiaire et créer un trou dans la bande de valence, l'excès d'énergie au-delà de la transition énergétique E_1 sera perdu à cause de la thermalisation. Cela fait une absorption d'un photon avec $E_1 < h\nu < E_2$ qui a le même effet qu'un photon absorbé avec une énergie $h\nu = E_1$. Les photons avec une énergie $E_2 \leq h\nu < E_g$ seront absorbés, pour faire transiter un électron à partir de la bande intermédiaire à la bande de conduction, l'excès d'énergie au-delà de la transition énergétique E_2 sera perdu à cause de la thermalisation. Cela fait une absorption d'un photon avec $E_2 < h\nu < E_g$ qui a le même effet qu'un photon absorbé avec une énergie $h\nu = E_2$. Les photons avec une énergie $h\nu \geq E_g$ sont absorbés pour faire transiter un électron à la bande de conduction et créer un trou dans la bande de valence, l'excès d'énergie au-delà de la transition énergétique E_g sera perdu à cause de la thermalisation. Cela fait une absorption d'un photon avec $h\nu > E_g$ qui a le même effet qu'un photon absorbé avec une énergie $h\nu = E_g$.

Le flux de photons net est égal au nombre de paires de porteurs de charge collectées au niveau des contacts. La densité de courant totale peut être écrite comme

$$J(V) = q[N(E_g, \infty, T_s, 0) - N(E_g, \infty, T_a, qV)] \quad (2.20)$$

$$+ q[N(E_2, E_g, T_s, 0) - N(E_2, E_g, T_a, \mu_{Cl})]$$

Où nous avons fait usage de la fonction définie par l'équation (2.15) et ses variables.

Le premier terme entre parenthèses du côté droit de l'équation représente la densité de courant générée par la transition des électrons à partir de la bande de valence à la bande de conduction moins la recombinaison due à la transition inverse. Le second terme entre parenthèses de l'équation représente la densité de courant générée par la transition des électrons à partir de la bande intermédiaire à la bande de conduction moins la recombinaison due à la transition inverse.

Dans les deux termes entre parenthèses, la IBSC absorbe le rayonnement du soleil à la température caractéristique T_s , et réémet un rayonnement à la température caractéristique T_a qui ne contribue pas à la densité de courant totale.

Pour chaque configuration d'énergie E_1 et E_2 , il existe une tension V qui maximise la puissance de sortie de l'IBSC donnée par l'équation (2.16).

Cependant, l'équation de la densité de courant contient un potentiel chimique supplémentaire μ_{CI} , dont il faut lui attribuer une valeur. Le bon fonctionnement d'une IBSC nécessite qu'il n'y ait pas de courant extrait de la bande intermédiaire, le courant entrant dans la bande intermédiaire doit être égal au courant sortant de la bande intermédiaire. Cela définit la contrainte suivante

$$[N(E_2, E_g, T_s, 0) - N(E_2, E_g, T_a, \mu_{CI})] = [N(E_1, E_2, T_s, 0) - N(E_1, E_2, T_a, \mu_{IV})] \quad (2.21)$$

La résolution du système d'équations (2.21) et (2.19.c) permet de déterminer les potentiels chimiques μ_{CI} et μ_{IV} d'où le calcul du courant donné par l'équation (2.20), de la puissance donnée par l'équation (2.16) et du rendement donné par l'équation (2.18).

2.7 Cellule solaire à deux bandes intermédiaires

2.7.1 Balance détaillée d'une cellule solaire à deux bandes intermédiaires

Dans une IBSC à quatre bandes, où il y a deux bandes intermédiaires situées entre la bande de valence et la bande de conduction au lieu d'une seule bande intermédiaire (IB) comme dans le système précédent, Il y a six types de transitions énergétiques dans ce dispositif, E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 et E_g . E_1 représente la transition de la bande de valence à la première bande intermédiaire, E_2 représente la transition de la première bande intermédiaire à la seconde bande intermédiaire, E_3 représente la transition de la seconde bande intermédiaire à la bande de conduction, E_4 représente la transition de la bande de valence à la seconde bande intermédiaire, E_5 représente la transition de la première bande intermédiaire à la bande de conduction, et E_g représente la bande gap classique entre la bande de valence et la bande de conduction. Voir figure 2.10.

Les trois transitions intermédiaires E_1 , E_2 , et E_3 sont indépendantes les unes des autres, tandis que les trois autres transitions E_4 , E_5 , et E_g sont en fonction de ces transitions intermédiaires tel que :

$$E_4 = E_1 + E_2 \quad (2.22.a)$$

$$E_5 = E_2 + E_3 \quad (2.22.b)$$

$$E_g = E_1 + E_2 + E_3 \quad (2.22.c)$$

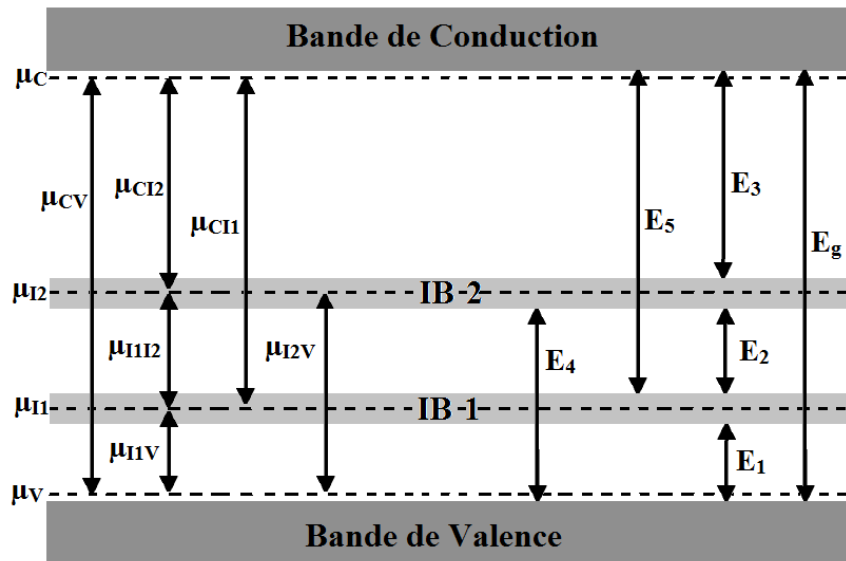


Figure 2.10. Représentation des transitions dans une cellule solaire à deux bandes intermédiaires.

Comme dans la IBSC avec une seule bande intermédiaire, à l'exposition de la lumière, le niveau d'énergie de Fermi se divisera par le nombre totale des bandes. Dans ce cas, on aura quatre potentiels chimiques séparés, μ_C , μ_{I1} , μ_{I2} et μ_V qui représentent des solutions pour l'état stable tel que

$$\mu_{CI1} = \mu_C - \mu_{I1} \quad (2.23.a)$$

$$\mu_{CI2} = \mu_C - \mu_{I2} \quad (2.23.b)$$

$$\mu_{I1I2} = \mu_{I1} - \mu_{I2} \quad (2.23.c)$$

$$\mu_{I1V} = \mu_{I1} - \mu_V \quad (2.23.d)$$

$$\mu_{I2V} = \mu_{I2} - \mu_V \quad (2.23.e)$$

a Paramètres Caractéristiques d'une IBSC à deux IB

En utilisant les mêmes caractéristiques et les hypothèses pour une IBSC contenant une bande intermédiaire, nous pouvons effectuer les calculs de la limite du rendement pour une IBSC contenant deux bandes intermédiaires. La seule différence avec l'analyse précédente, est qu'il y a plus de variables et plusieurs équations à résoudre. Dans notre étude on a pris les transitions énergétique dans cet ordre, $E_1 < E_2 < E_4 < E_3 < E_5 < E_g$. Pour une IBSC à deux IB idéal, la densité de courant J dépend du nombre de photons absorbés moins le nombre de photons réémis par la cellule. Elle peut être exprimée par [35]

$$J(V) = J_{cv}(V) + J_{ci1}(\mu_{CI1}) + J_{ci2}(\mu_{CI2}) \quad (2.24)$$

Où J_{cv} est la densité de courant générée par la transition des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, et peut être décrite par

$$J_{cv}(V) = q[N(E_g, \infty, T_s, 0) - N(E_g, \infty, T_a, qV)] \quad (2.25.a)$$

J_{ci1} est la densité de courant produite par la transition des électrons de la première bande intermédiaire à la bande de conduction, et peut être donnée par

$$J_{ci1}(\mu_{CI1}) = q[N(E_5, E_g, T_s, 0) - N(E_5, E_g, T_a, \mu_{CI1})] \quad (2.25.b)$$

J_{ci2} est la densité de courant généré par la transition des électrons de la deuxième bande intermédiaire à la bande de conduction, et peut être exprimée par

$$J_{ci2}(\mu_{CI2}) = q[N(E_3, E_5, T_s, 0) - N(E_3, E_5, T_a, \mu_{CI2})] \quad (2.25.c)$$

L'équation de la densité de courant contient deux potentiels chimiques supplémentaire μ_{CI1} et μ_{CI2} . Le bon fonctionnement d'une IBSC nécessite, premièrement, qu'il n'y ait pas de courant extrait des deux bandes intermédiaires, les courants entrants ($J_{ci1} + J_{ci2}$) dans les bandes intermédiaires doivent être égaux aux courants sortants ($J_{vi1} + J_{vi2}$) des bandes intermédiaires. Le potentiel chimique (μ_{cv}) doit être égal à la somme des quasi-niveaux de fermi. Cela définit les contraintes suivantes :

$$J_{vi1} + J_{vi2} = J_{ci1} + J_{ci2} \quad (2.26)$$

Deuxièmement, Le potentiel chimique μ_{i2v} doit être égal à la somme des potentiels chimiques $\mu_{i1v} + \mu_{i1i2}$. Le potentiel chimique μ_{ci1} doit être égal à la somme des potentiels chimiques $\mu_{i1i2} + \mu_{ci2}$. Finalement, Le potentiel chimique μ_{cv} doit être égal à la somme des quasi-niveaux de fermi $\mu_{i1v} + \mu_{i1i2} + \mu_{ci2}$.

Cela définit les contraintes suivantes

$$q[N(E_1, E_2, T_s, 0) - N(E_1, E_2, T_a, \mu_{i1v})] + q[N(E_4, E_3, T_s, 0) - N(E_4, E_3, T_a, \mu_{i2v})]$$

$$= \tag{2.27}$$

$$q[N(E_3, E_5, T_s, 0) - N(E_3, E_5, T_a, \mu_{ci2})] + q[N(E_5, E_g, T_s, 0) - N(E_5, E_g, T_a, \mu_{ci1})]$$

$$\mu_{i2v} = \mu_{i1v} + \mu_{i1i2} \tag{2.28.a}$$

$$\mu_{ci1} = \mu_{i1i2} + \mu_{ci2} \tag{2.28.b}$$

$$\mu_{cv} = qV = \mu_{i1v} + \mu_{i1i2} + \mu_{ci2} \tag{2.28.c}$$

La résolution de ce système d'équations nous permet de déterminer les différents potentiels chimiques d'où les caractéristiques de la cellule : la densité de courant, la puissance et le rendement.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure électronique des bandes d'une cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques et la théorie de la balance détaillée utilisée dans l'étude et la détermination des caractéristiques principales d'une cellule solaire idéale.

Le but de cette étude consiste à démontrer qu'une cellule solaire contenant une ou deux bandes intermédiaires pourrait augmenter le rendement des cellules solaires de façon considérable.

Chapitre 3 Simulations

3.1 Introduction

La simulation numérique est un outil d'analyse et d'étude de plus en plus utilisé dans de nombreux domaines de recherche et développement tels que la mécanique, la science des matériaux, la physique théorique, la mécanique quantique...etc. Mise à la portée de l'ensemble des entreprises quels que soient leur secteur et leur taille, elle peut être un outil majeur de progrès technique et de gain économique.

Les calculs de simulation reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques. Ils sont donc une adaptation aux moyens numériques des modèles mathématiques. Elle permet de prédire le comportement du sujet étudié sans avoir à passer par la construction de prototypes ou la réalisation d'essais réels, coûteux et/ou difficiles à mettre en place, ce qui est un avantage essentiel en matière de coûts de production, notamment dans les domaines innovants.

Notre simulation repose sur MATHCAD, qui est un logiciel mathématique à interface très maniable, qui nous a permis de résoudre, d'analyser et de partager nos calculs techniques. On a aussi utilisé MATLAB pour ses fonctions graphiques à réaliser les Contours. Il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

Dans ce chapitre, on donne les résultats et les graphiques calculés à partir de notre étude du chapitre précédent. Nous allons présenter les caractéristiques des cellules solaires à simple jonction, à une bande intermédiaire à deux bandes intermédiaires et on termine par une cellule solaire avec un superréseau de boîtes quantiques à une bande intermédiaire de la structure $\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1} / \text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$.

3.2 Cellule solaire à une simple jonction

3.2.1 Rendement maximal en fonction du gap

Suivant les étapes décrites dans le chapitre 2, nous avons calculé la variation du rendement en fonction du gap. Le rendement maximal est environ 40,7% à pleine concentration du soleil, pour un gap de 1,1 eV. Si l'énergie de gap dans la cellule était plus grande, alors une bonne partie des photons ne serait pas absorbée et le rendement diminuera. Et si l'énergie de gap était trop petite, la plupart des photons seraient absorbés mais une bonne partie de leur énergie serait gaspillée par la thermalisation et la génération des phonons, donc le rendement diminuera aussi.

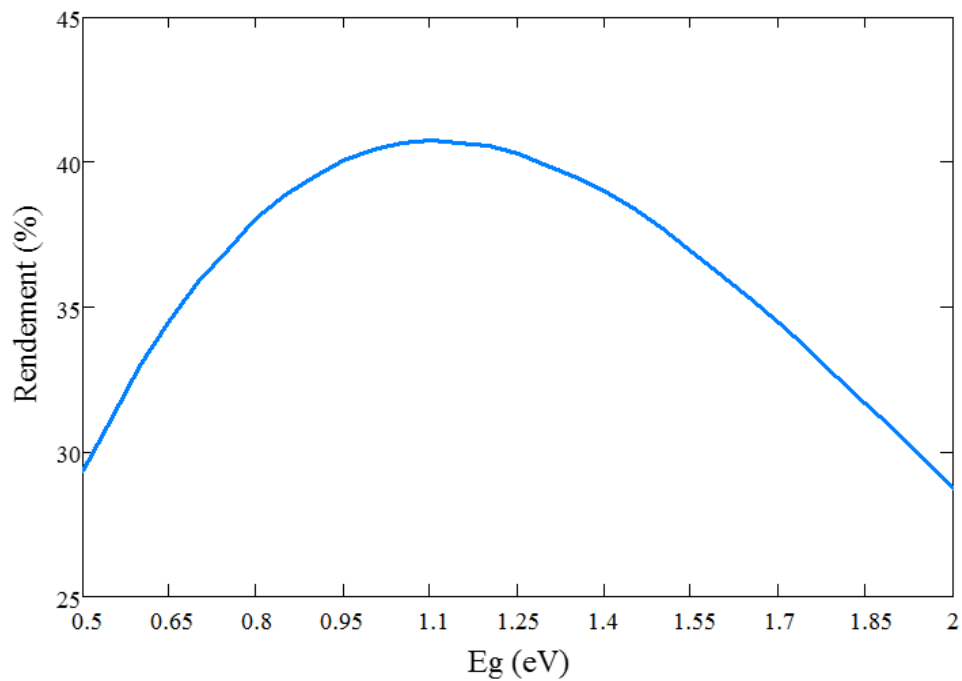


Figure 3.1. Représentation du rendement maximal d'une simple jonction en fonction du gap E_g .

3.2.2 Caractéristiques courant-tension et puissance

La figure 3.2 représente la variation du courant en fonction de la tension V . Avec une cellule solaire à simple jonction on peut obtenir un courant maximum $J_{sc}=63,277$ mA/cm².

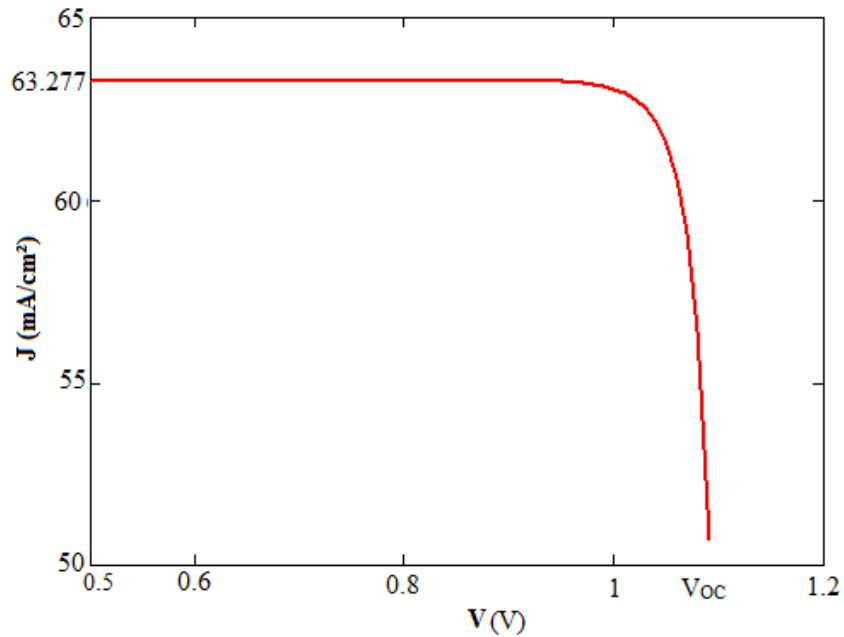


Figure 3.2. Représentation de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à simple Jonction.

Dans la figure 3.3 on représente la puissance de sortie qui peut être délivrée par une cellule à simple jonction. La puissance maximale est égale à $P_{out}=64,609$ mW/cm².

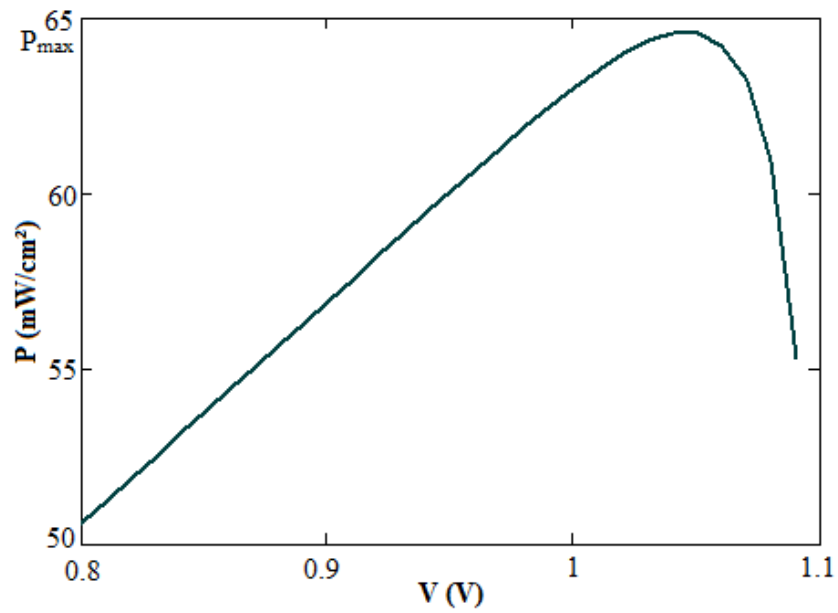


Figure 3.3. Représentation graphique de la puissance de sortie P en fonction de la tension V d'une cellule à simple Jonction.

3.2.3 Facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre qui dépend de la qualité de la jonction pn, on le représente dans la figure 3.4.

$$FF = \frac{J_{pm} \cdot V_{pm}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.1)$$

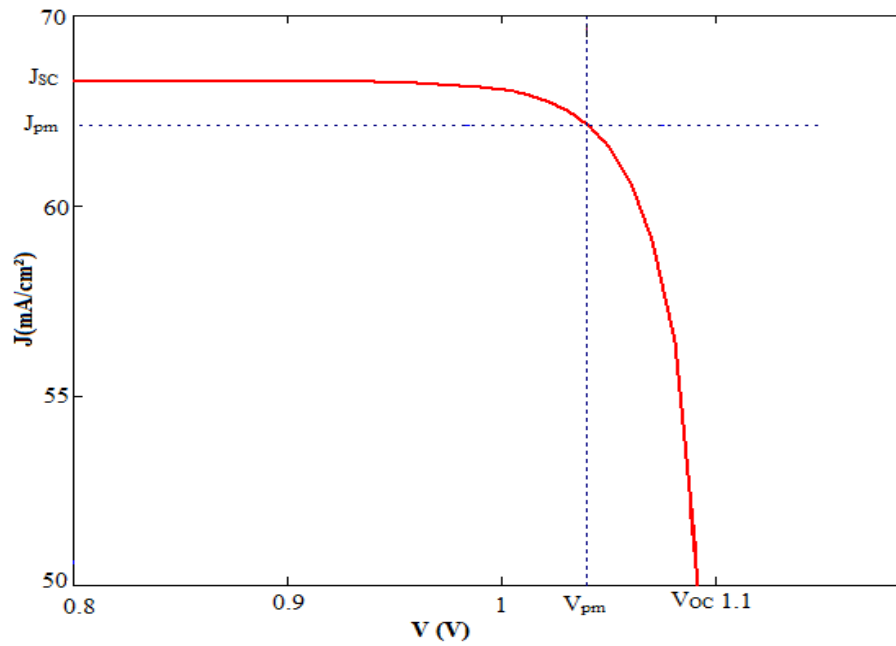


Figure 3.4. Représentation du facteur de forme FF.

3.2.4 Résumé des résultats obtenus pour une simple jonction

- $J_{sc} = 63,27 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{oc} = 1,09 \text{ V}$
- $J_{pm} = 62,12 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{pm} = 1,04 \text{ V}$
- $P_{max} = J_{pm} \cdot V_{pm} = 64,60 \text{ mW/cm}^2$
- $FF = 93,7 \%$
- $P_s = 158,681 \text{ mW/cm}^2$
- $\eta = 40,71 \%$

3.3 Cellule solaire à une bande intermédiaire

3.3.1 Contour du rendement en fonction des énergies de transitions

Nous avons calculé la limite du rendement de la IBSC en fonction des deux transitions énergétiques indépendantes E_1 et E_2 , pour une plage de $E_1 = [0,55.. 0,9]$ eV et $E_2 = [1.. 1,7]$ eV. On constate que le rendement maximal est de 63.2% et est obtenu pour des énergies de transition $E_1 = 0,71$ eV et $E_2 = 1,23$ eV pour un gap de $E_g = 1,94$ eV. Avec la possibilité d'obtenir un rendement $\geq 62\%$ à diverses configurations de la bande. On constate aussi qu'avec la IBSC on a diverses configurations de bandes d'énergie entre $0,57 \leq E_1(\text{eV}) \leq 0,88$ et $1,06 \leq E_2(\text{eV}) \leq 1,43$, qui ont un rendement nettement plus supérieur à 41% correspondant à une cellule classique.

Ces intervalles d'énergies peuvent nous aider à choisir les matériaux qui peuvent être utilisés dans le processus d'une conception physique d'une cellule solaire à Bande Intermédiaire à rendement maximal.

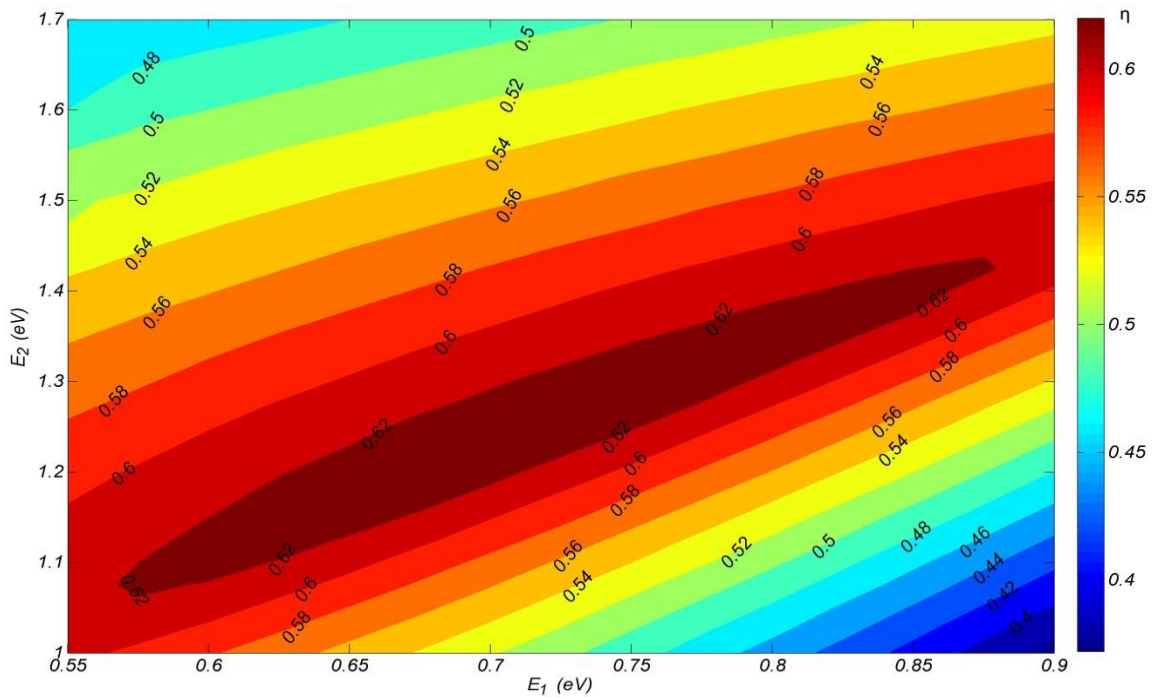


Figure 3.5. Contour de rendement en fonction des deux transitions énergétiques E_1 et E_2 .

3.3.2 Caractéristiques courant-tension et puissance pour une IBSC

Pour un rendement de $\eta=62,3\%$, avec $E_1=0,7$ eV, $E_2=1,23$ eV et $E_g=1,93$ eV, on représente la caractéristique du courant totale maximal d'une cellule solaire à bande intermédiaire en fonction de la tension V . On obtient un courant de court-circuit $J_{sc}=56,216\text{mA/cm}^2$ et une tension de circuit ouvert $V_{oc}=1,92$ V.

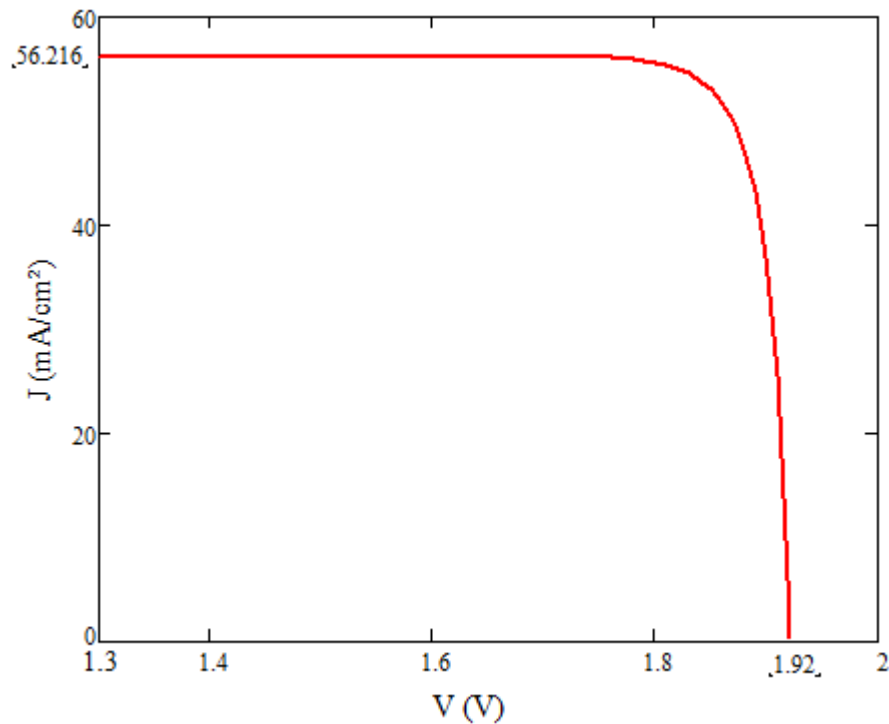


Figure 3.6. Représentation de la courbe du courant J généré par la cellule solaire à bande intermédiaire, en fonction de de la tension V .

La figure 3.7 représente la puissance de sortie délivrée par la cellule à bande intermédiaire, en fonction de la tension V . On obtient une puissance maximale de $P_{max}=100.202$ mW/cm² pour $V_m=1.81$ V.

On remarque que le courant de court-circuit d'une cellule solaire à une bande intermédiaire est inférieur au courant J_{sc} d'une simple jonction, n'empêche que la tension V est nettement plus grande, ce qui donne une puissance de sortie beaucoup plus supérieure.

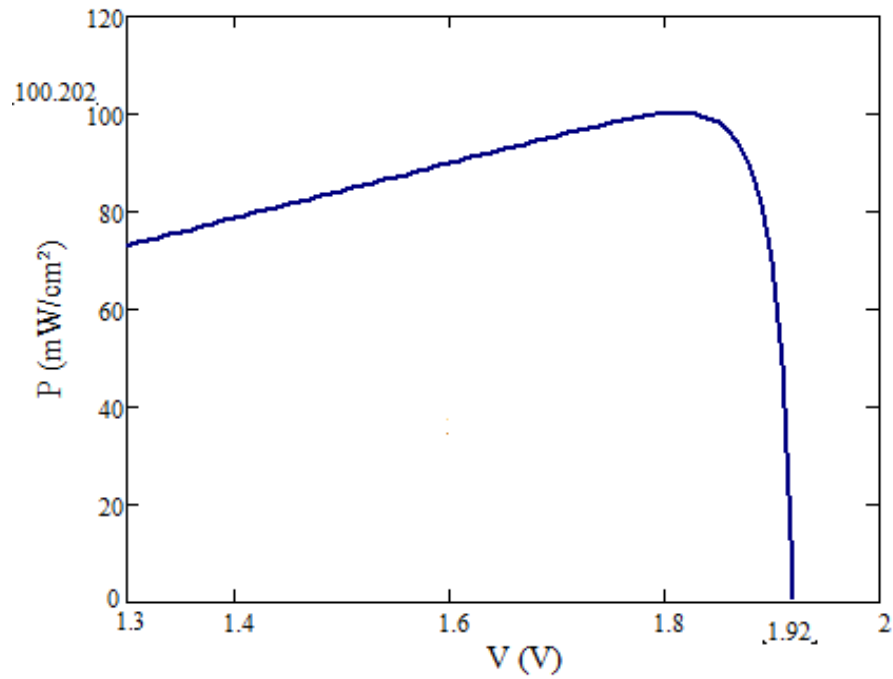


Figure 3.7. Représentation de la puissance de sortie en fonction de la tension V d'une cellule solaire à bande intermédiaire.

3.3.3 Facteur de forme FF

On a calculé le facteur de forme pour un courant $J_{pm} = 55,36 \text{ mA/cm}^2$, et $V_{pm} = 1,81 \text{ V}$, on trouve $FF = 92,8\%$.

3.3.4 Résumé des résultats obtenus pour une cellule solaire à une bande intermédiaire

- $J_{sc} = 56,216 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{oc} = 1,92 \text{ V}$
- $J_{pm} = 55,36 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{pm} = 1,81 \text{ V}$
- $P_{max} = J_{pm} \cdot V_{pm} = 100.202 \text{ mW/cm}^2$
- $FF = 92.8\%$
- $P_s = 158.681 \text{ mW/cm}^2$
- $\eta = 63.2\%$

3.4 Cellule solaire à deux bandes intermédiaires

Tout comme avec une bande intermédiaire, on a étudié la sensibilité du rendement en fonction des deux transitions énergétiques indépendantes E_1 et E_2 avec la transition énergétique E_3 du dispositif maintenue fixe, $E_3 = 1,5$ eV. On obtient un rendement maximal $\eta=73,3\%$ pour une configuration de $E_1= 0,42$ eV, $E_2= 1$ eV, $E_3= 1,5$ eV et un gap $E_g= 2,92$ eV. On constate qu'on peut obtenir un rendement $\geq 70\%$ pour des énergies dans les intervalles $0,4 \leq E_1$ (eV) $\leq 0,44$, et $0,89 \leq E_2$ (eV) ≤ 1 . On représente ces résultats par un contour dans la figure 3.8.

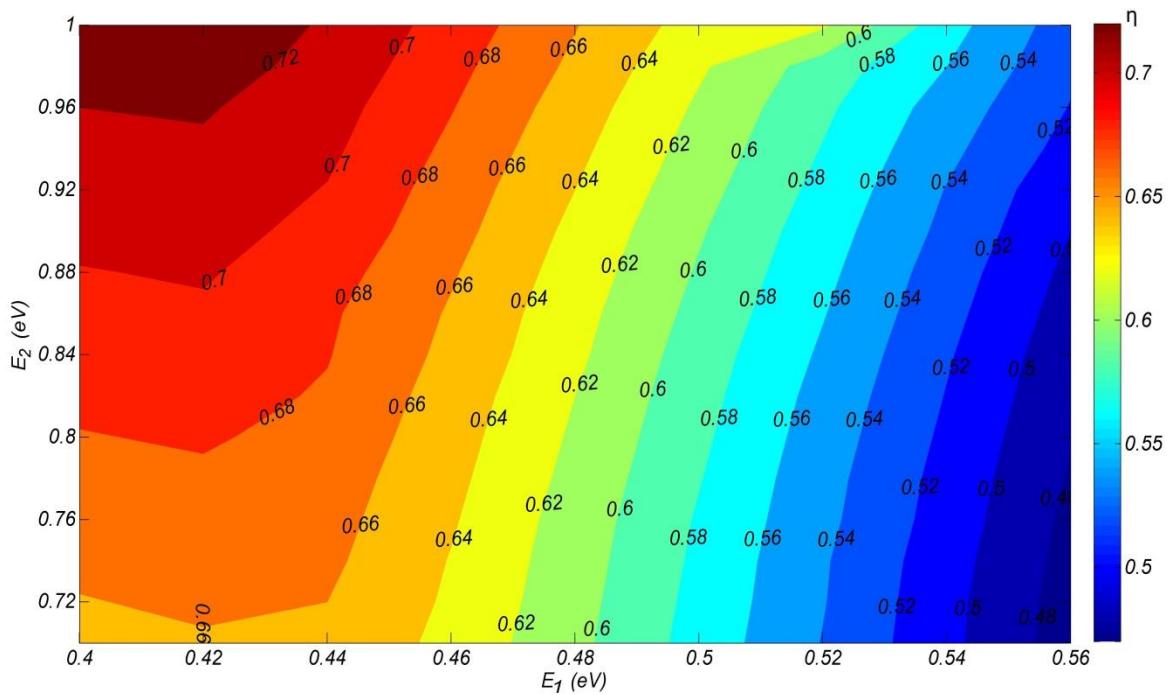


Figure 3.8. Contour qui représente le rendement pour chaque configuration énergétique de E_1 et E_2 . ($E_3=1,5$ eV).

3.4.1 Caractéristique courant-tension et puissance pour une cellule solaire à deux bandes intermédiaires

Pour le rendement maximal égal à $\eta=73,3\%$ ($E_1=0,42$ eV, $E_2= 1$ eV et $E_3=1,5$ eV), la caractéristique du courant en fonction de la tension V est représentée sur la figure 3.9. On obtient un courant de court-circuit $J_{SC} = 43,039$ mA/cm² et une tension de circuit ouvert $V_{OC}=2,82$ V.

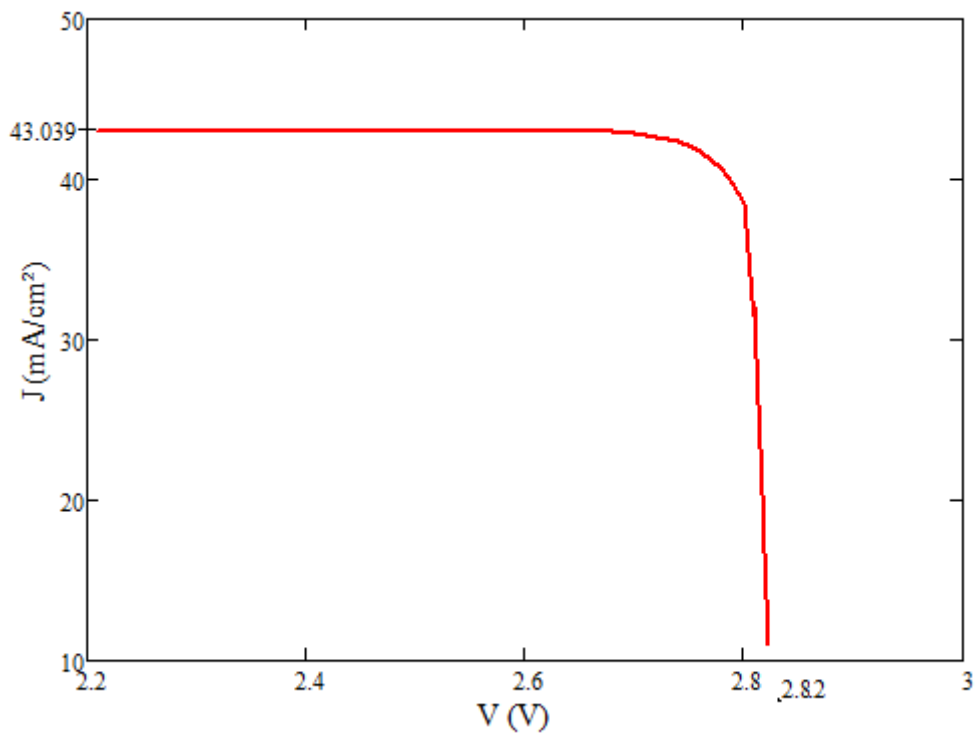


Figure 3.9. Représentation du courant généré par une cellule solaire à deux bandes intermédiaires en fonction de la tension V .

La figure 3.10 représente la puissance de sortie délivrée par la cellule à deux bandes intermédiaires en fonction de la tension V . On obtient une puissance maximale $P_{max}=116,126$ mW/cm² pour une tension $V_{pm}=2,72$ V.

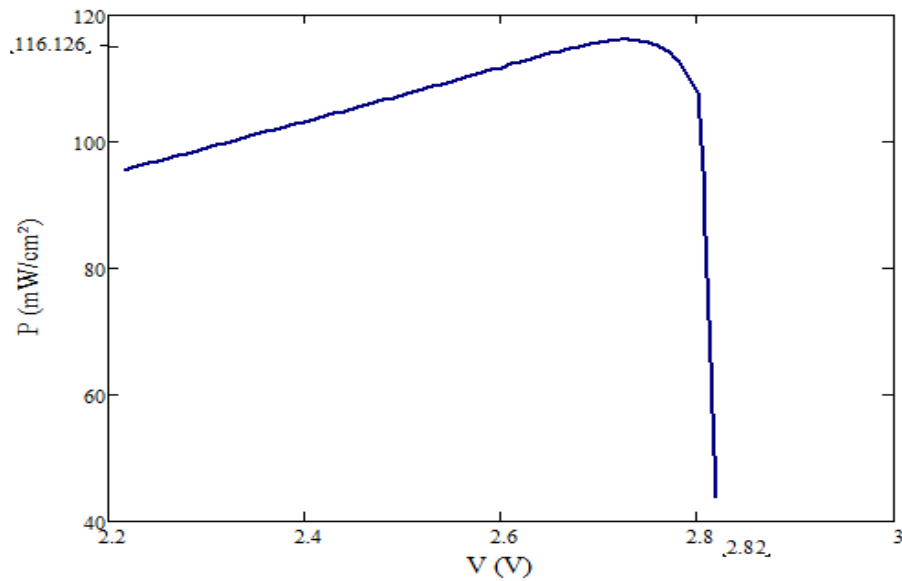


Figure 3.10. Représentation de la puissance maximale délivrée par une cellule solaire à deux bandes intermédiaires.

3.4.2 Facteur de forme

On a calculé le facteur de forme pour un courant $J_{pm} = 42,693 \text{ mA/cm}^2$, et $V_{pm} = 2,72 \text{ V}$, et on trouve $FF = 95,7\%$.

3.4.1 Résumé des résultats obtenus pour une Cellule Solaire à deux bandes intermédiaires

- $J_{sc} = 43,039 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{oc} = 2,82 \text{ V}$
- $J_{pm} = 42,693 \text{ mA/cm}^2$
- $V_{pm} = 2,72 \text{ V}$
- $P_{max} = J_{pm} \cdot V_{pm} = 116,125 \text{ mW/cm}^2$
- $FF = 95,7\%$
- $P_s = 158,681 \text{ mW/cm}^2$
- $\eta = 73,3\%$

On remarque, qu'en ajoutant une autre bande intermédiaire on augmente considérablement le rendement de la cellule solaire avec presque 10% de plus que la cellule solaire à une bande intermédiaire et voire même plus de 32% par rapport à la cellule solaire classique.

3.5 Cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques avec une bande intermédiaire

Les calculs et les figures présentés dans ce travail sont effectués pour les matériaux ternaires InAsN en tant que boîtes quantiques et GaAsSb en tant que barrière. Le système de matériau choisi (InAsN/GaAsSb) est particulièrement intéressant pour une étude théorique, car il a fait l'objet d'un grand nombre d'investigations expérimentales récentes [39][40][41]. Nous avons effectué une analyse à trois dimensions sur cet exemple de système matériel, $\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1}/\text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$, qui est caractérisé par ses paramètres [39][40][41], sachant que l'offset de la bande de valence est négligeable :

Paramètres	Symbole	Valeur
Energie de Gap de ($\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1}$)	$E_g (\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1})$	0,19 eV
Energie de Gap de ($\text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$)	$E_g (\text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02})$	1,48 eV
Masse effective de $\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1}$	$m^*_{\text{InAs}_{0.9}\text{N}_{0.1}}$	0,0354 m_0
Masse effective de $\text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$	$m^*_{\text{GaAs}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}}$	0,0664 m_0
Offset de la bande de conduction	CBO	1,29 eV

Tableau 3.2. Paramètres de InAsN/GaAsSb.

En utilisant le modèle de Kronig-Penney, L'analyse qui suit est pour différentes valeurs de la largeur de la barrière H et de la largeur des boîtes quantiques L. On a déterminé les énergies de transitions E_1 et E_2 en fonction de L et H pour ($L_x=L_y=L_z$ et $H_x=H_y=H_z$) montrés sur les deux contours de la figure 3.11 et la figure 3.12.

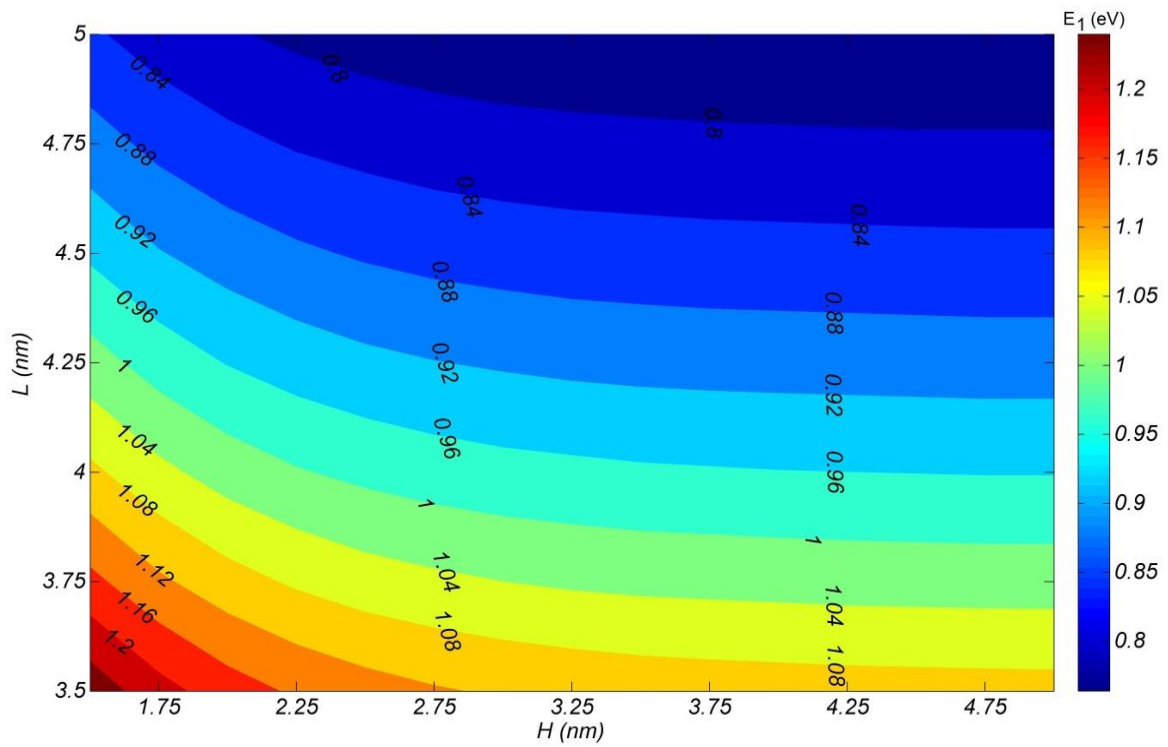


Figure 3.11. Contour de l'énergie de la première transition E_1 en fonction de L et H .

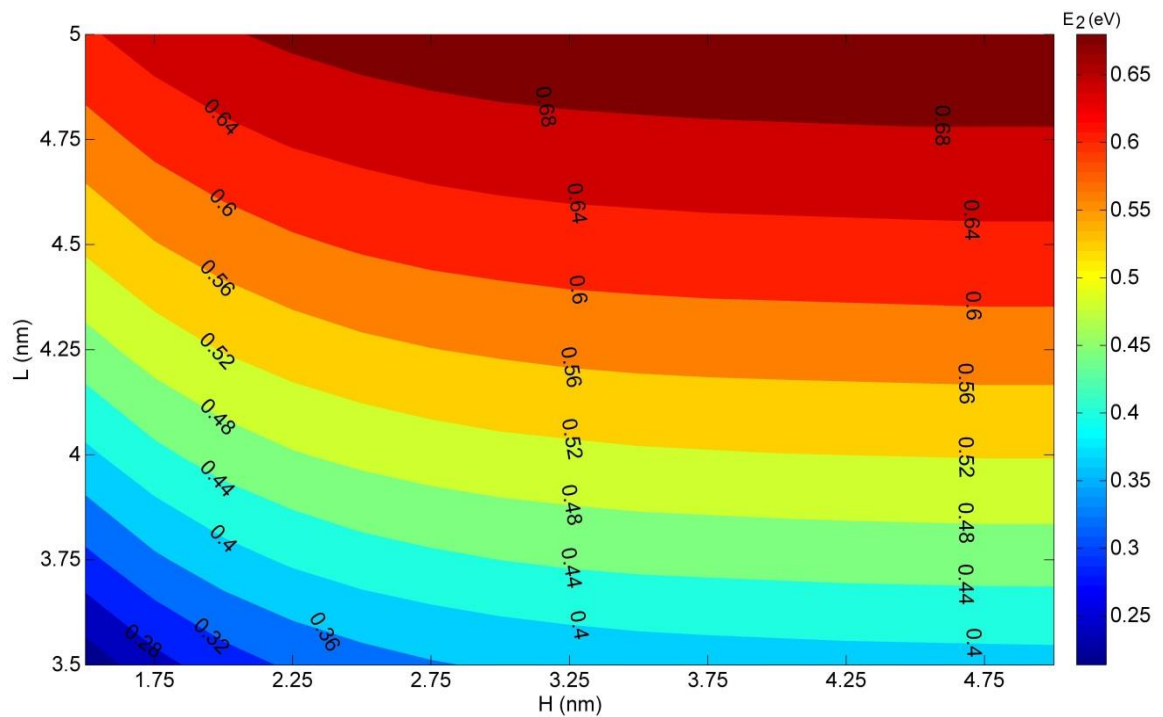


Figure 3.12. Contour de l'énergie de la deuxième transition E_2 en fonction de L et H .

D'après ces transitions énergétiques on a pu calculer le rendement en fonction de L et de H, qui est présenté sur la figure 3.13.

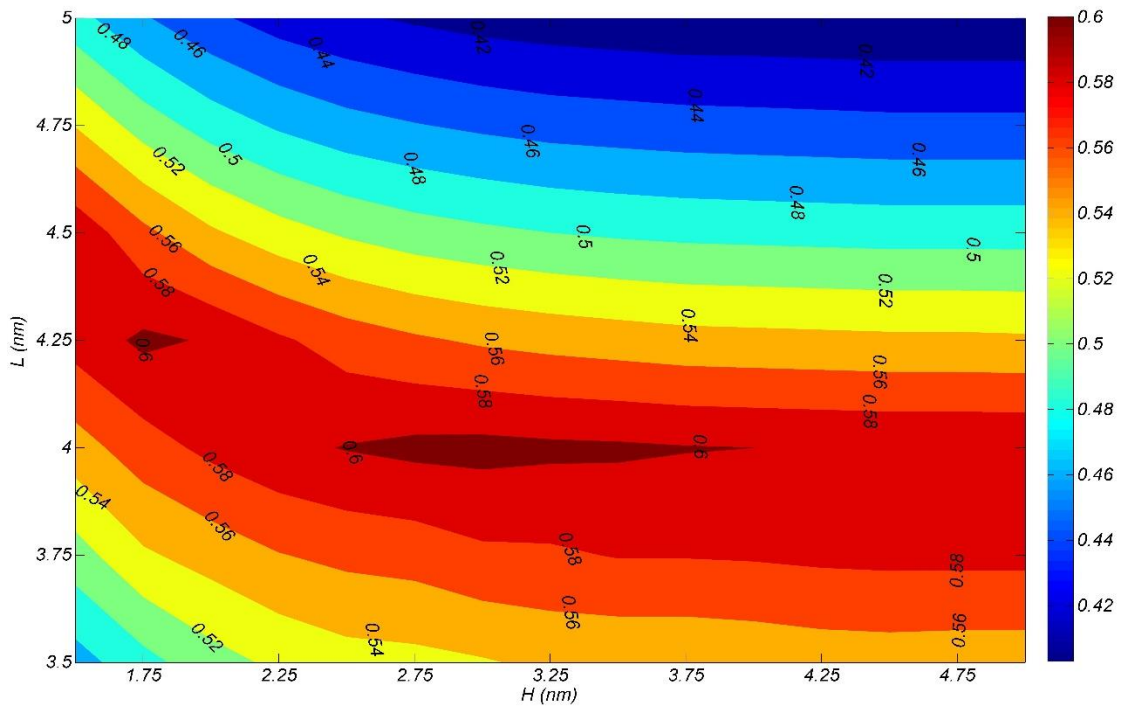


Figure 3.13. Contour qui représente le rendement en fonction de L et H.

On constate que pour ce matériau, on a un rendement théorique maximal de 60,6% pour une largeur de InAsN $L=4\text{nm}$, et une largeur de la barrière GaAsSb $H=3\text{nm}$, pour une configuration optimale des transitions énergétique égale à $E_2=0,507\text{ eV}$ et $E_1=0,973\text{ eV}$.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les cellules solaires à une et à deux bandes intermédiaires. L'influence des énergies de transitions E_1 et E_2 sur le rendement a été déterminée. Les rendements obtenus pour une cellule à une et à deux bandes intermédiaires sont de l'ordre de 63,2% et 73,3% respectivement qui sont largement supérieurs à celui d'une cellule conventionnelle.

Nous avons aussi étudié un superréseau de boîtes quantiques. L'influence des dimensions et de la séparation entre les boîtes sur les énergies de transition a été déterminée.

Les résultats de simulation sont regroupés dans le tableau 3.2.

	<i>Facteur de forme</i>	<i>Courant de court-circuit</i>	<i>Tension du circuit-ouvert</i>	<i>Rendement</i>
<i>Symbole</i>	FF	J_{sc}	V_{oc}	η
<i>Cellule solaire simple à une jonction</i>	93,7 %	63,27 mA/cm ²	1,09V	40,71 %
<i>Cellule solaire à une bande intermédiaire</i>	92,8 %	56,216 mA/cm ²	1,92 V	63,2 %
<i>Cellule solaire à deux bandes intermédiaires</i>	95,7 %	43,039 mA/cm ²	2,82 V	73,3 %

Tableau 3.3. Tableau récapitulatif des résultats obtenus pour différents types de cellules solaires.

Conclusion générale

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.

Les cellules solaires sont fabriquées à partir des semi-conducteurs dont leur capacité à répondre à la lumière est déterminée par leur gap E_g , et jusqu'à présent aucun semi-conducteur n'a un gap qui peut répondre à la gamme complète de la lumière du soleil, de l'infrarouge à l'ultraviolet.

La limite du rendement d'une simple jonction p-n présentée par Shockley et Queisser représente les limites fondamentales atteignables par les cellules solaires à semi-conducteurs qui correspondent à 40,7%.

Ce travail a pour but d'améliorer l'absorption de la cellule en introduisant des bandes intermédiaires dans la bande interdite du matériau.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté les caractéristiques du spectre solaire, le principe de fonctionnement ainsi que les caractéristiques d'une cellule solaire.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté la structure électronique des bandes d'une cellule solaire à superréseau de boîtes quantiques et la théorie de la balance détaillée utilisée dans l'étude et la détermination des caractéristiques principales d'une cellule solaire idéale.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié les cellules solaires à une et à deux bandes intermédiaires. L'influence des énergies de transitions E_1 et E_2 sur le rendement a été déterminée. Les rendements obtenus pour une cellule à une et à deux bandes intermédiaires sont de l'ordre de 63,2% et 73,3% respectivement qui sont largement supérieurs à celui d'une cellule conventionnelle.

Nous avons aussi étudié un superréseau de boîtes quantiques. L'influence des dimensions et de la séparation entre les boîtes sur les énergies de transition a été déterminée.

Les rendements obtenus pratiquement sont encore loin des prévisions théoriques à causes de problèmes techniques. Des efforts considérables sont consentis dans les différents laboratoires de par le monde afin d'apporter des solutions à ces problèmes technologiques et améliorer les rendements.

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] B. Flèche - D. Delagnes, "Energie solaire photovoltaïque.pdf". Juin 2007.
- [4] Brousse, B., "Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique", Université de Limoges, (15 décembre 2004).
- [5] Hakim, C., "Optimisation des Procédés Technologiques de Réalisation d'une Cellule Solaire par la Technique de Diffusion", Université de Batna, (15 décembre 2004).
- [6] Bettignies, B., "Cellules Photovoltaïques Organiques Dérivées de Nouveaux Systèmes Conjugés", université d'Angers, (23 septembre 2003).
- [7] Oi, A., "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", California Polytechnic State University, (22 March 2012).
- [8] Oleksiy, N., "Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques à Contacts Arrières Interdigités", Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (03 mai 2005).
- [9] Seloua, B., "Modélisation Numérique des OPVC dans les Systèmes ENR", Université Mentouri Constantine, (20/09/2010).

- [10] Mourad, O. ,“Etude du Silicium Poreux Destine aux Cellules Solaires”, Université Mentouri Constantine, (mai 2009).
- [11] Navarro, J. M., “Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes dans le Visible” ,Université Toulouse III, (octobre 2008).
- [12] M. Dahbi « Etude et optimisation d’une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [13] V.GORGE, « caractérisation de matériaux et test de composants des cellule solaires à base des nitrures des éléments III-V»,Thèse de doctorat, université paris sud 11,2012 .(sd).
- [14] Thibaut Desrues «développement cellule photovoltaïque à hétérojonction silicium et contacts en face arrière».Thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon,2009.
- [15] S.R Wenham, M.A Green, M.E Watt Corkish: APPLIED PHOTOVOLTAICS second Edition, page 04, 2007.
- [16] Herino R, Perio A, Barla K. et al. Microstructure of porous silicon an dits evolution with temperature. Materials Letters, 1984, vol. 2, n°6 A&B, pp. c519-523.
- [17] S. Strehlke, S. Bastide, J. Guillet and C. Lévy-Clément. Design of porous silicon antireflection coatings for silicon solar cells. Mat. Science & Engineer. B, 2000, Vol. 69-70, pp. 81-86.
- [18] Z. N. Adamian, A. P. Hakhoyan et al. Investigations of solar cells with porous silicon as antireflection layer. Solar En.Mat.&Sol.Cells, 2000, Vol. 64, pp. 347-351.
- [19] R. Guerrero-Lemus, F. Ben-Hander C. Hernandez-Rodriguez, J.M. Martinez-Duart. Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments. Mat. Science & Engineer. B, 2003, Vol. 101, pp. 249-254.

- [20] V. M. Aroutiounian, K. R. Maroutyan, A. L. Zatikyan and K. J. Touryan. Calculations of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells. *Thin Solid Films*, 2002, Vol. 403-404, pp. 517-521.
- [21] L. Schirone, G. Sotgiu and F. P. Califano. Chemically etched porous silicon as an anti-reflection coating for high efficiency solar cells. *Thin Solid Films*, 1997, Vol. 297, pp. 296-298.
- [22] J. P. Zheng and P. T. Charbel. A three-dimensional computer model for simulation of light-trapping effects in porous silicon. *Microelectronic Engineering*, 2003, Vol. 66, pp. 224-232.
- [23] V. A. Skryshevsky. Thin film PV module. *Thin Solid Films*, 2000, Vol. 368, pp. 125-129.
- [24] Etudes des Cellules Photovoltaïques, Olympiades de la Physique 2004.
- [25] W. Shockley and H.J. Queisser. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 1961.
- [26] A. Mart, L Cuadra and A. Luque, "Quantum dot intermediate band solar cell," *in Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, pp. 940–943, IEEE, New York, 2000.
- [27] A. Luque and A.Martí, "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels," *Phys. Rev. Lett*, 78 (26) 5014–5017, 1997.
- [28] S. Heshmati, S. Golmohammadi "Performance Analysis of Single Quantum Dots and Couple Quantum Dots at Intermediate Band Solar Cells", *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. Volume 8, Issue 5. PP 34-40. (Nov. - Dec. 2013).
- [29] Paul Preuss, "The Practical Full-Spectrum Solar Cell Comes Closer". 510-486-6249. January 24, 2011.
- [30] Kronig, R. de L.; Penney, W. G. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1930, A130, 499.

- [31] M. A. Green, "Potential for low dimensional structures in photovoltaics," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 74, pp. 118–124, 2000.
- [32] A. Mart, L Cuadra and A. Luque, "Quantum dot intermediate band solar cell," *in Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, pp. 940–943, IEEE, New York, 2000.
- [33] Chu. Wei. Jiang and M. A. Green, "Silicon quantum dot superlattices: Modeling of energy bands, densities of states, and mobilities for silicon tandem solar cell applications," *J.Appl.Phys.*99, 114902, 2006.
- [34] O. Lazarenkova and A. Balandin, "Miniband formation in a quantum dot crystal," *J. Appl. Phys.* 89, 5509, 2001.
- [35] W. Wei, Q. Zhang. "Single intermediate-band solar cells of InGaN/InN quantum dot supracrystals, ". *Appl.Phys. A*, 116 :1009-1016. China, 2014.
- [36] R.A. Serway, C. J. Moses, and C. A. Moyer. *Modern Physics*. Thomson Learning, Singapore, 1997.
- [37] Jenny Nelson. *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press, London, 2003.
- [38] Martin A. Green. *Third Generation Photovoltaics*. Springer, New York, 2006.
- [39] Abou El-Maaty M. Aly; A. Nasr, "The effect of multi-intermediate bands on the behavior of an InAsN/GaAsSb quantum dot solar cell". *Journal of Semiconductors* ».Vol. 36, No. 4. April 2015.
- [40] Q. Shaoa, Alexander A. Balandin, Alexander I. Fedoseyevb, and Marek Turowskib "Computational Design of the Intermediate-Band Solar Cells Based on the Quantum Dot Superlattices". bCFD Research Corporation, 215 Wynn Drive, Huntsville, Alabama 35805 USA.
- [41] Q. Shao and A. A. Balandina. "Intermediate-band solar cells based on quantum dot supracrystals". *APPLIED PHYSICS LETTERS* 91, 163503.(2007). USA.