

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Ahdibi Souhila

Intitulé

**Etude et simulation des cellules solaires
photovoltaïques à base de "Si "et "GaAs"**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Ben naccer Hamza	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Président
Dr. Bouras Mounir	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Rapporteur
Dr. Kebaili Farida	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Dr. Bouras Mounir**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un mémoire considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A l'a personne devant laquelle tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection pour elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma douce mère. Mère, si tu savais combien je t'aime.

A mon cher père.

{ وَأَخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا }

سورة الإسراء آية 24'

" اللهم ادخلهم فسيح جناتك يا رب "

A mes chers frères et soeur.

A mes amis à qui je souhaite bonheur et réussite.

A tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Introduction général	2
Chapitre I: Etude théorique d'une cellule solaire photovoltaïque	
I.1 Introduction	6
I.2 Historique du photovoltaïque	6
I.3 Le rôle des sources renouvelables de l'énergie dans la société	7
I.4 Les filières technologique	8
I.4.1 La jonction p-n	8
I.4.2 Le GaAs (Arséniure de gallium)	9
I.4.3 Le silicium	9
I.4.3.1 Le silicium monocristalline	10
I.4.3.2 Le silicium polycristalline	10
I.4.3.3 Le silicium amorphe	10
I.4.4 Les couches minces	12
I.4.5 Dopage	13
I.4.5.1 Dopage type N	13
I.4.5.2 Dopage type P	13
I.5 L'énergie solaire	14
I.6 Cellule solaire photovoltaïque	14
I.7 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire	15
I.8 Le module photovoltaïque	16
I.9 L'effet photovoltaïque	16
I.10 Le panneau solaire	17
I.11 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	18

I.11.1 Courant de court-circuit I_{cc}	18
I.11.2 Tension de circuit ouvert V_{oc}	18
I.11.3 Facteur de forme FF	19
I.11.4 Le rendement η	19
I.12 Les avantages et Les inconvénients des cellules solaires PV	20
a. Les avantage	20
b. Les inconvénients	21
I.13 conclusion	21

Chapitre II : Outil de simulation

II.1 Introduction	23
II.2 Logiciel utilisé « RsoftCAD »	23
II.3 Solar-cell	23
II.4 Etapes de simulation de module cellule solaire	25
II.5 Création d'un nouveau circuit	25
II.6 Création de la structure	27
II.7 Définition des variables	28
II.8 Vérification de la structure	29
II.9 L'exécution de la simulation	31
II.10 Conclusion	33

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction	35
III.2 Design et description de cellule utilisé	35
III.2.1 Structure étudiée	35
III.3 Optimisation des paramètres géométrique et physique	36
III.3.1 Effet d'antireflet	36

III.3.2 Variation de l'angle	37
III.3.3 Variation de l'épaisseur	38
III.3.4 Variation du dopage	42
III.4 Spectre solaire	43
III.6 Conclusion	44
Conclusion générale	45

Liste des figures

Chapitre I : Etude théorique d'une cellule solaire PV

Figure	Page
Figure I.1: Les différents types de cellules solaires photovoltaïques	11
Figure I.2: Les différentes technologies photovoltaïques	12
Figure I.3: Une cellule solaire	15
Figure I.4: Principe de fonctionnement d'une cellule PV	15
Figure I.5: Circuit équivalent de cellule solaire	16
Figure I.6: Caractéristique $I=f(v)$ d'une cellule PV	16
Figure I.7: Panneau solaire	17

Chapitre II : Outil de simulation

Figure II.1: Fenêtre principale du programme CAD	25
Figure II.2: La fenêtre de démarrage (Startup Window)	26
Figure II.3: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau circuit	26
Figure II.4: Propriétés sectorielles pour l'objet guide d'ondes créé	27
Figure II.5: Structure CAD de la cellule solaire	28
Figure II.6: L'éditeur du tableau de symboles	28
Figure II.7: Paramètres de lancement (lancement paramètres)	29
Figure II.8: Arrangement de calcul de profil d'index	30
Figure II.9: Distribution d'index pour la configuration non structurée	30
Figure II.10: La boîte de dialogue paramètre de simulation FullWave	31
Figure II.11 : Lancer simulation	31
Figure II.12: Utilitaire de cellule solaire	31
Figure II.13: Courbe L-I-V pour cellule solaire	32
Figure II.14: Courbe I-V pour cellule solaire	33

Chapitre III : résultats et discussion

Figure III.1: Structure de la cellule PIN	35
Figure III.2: Caractéristique courant-tension de la structure PIN	36
Figure III.3: Rendement de la pour variation de l'angle incident	37
Figure III.4: Caractéristique courant-tension de la structure pour déférente épaisseur de la couche	38
Figure III.5: Densité de court-circuit(J_{cc}) en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche active (couche P)	39
Figure III.6: Tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche active	40
Figure III.7: Rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche active.....	41
Figure III.8: Rendement de la cellule en fonction du dopage de couche active	42
Figure III.9: Spectre solaire	43

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Resultat du simulation	33
Tableau III.1 : Valeur de rendement par rapport de l'antireflet	37

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figure envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de "continuer à vivre comme maintenant" sans que cela n'aggrave nos émissions de gaz à effet de serre, en attendant tranquillement que l'efficacité énergétique permette de diminuer les émissions. Mais il est important de savoir que l'on ne peut pas filtrer l'atmosphère pour en retirer le gaz déjà émis. La technique ne peut donc rien sur ce plan, et ne nous évitera pas un réchauffement programmé et inévitable d'au moins 1°C en un siècle. Souvent, la révolution des énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique. Mais il serait plus raisonnable de voir ces nouvelles solutions techniques comme un simple frein au réchauffement climatique à condition que notre consommation énergétique ne continue pas d'augmenter exponentiellement. Cela éviterait ainsi de reproduire les mêmes erreurs du passé en pensant à des solutions "miracles" qui seraient inépuisables et sans impact sur notre mode vie ou sur l'environnement [1].

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Seule la géothermie échappe à cet inventaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit. L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie. Ces affirmations sont en passe d'être aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques mais également sur le traitement de l'énergie. Actuellement, la

plupart des panneaux photovoltaïques produisent largement plus d'énergie au cours de leur vie que l'énergie nécessaire à leur production. On a vu apparaître ces dernières années la notion de remboursement énergétique noté EPT (Energy Payback Time). Selon les technologies et les lieux de production, l'EPT s'étend de 2 à 4 ans pour des panneaux ayant une durée de vie de 15 à 25 ans. Les progrès de fabrication ont été considérables ces dernières années permettant d'avoir des fonctionnements de générateurs photovoltaïques garantis au-delà de 25 ans avec en plus des coûts de fabrication qui tendent à baisser quand on ramène le prix de l'installation au prix du Watt Crête [1].

Pour passer des premières cellules qui ont suivi la découverte de l'effet photovoltaïque aux cellules actuelles, un important travail de recherche a été réalisé. Le marché du photovoltaïque est en pleine expansion, 71GW de systèmes photovoltaïques ont été installés dans le monde en 2016. Plusieurs technologies sont présentes sur le marché mais ce dernier est dominé par les cellules basées sur un substrat en silicium. Bien que la filière ait atteint le stade industriel, les recherches en laboratoire se poursuivent. Plusieurs voies sont explorées pour obtenir les cellules de demain : augmentation de l'absorption de lumière, prise en compte de la disponibilité des ressources naturelles, allongement de la durée de vie, diminution de coûts ... De nombreux points d'optimisation sont obtenus régulièrement dans la recherche et dans l'industrie [2].

Les performances des cellules solaires à couches minces sont nettement améliorées depuis quelques années. Le silicium polycristallin est un matériau de plus en plus impliqué dans leur fabrication car il présente l'avantage d'un coût de revient relativement bas, en plus d'une grande facilité de dépôt en couches minces. A cause des différentes techniques d'élaboration, les performances des cellules solaires au silicium multicristallin sont limitées par la présence de défauts de structure tels que les joints de grains et les impuretés [3].

Depuis quelques années, une activité de recherche se développe autour de l'utilisation des nanostructures de silicium (nanoparticules, nanofils ...) dans le domaine du photovoltaïque(PV) pour accroître le rendement des cellules solaires. En effet, la principale limite au rendement des cellules PV est l'inadéquation entre le spectre du rayonnement solaire incident et le spectre d'absorption de la cellule PV. L'augmentation du rendement de conversion lumière/courant électrique passe donc par l'adaptation du rayonnement solaire à la sensibilité spectrale des cellules PV [4].

De nombreuses publications attestent aujourd'hui que l'introduction des nanostructures de silicium dans la filière photovoltaïque pourrait créer le potentiel de dépasser un certain nombre de limites. Dans ce domaine, les propriétés particulières que présentent ces nano-objets peuvent être exploitées de différentes façons.

- Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes)
- Cellules à concentration
- Utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule
- Cellules à porteurs chauds produisant plus de paires électron/trou pour des énergies supérieures à la bande interdite
- Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi conducteur [4].

Ce mémoire est organisé en trois chapitres suivi d'une conclusion général.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions essentielles sur le développement de la cellule solaire, le fonctionnement de la cellule en expliquant le phénomène photovoltaïque. Et présenté les différentes technologies des cellules.

Ensuite, le second chapitre est présenté le logiciel de simulation utilisé dans ce travail.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus, par le Rsoft CAD.

Enfin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

CHAPITRE I :
ETUDE THÉORIQUE D'UNE
CELLULE
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, présente étude théorique d'une cellule solaire photovoltaïque et l'itérât de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Plusieurs matériaux à caractère semi-conducteur sont utilisés dans cette conversion photovoltaïque. Le Silicium(Si) est le matériau de base le plus utilisé dans le monde et l'arséniure de gallium (GaAs).

I.2 Historique du photovoltaïque:

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

L'hélio électricité est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie [5].

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés [5].

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013. Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electroniques, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs [4].

Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud ouest; ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12 000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin 2013[5].

I.3 Le rôle des sources renouvelables de l'énergie dans la société

Les énergies renouvelables ont un très grand impact sur l'environnement, leurs rôle ne se limite pas seulement aux risques d'épuisement des combustibles fossiles ou bien le souci de l'approvisionnement, mais en plus, on trouve de nombreuses raisons environnementales qui pousseront au développement des énergies renouvelables parmi lesquelles on peut citer:

- La lutte sans cesse contre la pollution atmosphérique mettra en évidence les énergies peu ou pas polluantes pour l'air, comme par exemple le soleil pour l'énergie photovoltaïque, le vent pour l'énergie éolienne et la géothermie.
- Les combustibles fossiles sont responsables en grande partie dans le réchauffement progressif de la planète (effet de serre) à cause du gaz carbonique émis par leur combustion dans l'atmosphère, alors que le soleil, le vent ou la géothermie permettent d'éviter ce réchauffement ainsi que ces conséquences climatiques résultantes. Aussi, la combustion de la biomasse est considérée comme une énergie propre, du point de vue quelle représente un grand avantage dans la croissance des végétaux et cela grâce au recyclage du gaz carbonique émis lors des brûlages des végétaux [6].

L'énergie nucléaire ne participe pas à l'effet de serre, mais les craintes que représente cette énergie sont beaucoup plus graves comme les risques d'explosion ou d'accident, la prolifération des armes nucléaires et le sort des déchets nucléaires.

- Le développement des cultures énergétiques (houille verte), ce qui permettra de ne pas détruire les forêts existantes, et en même temps combattrà la désertification, grâce à la plantation des champs et des forêts à des fins énergétiques, éventuellement sur des terres abandonnées ou en jachère, afin de revitaliser des régions rurales en voie de désertification. Pour autant, il faut mentionner que certaines des énergies renouvelables causent comme même quelques dégâts environnementaux comme les déforestations dus à des usages abusifs du bois, les inconvénients de certains barrages hydroélectriques, de certaines éoliennes ou de certaines installations solaires sans oublier le fait qu'elles occupent de très grandes surfaces, ces derniers peuvent ralentir le développement de certaines autres énergies renouvelables [6].

I.4 Les filières technologiques

Une cellule photovoltaïque est constituée par un semi-conducteur de type P-N la taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques, cellules multi jonction et cellules CP 1D 2D 3D.

I.4.1 la jonction p-n :

Une jonction p-n est la juxtaposition de deux zones dopées pour améliorer la conductivité du matériau :

- Une zone de type p qui possède un excès de trous avec la présence d'atome de la colonne III du tableau périodique (typiquement le bore), ou la conduction s'effectue par les trous.

-une zone de type n qui possède un excès d'électrons avec la présence d'atome de la colonne v du périodique (typiquement le phosphore), ou la conduction s'effectue par les électrons.

A la jonction des zones p et n, il se crée une zone de charge d'espace de quelque micromètres avec une zone n chargée positivement et une zone p chargée négativement .il se crée donc un champ électrique qui repousse les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. En ajoutant des contacts électrique à la jonction p-n [7].

I.4.2 le GaAs (arséniure de gallium) :

L'arséniure de gallium est un composé chimique de formule brut GaAs appartenant à la famille des semi-conducteur III-V. C'est un matériau semi-conducteur à gap direct ($E_g=1.$) présentant une structure cristallin cubique de type sphalérite (blende).

Il est utilisé notamment pour réaliser des composant micro-ondes, des circuits intégrés monolithique hyperfréquences, des composant opto-électrique, des diodes et des cellules photovoltaïques [8].

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration. Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix !

- Rendement électrique: 25-40 %.
- Usage: satellites, concentrateurs.
- Particularité : prix très élevé [9].

I.4.3 Le silicium :

Le **silicium** est l'élément chimique de numéro atomique 14, Il appartient au groupe 14 du tableau périodique et le gap est $E_g=1.12\text{ev}$. C'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, soit 25,7 % de sa masse, mais il n'est comparativement présent qu'en relativement faible quantité dans la matière constituant le vivant. Il n'existe pas dans la nature à l'état de corps simple, mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), d'origine biogène (fabriqué par un organisme vivant comme les diatomées ou les radiolaires), on le trouve sous forme de silice amorphe (dans le sable) [10].

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïque. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte trois technologies : le silicium monocristallin, le silicium poly cristallin et silicium amorphe [11].

I.4.3.1 Le silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en formant qu'un seul cristal de grande dimension. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque [11].

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairage, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 %.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairage : 100 à 1 000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires [9].

I.4.3.2 Le silicium poly cristallin :

Le silicium multi cristallin (poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, a elle seul elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène [11].

Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux, il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairages modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 17 %.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairage : 200 à 1 000 W/m².
- Usage : id. silicium cristallin [9].

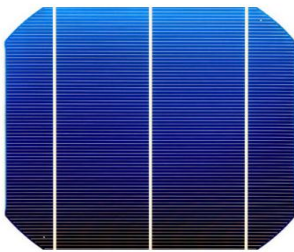
I.4.3.3 Le silicium amorphe:

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réel organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion [11].

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairages, extérieur *et* intérieur. Sa technologie de

fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

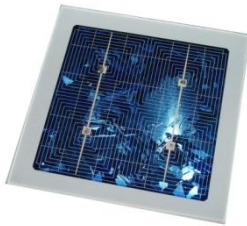
- Rendement électrique des panneaux : 5-7 %.
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 Wc.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1 000 W/m² (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol [9].



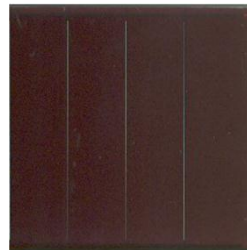
Cellule solaire en GaAs [7]



Cellule PV en Si monocristallin [9]



*Cellule photovoltaïque en silicium
Poly cristallin [9]*



Cellule solaire en silicium amorphe [9]

Figure I.1 : les différents types cellules solaires PV

Cette technologie peut être résumée dans le schéma suivant :

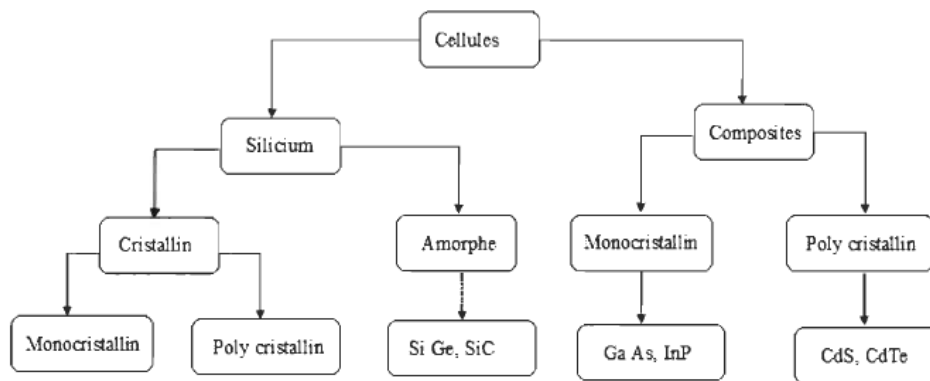


Figure I.2 : Les différentes technologies photovoltaïques [5].

I .4.4 Les couches minces :

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grand échelle reste encore aujourd'hui. Malgré la baisse de ces dernières années, la pris trop élevé du kilo watt crête KWc. Le kilo watt crête (KWc) est l'unité qui défini la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standards ($1000W.m^2$ et $25^{\circ}C$).

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et de procédé de purification. Plusieurs types des cellules photovoltaïques visant à diminuer la qualité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologie appelées couche minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mure est celle du silicium amorphe (a-Si) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial [11].

L'avantage de cette technique est l'utilisation des substrats à bas coûts. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et fabrique des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules cristallin [11].

L'utilisation de ce type de cellule nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et les réseaux. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphe captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Par conséquence, ces cellules sont une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères [11].

De manière générale, les technologies couches minces recouvrent l'utilisation de matériau dont l'épaisseur nécessaire à l'absorption des photons est de quelques microns. C'est le cas des matériaux III-V tels que l'arséniure de galium (GaAs) et ses alliages, les composés à base de cuiver indium, sélénium(CIS) ou le tellure de cadmium (CdTe) [11].

I.4.5 Dopage

Le dopage a pour but d'augmenter la quantité d'électrons ou bien de trous dans un matériau en introduisant dans ce dernier des atomes d'une autre nature qui vont se substituer aux atomes originaux, ainsi introduire les porteurs libres. Le rôle du dopage consiste à modifier les caractéristiques du matériau comme par exemple contrôler la conductivité électrique du matériau à travers la création d'une jonction [6].

Généralement, le dopage se fait de trois différentes manières; le dopage par diffusion, le dopage par implantation ionique et le dopage par transmutation nucléaire. Cependant, pour des composants semi-conducteurs réalisés par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur le dopage par diffusion est la technique la plus utilisée et la plus adéquate.

Il existe deux sortes de dopage, si on augmente la densité d'électrons dans ce cas il s'agit d'un dopage de type N, qui se caractérise avec une conduction électrique par les électrons. Dans l'autre cas, on aura un dopage de type P dont la conduction électrique est favorisée par les trous [6].

I.4.5.1 Dopage de type N

Ce type de dopage présente un excès d'électrons donc il sera chargé négativement. Les composants de structure V-III sont naturellement de type N car ils ont plus d'électrons, ce qui facilite ce type de dopage [6].

I.4.5.2 Dopage de type P

Ce type de dopage présente un excès de trous donc il sera positivement chargé. Contrairement au dopage de type N, ce dopage est beaucoup plus compliqué à réaliser vu, donc il faut d'abord créer un équilibre entre les électrons et les trous dans le matériau pour pouvoir créer par la suite un excès de trous.

La concentration très élevée du dopant va créer une dispersion des porteurs et ainsi réduire leur mobilité [6].

I.5 L'énergie solaire

L'énergie émise par le soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière c ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère.

La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence f peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques [12].

I.6 cellule solaire photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est généralement constituée d'un semi-conducteur de type n et un autre de type p. L'incidence d'un flux lumineux sur cette dernière fera apparaître une différence de potentiel grâce à la génération de porteurs de charge excitée par le flux lumineux au voisinage d'une jonction, qui fonctionne par l'absorption de ce flux lumineux. Autrement dit la cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur capable de transformer directement l'énergie solaire en énergie électrique, cette transformation d'énergie se fait via la création et le déplacement de charges électriques positives et négatives dans le matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière. Cette transformation est donc basée sur:

- a. Absorption des photons grâce à l'écart entre les bandes de valence et de conduction. Ce que représente d'ailleurs la caractéristique fondamentale des semi-conducteurs.
- b. Conversion de l'énergie photonique en énergie électrique, ce qui permet de créer les paires électron/trou.
- c. La jonction p-n ou l'hétérojonction, lors qu'il s'agit de deux semi-conducteurs différents permet de collecter les particules générées dans le matériau [6].

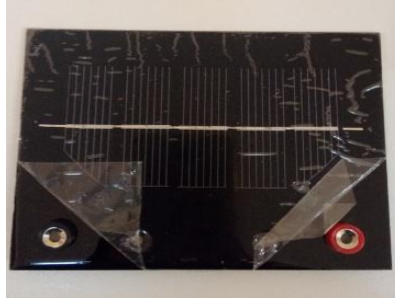


Figure I.3 : une cellule solaire PV

I.7 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, il y'aura une création de porteurs dans les différentes zones n, p et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région:

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou bien dans la zone n pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone de charge, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération [6].

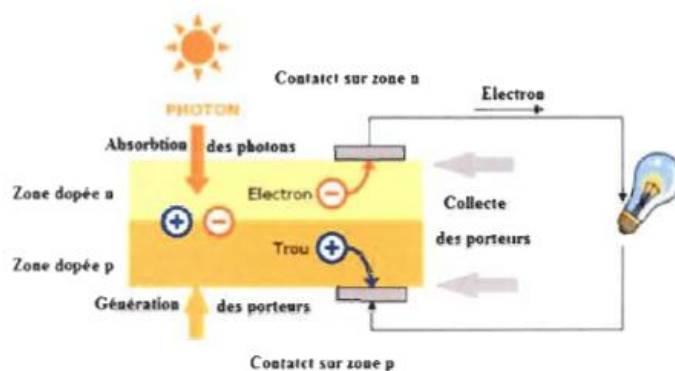


Figure I.4: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [6].

I.8 Le module photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV) est définie comme la science ou la technologie qui convertie la lumière en électricité, la forme la plus courante étant l' utilisation de la lumière du soleil.

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d' énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d' alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues, et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif [6].

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme montre la figure.

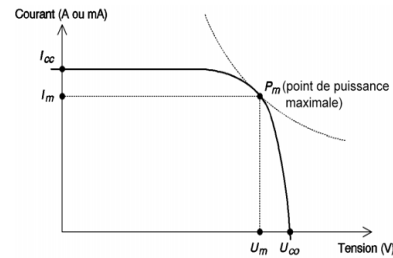
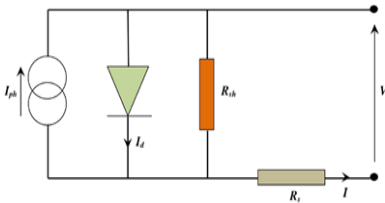


Figure I.5 : circuit équivalent de la cellule solaire

Figure I.6 : Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV [9]

I.9 l'effet photovoltaïque

l'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés « semiconducteur », cet effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien Alexandre-Edmond Becquerel. Lorsque les « grains de lumière » (les photons) frappent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné [13].

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semiconducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p [13].

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. la zone initialement dopée n devient chargée positivement, et zone p chargée négativement. il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. une jonction p-n a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zone n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans : la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel. L'effet repose donc à la base sur les propriétés semiconducteur du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [13].

I.10 Le panneau solaire

Le panneau solaire se compose de plusieurs modules photovoltaïque interconnectés en série et/ou en parallèle (en série augment la tension et en parallèle augment le courant) afin de produire la puissance requise. Ces modules sont monté sur une armature métallique qui permet de supporter la charge solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [14].



Figure I.7: panneau solaire

I.11 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , FF et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques [15].

Ces paramètres sont définis comme suit:

I.11.1 Courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [15].

A partir de la figure (I.5) la loi des noeuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I + I_d + I_{sh} \quad (\text{I.1})$$

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ($R_s=0, R_{sh} \rightarrow \infty$), le R_s est faible devant R_{sh} alors :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_d \left(\exp \left(q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right) - 1 \right) \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.2})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_d \left(\exp \left(q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right) - 1 \right) \right)$ devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = I_{ph} / \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{I.3})$$

I.11.2 tension de circuit ouvert V_{oc} :

La tension de circuit ouvert V_{oc} est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif photovoltaïque. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction

pn, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts couche active-électrode.

De plus, elle dépend de l'éclairement de la cellule.

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (c'est la tension maximale d'une photopile) [15].

$$V_{oc} = \frac{q}{nKT} * \ln\left(\frac{I_c}{I_d} + 1\right) \quad (\text{I.4})$$

I.11.3 Facteur de forme FF:

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_m(I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension (courant compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co})

On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante :

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{I.5})$$

On voit bien qu'il dérive de la représentation graphique et est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} sur celle du rectangle dont les cotés mesurent V_{co} et I_{cc} [15].

I.11.4 Le rendement η :

C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{I.6})$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule[15].

Ou :

R_s : Resistance serie (Ω).

R_{sh} : Resistance parallele (Ω).

P_m : Puissance maximmale (w).

P_{in} : puissance lumineuse incidente (w).

I_{ph} : Couranrt photopile (A).

K : Constant de Boltzman ($1.36 \cdot 10^{-23}$ ev).

T : Tempirateur de cellule ($^{\circ}K$).

q : La charge d'electron $1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

I.12 Les avantages et les inconvénients des cellules solaires PV

a- Les avantages :

-Le principal avantage de ces énergies renouvelables est qu'elles sont de sources illimitées

-un facteur de développement et le pilier de l'économie moderne.

-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

-Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

-L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées.

- 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 milliWatt au MégaWatt [14].

b- les 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, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an)
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [14].

I.13 Conclusion

L'énergie d'origine photovoltaïque est considérée comme stratégique dans une perspective de développement durable. Si jusqu'à présent le silicium, mono-cristallin ou amorphe, reste le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les filières technologiques existantes, ainsi que le rôle de ces énergies renouvelables, puis nous avons fait une étude détaillée par tous les axes nécessaires comme l'énergie solaire et la cellule solaire photovoltaïque, en passant à la principe de fonctionnement pour la compréhension de cette technologie comme sa structure, nous avons également parlé des modules photovoltaïques et effet photovoltaïque et les panneaux solaires. Enfin, nous avons parlé sur l'équation physique qui définissent ces paramètres photovoltaïque.

CHAPITRE II :
OUTIL DE SIMULATION.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description du logiciel de simulation que nous avons employé dans notre travail à **solar cells utility** de Rsoft. On va utiliser ce module pour modéliser et analyser la structure des cellules solaires à base des matériaux d'Si et d'GaAs.

II.2 Logiciel utilisé « Rsoft CAD »

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de RSoft : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD. Les résultats optimisés peuvent être trouvés rapidement le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable permettant des simulations de lots. Un avantage important d'une interface de CAD partagée est qu'une fois que les concepteurs et de crée et d'analyser la structure de diffraction dans DiffractMOD, la même dispositive de conception peut être directement simulé en double alternance et BandSOLVE pour d'autres aspect de la même structure comme réponse dans le ldomaine temporel avec finie temps de différence de méthode de domaine ou l'analyse de structure de bande avec la méthode d'extension d'onde plane. DiffractMOD peut aussi être facilement utilisé avec BeamPROP. BandSOLVE, double alternance et GratingMOD pour la simulation hybride d'un module à composant multiples [16].

II.3 Solar-cell

Les dispositifs d'absorption d'incidents de surface tels que les photodétecteurs et les cellules solaires peuvent être simulés avec LaserMOD and Fullwave. Cependant, il existe un certain nombre de légères différences dans la configuration des simulations pour de tels dispositifs. La ou les régions actives, qu'elles soient massives ou minces, sont utilisées pour déterminer l'absorption plutôt que le gain [17].

LaserMOD est un progiciel intégré pour la conception et la simulation de lasers à semi-conducteurs et de structures photoniques actives. LaserMOD a été intégré à BeamPROP et FemSIM de RSoft afin que la méthode de propagation du faisceau (BPM) et la méthode des éléments finis (FEM) puissent également être exploitées pour la résolution des modes guide d'onde et VCSEL 2D, respectivement.

Le simulateur Fullwave est un module de la suite de logiciels développée par l'entreprise RSoft, basé sur la célèbre méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Cette dernière permet de résoudre les équations de Maxwell dans le temps et dans l'espace, en approximant directement les opérateurs différentielles dans les équations par des différences finies [18,19].

Une approche TMM (ou autre) est utilisée pour déterminer la distribution d'intensité de la lumière incidente, qui commence à se désintégrer à mesure que la première couche active est pénétrée. Cette intensité doit être mise à jour à chaque point de polarisation afin de déterminer correctement le courant photo généré. Par conséquent, au moins un des modèles suivants doit être vérifié au moment de l'exécution:

- . Recalculer les modes une fois par biais (pour la simulation à l'état stable)
- . Recalculer les modes pour tous les points de rampe (pour la simulation à l'état stable)
- . Recalculer les modes pour tous les transitoires (pour la simulation en fonction du temps)

Une polarisation inverse (électrique) est généralement utilisée pour ces dispositifs. Par conséquent, une tension négative est spécifiée dans l'éditeur de polarisation pour le contact p ou une tension positive est appliquée au contact n.

Un biais optique (la lumière incidente) doit également être appliqué. Un nouveau champ dans l'éditeur de biais est disponible à cet effet. En termes de rampe, il est traité comme tout autre type de polarisation, en ce sens que la puissance incidente augmente entre les valeurs spécifiées à des points de polarisation consécutifs. En l'absence de sortie optique, la courbe LIV affiche simplement la puissance optique incidente.

La longueur d'onde (dans la boîte de dialogue de calcul de mode) est utilisée pour définir la longueur d'onde de la lumière incidente. Ainsi, les spectres de réactivité doivent être générés à partir de plusieurs analyses, car cette longueur d'onde est modifiée [17].

II.4 Etapes de simulation de Module cellule solaire

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menu en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et le linge d'état.

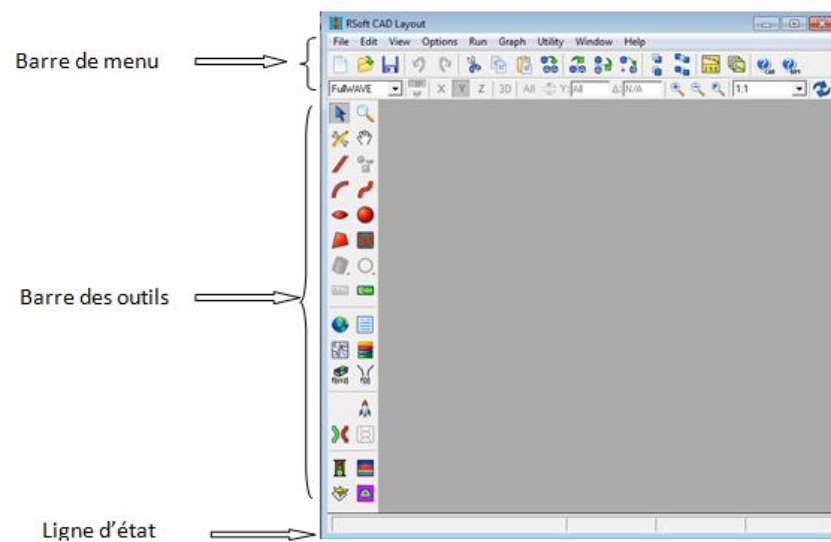


Figure II.1: fenêtre principale du programme CAD

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin.

II.5 Création d'un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir **File /New** du menu. Le dialogue de démarrage de la figure1 va apparaître figure II.2.

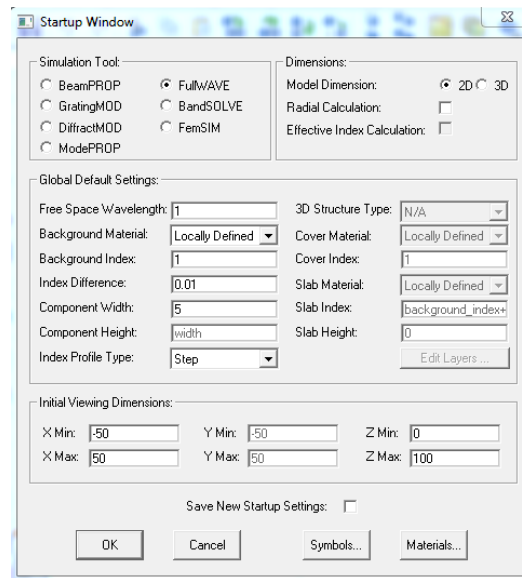


Figure II.2 : la fenêtre de démarrage (startup Window).

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les 7 modules existants dans le logiciel Rsoft : BeamPROP, GratingMOD, DiffractMOD, ModePROP, FullWave, BandSOLVE, femSIM. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure (II.3) [16].

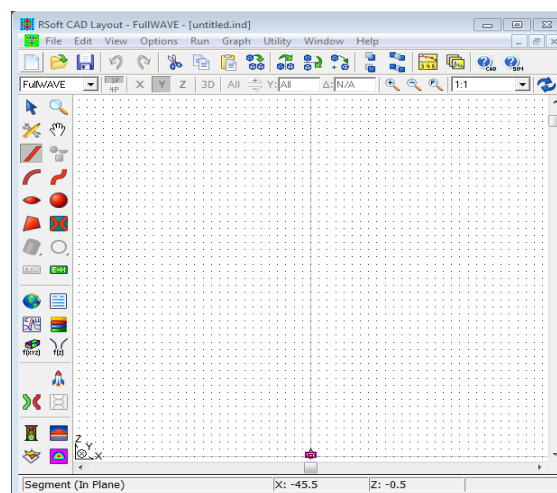


Figure II.3: nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau circuit.

II.6 Création de la structure

Pour créer le composant diffractif, il suffit de tracer un segment dans l'interface de CAD en déplaçant la souris vers la recherché position de départ, appuyer et maintenir le bouton gauche de la souris, déplacer la souris à la position de fin souhaitée, et en appuyant sur le bouton gauche de la souris. Dans cet exemple, nous n'utiliserons un segment à créer la structure. Bien sur, plus des structures complexes peuvent être réalisées grâce à l'utilisation des segments supplémentaires.

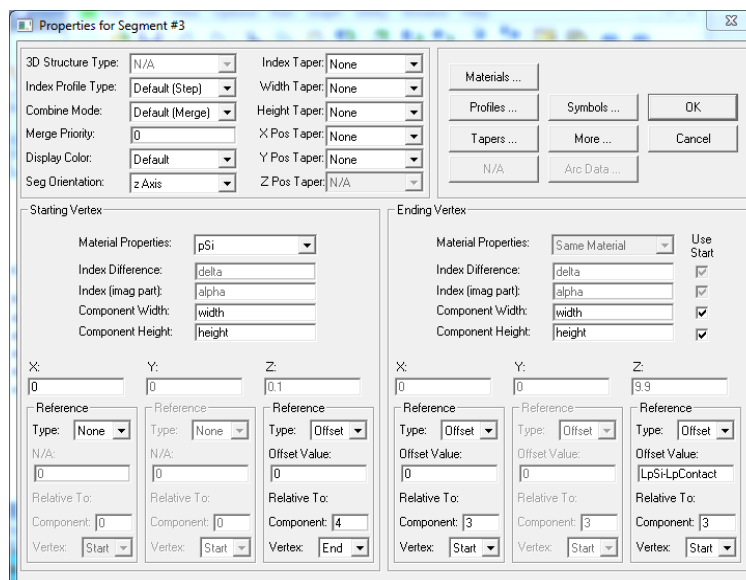


Figure II.4: propriétés sectoriels pour l'objet de guide d'ondes créé.

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure de la cellule solaire qui apparaît sur la figure II.5.

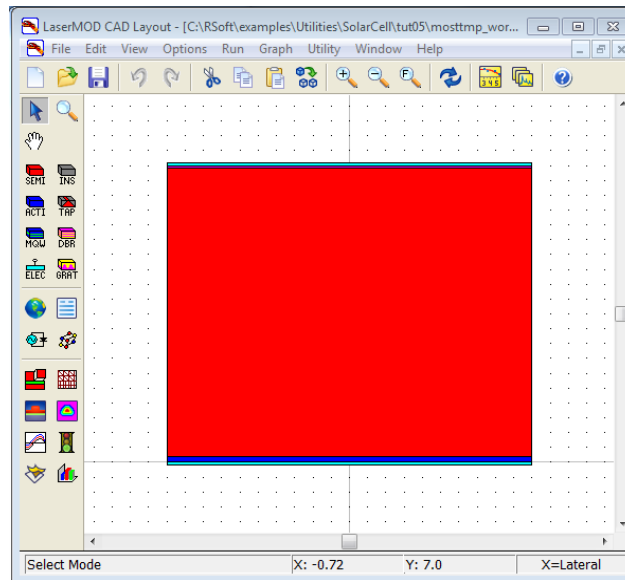



Figure II. 5 : Structure CAD de la cellule solaire.

II.7 Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure6). Ce tableau de symbole permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (l'épaisseur, le dopage, inclure un réflecteur).

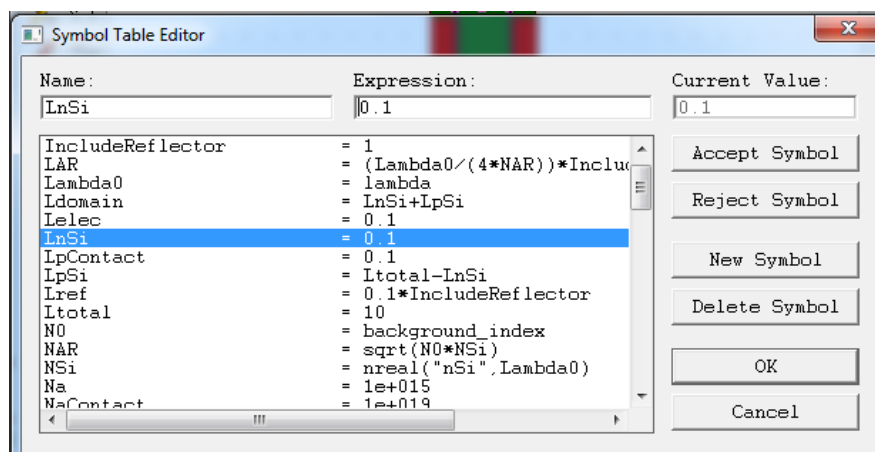



Figure II.6 : l'éditeur du tableau de symbole.

Ces symboles correspondant aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New circuit) de la boîte de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple $\text{LnSi}=0.1$), on clique sur  (**Edit Launch Field**), s'ouvre la fenêtre suivant :

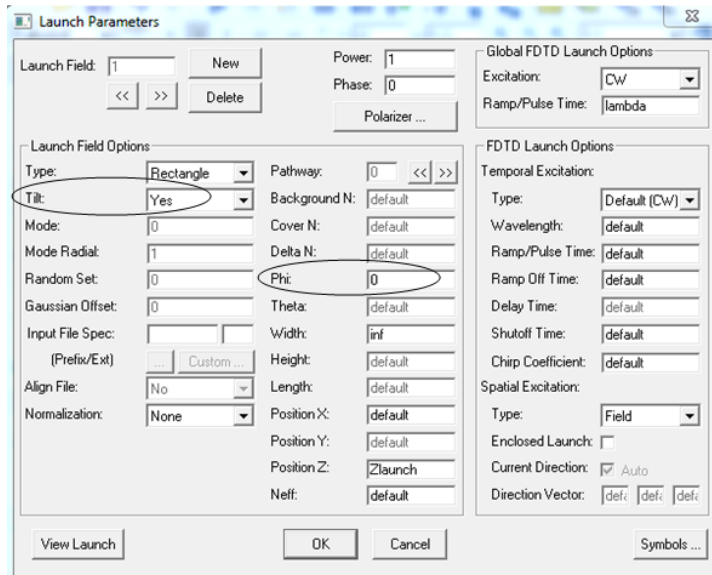


Figure II.7: paramètres de lancement (launch parameters).

Dans cette fenêtre, nous pouvons mettre en place tous les paramètres de simulation. Cependant, puisque c'est un cas simple, nous utiliserons toutes les valeurs par défaut.

II.8 Vérification de la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil du constant diélectrique dans le plan de périodique.

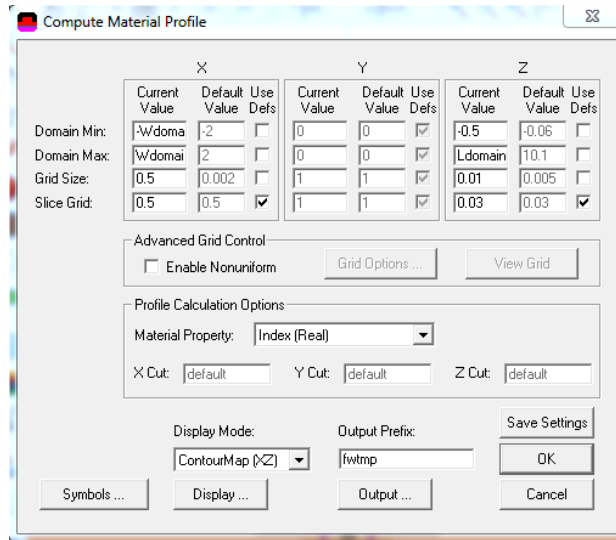


Figure II.8: Arrangement de calcul de profil d'index.

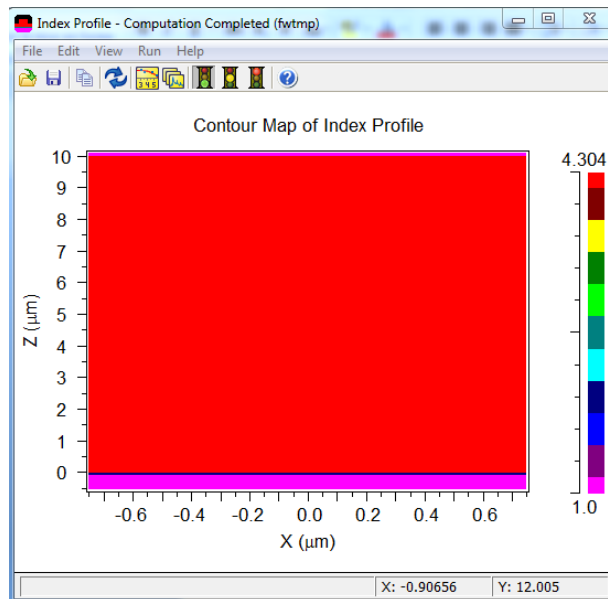


Figure II.9: Distribution d'index pour la configuration non structure.

Maintenant que nous avons créé la structure, nous pouvons définir les paramètres de simulation. Appuyez sur la simulation icône effectuez (**Perform simulation**).

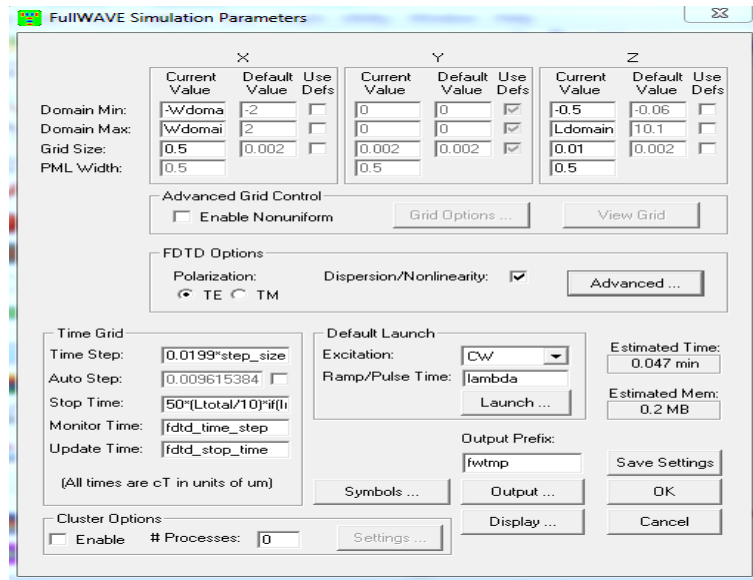


Figure II.10 : La boîte de dialogue paramètre de simulation FullWave.

Dans cette fenêtre, nous pouvons mettre en place tous les paramètres de simulation. Cependant, puisque c'est un cas simple, nous utiliserons toutes les valeurs par défaut.

II.9 L'exécution de la simulation

Appuyez sur le **utility** et **solar-cell**, et on clique sur le bouton OK pour lancer la simulation, comme suit.

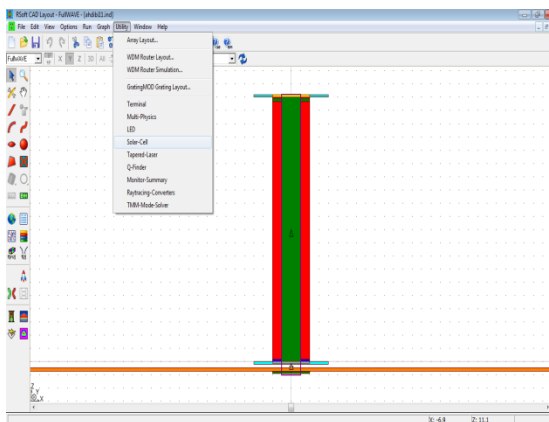


Figure II.11: lancer simulation.

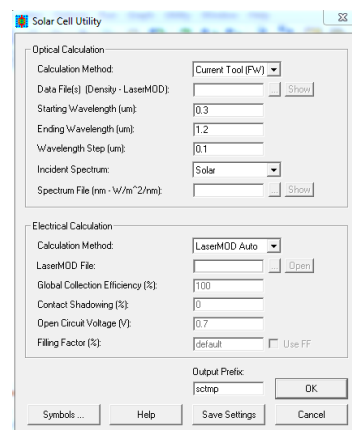


Figure II.12 : utilitaire de cellule solaire.

Une fois la simulation terminée, la courbe L-I-V est visible dans la fenêtre de l'interface graphique de la simulation ou peut être ouverte dans WinPLOT via le bouton de tracé jaune ouvert de l'interface CAD. Notez que le courant (bleu) devient négatif lorsque la lumière incidente (verte) atteint son niveau final. Après cela, il redevient positif au-dessus du seuil de la diode [17].

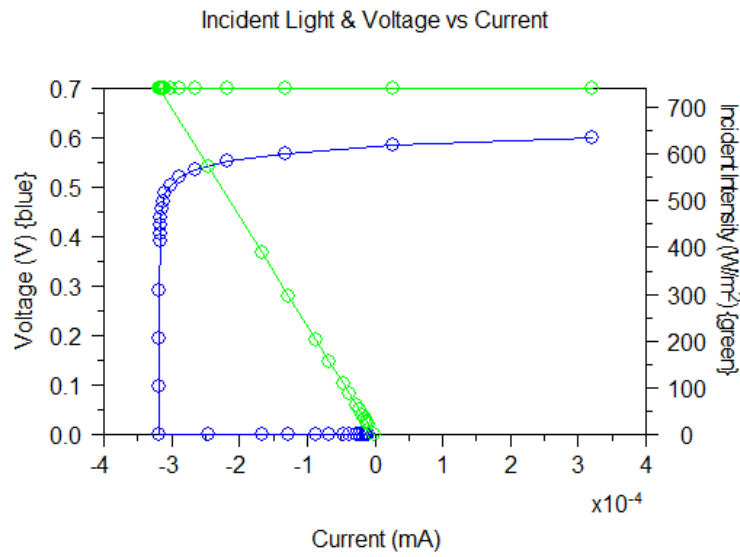


Figure II.13: Courbe L- I-V pour cellule solaire.

Le prochain graphique généré est la courbe J-V, qui montre l'efficacité de la cellule dans le sous-titre et le rectangle de facteur de remplissage dans le signe de hachage. C'est la courbe I-V divisée par la surface incidente de la cellule. Une inspection minutieuse de la parcelle indiquera la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et le point de polarisation optimal (V_{opt} , J_{opt}). Les valeurs précises de ces paramètres, telles que déterminées par le simulateur, sont également écrites dans un fichier portant la désignation <préfixe> .sol (voir tableau 2). L'efficacité de la collecte et le facteur de remplissage y sont également archivés. Le fichier .sol est créé avec les tracés d'efficacité de la cellule [15].

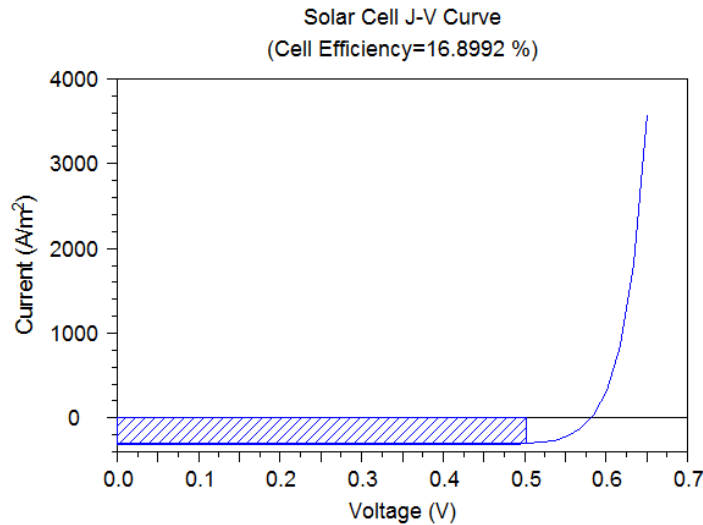


Figure II.14: Courbe I-V pour la cellule solaire. L'efficacité des cellules est donnée dans le titre.

Cell Efficiency (%)	Filling Factor (%)	Collection Efficiency (%)	Open Circuit Voltage (V)	Short Circuit Current(A/m ²)	Optimal Bias Voltaige (V)	Optimale Bias current(A/m ²)
16.8992	82.2596	92.9012	0.582299	-317.589	0.50254	-302.711

Tableau II.1 : Resultat du simulation.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, le logiciel RsoftCAD, avec le module solar-cell, ce module est basé sur la méthode de FDTD. Cette technique est une méthode bien adaptée pour la modélisation des cellules solaires principalement parce qu'elle permet l'accès aux caractéristiques dynamiques des structures (transmission, réflexion, localisation des champs, facteur de qualité de résonateurs,...). Elle permet l'utilisation de sources de profils spatiaux (modes guidés, ondes planes, source ponctuelle) et de profils temporels (harmoniques, impulsions) divers et variés. Enfin, les étapes de simulation de Module cellule solaire.

CHAPITRE III :
RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS.

III.1 Introduction

Les axes essentiels pour l'étude d'une cellule photovoltaïque en couche mince à base de matériaux ayant des dimensions de l'ordre du nanomètre, nous allons pouvoir procéder dans ce troisième et dernier chapitre à simulation de notre modèle sous les environnements RsoftCAD.

III.2 Design et description de la cellule utilisée

III.2.1 Structure étudié

Le modèle choisi pour notre étude est une cellule solaire à mono jonction à base d'alliage "GaAs" ou "Si", ayant une structure PIN. Telle qu'elle est schématisée sur la figure (III.1) à l'aide du simulateur numérique Rsoft, où la couche supérieure "GaAs-p" ou "Si-p" est quasi transparente, afin de permettre une absorption du rayonnement dans la région pn.

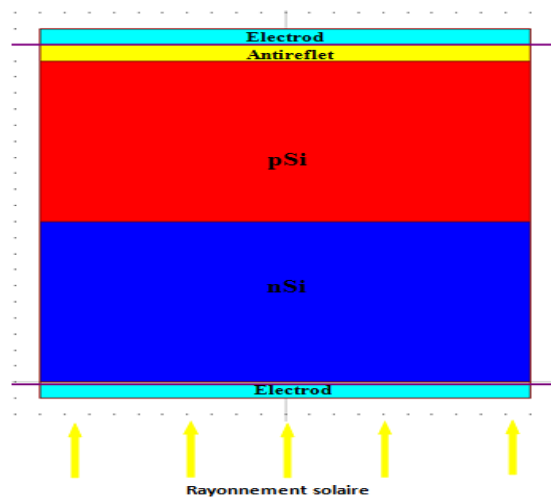


Figure III. 1 Structure de la cellule PIN.

L'épaisseur de cette cellule est de $10\mu\text{m}$ pour avoir une bonne extraction des porteurs par l'intermédiaire du contact électrique, où cette dernière est dopée p. Par conséquent, on va introduire à la couche inférieure un dopage de type n. La couche GaAs ou Si intrinsèque a pour objectif de maximiser l'absorption dans la région, car cette dernière peut absorber le maximum de la lumière incidente.

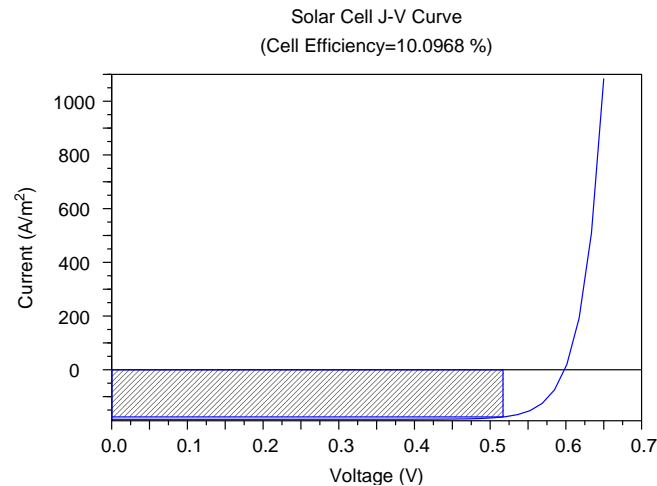


Figure III. 2 Caractéristique courant-tension de la structure PIN.

Cette figure représente le changement de densité de courant par rapport la tension, Où le plus la tension a augmenté la densité, cela affecte de l'efficacité de la cellule. Pour obtenir le plus d'efficacité possible, il est nécessaire d'étudier plusieurs facteurs.

III.3 Optimisations des paramètres géométriques et physiques

Après avoir défini notre structure de base pour une cellule solaire à base de "GaAs" ou "Si" dans cette troisième partie de notre simulation, nous allons faire une optimisation de quelques paramètres ayant une grande influence sur le rendement de la cellule dans le but d'obtenir le rendement optimum qui soit. Les paramètres dont il est question sont l'effet d'antireflet, l'angle incident, l'épaisseur de la couche active "GaAs" ou "Si" et le dopage de la couche active dans cet alliage "GaAs" ou "Si".

III.3.1 Effet d'antireflet :

Actuellement, on utilise dans la fabrication des cellules solaires des couches antireflets qui permettent une absorption maximale de spectre solaire. Ces couches sont généralement très minces et transparentes, fabriquées avec une texturation de la surface et ayant un indice de réfraction plus faible que celui de l'absorbeur "Si" / "GaAs", afin que l'effet anti reflet opère ainsi sa permettra de minimiser les reflets de la lumière.

Matériaux	Le rendement (%)	
	Avec l'antireflet	Sans l'antireflet
Si	16.8992	14.6327
GaAs	19.0812	16.5234

Tableur III.1: Valeur de rendement par rapport de couche l'antireflet.

Afin d'évaluer les performances de notre structure avec une couche antireflet. On va ajouter une couche de aluminium (Al) de 20 nm sur l'absorbeur "Si" / "GaAs" dans notre structure de référence, avec une épaisseur de la couche intrinsèque de 10 μm .

Le tableur (III.1) indique la valeur d'efficacité par rapport couche antireflet. On peut dire qu'on a obtenu un plus grand de rendement avec cette couche antireflet, dû à une plus grande absorption de lumière donc une plus grande absorption de photons.

En conclusion, la couche antireflet de la cellule nous permettra une augmentation significative du rendement.

III.3.2 Variation de l'angle :

Dans une deuxième étape, nous allons varier de l'angle incident de la lumière pour les deux cellules fabriqué à "GaAs" et "Si" de notre modèle dans un intervalle allant de (0°) à (50°).

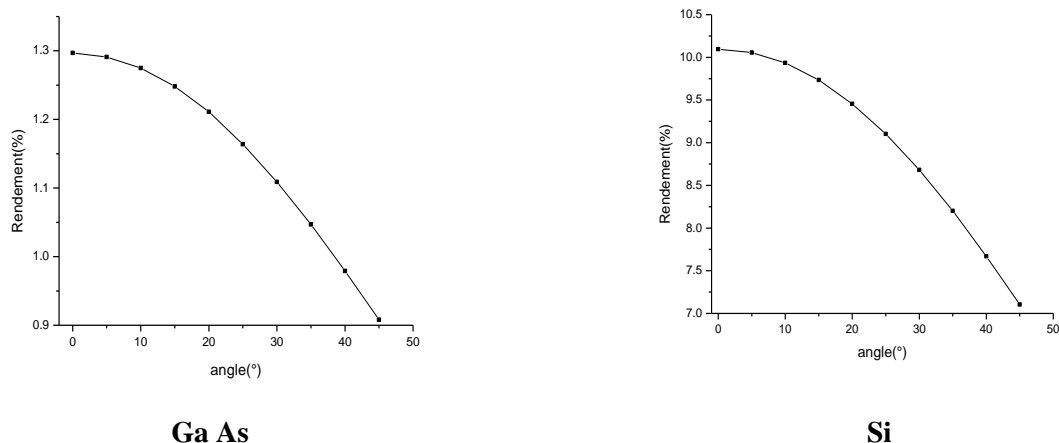


Figure III.3: Rendement de la cellule pour variation de l'angle incident

Cette figure représente le rendement en fonction de l'angle incident, Où nous remarquons que l'efficacité de la cellule est optimale à l'angle (0°) et décroît à mesure que l'angle augmente, pour être absente à l'angle (45°), ce qui est dû à la diminution du rayonnement incident pour les deux matériaux.

III.3.3 Variation de l'épaisseur :

Dans une cette étape, Nous allons varier l'épaisseur de la couche active pour les deux cellules utilisé "GaAs " et "Si" de notre modèle dans un intervalle de $0.1\mu\text{m}$ à $0.6\mu\text{m}$.

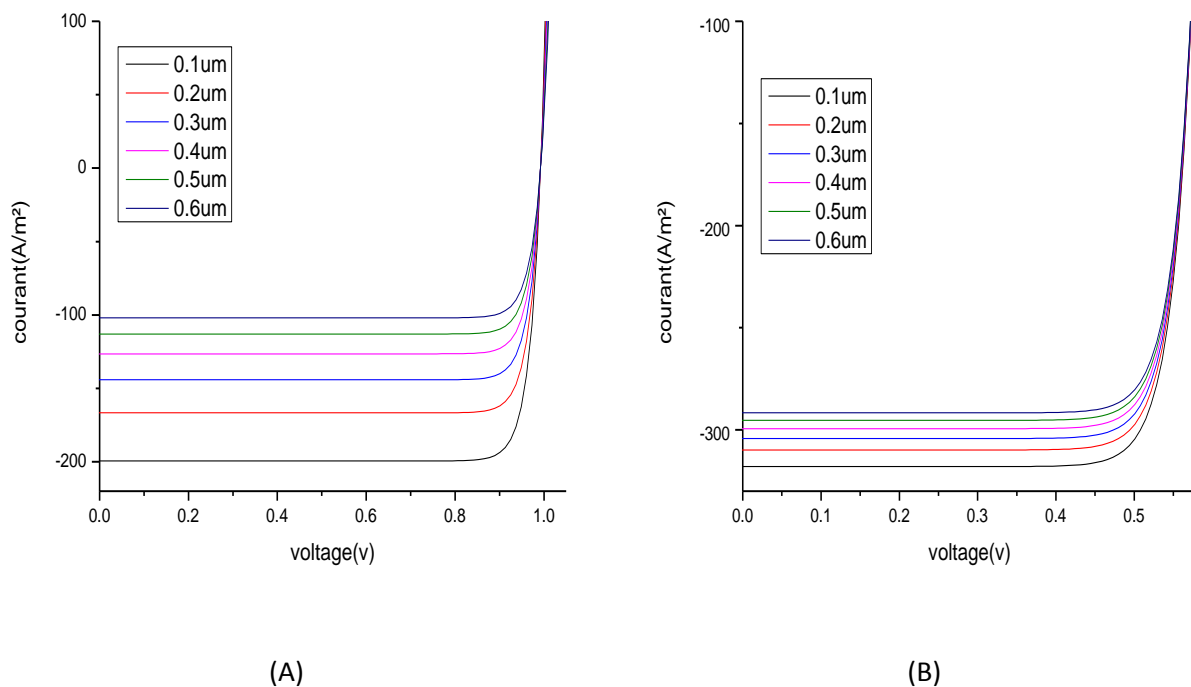


Figure III.4 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche (A) GaAs, (B) Si.

Cette figure représenté la caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche de silicium et le arséniure de gallium, où on remarque stabilisé le courant pour déférentes valeurs de tension jusqu'à ce qu'ils atteignent une certaine valeur, puis augmentent.

- La cellule de GaAs: la meilleure valeur de courant est -100A/m pour $0.1\mu\text{m}$ et 1v .

-La cellule de Si: la meilleure valeur de courant est -300A/m pour $0.1\mu\text{m}$ et 0.5v .

On observe sur la Figure III-4, que J_{cc} et V_{oc} croissent de façon substantielle avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante. Ceci pourrait être dû au fait que plus de photons avec de grandes longueurs d'onde sont absorbés par l'absorbeur lorsque celui-ci est plus large et de ce fait un nombre accru de paires électron-trou est observé. Ceci produira donc des améliorations dans les valeurs de J_{cc} et V_{oc} et donc de l'efficacité [20].

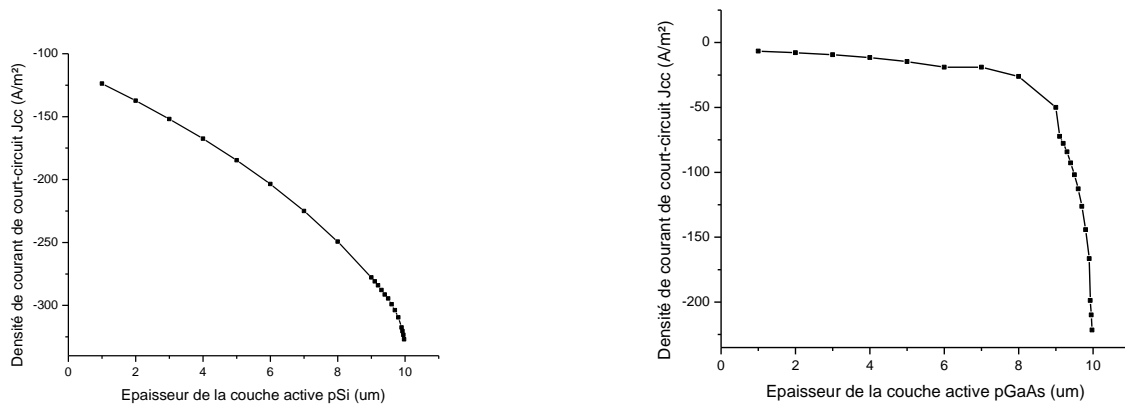


Figure III. 5 Densité de courant de court-circuit (J_{cc}) en fonction de la variation de l'épaisseur d'*pSi* et de *pGaAs*.

D'après les résultats obtenus des caractéristiques courant-tension illustrées dans la figure (III.5), on remarque que la densité de courant est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche active. D'où on voit que la densité de courant J_{cc} une épaisseur de la cellule d'Si égale à 1 μm est de $-123 A/m^2$ et pour la cellule d'GaAs est $-6 A/m^2$, puis elle diminue graduellement avec augmentation de l'épaisseur pour atteindre une valeur d'Si $-327 A/m^2$ et d'GaAs $-236 A/m^2$ à une épaisseur aux alentours de 10 μm . vu qu'une très grande épaisseur de la couche va impliquer une réduction du courant à cause de la recombinaison des photons non collectés [6].

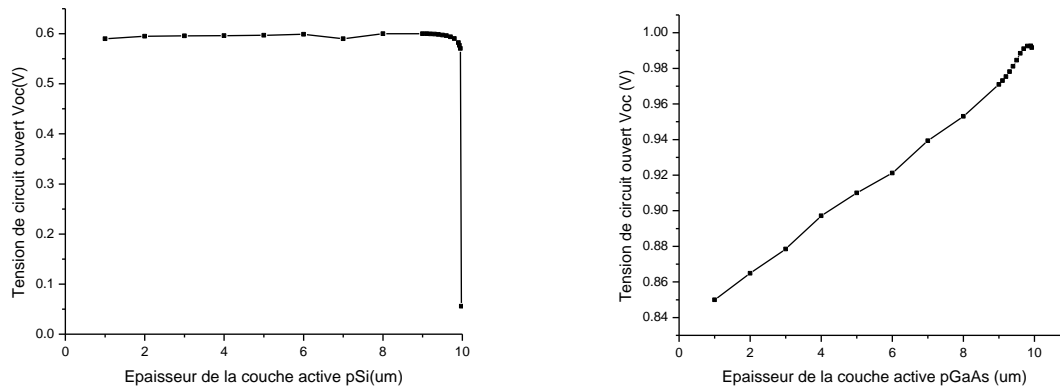


Figure III. 6 Tension de circuit ouvert (V_{co}) en fonction de la variation d l'épaisseur d pSi et d pGaAs.

Si on prend la courbe de la tension en fonction de l'épaisseur de la couche active, premièrement pour la cellule d'Si on remarque que la tension est inversement proportionnelle à l'épaisseur comme au courant. D'où on remarque que la tension à une épaisseur de $1\mu\text{m}$ est égale 0.59 V , puis cette dernière se décroît continuellement avec l'augmentation de l'épaisseur. On peut justifier cela par le gap d'énergie ou bien par l'augmentation de la densité de défauts [5]. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent pas générer de paire électron-trou et par conséquent, sont perdus. L'excès d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite est principalement dissipé sous forme de chaleur (phénomène de thermalisation). Ceci influe sur la création des paires électron-trou contribuant à l'ensemble de photo courant [21].

Mais pour l'GaAs on remarque que la tension est proportionnelle à l'épaisseur où on remarque que la tension à une épaisseur de $1\mu\text{m}$ est égale 0.85 V . Puis cette dernière se augmente continuellement avec l'augmentation de l'épaisseur. Ceci s'explique par une absorption considérable de photons dans cette couche.

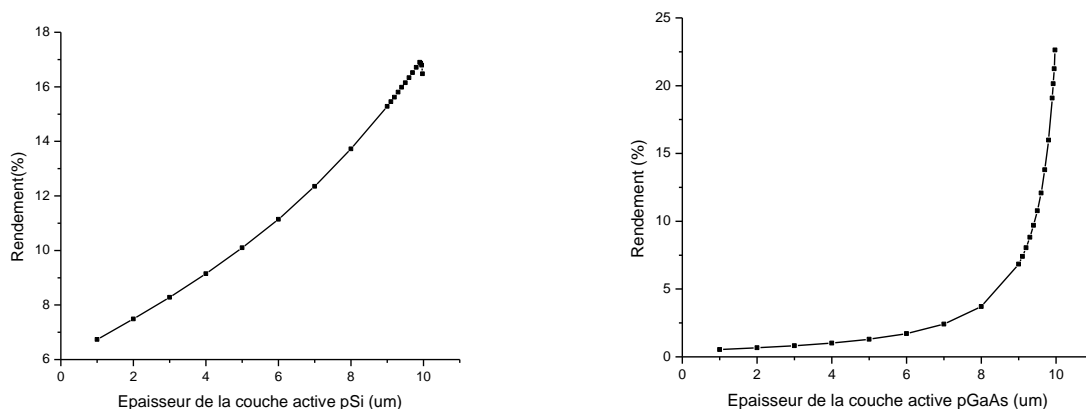


Figure III. 7 Rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur d'pSi et d'GaAs.

Cependant, afin de conclure sur l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque, nous avons aussi tracé la courbe du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche active. D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'épaisseur de la couche d'GaAs ou d'Si peut avoir une influence positive sur la structure comme peut aussi avoir une influence négative. D'où on constate qu'à une certaine valeur d'épaisseur située aux alentours de 10μm, on obtient un maximum de rendement. Ce qui revient sûrement à un accommodement entre l'absorption des photons et le gap d'énergie [6].

On peut ajouter aussi que cette valeur optimale d'épaisseur dépendra de plusieurs facteurs tels que le dopage, la densité de défauts et la mobilité de porteurs [6].

Le rendement décroît lorsque l'épaisseur de la couche active est réduite. Donc la probabilité de recombinaison des transporteurs générés est plus importante au voisinage du contact arrière.

Quand les porteurs atteignent la couche active (la jonction p-n), ils vont se recombiner dans la couche tampon, ou ils vont circuler dans la couche d'absorbeur ce qui diminue la densité du courant photo-généré ce qui implique la diminution du rendement de conversion [21].

Nous concluons qu'il faudrait choisir une épaisseur seuil pour avoir le rendement électrique optimal. Dans notre cas, cette épaisseur est de 10μm

III.3.4 Variation du dopage

La dernière étape, après avoir fait varier l'épaisseur de la couche active, dans cette étape nous allons fixer l'épaisseur de notre modèle à 10 μm et faire varier le dopage entre 10^{10} et 10^{20} cm^{-3} .

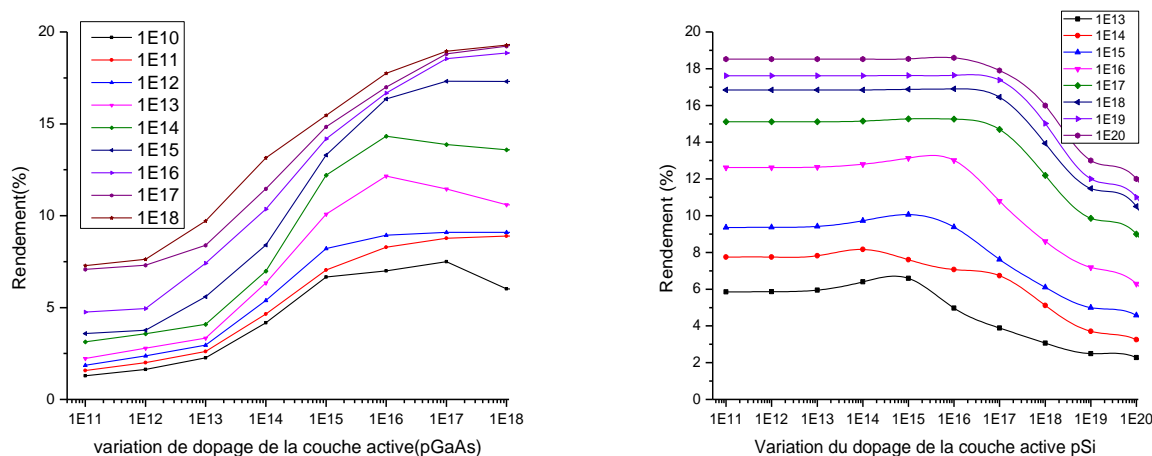


Figure III.8 Rendement de la cellule en fonction du dopage de couche active GaAs et Si pour différentes valeurs de dopages de la couche passive

La figure (3.8) représente la courbe de rendement en fonction du dopage de la couche active de la cellule. On remarque que le rendement de silicium est constant pour des dopages inférieurs à 10^{16}cm^{-3} . Mais, commence à diminuer quand on augmente la concentration du dopage au-delà de 10^{16}cm^{-3} . Le rendement le plus élevé est obtenu à la concentration de 10^{16}cm^{-3} .

Mais pour le rendement arséniure de gallium est inverse où on remarque augmentation de dopage avec l'augmentation de rendement jusqu'à ce qu'il atteigne de dopage 10^{16} , puis se stabilise. Grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges [22.23].

D'un autre côté, lorsque le dopage de la couche active augmente, la barrière de potentiel diminue, et permet une augmentation de la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion [24].

III.5 Spectre solaire

La source lumineuse exploitée est ici le soleil dont le spectre d'irradiance est comparable à celui d'un corps noir à 5776K avec un pic d'émission principal autour de $\lambda=500\text{nm}$. Lorsque le capteur utilisé est du silicium, une bonne partie de ce spectre est absorbée pour convertir cette énergie solaire en une énergie électrique, il s'agit de la gamme spectrale allant de 300 nm à 1200 nm.

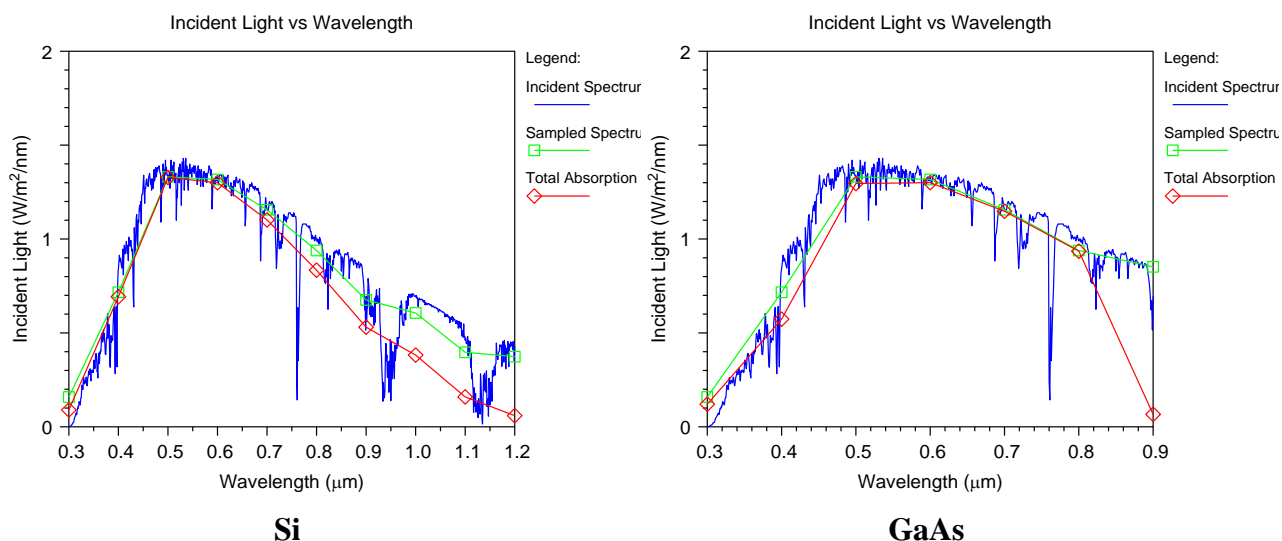


Figure III.9 : spectre solaire.

En résumé, il suffit d'étudier la réponse spectrale relative à une cellule donnée et voir la zone convenable du spectre, là où il faudrait placer les nouveaux photons une fois la transformation est réalisée. Dans la figure III.9, les deux transformations étudiées permettent un décalage de 2000 nm (transf. 0,2) ou de 5000 nm (transf. 0,5), des longueurs d'ondes inférieures ou égales à 4000 nm pour lesquels la réponse spectrale est médiocre [25].

III.6 Conclusion

Dans ce troisième et dernier chapitre nous avons d'abord présenté le design de notre structure de la cellule solaire à modélisée, qui était à la base une cellule solaire (GaAs)/(Si) à mono-jonction.

Nous avons fait une étude d'optimisation des différents paramètres de notre structure à couche graduelle. En premier lieu, nous avons introduit une couche antireflet à notre modèle afin d'absorber le maximum qui soit de la lumière, et changement de l'angle incident sur cellule solaire. On a fait une variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque. Après avoir obtenu une efficacité optimale, on a fixé l'épaisseur et faire varier le dopage de cette dernière afin d'obtenir l'efficacité optimale en fonction du dopage de la couche active. Effectivement les résultats trouvés montrent un meilleur rendement pour notre modèle.

Nous avons conclu à partir des résultats est le matériau GaAs est le matériau optimale par rapport le Si.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons fait une étude détaillée d'une cellule solaire à base de matériaux ayant des dimensions nanométriques, afin de montrer l'impact de cette technologie sur l'efficacité d'une cellule solaire, ainsi que les avantages procurés pour le domaine du photovoltaïque. Ce mémoire avait pour objectif principal la modélisation d'une cellule solaire à base d'Si et d'GaAs. Cet alliage a fait l'objet de plusieurs sujets de recherches au cours des dernières années grâce à ces caractéristiques semi-conductrices considérées comme exceptionnelles, vu qu'il possède le plus large des gaps modulables capable de couvrir quasiment tout le spectre solaire allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. D'ailleurs le succès de l'Si et l'GaAs dans le domaine de l'optoélectronique, surtout au niveau des diodes lasers et les LEDs, a fait de lui un élément clé pour les applications photovoltaïques car son utilisation dans des cellules solaires permettra d'avoir des hauts rendements à un coût concurrentiel.

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs. Nous avons aussi optimisé les paramètres physiques et géométriques d'une structure spécifique de cellule solaire à base de "Si" et "GaAs" pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

La simulation est été faite par le logiciel Rsoft CAD, pour étudier les performances des cellules solaires à base de "Si" et "GaAs". Nous avons évalué, dans un premier temps, le courant de court-circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , le rendement électrique η .

Pour conclure, ce mémoire résume l'étude du développement d'une cellule photovoltaïque à base d'un matériau (Si et GaAs) , fabriqué avec les applications des nanotechnologies, en passant par les différentes techniques utilisées dans la fabrication de ce type de cellules, l'étude du matériau utilisé dans ces composants et enfin la présentation du modèle de la structure proposée.

Une optimisation des paramètres a été également effectuée ainsi que des suggestions pour une optimisation des performances de la cellule.

Références

- [1] **M.PETIBON. Stéphane** : Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications PV. Université Toulouse, Thèse de doctorat jan 2009.
- [2] **David REAUX** : Cellules PV à hétérojonction de silicium (a-Si :H/ c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface, Université Paris, thèse de doctorant 2017.
- [3] **BENLOUCIF NISRINE** : Potentialités de films de silicium poly cristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches, Université Costantine.
- [4] **DRIDIREZGUI. Béchir** : Etude des propriété optique, électrique et structurales des nanoparticules de « Si » insérées dans une matrice diélectrique et étude de leur intégration pour des cellules PV à haut rendement , 2010.
- [5] **Dr. BELAID LALOUNI Sofia** : cours Energie solaire PV.2014.
- [6] **MOHAMED MIMOUNE** : Etude des capteurs PV basés sur les nanotechnologies. Université Québec, Thèse de doctorat Mars 2006.
- [7] **Julien Degoulange** : Purification et caractérisations physico-chimique et électrique de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque, 2008.
- [8] Internet. <http://Wikipedia.org/Wiki/> Arséniure de gallium.
- [9] European Photovoltaic Industry Association : www.epia.org
- [10] Internet. <http://Wikipedia.org/Wiki/> Silicium.
- [11] **HADJISSI Oum ELKHIR** : Etude expérimentale d'un panneau solaire PV dans la région de M'sila. Université de M'sila Mmoire de magéster 2017.
- [12] Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, Sep 2000.
- [13] **Aradji Malia** : Etude et modélisation des cellules PV. Université M'sila, Mémoire de magister 2015.
- [14] **Belhadj Mohammed**: Modélisation d'un système de captage PV autonome. Université de Bachar Mmoire de Magister 2008.
- [15] Etude théorique des cellules PV organique. Structure réseau interpénètre polymère conjugué fullerène cellules Graetzel. Dspase.univ-tlemcen.dz/handle.

- [16] **Roguiya chendi** : Amélioration de l'absorption dans les cristaux photonique (CP) 2D Application aux cellules. Université de M'sila. Mmoire de magister 2015
- [17] Laser MOD 2013.12.
- [18] **OUANOUGHI Asma** : Amélioration d'absorption des cellules solaires par l'utilisation des CP en couche minces. Université M'sila. Thèse de doctorat 2016.
- [19] **HARHOUZ Ahlam** : contribution à l'étude et la conception des capteurs à base des CP. Thèse de doctorat 2017.
- [20] **internat** // www.researchgat.net/ performances des cellules solaires.
- [21] **MOSTFA KARA Selma** : Etude et simulation de cellule PV a couches minces à base de CIS et CIGS. Université telemcen,2012. .
- [22] **MEDJDOUB Sarra** : Etude structurale des cellules solaires deuxième et troisième génération. Univ Abou Backer Belkaid telemcen 2016.
- [23] **DJERIOUAT KHADIJA** : Optimisation du rendement des cellules PV à hétérojonction :GaInP/GaAs. Univ telemcen 2011
- [24] **Pierre PARET** : Nouveaux concept pour la réalisation de cellules PV à contacts inter digités sur substrats minces en 'Si' cristallin. Thèse de doctorat Dec 2007.
- [25] **H. El Omari, M. Lotfi, A. Tajmouati, A. Errkik et A. Alhamany**, '*Transformation des Photons Hautes Energies non Exploitable dans la Conversion Solaire*', 3ème Congrès International sur la Physique des Interactions Rayonnement – Matière (PIRM III), 35-10, 139, Marrakech 5-7 Avril, 2006.

RÉSUMÉ :

La consommation d'énergie est nécessaire au développement social et économique. Ces médiocrités rappellent l'extrême importance de la maîtrise énergétique : savoir créer de l'énergie, savoir l'économiser aussi, il y a un compromis entre la production et la consommation et par suite il faut entrer dans une logique forte d'économies d'énergie et augmenter nettement la part des énergies renouvelables.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire.

Dans ce travail, nous avons réalisé une cellule solaire à monojonction à base des matériaux Si/GaAs dans le but d'optimiser le rendement en agissant sur quelques éléments constituant la cellule.

Mots clés : cellules solaires, énergies renouvelables, silicium /Arséniure de Gallium.

ABSTRACT

The consummation of energy is required for the development social and economic. These equilibrium necessities the most importance of the utilization of the energy: know how create energy and know economized this energy. There is a compromise between the production and the consummation.

Furthermore, everybody must have a fort logical in utilization of energy in the world. The conversion photovoltaic is the transformation direct of the electromagnetic energy on electrical permanent energy. Even, this electromagnetic energy is the solar radiation. In this work, we were realized a monojunction solar cell Si /GaAs in the mean of optimization of its efficiency on action of the elements constructed the cell.

Key words:

Solar cell, renewable energies, selenium/Arsenic of gallium

ملخص

استهلاك الطاقة ضروري من اجل التقدم الاجتماعي والاقتصادي ، وهذا الاعتدال يتطلب ضرورة التمكن من الاستغلال الأمثل لهذه الطاقة ومعرفة استغلالها بطريقة اقتصادية أيضا يجب أن يكون هناك توازن بين إنتاج الطاقة واستغلال وبالتالي يجب ان يدخل الإنسان في منطق الاقتصاد في الطاقة الكهربائية ورفع أسهم الطاقات المتجددة .

تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية هو تحويل الطاقة الالكترومغناطيسية (طاقة الفوتونات الضوئية) إلى طاقة كهربائية (تيار مستمر)، هذه الطاقة الكهرومغناطيسية هي غالبا أشعة ضوئية.

في هذه المذكرة، قمنا بانجاز خلية شمسية من مادتي Si/GaAs بهدف تحسين مردود هذه الأخيرة مؤثر تربيين على خصائص الخلية الشمسية.

الكلمات الرئيسية : خلايا شمسية، طاقات متجددة، سيليسوم/ارسنيورالغاليوم.