

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1**  
**FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE**

# *Mémoire*

*Pour l'obtention*  
*du diplôme de magistère en électronique*  
*Option*  
*matériaux et systèmes micros et nanoélectronique*  
*Thème*

---

## *Modélisation d'une cellule solaire à puits quantique en GaAs/AlGaAs*

---

*Présenté par :*

*Mamri Badreddine*

*Membres du jury:*

Président :	Mr. Messaoud Boukezzata	Prof .Université de Constantine 1
Rapporteur :	M. Mimia Marir-Benabbas	Prof .Université de Constantine 1
Examineurs :	Mr. kerbach taher	Prof Université de Constantine 1
	Mr. Abdeslam Houam	M .C.A Université de Constantine 1

*2013-2014*

# Remerciements

*Je remercie ALLAH Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*J'exprime mes chaleureux remerciements à madame Mímía Marír-Benabbas Professeur au département d'électronique, Université de Constantine, qui a suivi avec excellence mes travaux et pour ses fructueuses remarques, ses encouragements et sa passion pour la recherche .Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

*Je remercie sincèrement monsieur Kerbache Tahar Professeur à l'université de Constantine (département physique) d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Je remercie sincèrement monsieur Boukezzata Messaoud Professeur à l'université de Constantine d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Je remercie monsieur abdeslam Houam Maître de conférences à l'université de Constantine d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Mamri Badreddine*

# *Dédicace*

*A*

*Ma très chère mère  
Mon très cher et regretté père  
Mes chers frère et sœurs  
Ma chère épouse  
toute ma famille  
Mon encadreur M .Mimia Marir  
Tous mes collègues et mes amis  
Tous ceux que j'aime*

*BADREDDINE MAMRI*

# ***Sommaire***

# SOMMAIRE

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **CHAPITRE I : le gisement solaire et la conversion photovoltaïque**

Introduction.....	01
I- Définition générale.....	01
I-1 Coordonnées terrestres.....	01
a) La longitude.....	01
b) La latitude.....	02
c) L'altitude .....	02
I-2 Rappels de quelques éléments de géométrie.....	02
a) Les coordonnées horaires.....	03
b) Les coordonnées horizontales.....	03
c) La déclinaison du soleil.....	03
I-3 Le rayonnement solaire.....	04
I-3-1 Soleil.....	04
I-3-2 Caractéristiques de rayonnement solaire.....	05
a) Energie renouvelable .....	05
b) Le rôle de l'atmosphère .....	05
c) Masse d'air .....	05
I-3-3 Différents types de rayonnement .....	06
a) Le rayonnement direct .....	06
b) Le rayonnement diffus.....	07
c) L'albédo.....	07
d) Le rayonnement global.....	07
I-3-4 Distribution spectrale.....	08
I-3-5 Les influences diminuant l'intensité des rayons du soleil.....	09
a) Les conditions météo .....	09
b) Le nombre d'heure de soleil dans la journée.....	10
c) Les aérosols .....	10
d) l' albédo .....	10
I-4 Quelques grandeurs photométriques.....	10
a) Le flux .....	10
b) L'intensité lumineuse.....	10
c) L'éclairement.....	11
d) L'exposition .....	11
e) La luminance .....	11
I-5 Le photovoltaïque.....	12
a) Historique.....	12
b) L'absorption .....	15
c) Effet photoélectrique .....	15
I-6 Les cellules solaires.....	16
a) Définition .....	16
b) Le principe de fonctionnement.....	16
c) Les caractéristiques de la cellule solaire .....	17
Conclusion.....	18

## CHAPITRE II : Théorie générale sur les hétéro-structures et les cellules solaires à puits quantique

Introduction.....	19
I. Propriétés du matériau utilisé.....	19
I-1 GaAs .....	20
I-2 L'alliages $Al_xGa_{1-x}As$ .....	22
II- Position des bandes d'énergie d'une hétérojonction- modèle d'ANDERSON.....	23
III- Les différents types d'hétérojonctions.....	26
IV- Les hétérostructures à base des semi-conducteurs III-V (GaAs/GaAlAs).....	28
IV.1. Puits quantiques .....	29
IV.2 Les états électroniques liés à un puits de potentiel.....	30
IV.2.1 Structure de sous bande d'énergie .....	30
IV.2.2 Occupation de sous bandes .....	31
Conclusion.....	32
<b>CHAPITRE III : Modèle d'une cellule solaire à puits quantique.....</b>	
Introduction.....	33
I- Cellule solaire à puits quantique.....	33
I-1 Structure.....	33
I-2 La dynamique des porteurs dans le puits quantique.....	34
I-3 La génération au niveau du puits (escape et le $\Delta Ec$ ).....	36
II-Approximations .....	36
III-but de la modélisation.....	37
IV-modélisation de la cellule solaire à puits quantique.....	38
V- caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire à puits quantique .....	40
V-1 Calcul du courant $I_{PH}$ .....	40
V-1-1courant des trous dans la région dopée type N.....	41
V-1-2courant des électrons dans la région dopée type P.....	45
V-2 calcul de la densité du courant $J_{QW}$ .....	47
a) Calcul de l'énergie de confinement $E_c$ .....	47
b) Calcul de la densité d'états dans le puits quantique.....	52
c) Population électronique .....	54
d) Densité du courant $J_{QW}$ .....	56
Conclusion .....	57
<b>CHAPITRE IV : résultats et interprétations.....</b>	
Introduction.....	58
I- Le modèle mathématique de la cellule solaire .....	58
I-1 La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire idéale .....	58
I-2 La caractéristique $I(V)$ dans le cas ou $R_s = 3\Omega$ et $R_{sh} = 1000$ .....	61
I-2-1 La méthode de Newton-Raphson.....	62
I-2-2 L'organigramme principal.....	64

II- L'influence des paramètres géométriques et technologiques sur la caractéristique I(V)	68
II-1 L'influence de la température T.....	68
II-2 L'influence du nombre de puits quantique.....	71
II-3 L'influence du dopage .....	73
II-4 Influence des énergies $E_1, E_2$ .....	74
II-5 Influence de la résistance série.....	75
II-6 Influence de la résistance de shunte (parallèle).....	77
Conclusion.....	80
Les annexes.....	
Liste des figures.....	
Liste des symboles.....	
Référence	
bibliographique.....	
<b>ملخص</b>	
Abstract.....	
Résumé.....	

# *Chapitre I*



## **Introduction :**

L'énergie solaire est la ressource primordiale la mieux partagée au monde. Les générateurs photovoltaïques permettent d'exploiter cette source. Elle est formellement une solution technique et économique pour l'électrification en site isolé, tant dans les pays en voie de développement que dans les pays industrialisés.

Le rayonnement solaire n'est pas toujours perpendiculaire à la surface du sol, les panneaux devraient être installés avec une certaine inclinaison et orientés dans une direction de façon à ce que les rayons solaires soient perpendiculaires aux générateurs.

De ce qui précède, nous avons jugé utile de présenter dans ce chapitre une notion générale sur le gisement solaire ainsi que la conversion photovoltaïque.

## **I- Définition générale :**

### **I-1 Coordonnées terrestres : [4]**

Tout point de la surface terrestre est repéré par ces coordonnées géographiques :

Longitude et latitude, ainsi que par son altitude. Voir figure (I-1)

#### **a) Longitude :**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ), l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude sera désignée ici par la lettre «  $\lambda$  ».

✓ Longitude OUEST  $\lambda < 0^\circ$

✓ Longitude EST  $\lambda > 0^\circ$

Un écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps légitime.

Pour Constantine la longitude est de :  $42^\circ 3'$  [4]

### b) La latitude :

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud. [5]

### c) L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre. [4]

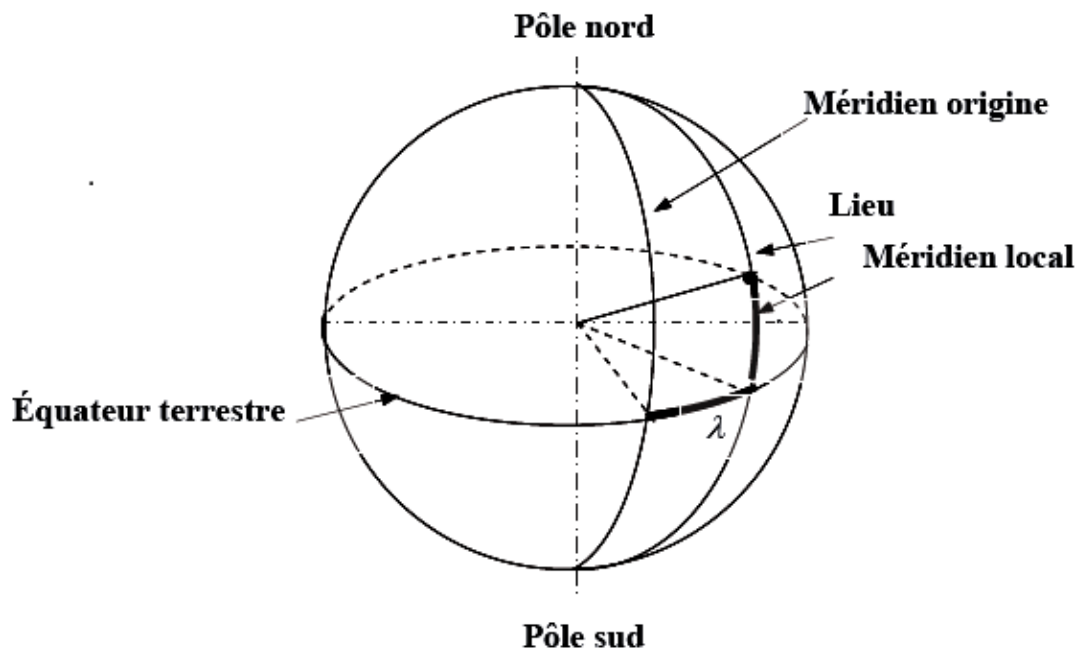


Figure (I-1) : Coordonnées terrestre [6]

### I-2 Rappels de quelques éléments de géométrie:

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'elliptique ». La distance terre soleil ne varie que  $\pm 1,7\%$  par rapport à sa valeur moyenne qui est de  $1,49675 \cdot 10^8$  km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet. Voir figure (I-2) [7]

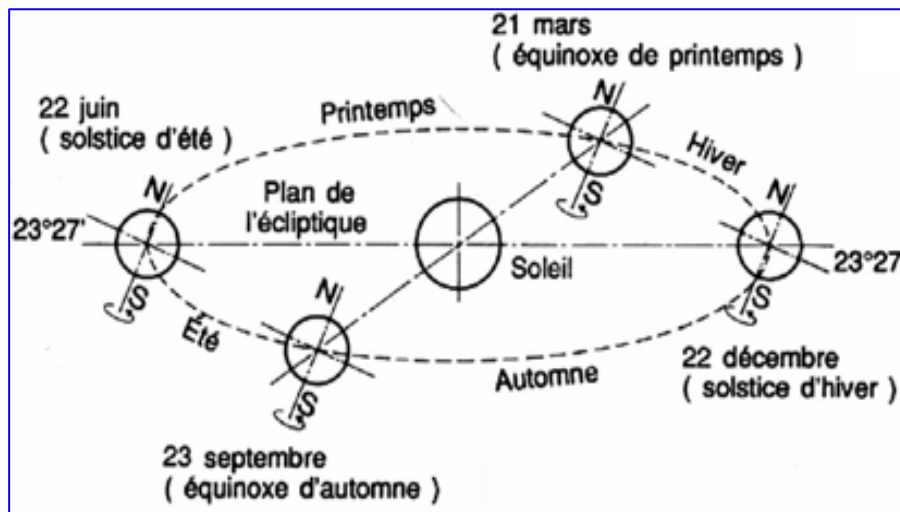


Figure (I-2) : Le mouvement de la terre autour de soleil [8]

#### a) les coordonnées horaires :

Les coordonnées horaires dont le repère est donné par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison  $\delta$  et son angle horaire  $H$ . voir figure (I-3) [8]

#### b) les coordonnées horizontales :

Les coordonnées horizontales dont le repère est donné par la verticale du lieu (zénith) et le plan de l'horizon. Le méridien du lieu est encore utilisé comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa hauteur  $\eta$  et son azimut  $\psi$ . Voir figure (I-3) [8]

#### c) La déclinaison du Soleil :

L'angle du zénith avec le plan équatorial est la latitude  $\varphi$  du lieu. La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre-Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre  $+23^{\circ}27'$  (au solstice d'été, 22 juin) et  $-23^{\circ}27'$  (au solstice d'hiver, 22 décembre) ; sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) voir figure (I-2). La valeur de la déclinaison au jour  $J$  (compté à partir du début de l'année) est approximée, à  $1^{\circ}$  près, par la formule : [8]

$$\delta = 23,45 \sin (0,986J - 80^{\circ}) \quad (\text{I-1})$$

Pour un jour déterminé, la déclinaison peut être considérée comme constante ; sur la sphère céleste, le soleil décrit alors un petit cercle, parallèle au plan de l'équateur, avec une vitesse angulaire constante d'un tour par 24 heures. À un instant  $t$ , exprimé en temps solaire vrai, l'angle horaire du soleil est simplement (en degrés) :

$$H = 15(t - 12) \quad (I-2)$$

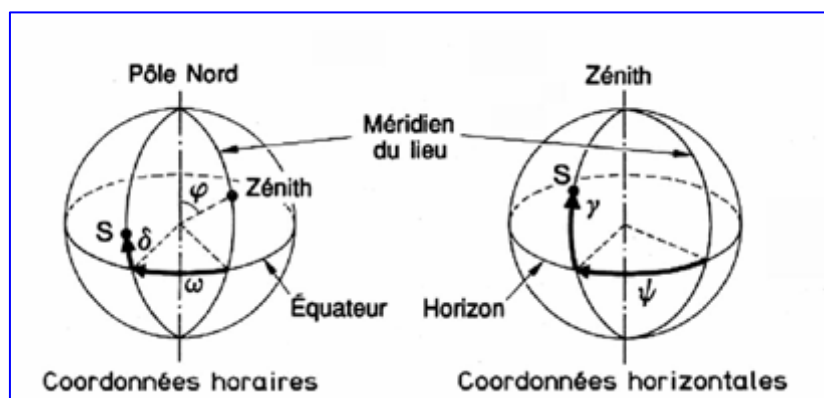


Figure (I-3) : Les coordonnées horaires et horizontales [8]

### I-3 Le rayonnement solaire :

#### I-3-1 Le soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000km. Il est situé à une distance moyenne de  $1,49675 \cdot 10^8$ km de la terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réaction, de fusion nucléaire permanente et sa température de cœur atteint  $10^7$ K. [9]

### I-3-2 Caractéristiques du rayonnement solaire :

#### a) Energie renouvelable :

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre.

Outre, l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, l'énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétique (lumière).

Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie), les marées, l'énergie nucléaire, le vent, la biomasse... etc [9]

#### b) Le rôle de l'atmosphère :

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire laquelle subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les aérosols seront définis ultérieurement). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [7]

#### c) La masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. [10]

On appelle masse d'air  $AM$ , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique.

Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith

$$AM = 1 / \sin \theta \quad (I-3)$$

Où :

$\theta$  : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg).

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith. [6]

A une pression  $p$  différente de 1013 mbar et à altitude  $z$  (km), qu'on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre:

$$m = \frac{p}{1013 \times \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right). \quad (I-4) \quad [7]$$

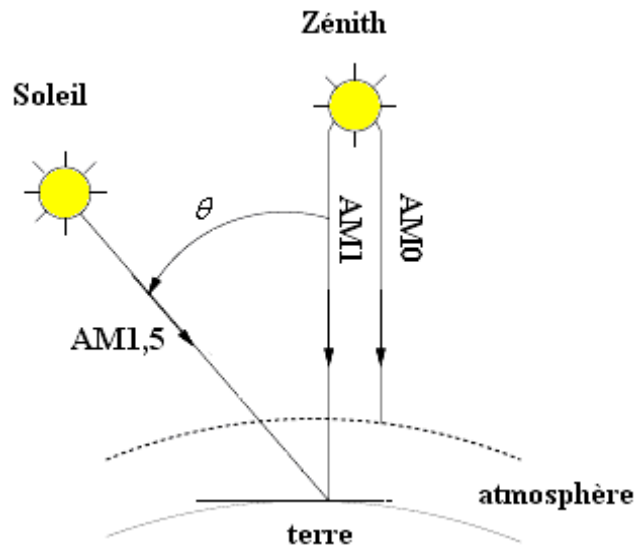


Figure (I-4) : Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [5]

### I-3-3 Différents types de rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

#### a) Le rayonnement direct (I):

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair. [12]

**b) Le rayonnement diffus (D):**

C'est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année. [12]

**c) L'albédo :**

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. [12]

**d) Le rayonnement global (G):**

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme la montre la figure ci-dessous.

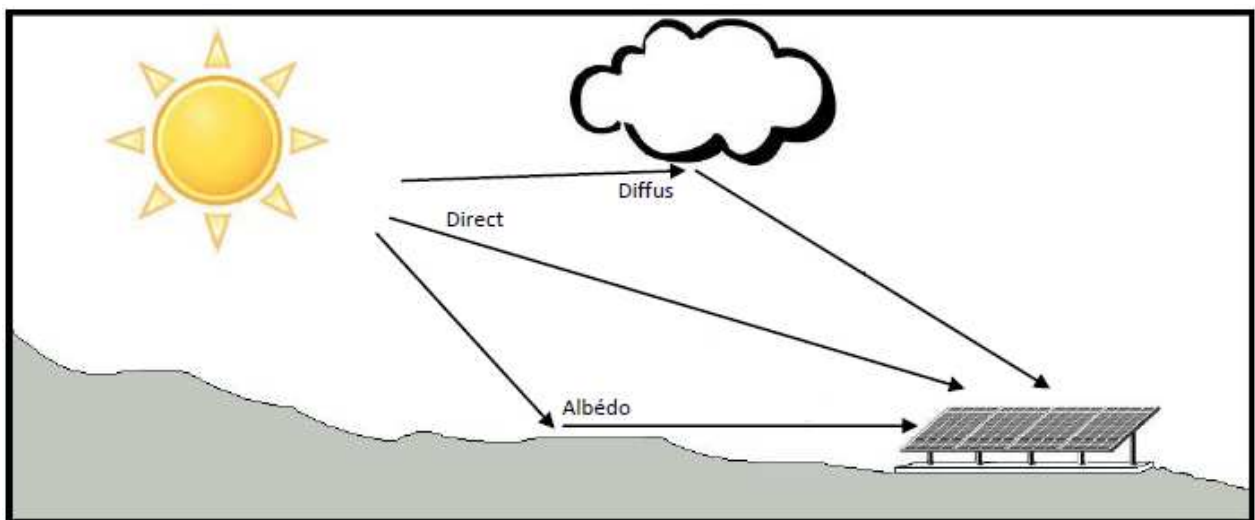


Figure (I-5) : Différents composants d'un rayonnement [13]

### I-3-4 distribution spectrale :

Le rayonnement solaire se compose de radiation électromagnétique émise par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons de gamma) vers les grandes ondes radioélectrique. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes. [11] la distribution spectrale de ce rayonnement est donnée par la Figure (I-6).

<b>Ultra violet UV</b>	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4%
<b>Visible</b>	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48,0%
<b>Infra rouge IR</b>	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6% [11]

La figure ci-dessous donne le spectre du corps noir à 5 800 K (courbe a) et le spectre réel hors atmosphère (courbe b). Ces spectres montrent que les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprises entre 0,2  $\mu\text{m}$  (ultraviolet) et 4  $\mu\text{m}$  (infrarouge) ; 97,5 % de l'énergie est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ , notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre 0,4 et 0,78  $\mu\text{m}$ . [8].



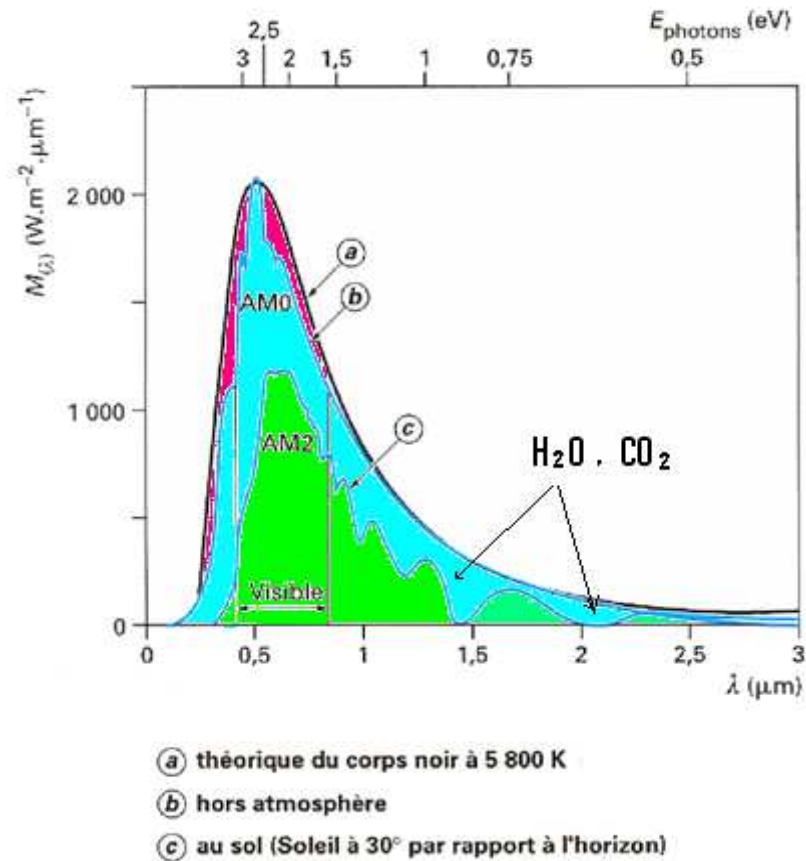


Figure (I-6) : Répartition spectrale de rayonnement solaire [8]

### I-3-5 Les influences diminuant l'intensité des rayons du soleil : [9]

La puissance d'un dispositif photovoltaïque se mesure en watt crête. La production d'un panneau solaire dans des conditions optimales dépend de :

#### a) Conditions météo :

Si on considère qu'un panneau de 50 watt-crête produira 50 watts pour chaque heure d'ensoleillement à  $1000\text{w}/\text{m}^2$ , il produira plus ou moins la moitié (25 watts) chaque heure avec la moitié de lumière ( $500\text{w}/\text{m}^2$ ). Avec des nuages légers, on peut atteindre des valeurs de  $300\text{w}/\text{m}^2$  avec la lumière diffuse. Dans des conditions météo très mauvaises avec des nuages épais et foncés ( $100\text{w}/\text{m}^2$ ) le rendement ne sera plus que de 5%.

**b) Le nombre d'heures de soleil dans la journée :**

Ce facteur est celui qui pose le plus de problèmes pour les utilisateurs dépourvus de l'occasion d'habiter près de l'équateur, à cause de la grande différence et l'écart entre la durée d'ensoleillement selon les saisons. Signalons en outre que le flux solaire reçu sur une surface dépend bien évidemment de l'orientation et de l'inclinaison de cette surface.

**c) Les aérosols :**

Les aérosols peuvent être des poussières, des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelettes, ou des fumées de pollution industrielle dont la taille varie entre 0.5 à 10  $\mu\text{m}$ .

**d) Albédo :**

Comme nous l'avons défini précédemment (I-3-3 partie C), il représente la faculté de réflexion des matériaux qui nous entourent.

**I-4 Quelques grandeurs photométriques :****a) Le flux :**

Le flux lumineux est la valeur instantanée d'un débit de rayonnement. On peut mesurer le flux émis par une source, transporté par un faisceau ou encore reçu par un détecteur. Il peut être mesuré par la puissance qu'il transporte ou par le nombre de photons qu'il transporte par unité de temps, pour une surface  $S$  déterminée. Le flux lumineux s'exprime en Watts (W). [8]

**b) L'intensité lumineuse:**

L'intensité  $I$  d'une source de rayonnement est le rapport entre le flux  $d\phi_s$  qu'elle émet dans un petit angle solide donné et la valeur de celui-ci.  $I$  est en  $\text{w}/\text{sr}$ . [8]

**c) L'éclairement:**

L'éclairement  $E$  est la valeur locale du rapport entre le flux reçu par une surface élémentaire d'un récepteur et l'aire de cette surface, soit :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (I-6)$$

$E$  est en  $W/m^2$ . [8]

**d) L'exposition :**

L'exposition  $H$  d'une surface réceptrice en un point donné est l'intégrale de l'éclairement en ce point pendant un intervalle de temps donné :

$$H = \int E dt \quad (I-7)$$

$H$  est donc en  $J.m^2$ . [8]

**e) La luminance:**

La luminance  $L$  est définie comme étant le flux rayonné  $F_{rayonné}$  par unité d'angle solide  $d\Omega$  et par unité de surface  $dS$  dans une direction donnée). Elle s'exprime en  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$  et prend à la fois en compte la direction et la surface d'émission.  $\theta$  est l'angle entre l'élément de surface  $dS$  et la source. [14]

$$L = \frac{d^2 F_{rayonné}}{dS \cdot d\Omega \cos(\theta)} \quad (I-8)$$

## I-V Le photovoltaïque [15]

### a) Historique :

L'effet photovoltaïque a été observé par Becquerel en 1839, quand il a produit un courant en exposant des électrodes d'argent au rayonnement dans un électrolyte. L'effet a été décrit et détaillé par Adams et Day en 1877. Ils ont observé que l'exposition des électrodes de sélénium au rayonnement produit une tension électrique, ce qui leur permet de produire du courant électrique. Ce phénomène est mis en attente jusqu'à la découverte du transistor et l'explication de la physique de jonction PN par Shockley et Bardeen et Brattain en 1949.

Puis, en 1954, Chapin et al ont développé la première cellule solaire à base de silicium cristallin dans les laboratoires de Bell aux Etats-Unis, avec un rendement de 6%. Cette efficacité a été portée à 10% en quelques années. La première utilisation des cellules solaires était pour des missions interplanétaires. Le photovoltaïque fait ses preuves de façon déterminante dans cette application.

Ainsi, ce n'est qu'à partir du milieu des années 70 que l'utilisation pour des applications terrestres devint intéressante grâce à la réduction des coûts.

### b) Interaction rayonnement –semi-conducteur :

A chaque longueur d'onde est associé un photon d'énergie  $E$  (eV) donnée comme suit :

$$E(eV) = h\nu = \frac{hc}{\lambda(\mu m)} \quad (I-9)$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide,  $\nu$  la fréquence et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Les photons incidents sur la surface d'un semi-conducteur peuvent être soit réfléchies par sa surface soit absorbé par le matériau.

Les photons incidents sont absorbés en fonction de leur longueur d'ondes, et ce phénomène est décrit par la loi de Lambert.

$$E(z) = E_0 \exp(-\alpha z) \quad (I-10)$$

$E$  : Intensité lumineuse transmise.

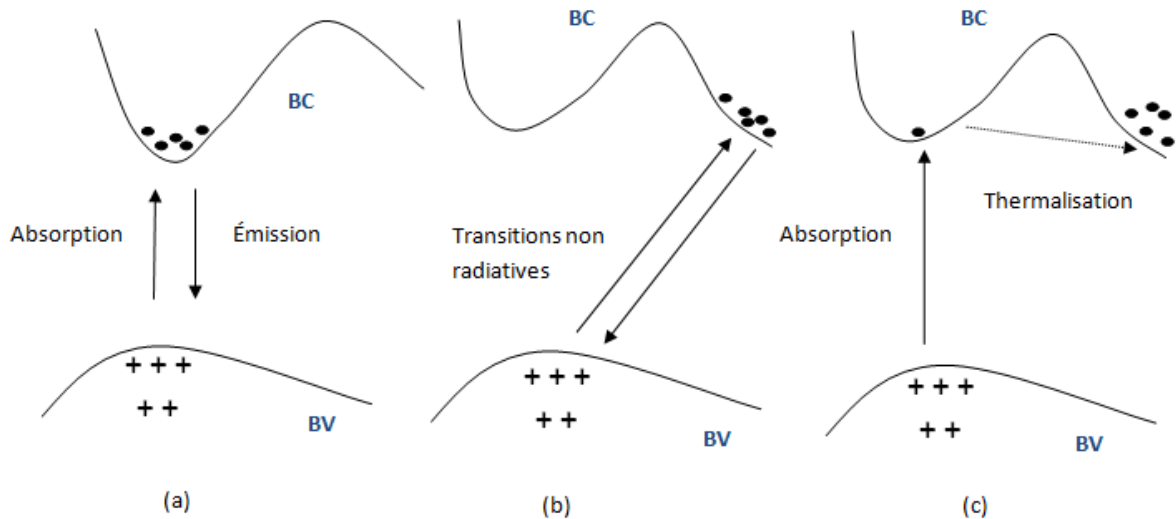
$E_0$  : Intensité lumineuse incidente.

$\alpha$  : coefficient d'absorption.

Z : profondeur (cm).

Dans ce qui précède, on peut dire que les photons de basse longueur d'onde sont plus énergétiques (Ultraviolet) et donc seront absorbés dans les premières couches du matériau semi-conducteur. Alors que les photons de plus grande

longueur d'onde (Infrarouge) peuvent atteindre la face arrière et seront réfléchis par cette dernière.



**Figure (I-7) :** Transitions électroniques entre les extrema des bandes de valence et de conduction :

- Semi-conducteur à gap direct, les transitions sont verticales et par suite radiatives.
- Semi-conducteur gap indirect, les transitions sont obliques et non radiatives au premier ordre.
- Absorption directe de photons dans un semi-conducteur à gap indirect.

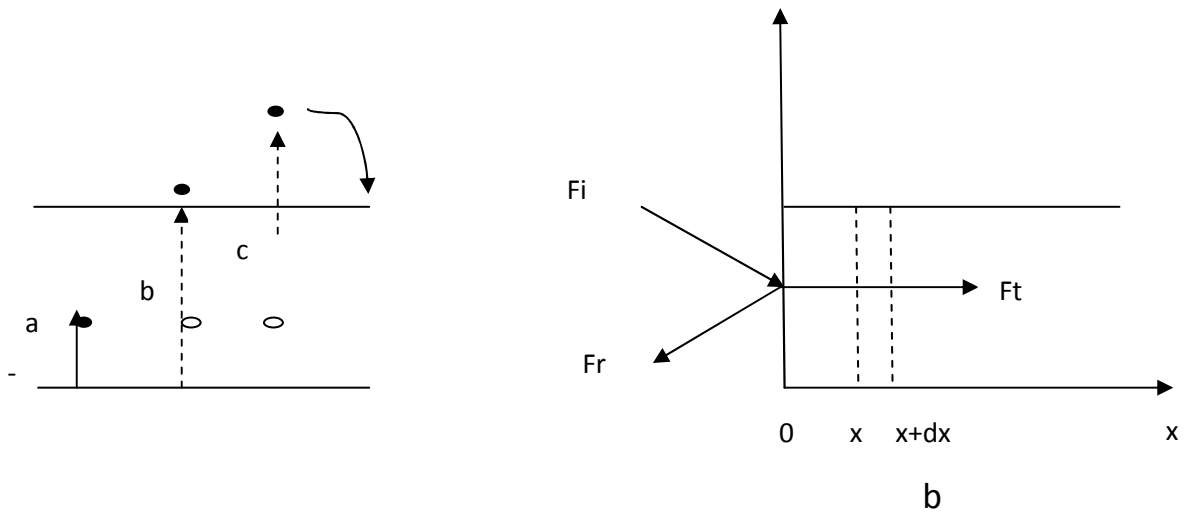
## b) L'absorption :

Quand un semi-conducteur est éclairé, les photons sont ou ne sont pas absorbés suivant leurs énergies ( $E_{ph}$ ) (figure I.8. a).

-Si  $E_{ph} < E_g$  les photons ne sont pas absorbés car il n'existe pas d'états d'énergie pour les recevoir.

-Si  $E_{ph} = E_g$  les photons sont absorbés et ils génèrent des paires électrons-trous.

-Si  $E_{ph} > E_g$  des paires électrons-trous sont créées et l'excès d'énergie est transformé en chaleur.



a  
Figure (I-8): (a) Génération de paires électrons-trous.

(b) Absorption optique dans un semi-conducteur [15].

Pour étudier la nature de l'absorption de la lumière par le semi-conducteur, on considère une source lumineuse monochromatique d'énergie  $h\nu > E_g$  et de flux incident  $F_i(E)$ .

$F_i(E)$  : Le nombre de photons d'énergie  $E$  qui arrive sur l'unité de surface du semi-conducteur pendant l'unité de temps.

$R(E)$  : Le coefficient de réflexion du semi-conducteur pour le rayonnement d'énergie  $E$ , donc le flux de photons entrant dans le semi-conducteur s'écrit :

$$F_t(E) = F_i(E)[1 - R(E)] \quad (I-11)$$

On définit le coefficient d'absorption  $\alpha$  du matériau semi-conducteur par la variation relative du flux par unité de longueur :

$$\alpha(\text{cm}^{-1}) = \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \quad (I-12)$$

Il y a absorption du rayonnement si  $dF < 0$ . ( $\alpha > 0$ )

En intégrant la relation (I-12) et en prenant compte que  $F(E,0) = F_t(E)$

On trouve :

$$F_t(E, x) = F_t(E) \exp(-[\alpha(E)x]) \quad [\text{ph/cm}^2/\text{s}] \quad (\text{I-13})$$

Le coefficient de réflexion  $R(E)$  dépend de la nature du semi-conducteur.

Le coefficient de réflexion du silicium est environ 35%.

Si  $\alpha(E)$  est nul, le rayonnement traverse le matériau sans atténuation (sans qu'il soit absorbé).

Si  $\alpha(E) > 0$ , le rayonnement est absorbé par le matériau et s'atténue exponentiellement en fonction de la distance parcourue comme le montre l'équation (I-10). La disparition d'un photon se traduit par la création d'une paire électrons-trous. Le taux de génération des paires électrons-trous est égal au taux de disparition des photons :

$$G(E, x) = - \frac{dF(E, x)}{dx} \quad (\text{I-14})$$

En tenant compte de la relation (1.7) :

$$G(E, x) = F(E) \alpha(E) (1 - R(E)) \exp - [\alpha(E)x] \quad (\text{I-15})$$

Si le matériau a un faible coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , le rayonnement pénètre ardemment dans le semi-conducteur et il crée peu de porteurs par unité de volume, alors qu'avec un matériau de fort coefficient d'absorption le rayonnement est très absorbé, les porteurs sont créés dans un petit volume au voisinage de la surface.

### c) Effet photoélectrique

Au cours de l'effet photoélectrique, le photon interagit avec un électron du cortège du noyau, il lui cède totalement son énergie  $E = h\nu$  et disparaît. L'électron cible quitte donc sa couche avec une énergie égale à l'énergie du photon diminuée de son énergie de liaison  $U_L$  (Equation I-16). Après cet événement, l'atome subit un réarrangement au cours duquel, soit un photon de fluorescence est émis, soit un électron est éjecté avec une énergie cinétique  $E_e$  (cet électron est appelé électron Auger). Cet effet ne se produit que  $h\nu \geq U_L$ .

$$E_e = E - U_L \quad (\text{I-15})$$

## I-6 les cellules solaires

### a) Définition :

Les cellules solaires sont des composants électroniques à semi conducteur (silicium) dopé, elle se présente sous forme de plaquettes ronde, carré ou pseudo carré.



Figure (I-9) : Cellules photovoltaïques [16]

### b) Le principe de fonctionnement :

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. [17]

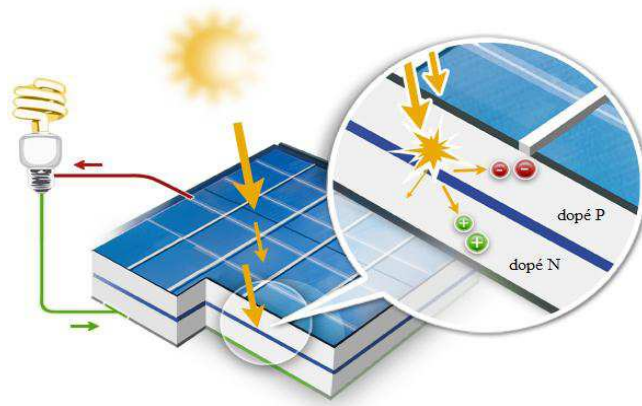


Figure (I-10) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [13]



### c) Les caractéristiques de la cellule solaire :

Une cellule solaire ne peut donc être assimilée à aucun générateur classique. On peut en effet la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de sa caractéristique. (Figure (II-3)) [10].

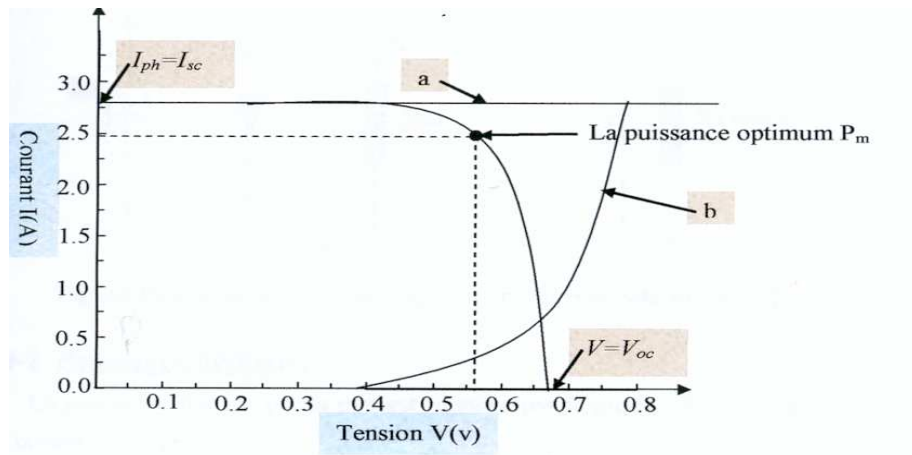


Figure (I-11): Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [18]

#### ➤ Courant de court-circuit, $I_{CC}$ :

Il s'agit du courant obtenu en  $V=0$ , c'est-à-dire  $I_{cc} = I(V=0)$

#### ➤ tension au circuit ouvert $V_{co}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

#### ➤ Puissance débitée

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit  $P = V \times I$ , Cette puissance est maximale au point  $P_m$  Défini par :

$$P_m = V_m \times I_m = FF \times V_{CO} \times I_{CC} \quad (I-16)$$

### ➤ Facteur de forme

Le facteur de forme (FF) de la courbe J-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit  $J_{cc} \times V_{oc}$ . Le FF est limité dans la plupart des cas par des résistances parasites et son expression est donnée par la relation (I-17).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (I-17)$$

### ➤ Le rendement $\eta$ :

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

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (I-18)$$

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions fondamentales et principales qui concernent le gisement solaire ainsi qu'une description physique et électrique de l'élément indispensable et essentiel dans notre étude en l'occurrence la cellule solaire.

# *Chapitre II*

## Introduction

Durant les dernières années et dans les recherches des rendements les plus approfondies obtenues par la conversion photovoltaïque, les cellules solaires à base des matériaux III-V ont été largement utilisées, plus particulièrement les cellules solaires à l'arséniure de gallium (GaAs) à travers la fenêtre (AlGaAs), et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [19].

Dans ce chapitre, nous définirons et exposerons quelques propriétés des semi conducteurs de III-V en particulier les composés *GaAs*, *GaAlAs*, afin d'arriver à la présentation des principales caractéristiques d'une hétéro structure. Puis nous présenterons les cellules solaires à puits quantique.

### I- Propriétés du matériau utilisé

La recherche des composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles du Silicium, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à des nouveaux matériaux en particulier les semi-conducteurs III-V.

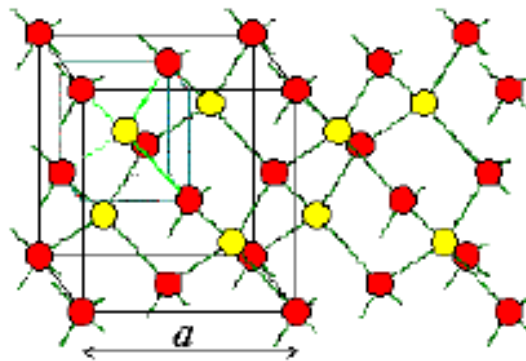
Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III<sup>ème</sup> colonne et d'un élément de la V<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique de Mendeliev [20, 21, 22]. Une nouvelle classe de matériaux fait ainsi son apparition.

Nous nous sommes intéressés aux composés III-V GaAs et L'alliages AlGaAs, qui sont les matériaux utilisés dans notre structure.

## I-1 GaAs

### ▪ Structure cristalline

Les semi-conducteurs III-V tels que GaAs (arséniure de gallium) ont une structure cristallographique de type blende de zinc. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (Si, Ge, etc...), est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un d'éléments III, l'autre d'éléments V, décalé l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale (Figure (II.1)), l'atome en rouge représente un élément III par exemple, l'atome en jaune représente un élément V. La maille élémentaire comporte deux atomes, le premier (Ga) à l'origine et l'autre (As) à  $(a/4, a/4, a/4)$ , où 'a' représente le paramètre de maille du matériau [20,21].



**Figure (II-1) :** structure cristalline du GaAs (structure zinc blende)

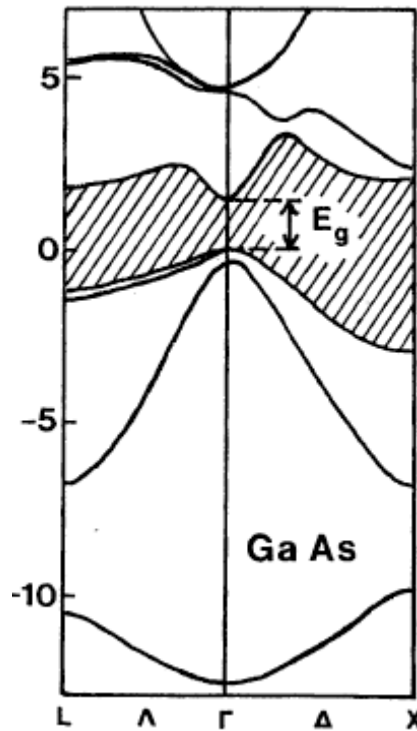
### ▪ Caractéristique de la Structure de bande d'énergie

#### ➤ Le semi-conducteur uni vallée GaAs [22]

La structure de bandes du semi-conducteur GaAs est représentée dans la figure (II-2) suivant les directions de plus haute symétrie de l'espace réciproque. La bande interdite est hachurée, les bandes supérieures sont les bandes de conduction, les bandes inférieures sont les bandes de valence. Au zéro degré absolu la bande de valence est pleine d'électrons, la bande de conduction est vide. A la température ambiante à laquelle fonctionnent la plupart des composants électroniques, certains électrons sont thermiquement excités depuis la bande de valence et occupent la bande de conduction.

Il est évident que les électrons les plus susceptibles de passer de la bande de valence vers la bande de conduction sont les électrons de la bande de valence supérieure. En outre ces électrons occupent la bande de conduction inférieure.

De plus, parmi les états de ces bandes ceux qui jouent le rôle essentiel sont respectivement ceux du sommet de la bande de valence et du minimum de la bande de conduction.



**Figure (II-2):** structure de bande du GaAs [22]

Pour le GaAs le minimum de la bande de conduction est situé au centre de la zone de Brillouin et puisque ce minimum est unique on dit que le GaAs est un semi-conducteur uni vallée contrairement au silicium qui est un semi-conducteur multi vallée.

### ➤ La nature de la transition énergétique du GaAs [22]

Le gap est par définition la largeur de la bande interdite c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence.

A partir de la structure de bande on peut classer les semi-conducteurs en deux types [22] : les semi-conducteurs dans lesquels le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés en des points différents dans l'espace réciproque et les semi-conducteurs pour lesquels ces extrema sont situés au même point. Les seconds sont dits à gap direct et les premiers sont dits à gap indirect.

Le GaAs est un composé III-V à transition direct. Cela signifie que l'énergie minimale de la bande de conduction et l'énergie maximale de la bande de valence sont localisées au centre de la zone de Brillouin. Ceci a des conséquences importantes du point de vue des propriétés électroniques.

## **I-2 L'alliages $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$**

L'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  est une solution solide de GaAs et de AlAs. Tout paramètre physique relatif à cet alliage peut être obtenu par combinaison des paramètres correspondants au GaAs et à l'AlAs. Les deux matériaux ont la même structure cristalline. Les paramètres physiques de ces deux matériaux sont voisins [22].

La nature de la transition énergétique de l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  change selon le taux d'Aluminium  $x$ , avec  $0 < x < 1$ . Pour une fraction d'Aluminium inférieure à 0,45, la transition de l'alliage est identique à celle du GaAs caractérisée par une transition directe. Quand le taux d'Aluminium devient supérieur à 0,45 la transition devient indirecte comme celle de l'AlAs [22].

La constante de maille et les bandes d'énergies en fonction de la composition ( $x$ ) de l'Aluminium sont données par [20] :

$$\text{Constante de maille (en \AA)} : \quad a = 5.6533 + 0.0078x \quad \text{(I-1)}$$

$$\text{Bande interdite (en eV)} : \quad E_g = 1.424 + 1.155x + 0.37x^2 \quad \text{(I-2)}$$

## **II- Position des bandes d'énergie d'une hétérojonction- modèle d'ANDERSON**

Les hétérostructures sont des semi-conducteurs artificiels obtenus par la croissance alternée de fines couches de matériaux ayant une énergie de bande interdite différente mais présentent des paramètres de maille voisine [23].

La plus simple des hétérostructures est l'hétérojonction qui est une jonction entre deux semi-conducteurs différents [23].

Le problème principal dans la théorie des hétérojonctions est de pouvoir prédire le positionnement relatif des bandes d'énergie des différents matériaux les uns par rapport aux autres. La plupart d'entre eux divisent le problème en deux parties [24] :

- Détermination des positions des bandes d'énergie par rapport à une certaine référence dans chacun des deux matériaux.
- La détermination de la différence d'énergie entre ces deux références après la formation de l'hétérojonction

Plusieurs études ont été accomplies à ce propos et plusieurs modèles ont été proposés. Parmi ces modèles nous pouvons citer celui d'ANDERSON .

Les règles de raccordements dites d'ANDERSON (1962) reposent sur la continuité du niveau de libération et celle du niveau de Fermi à la frontière qui sépare les deux matériaux. Le raisonnement est simple : lorsque les deux matériaux sont infiniment rapprochés (mais non en contact) et s'ils sont électriquement neutres, un électron en équilibre dans l'interstice qui les sépare occupe un niveau d'énergie qui peut être considéré indifféremment comme le niveau d'extraction du matériau 1 ou comme celui du matériau 2. Cela signifie que ces deux niveaux coïncident. Le diagramme d'énergie correspondant à cet état est représenté dans la figure (II-3).



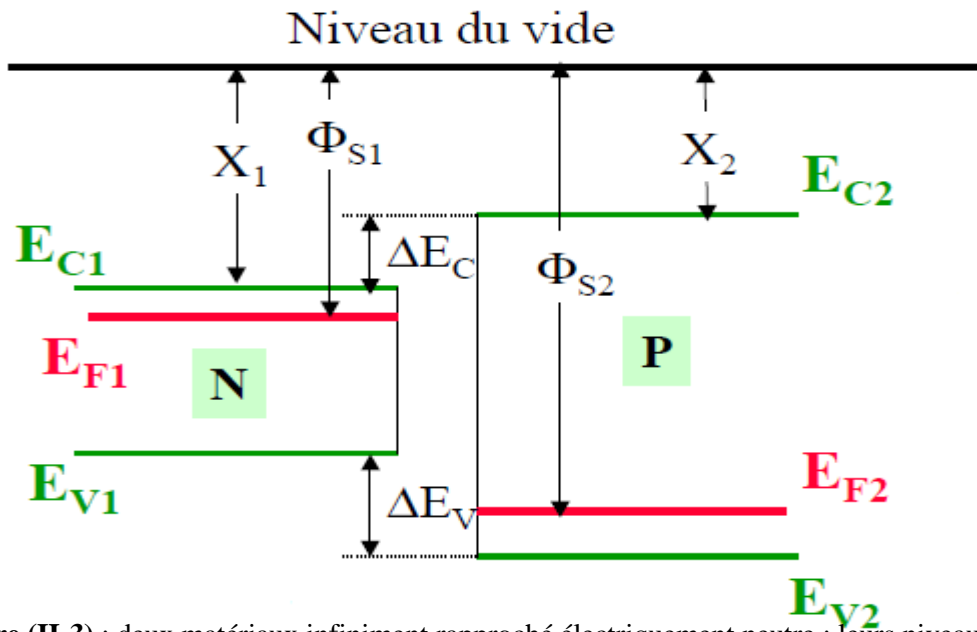


Figure (II-3) : deux matériaux infiniment rapproché électriquement neutre : leurs niveaux de libération coïncidente [24]

Où :

$E_{C1}$  : bande de conduction du matériau 1.

$E_{C2}$  : bande de conduction du matériau 2.

$E_{V1}$  : bande de valence du matériau 1.

$E_{V2}$  : bande de valence du matériau 2.

$E_{F1}$  : niveau de Fermi du matériau 1.

$E_{F2}$  : niveau de Fermi du matériau 2.

$\Delta E_C$  : différence des bandes de conduction  $E_{C1}$  et  $E_{C2}$ .

$\Delta E_V$  : différence des bandes de valence  $E_{V1}$  et  $E_{V2}$ .

$\chi_1$  : affinité électronique du matériau 1.

$\chi_2$  : affinité électronique du matériau 2.

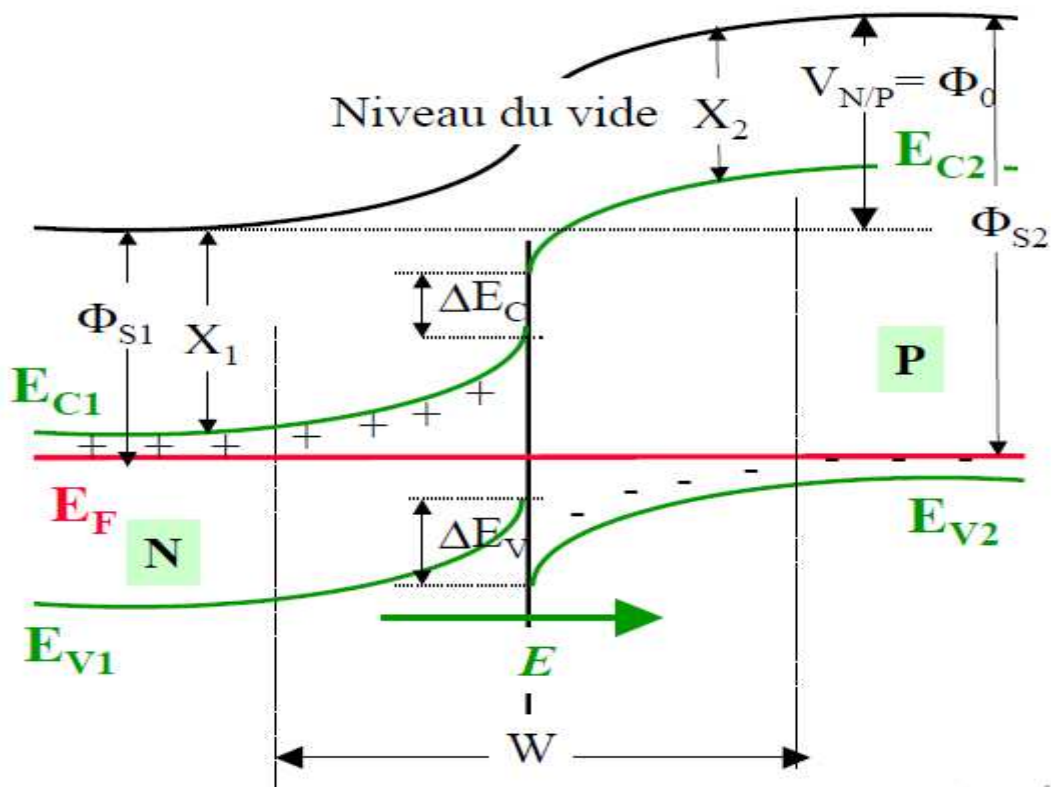
$\phi_1$  : travail de sortie du matériau 1.

$\phi_2$  : travail de sortie du matériau 2.

Si l'on rend maintenant les réseaux cristallin solidaires l'un avec l'autre [24], ceci permet aux électrons de passer d'un matériau dans l'autre, le système va tendre vers un nouvel état d'équilibre caractérisé par l'horizontalité du niveau de Fermi.

Naturellement, la règle de raccordement des niveaux d'énergies, et donc des bandes de conduction est conservée [24]. Le retour à un niveau de Fermi horizontal nécessite généralement l'apparition de zone de charge d'espace de part et d'autre de la frontière.

Le diagramme des bandes pour les matériaux de la figure (II-3) est maintenant représenté dans la figure (II-4) qui montre qu'il y a une horizontalité du niveau de Fermi, des charges d'espaces doivent se constituer par le départ ou l'accumulation de porteurs. Les bandes de conduction et de valence présentent une discontinuité à l'interface [24].



**Figure (II-4) :** Diagramme énergie- bande d'une hétérojonction à l'équilibre [24].

### III- Les différents types d'hétérojonctions

Selon différents critères, plusieurs types d'hétérojonction peuvent être définis. On peut citer les types suivants :

✓ **Hétérojonction isotype et anisotype**

Lorsque ces deux semi-conducteurs sont de même type (N-NouP-P) on dit que l'hétérojonction est isotype et lorsqu'ils sont de type différents elle est appelée anisotype [22,23].

✓ **Hetero jonction graduelle et abrupte [20]**

Si une hétérojonction est réalisée entre deux matériaux pour lesquels il existe un continuum de solution solide comme entre le GaAs/AlAs ( $Al_x Ga_{1-x}As$  existe pour tout  $0 < x < 1$ ) ou en faisant varier progressivement la composition de l'alliage ternaire et les dopages des deux semi-conducteurs, cette hétérojonction est dite graduelle (figure II-5).

La barrière de potentiel d'une hétérojonction graduelle est beaucoup plus difficile à décrire, la variation progressive du paramètre de composition  $x$  de l'alliage ternaire induit des modifications de la plupart des caractéristiques du matériau, contrairement à l'hétérojonction abrupte où à la fois la composition des matériaux et les dopages changent brusquement lors du passage du plan d'interface (figure II-6).

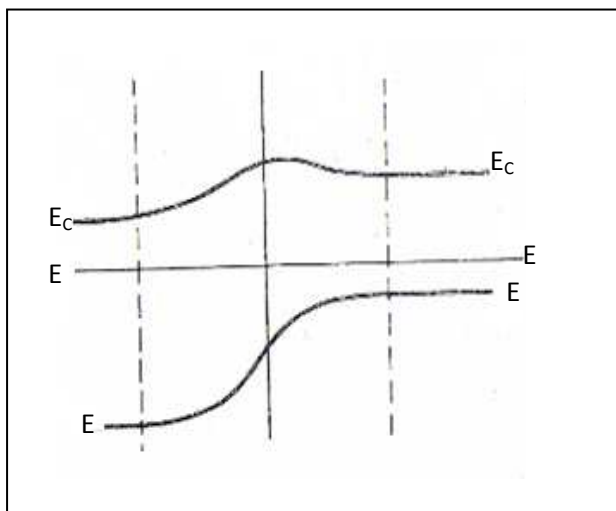


Figure (II-5) : hétérojonction graduelle [20]

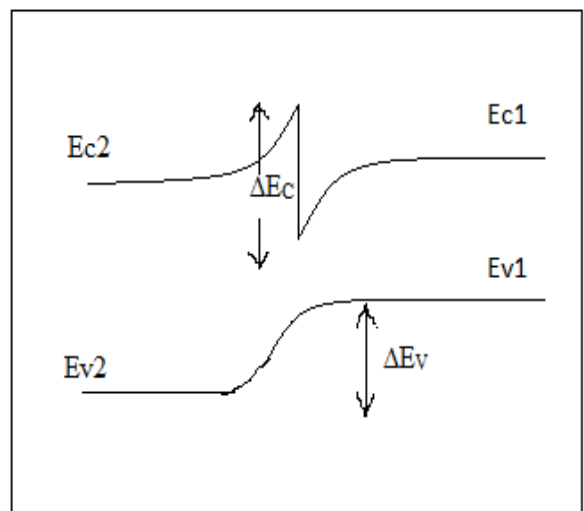


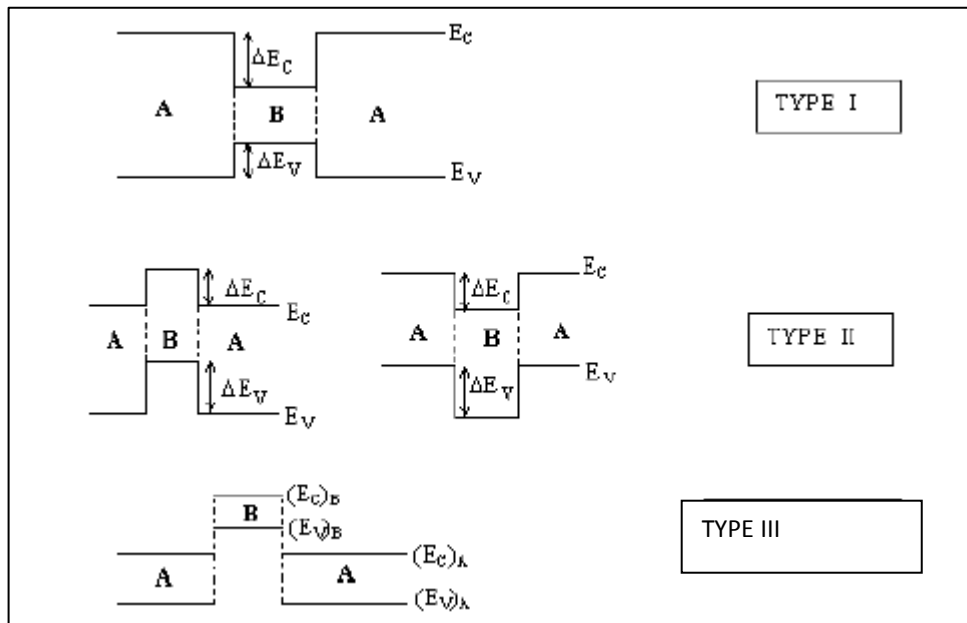
Figure (II-6) : hétérojonction abrupte

✓ **Les hétérojonctions de type I, II et III**

Les hétérojonctions sont classées selon différents types suivant le signe des “offsets” de discontinuités de bande à l’hétérojonction abrupte ( $\Delta E_C$ ), mais le système le plus utilisé actuellement est de type I [25].

Le type I à chevauchement “starddling configuration” est illustré dans la figure (II-7) c’est la configuration qui est considérée comme normale ou la discontinuité de bande de conduction  $\Delta E_C$  et de la bande de valence  $\Delta E_V$  ont des signes opposés c'est-à-dire la bande interdite du semi-conducteur à petit gap est englobé dans la bande interdite à grand gap ceci traduit le confinement des porteurs dans le matériau à petit gap [25].

Contrairement aux hétérojonctions de type I l’hétérojonction de type II (figure II-7) est de configuration décalée “straggered configuration”[25]. Dans ce type d’alignement le chevauchement n’est pas complet, le bas de la bande de conduction du semi-conducteur à gap étroit se positionne au dessus de celui du semi-conducteur à large gap ou bien son haut de la bande de valences positionne en dessous de celui à gap large, ce décalage peut atteindre le cas limite ou le chevauchement disparaît complètement, c’est à dire que les deux bandes interdites deviennent séparé, c’est le type III de configuration à gap rompu “broken gap” qui est représenté dans la figure (II-7)[25].

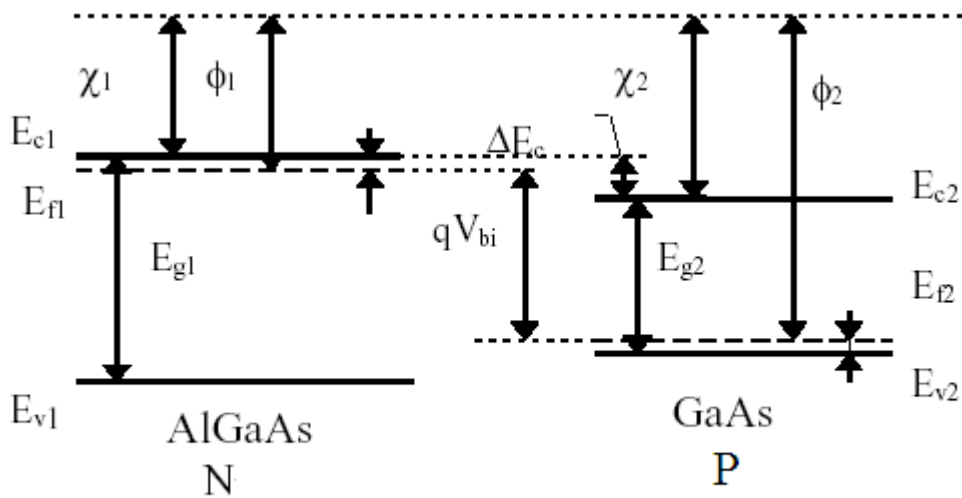


**Figure (II-7) :** Divers types d’hétérojonctions définis par la position relative des Bandes des semi-conducteurs A et B ; le type I est le plus utilisé

#### IV- Les hétérostructures à base des semi-conducteurs III-V (GaAs/GaAlAs)

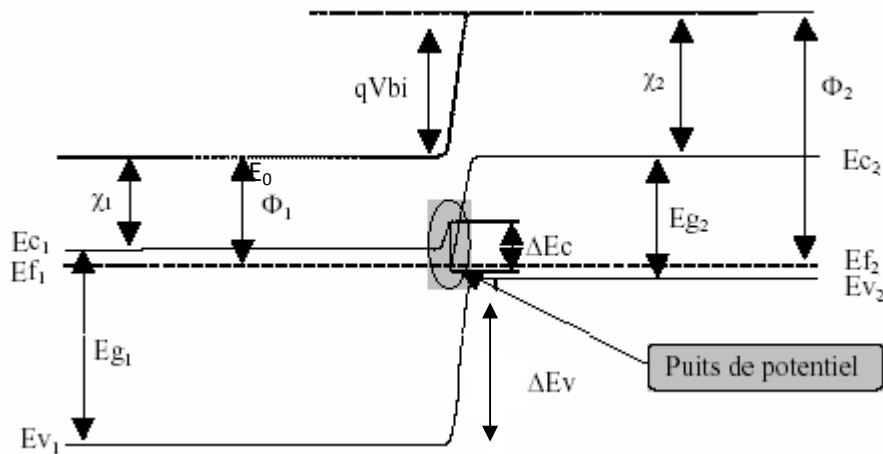
Pour que deux matériaux puissent former une bonne hétérojonction il faut que leurs paramètres de mailles soient aussi voisins que possible [23]. A cet effet, l'intensification des recherches sur les matériaux semi-conducteurs III-V a permis de recenser des couples de matériau susceptible de constituer des hétérojonctions présentant des interfaces de qualité tout à fait acceptable. Parmi ceux-ci, l'hétérojonction AlGaAs/GaAs.

Pour cela nous pouvons croître une couche de GaAs dopée type P suivie d'une couche de AlGaAs fortement dopée type N. La figure (II-8) représente le diagramme de bandes d'énergie de l'hétérostructure AlGaAs / GaAs avant contact.



**Figure (II-8) :** Diagramme de bandes d'énergie de deux matériaux de gap différents (AlGaAs et GaAs)

D'après les règles d'Anderson, lorsque les deux matériaux sont assemblés (Figure II-9) et ont un équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi doivent s'aligner et le niveau du vide ne pourra en aucun subir de discontinuité. Il en résulte des discontinuités des bandes de conduction et de valence à l'interface [24]. A partir de là, se crée un puits de potentiel.



**Figure (II-9) :** Diagramme de bandes d'une hétérojonction

### IV-1 Puits quantiques :

Un puits quantique généralement est constitué à partir de deux alliages semi-conducteurs (dans notre modèle c'est le GaAs et l' $Al_xGa_{1-x}As$ ). La valeur de  $x$  permet d'avoir une barrière importante pour l'hétérojonction tout en conservant un gap direct. Ce couple de semi-conducteurs permet de créer des interfaces abritées (La particule est confinée entre deux murs séparés par la distance  $L$ ) et donc de réaliser des structures d'empilement assez complexes [3].

## **IV-2 Les états électroniques liés à un puits de potentiel**

### **IV-2-1 Structure de sous bande d'énergie**

Le confinement spatial entraîne l'apparition de sous bandes d'énergie, aussi bien dans la bande de conduction (BC) que dans la bande de valence (BV).

La densité d'états par unité d'aire et unité d'énergie est définie selon [22] par la relation (I-20) :

$$n(E) = \frac{g_v m_e}{\pi \hbar^2} \quad (\text{I-1})$$

Où  $g_v$  est le facteur de dégénérescence de vallée qui nous renseigne sur les bandes d'énergie équivalentes, avec un facteur 2 pour la dégénérescence de spin.

La structure choisie fait partie de la famille des semi-conducteurs III-V, qui ont connue particularité l'uni vallées, ce qui donne  $g_v = 1$ , et une densité d'états électronique constante.

Puisque la largeur d'un puit de potentiel est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de Broglie  $\lambda = h/p$  ( $\lambda = 250 \text{ \AA}$  dans le GaAs) et la densité d'état électronique est constante, les effets quantiques introduisent une suite de niveaux d'énergie discrets  $E^i$ .

Ces niveaux  $E^i$  décrivent la quantification des états électronique dans la direction perpendiculaire à l'interface [21].

## **IV-2-2 Occupation de sous bandes**

Le nombre de sous bandes occupé dépend de la densité d'électrons et de la température, lorsqu'un seul électron se trouve dans le puits celui-ci occupe le niveau de plus faible énergie, c'est-à-dire  $E_0$  et si on augmente le nombre des électrons, ces derniers vont occuper de manière successive les niveaux d'énergie supérieure [22, 25,26].

L'hétérojonction AlGaAs/GaAs accumule de nombreux avantages [23] : largeur de bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température, mobilité électronique élevée qui permet d'atteindre de bonnes performances, mailles cristallines assez proche qui minimisent les recombinaisons parasites. Beaucoup de composants ont bénéficié de ces performances notamment les cellules solaires.



## **Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'aborder le fonctionnement et les caractéristiques d'une hétérojonction qui a un rôle primordiale dans la cellule solaire et qui réside dans l'obtention de très faibles recombinaisons en surface donc réduction des pertes optiques, par suite avoir un bon rendement.

# *Chapitre III*

## Introduction

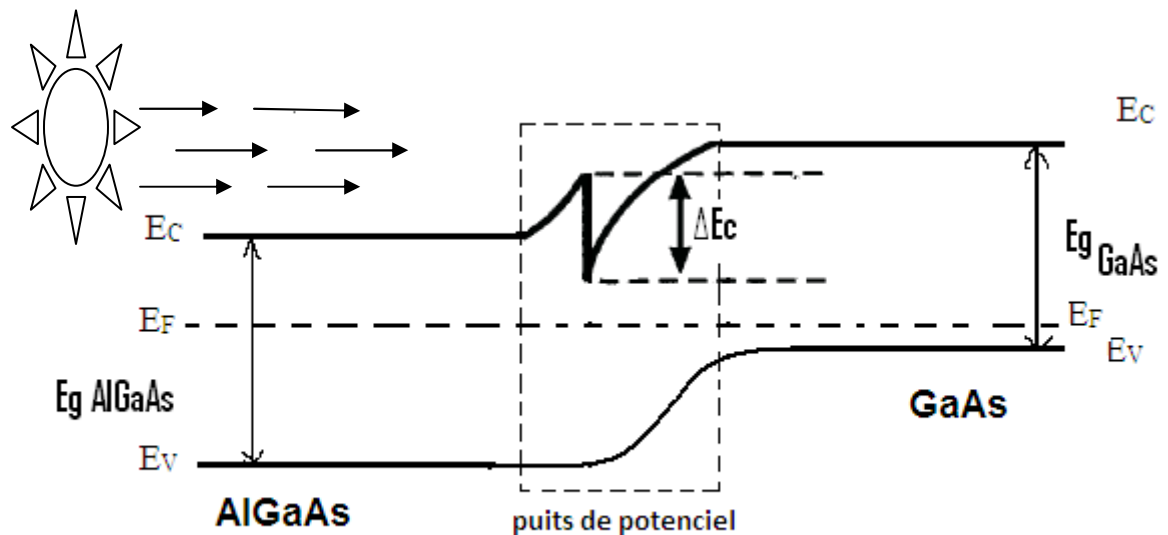
La recherche dans le domaine photovoltaïque est motivée principalement par l'amélioration du rendement de conversion énergétique et par la réduction du coût de réalisation. Les performances de la cellule peuvent être améliorées par optimisation continue de la structure des cellules (paramètres physiques internes de la cellule) pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés [28]. Dans cette optique, Différentes structures sont successivement apparues, parmi lesquelles on trouve les cellules solaires à puits quantique.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude d'un modèle de cellule solaire à puits quantique et sa caractéristique  $I(V)$ , ainsi que les différents paramètres liés à cette caractéristique.

### I- Cellule solaire à puits quantique

#### I-1 Structure

La structure adaptée est composée essentiellement d'une cellule n-p à base de GaAs de type **p**, sur laquelle est déposée une couche fenêtre AlGaAs de type **n** (voir figure).



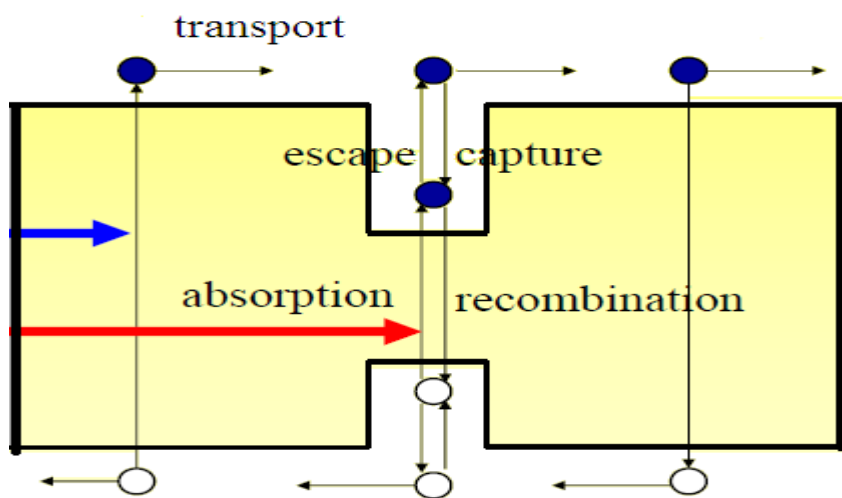
**Figure III-1** : Structure d'une cellule solaire à puits quantique

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi,

de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentiel qui arrête la diffusion des porteurs de charges et définit l'état d'équilibre.

L'alignement des niveaux de Fermi crée une discontinuité de bande de conduction  $\Delta E_c$  qui est présentée dans la figure par un puits quantique où se transfèrent et s'accumulent les électrons provenant de la couche donneuse, et une discontinuité dans la bande de valence  $\Delta E_v$  [28].

## I-2 La dynamique des porteurs dans le puits quantique



**Figure III-2** : dynamique des porteurs dans le puits quantique [29]

Dans de tels systèmes, on peut constater les processus suivants de l'absorption de photons, relaxation porteuse et la recombinaison, qui sont d'une importance capitale pour la conversion de l'énergie photovoltaïque:

Au niveau de L'émetteur et la base :

- L'absorption de l'énergie par les porteurs (phénomène d'absorption),
- Cette absorption de l'énergie aide les porteurs pour passer de la bande valence BV à la bande de conduction BC (phénomène de génération),
- Ce phénomène de génération va créer des porteurs libres qui sont des porteurs de conduction (phénomène de transport),
- Le phénomène inverse présenté par la capture des porteurs (phénomène de recombinaison),

Au niveau du QW :

- Quantification de l'énergie,
- Confinement des porteurs,
- L'absorption de l'énergie par les porteurs (phénomène d'absorption),
- L'absorption de l'énergie aide les porteurs de passer du niveau d'énergie E1 vers E2 (phénomène de génération « **escape** »),
- Cette génération va créer des porteurs libres qui sont des porteurs de conduction (phénomène de transport),
- Le phénomène de capture des porteurs (phénomène de recombinaison « **capture** »).

### I-3 La génération au niveau du puits (escape et le $\Delta E_c$ )



**Figure III-3** : génération au niveau du puits quantique [29]

Pour faire échapper les porteurs du puits on a besoin d'une excitation sous forme d'éclairement c'est-à-dire une photo courant,

## II- Approximations

Dans notre modèle on va supposer que :

- Le courant du puits quantique  $I_{Qw}$  est égal au produit des densités des électrons dans le puits quantique, la vitesse de ces électrons et la charge c'est-à-dire que

$$I_{Qw} = e \times n_s \times v \quad (III-1)$$

$I_{Qw}$ : courant du puits quantique

$e$ : charge des électrons ( $1.6 \times 10^{-19}$  c)

$n_s$ : densité des électrons dans le puits quantique

$v$ : vitesse des électrons

- Réellement, la forme du puits quantique est triangulaire voire figure (III-1), mais dans notre modèle et pour faciliter les calculs, on va le considérer comme carré.
- Le processus de recombinaisons est négligeable dans le puits quantique et dans les deux matériaux (GM1, GM2)

### **III- Buts de la modélisation**

Cette modélisation à pour but de déterminer :

- la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule solaire à puits quantique
- le calcul de l'énergie de confinement des électrons dans le puits quantique ainsi que son influence sur cette caractéristique.
- L'influence des paramètres technologique et géométrique sur cette caractéristique.
- L'influence du nombre de QW sur cette caractéristique.

#### IV- Modélisation de la cellule solaire à puits quantique

La bonne compréhension de la configuration physique des éléments des cellules solaires aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément est capitale pour le développement des circuits équivalent des cellules photovoltaïques. Pour la représentation d'une cellule solaire, plusieurs modèles éclectiques ont été proposés, dans notre travail le modèle qu'on va adopté est présenté par une source de courant  $I_{ph}$  représente le photo- courant (général) et une branche de diode traversée par un courant  $I_D$  (cas d'une cellule idéale), par la suite on ajoutera d'autres paramètres en tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, et des fuites sur les bords (cas d'une cellule réel). [15]

##### ➤ Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

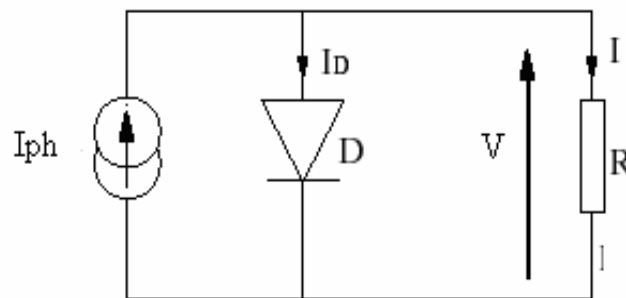


Figure III-4 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge  $R$  s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{III-2})$$

$I_{ph}$ : photo- courant.

$I_d$  : courant traversant la diode.

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III-3})$$



Avec : 
$$U_T = \frac{k \cdot T}{q}$$
 (III-4)

q : charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  coul).

k : la constante de boltzman.

$U_T$  : tension thermique.

$I_s$  : courant de saturation.

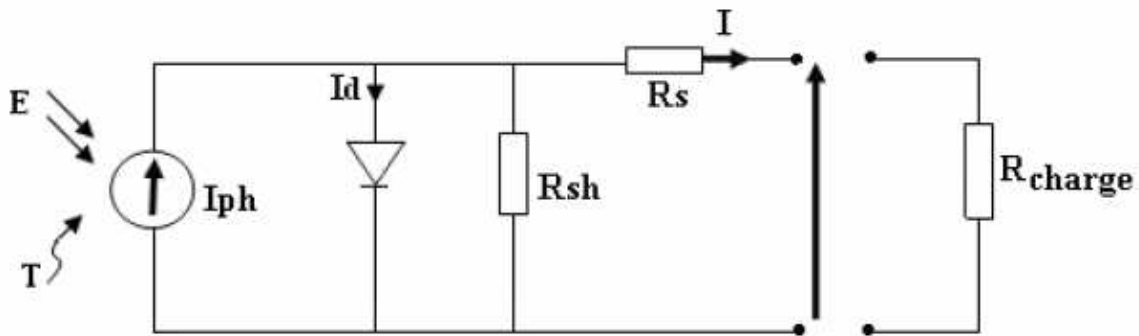
V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right]$$
 (III-5)

➤ **Modèle réel d'une cellule photovoltaïque**

Le modèle réel de la cellule est représenté par un générateur de courant  $I_{cc}$  ou bien courant  $I_{ph}$ , une diode et deux résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$ .



**Figure III-5** : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right)$$
 (III-6)

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{(V + R_s I)}{A U_T}\right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right)$$
 (III-7)

$R_s$  : résistance série

$R_{sh}$  : résistance shunt

A : Facteur de qualité

## V- Caractéristique I(V) de la cellule solaire à puits quantique

Pour tracer la courbe I(V) de la cellule solaire à puits quantique on doit d'abord calculer le courant de la cellule dans le cas idéal ensuite dans le cas réel par l'intégration de la résistance série et parallèle, et comme nous l'avons montré dans le paragraphe IV, le courant calculé dans les deux cas (réel et idéal) passe par le calcul du courant  $I_{ph}$  (photo courant) généré par la cellule solaire .

### V-1 calcul du courant $I_{ph}$

Le photo-courant de la cellule est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région P, le courant du puits quantique  $I_{QW}$  et le courant de diffusion des photo-trous de la région N .On obtient le photo-courant total en ajoutant ces trois composantes calculées en un même point  $x_j$ .

$$J_{ph} = J_n(x=x_j) + J_{QW}(x=x_j) + J_p(x=x_j) \quad [15] \quad (III-8)$$

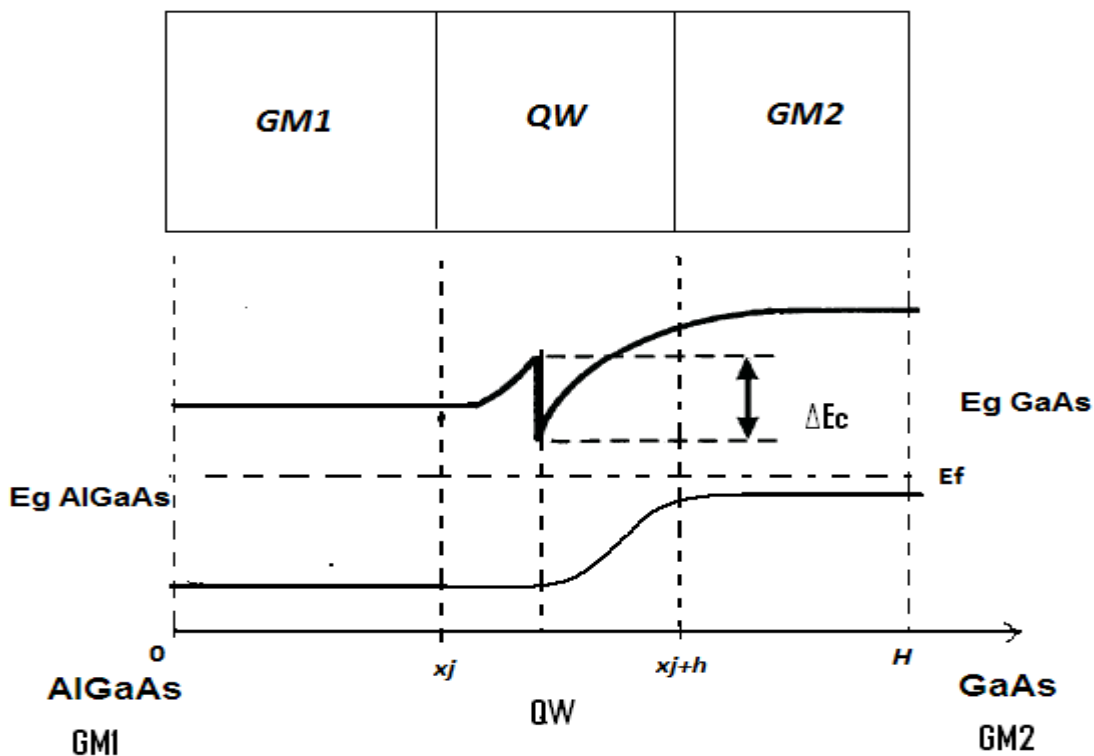


Figure III-6 : Schéma de la cellule à étudier

Ou :

GM1 et GM2 : les deux matériaux (AlGaAs, GaAs respectivement).

QW : Quantum well ou bien le puits quantique.

Si on néglige la recombinaison dans le puits quantique, le nombre d'électron qui arrivent à  $(x_j+h)$  égale au nombre d'électron partant du  $x_j$

Avec :

$x_j$  : épaisseur de la partie GM1

$x_j+h$  : épaisseur de la partie QW

H : épaisseur total

### V-1-1 Le courant des trous dans la région dopé type N [15]

Le taux de génération de paires électron-trou à une dimension  $x$  de la surface du semi conducteur GM1 est donné par :

$$G(x,\lambda) = \alpha_1(\lambda) F(\lambda) (1-R(\lambda)) \exp(-\alpha_1(\lambda) x) \quad (\text{III-9})$$

Ou :

$F(\lambda)$  : le nombre de photons incidents par  $\text{cm}^{-2}$  par  $\text{s}^{-1}$  par unité de longueur d'onde.

$R(\lambda)$  : la fraction de photons réfléchis de la surface.

$\alpha_1(\lambda)$  : coefficient d'absorption dans le semi conducteur GM1

Le photo-courant que va produire ces porteurs peut être déterminée sous la condition de faible injection, les équations de continuité pour les porteurs minoritaires sont :

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx} - G_p + \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_{p1}} = 0 \quad (\text{III-10})$$

Pour les trous dans la région (n), et pour les électrons dans la région (p) :

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} - G_n + \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_{n2}} = 0 \quad (\text{III-11})$$

$\tau_{p1}$  : est la durée de vie des trous dans la région dopé type n.

$\tau_{n2}$  : est la durée de vie des électrons dans la région dopé type p.

$n_{p0}$  : est la densité des électrons dans la région dopé type p à l'équilibre.

$p_{n0}$  : est la densité des trous dans la région dopé type n à l'équilibre.

Les courants de trous et d'électrons sont :

$$J_p = eD_{p1} \frac{dp_n}{dx} + e\mu_{p1}p_n E \quad (\text{III-12})$$

$$J_n = eD_{n2} \frac{dn_p}{dx} + e\mu_{n2}n_p E \quad (\text{III-13})$$

$D_{p1}$  : est la constante de diffusion des trous dans le semi-conducteur 1.

$D_{n2}$  : est la constante de diffusion des électrons dans le semi-conducteur 2 (type p).

$\mu_{p1}$  : est la mobilité des trous dans le semi-conducteur 1.

$\mu_{n2}$  : est la mobilité des électrons dans le semi-conducteur 2.

D'où :

$$D_{p1} = \mu_{p1} \left( \frac{KT}{e} \right)$$

$$D_{n2} = \mu_{n2} \left( \frac{KT}{e} \right)$$

$KT$ : Énergie thermique à la température ambiante.

Les équations (III.7) et (III.9) sont combinées pour tirer une expression pour la région dopé type n (l'émetteur).

$$D_{p1} \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_{p1}} = 0 \quad (\text{III-14})$$

Les équations (III.11) est une équation différentielle du deuxième degré avec second membre ; elle a pour solution, une solution homogène ( $S_h$ ) et une solution particulière ( $S_r$ ) :

$$S_h = A \cosh \frac{x}{L_{p1}} + B \sinh \frac{x}{L_{p1}}$$

Où  $L_{p1}$  est la longueur de diffusion des trous,

$$L_{p1} = \sqrt{D_{p1} \tau_{p1}}$$

$$S_r = K \exp(-\alpha_1 x)$$

Où A, B, K sont des constantes.

Donc la solution générale est :

$$S_G = S_h + S_r$$

$$S_G = n_p - n_{p0} = A \cosh \frac{x}{L_{p1}} + B \sinh \frac{x}{L_{p1}} + K \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{III-15})$$

On obtiendra la constante K par l'application de la solution particulière dans l'équation différentielle (III.11) par la dérivation de la solution particulière ( $S_r$ ).

On a donc :

$$p_n - p_{n0} = A \cosh \frac{x}{L_{p1}} + B \sinh \frac{x}{L_{p1}} - \frac{\alpha_1 F (1-R) \tau_{p1}}{(\alpha^2 L_{p1}^2 - 1)} \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{III-16})$$

Les conditions aux limites sont données comme suit :

- A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse  $S_p$  :

$$S_p (p_n - p_{n0}) = D_{p1} \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} \quad \text{à } x = 0$$

- A la limite de la jonction, la densité des porteurs en excès est réduite à zéro par le champ électronique dans la zone de déplétion :

$$p_n - p_{n0} = 0 \quad \text{à } x = x_j$$

A partir de ces conditions aux limites, nous obtenons les expressions de A et B, puis nous les remplaçons dans l'équation (III.12) :

$$p_n - p_{n0} = \left[ \frac{\alpha F (1-R) \tau_{p1}}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + \exp(\alpha x_j) \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} - \exp(-\alpha x) \right] \quad (\text{III-17})$$

Et la densité du photo courant des trous à la zone de déplétion est :

$$j_p = -e D_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j} = \left[ \frac{e F (1-R) \alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (\text{III-18})$$

### V-1-2 Le courant des électrons dans la région dopé type p [15]:

Le taux de génération de paires électrons-trous à une dimension  $x$  de la surface du semi-conducteur 2 est donné par :

$$G(\lambda, x) = \alpha_2(\lambda)F(1 - R) \exp\left(-\alpha(x_j + w_1)\right) \exp(-\alpha_2 w_2) \exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{III-19})$$

Pour trouver le photo-courant des électrons générés dans la base, les équations (III-19), (III-11), (III.13) sont nécessaires avec les conditions aux limites suivantes :

- De même que la région de l'émetteur, au bord de la zone de déplétion, la densité des porteurs minoritaires en excès est nulle :

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad x = x_j + w_1 + w_2$$

- A la surface arrière de la cellule une recombinaison en surface prend place  $S_n$

$$S_n(n_p - n_{p0}) = D_{n2} \left( \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \right) x = h$$

$h$  : L'épaisseur totale de la cellule.

En exploitant ces conditions aux limites, et avec l'utilisation d'une expression des électrons similaires à celle des trous, on déduit alors la distribution des électrons dans la région de base :

$$\begin{aligned}
n_p - n_{p0} &= \left[ \frac{\alpha F(1-R)\tau_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \right] \\
&\times \\
&\left[ \cosh\left(\frac{x-x_j-w_1}{L_n}\right) - \exp[-\alpha(x_j + w_1)] - \right. \\
&\left. \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \left[ \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \times \sinh\left(\frac{x-x_j-w_1}{L_n}\right) \right] \quad (\text{III-20})
\end{aligned}$$

La densité du photo-courant issue de la base due aux électrons collectés à la limite de la jonction est :

$$\begin{aligned}
j_n &= \left[ \frac{e\alpha F(1-R)L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \right] \exp[-\alpha(x_j + w_1)] \\
&\times \left[ \alpha L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \left[ \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (\text{III-21})
\end{aligned}$$

Où :

$H'$  : l'épaisseur de la base

$L_n$  : longueur de diffusion des électrons,  $L_{p1} = \sqrt{D_{n2}\tau_{n2}}$

$w_1$  et  $w_2$  : largeur de ZCE coté N et P



## V-2 Calcul de la densité du courant $J_{QW}$ [30]

Pour calculer le courant  $I_{QW}$  on doit calculer la densité d'état dans le puits quantique ainsi que la population électronique puis on calcule le courant à travers cette population ; mais avant ça on va d'abord étudier le mouvement des électrons et par conséquent l'énergie de confinement de ces électrons dans le puits quantique.

### a- Calcul de l'énergie de confinement E

On va supposer que le mouvement des électrons est libre plan de la structure-plan (xOy)- mais confiné dans la direction perpendiculaire (direction z) par les barrières de potentiel (figure) ;

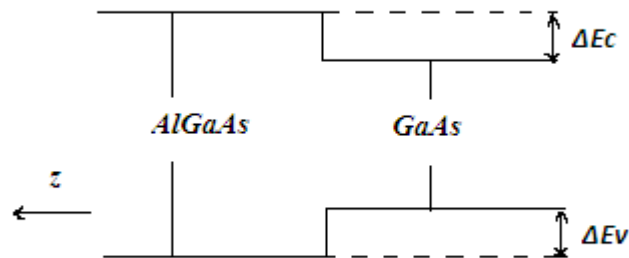


Figure III-7 : diagramme énergétique de la structure

Le mouvement des électrons dans le puits quantique suivant z est régi par l'équation :

$$\frac{\hbar^2}{2me} \frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + (E - V(z))\psi(z) = 0 \quad (\text{III-22})$$

Ou :

$\psi(z)$  : la fonction d'onde

$V(z)$  : l'énergie potentielle

$E$  : l'énergie des électrons (énergie de confinement par suite)

$\hbar$  :  $\hbar = h/2\pi$  avec :  $h$  Constante de Planck =  $6,62 \times 10^{-34}$  J.s

$me$  : masse des électrons

$$V(z) = \Delta E_c = V_0 \text{ pour } z < 0 \text{ et } z > L$$

$$V(z) = 0 \text{ pour } 0 < L < z$$

Le mouvement des électrons d'énergie  $E < \Delta E_c$  n'est plus borné en  $z=0$  et en  $z=L$ , l'électron a une probabilité non nulle de se trouver à l'extérieur du puits. Le potentiel carré délimite trois régions :

**Région I :**  $z < L$ ,  $V(z) = \Delta E_c = V_0$ , l'équation (III-22) s'écrit :

$$\frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + \frac{2m_2}{\hbar^2} (E - V_0) \psi(z) = 0 \quad (\text{III-23})$$

Ou :

$m_2$  : représente la masse des électrons dans le matériau barrière

On peut écrire l'équation III-16 comme suit :

$$\frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} - K_2^2 \psi(z) = 0 \quad (\text{III-24})$$

Telle que :

$$K_2 = \sqrt{2m_2 e(V_0 - E)/\hbar}$$

La solution de cette équation s'écrit :

$$\psi(z) = A e^{K_2 z} + A' e^{-K_2 z} \quad (\text{III-25})$$

Condition aux limites  $\psi(z \rightarrow \infty) = 0$  entraîne  $A' = 0$ , la fonction d'onde s'écrit :

$$\psi(z) = A e^{K_2 z} \quad (\text{III-26})$$

**Région II :**  $0 < L < z$ ,  $V(z) = 0$ , l'équation (III-22) s'écrit :

$$\frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + \frac{2m_1}{\hbar^2} E \psi(z) = 0 \quad (\text{III-27})$$

Ou :

$m_1$  : représente la masse des électrons dans le matériau puits

On posant :  $K_1 = \sqrt{2m_1 E/\hbar}$

La solution de cette équation s'écrit :

$$\psi'(z) = B e^{iK_1 z} + B' e^{-iK_1 z} \quad (\text{III-28})$$

Ou bien :

$$\psi'(z) = B \sin(K_1 z + \varphi) \quad (\text{III-29})$$

**Région III** :  $z > L$ ,  $V(z) = \Delta Ec = V_0$ , la solution de l'équation (III-15) s'écrit :

$$\psi''(z) = C' e^{K_2 z} + C e^{-K_2 z} \quad (\text{III-30})$$

La condition aux limites  $\psi''(z \rightarrow \infty) = 0$  entraîne  $C' = 0$ , la fonction d'onde s'écrit :

$$\psi''(z) = C e^{-K_2 z} \quad (\text{III-31})$$

Les constantes d'intégrations A, B, C et  $\varphi$  sont déterminées par les conditions aux limites. Ces conditions sont les continuités de la fonction d'onde  $\psi$  et du courants de probabilité  $(1/m) d\psi/dz$  au interfaces. À partir des expressions (III-19-22-24) on obtient les relations :

- En  $z = 0$ , les conditions  $\psi(0) = \psi'(0)$  et  $1/m_2 d\psi(0)/dz = 1/m_1 d\psi'(0)/dz$  entraînent

$$A = B \sin \varphi \quad (\text{III-32-a})$$

$$(\text{III-32-b})$$

$$A \frac{K_2}{m_2} = B \frac{K_1}{m_1} \cos \varphi$$

- En  $z = L$ , les conditions  $\psi'(L) = \psi''(L)$  et  $1/m_1 d\psi'(L)/dz = 1/m_2 d\psi''(L)/dz$  entraînent

$$B \sin(K_1 L + \varphi) = C e^{-K_2 L} \quad (\text{III-32-c})$$

$$B \frac{K_1}{m_1} \cos(K_1 L + \varphi) = -C \frac{K_2}{m_2} e^{-K_2 L} \quad (\text{III-32-d})$$

En divisant III-25-a / III-25-b et III-25-c/ III-25-d on obtient :

$$\tan \varphi = \frac{K_1 m_2}{K_2 m_1} \quad (\text{III-33-a})$$

$$\tan(K_1 L + \varphi) = -\frac{K_1 m_2}{K_2 m_1} \quad (\text{III-33-b})$$

Compte tenu de la relation trigonométrique  $\sin^2 \alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan^2 \alpha}}$  l'équation (III-32-a) donne :

$$\sin \varphi = \frac{\frac{K}{m_1}}{\sqrt{\frac{K_1^2}{m_1^2} + \frac{K_2^2}{m_2^2}}} \quad (\text{III-34})$$

D'autre part la relation  $\tan \varphi = -\tan(K_1 L + \varphi)$  entraîne  $\varphi = -(K_1 L + \varphi) + n\pi$

Où n est un nombre entier. Cette relation s'écrit :  $K_1 L = n\pi - 2\varphi$

Soit, en expliquant  $\varphi$  (III-27)

$$K_1 L = n\pi - 2 \text{Arc sin} \frac{\frac{K}{m_1}}{\sqrt{\frac{K_1^2}{m_1^2} + \frac{K_2^2}{m_2^2}}} \quad (\text{III-35})$$

En explicitant  $K_1$   $K_2$  à partir de leurs définitions, on obtient la relation

$$\frac{\sqrt{2m_1 E}}{\hbar} L = n\pi - 2 \text{Arc sin} \sqrt{\frac{E}{\frac{V_0 m_1}{m_2} + E(1 - \frac{m_1}{m_2})}} \quad (\text{III-36})$$

Pour  $m_e = m_1 = m_2$  et pour  $n=1$  on obtient :

$$\frac{\sqrt{2m_e E}}{\hbar} L = \pi - 2 \text{Arc sin} \sqrt{\frac{E}{V_0}} \quad \text{Ou} \quad \sqrt{\frac{E}{V_0}} = \sin \frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right)$$

$$E_1 = \pi^2 \hbar^2 / 2m_g L^2$$

$E_1$  est l'énergie de confinement dans le puits quantique et de hauteur infini .compte tenue de la relation  $E/E_1 < 1$  un développement limite de la fonction sinus permet d'écrire l'équation sous la forme :

$$\sqrt{\frac{E}{V_0}} \approx \frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right) - \frac{1}{3!} \left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right)\right)^2 \dots + \sqrt{\frac{E}{V_0}} \approx \frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right) - \frac{1}{5!} \left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right)\right)^5 - \frac{1}{7!} \left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_1}}\right)\right)^7$$

Un développement au deuxième ordre donne l'équation du second degré en  $\sqrt{E}$  suivante :

$$E + \left(\frac{B}{C}\sqrt{E_1} - \frac{1}{C}\frac{E_1}{\sqrt{V_0}}\right)\sqrt{E} + \frac{A}{C}E_1 \approx 0$$

$$A = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{3!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^5 - \frac{1}{7!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^7 = 0,9998 \approx 1$$

$$B = -\frac{\pi}{2} - \frac{3}{3!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 + \frac{5}{5!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^5 - \frac{7}{7!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^7 = 0,0014 \approx 0$$

$$C = -\frac{1}{3!} - \frac{3}{3!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 + 2\frac{5}{5!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^5 - 3\frac{7}{7!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^7 = -1.2393$$

L'énergie de confinement  $E$  est donnée par le carré de la solution positive de l'équation de second degré, soit :

$$E = \left( \frac{\sqrt{E_1}}{2C} \left( \sqrt{\frac{E_1}{V_0}} - B \right) + \sqrt{\frac{E_1}{4C^2} \left( B - \sqrt{\frac{E_1}{V_0}} \right)^2 - \frac{A}{C} E_1} \right)^2 \tag{III-37}$$

$$E = \left( \frac{E_1}{2C\sqrt{V_0}} + \sqrt{\frac{E_1^2}{4C^2 V_0} - \frac{A}{C} E_1} \right)^2 \tag{III-38}$$

Avec :

$$A=1, \quad B=0, \quad C=-1.24, \quad V_0=\Delta E c$$

### b- Calcul de la densité d'états dans le puits quantique

Dans un système à P dimensions, la densité d'état dans l'espace des k est donnée compte tenu du spin par :

$$g(\mathbf{k}) = \frac{2}{(2\pi)^P} \quad (\text{III-39})$$

Notre système est réduit à deux dimensions, la densité d'états s'écrit :

$$g(\mathbf{k}) = \frac{2}{(2\pi)^2} \quad (\text{III-40})$$

Ainsi sur le disque de rayon  $k_{//}$  le nombre d'états est donné par :

$$R(k_{//}) = \frac{2}{(2\pi)^2} \pi k_{//}^2 \quad (\text{III-41})$$

Si on prend, dans chacun des sous-bandes, l'origine des énergies au bas de la sous-bande, l'énergie s'écrit :

$$E = \frac{\hbar^2 k_{//}^2}{2m_e} \rightarrow k_{//}^2 = \frac{2m_e}{\hbar^2} E \quad (\text{III-42})$$

En explicitant  $k_{//}$  dans l'expression de  $R(k_{//})$  on obtient :

$$R(k_{//}) = \frac{m_e}{\pi \hbar^2} E \quad (\text{III-43})$$

$m_e$  : la masse d'électron

$E$  : l'énergie

$\hbar$  :  $\hbar = h/2\pi$  avec :  $h$  Constante de Planck =  $6,62 \times 10^{-34}$  J.s

La densité d'état dans l'espace des énergies s'écrit pour une sous bande j :

$$g_j(E) = \frac{dR(E)}{dE}$$

$$g_j(E) = \frac{m_e}{\pi h^2}$$

C'est une caractéristique essentielle d'un système à deux dimensions, la densité d'état est constante en fonction de l'énergie. En tenant compte de tous les sous bandes la densité d'états s'écrit :

$$g(E) = \frac{m_e}{\pi h^2} \sum_j H(E - E_j) \quad (\text{III-45})$$

Ou :

$H(x)$  : la fonction de Heaviside,  $H(x)=0$  pour  $x < 0$  ,  $H(x) = 1$  pour  $x > 0$

$E_j$  : les niveaux d'énergie

$m_e$  : masse des électrons

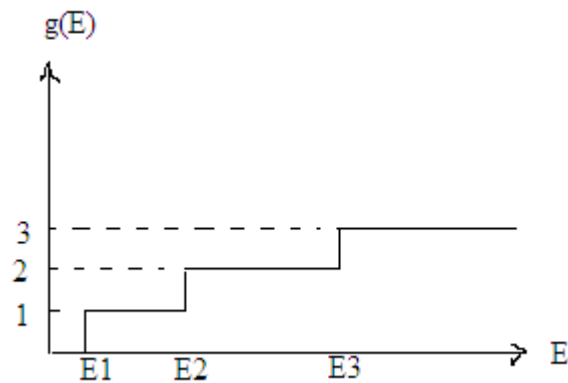


Figure III-8 : Densité d'état électronique dans le puits quantique

### c- Population électronique

A la température T, la population de chaque sous bande est donnée par

$$n_j = \int_{E_j}^{\infty} g_j(E) f(E) dE \quad (\text{III-48})$$

$g_j(E)$  : densité d'état

$f(E)$  : fonction de fermi

$$n_j = \frac{m_e}{\pi h^2} \int_{E_j}^{\infty} \frac{dE}{1 + \exp((E - E_f)/KT)}$$

L'intégrale de fermie est donné par :

$$\int_{E_j}^{\infty} \frac{dE}{1 + \exp((E - E_f)/KT)} = KT \ln(1 + \exp((E_f - E_j)/KT)) \quad (\text{III-49})$$

Ainsi la population de la sous-bande j s'écrit :

$$n_j = \frac{m_e}{\pi h^2} KT \ln(1 + \exp((E_f - E_j)/KT)) \quad (\text{III-50})$$

Sauf pour  $|E_f - E_j| \approx kT$ , on peut établir deux expressions simplifiées de  $n_j$  valable respectivement pour une sous-bande situé au-dessous du niveau de fermi et pour une sous-bande située au-dessus du niveau de fermi :

$$\checkmark \quad \text{Pour } E_f - E_j \gg KT \quad \ln(1 + \exp((E_f - E_j)/KT)) \approx \frac{E_f - E_j}{kT}$$

$$n_j = \frac{m_e}{\pi h^2} (E_f - E_j) \quad (\text{III-51})$$

$$\checkmark \quad \text{Pour } E_j - E \ll KT \quad \ln(1 + \exp((E_f - E_j)/KT)) \approx \exp((E_f - E_j)/KT)$$

$$n_j = \frac{m_e}{\pi h^2} KT \exp((E_f - E_j)/KT) \quad (\text{III-52})$$



les populations des trois premiers niveaux sont donnés par l'expression (III-41) pour  $j=1$  et par l'expression (III-42) pour  $j>1$ .

On obtient :

$$n_1 \approx \frac{m_e}{\pi h^2} (E_f - E_1)$$

$$n_2 \approx \frac{m_e}{\pi h^2} K T e^{(E_f - E_2)/K T}$$

$$n_3 \approx K T \frac{m_e}{\pi h^2} e^{(E_f - E_3)/K T}$$

La densité totale d'électrons dans la couche d'inversion est donnée par  $n_s = \sum n_j$ , soit

$$n_s = K T \frac{m_e}{\pi h^2} \sum \ln (1 + \exp (E_f - E_j) / K T) \quad (\text{III-53})$$

Compte tenu de valeurs précédentes les électrons sont pratiquement situés dans la première sous-bande.

Dans notre modèle on va prendre  $j=1,2$  ce qui implique un niveau d'énergie  $E_1, E_2$  Donc la densité d'états des électrons est donnée comme suit:

$$n_s = n_1 + n_2 = \frac{m_e}{\pi h^2} (E_f - E_1) + K T \frac{m_e}{\pi h^2} e^{(E_f - E_2)/K T} \quad (\text{III-54})$$

**d- densité du courant de puits  $J_{QW}$** 

On revient à notre approximation qui dit que le courant du puits quantique  $I_{QW}$  est égale au produit des densités des électrons dans le puits quantique, la vitesse de ces électrons et la charge c'est-à-dire la relation (III-2) on trouve :

$$J_{QW} = e \times n_s \times v$$

$$J_{QW} = e \times \left[ \frac{me}{\pi h^2} (E_f - E_1) + KT \frac{me}{\pi h^2} e^{(E_f - E_2)/KT} \right] \times v \quad (III-55)$$

Donc le courant total  $I_{ph}$  est :

$$\begin{aligned} I_{ph} = & \left[ \left[ \frac{eF(1-R)\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \right. \\ & + \\ & \left. \left[ \frac{e\alpha F(1-R)L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \right] \exp[-\alpha(x_j + w_1)] \times \left[ \alpha L_n - \frac{\left( \frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left[ \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \right. \\ & + \\ & \left. e \times \left[ \frac{me}{\pi h^2} (E_f - E_1) + KT \frac{me}{\pi h^2} e^{(E_f - E_2)/KT} \right] \times v \right] \times S \quad (III-56) \end{aligned}$$

Le calcul des différents courants  $I_n$ ,  $I_p$  et  $I_{QW}$  montre que les courants  $I_n$ ,  $I_p$  sont négligeables devant  $I_{QW}$ , donc le courant total de la cellule données par la relation suivante :

Donc le courant total de la cellule (réel) est de :

$$I = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{(V + R_s I)}{A U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{Sh}}\right)$$

$$I = e \times \left[ \frac{m_e}{\pi h^2} (E_f - E_1) + kT \frac{m_e}{\pi h^2} e^{(E_f - E_2)/kT} \right] \times v \times S - I_S \left[ \exp\left(\frac{(V + R_s I)}{A U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{Sh}}\right)$$

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter le modèle de la cellule solaire à puits quantique objet de notre étude, en l'occurrence la structure, modèle électronique et le calcul des différents courants).

# *Chapitre IV*

## Introduction

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, la prédiction du comportement des dits systèmes apparaît nécessaire en adoptant des modèles bien précis. La modélisation a donc été largement utilisée dans le domaine Photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement (optimisation).

Dans ce chapitre, nous présenterons et commenterons les différents résultats obtenus lors de la simulation numérique de notre modèle (caractéristique I(V)) ainsi que l'influence de quelques paramètres sur cette courbe.

### I- Le modèle mathématique de la cellule solaire :

La caractéristique courante tension I(V) se présente sous forme d'une équation linéaire (cas d'une cellule solaire idéal) et une équation non linéaire (cas d'une cellule solaire réel),

#### I-1 La caractéristique I(V) d'une cellule solaire idéale

D'après la relation III-5 (chapitre 3), l'expression du courant en fonction de la tension est comme suit :

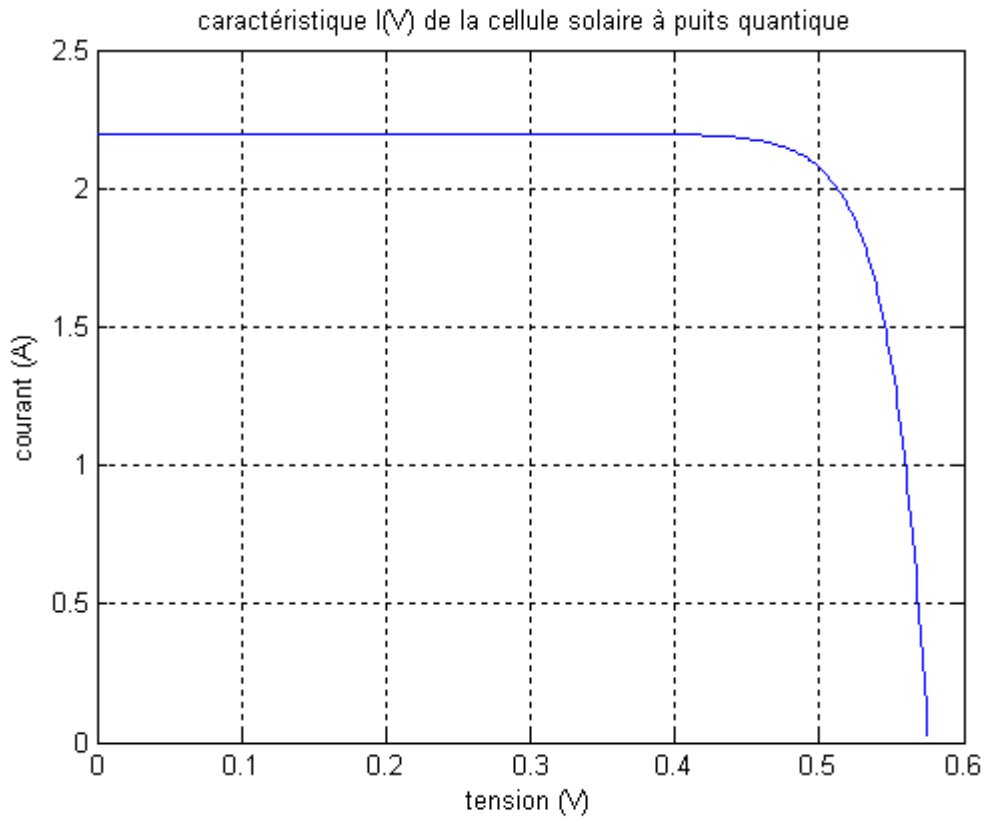
$$I(V) = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right]$$

Avec:

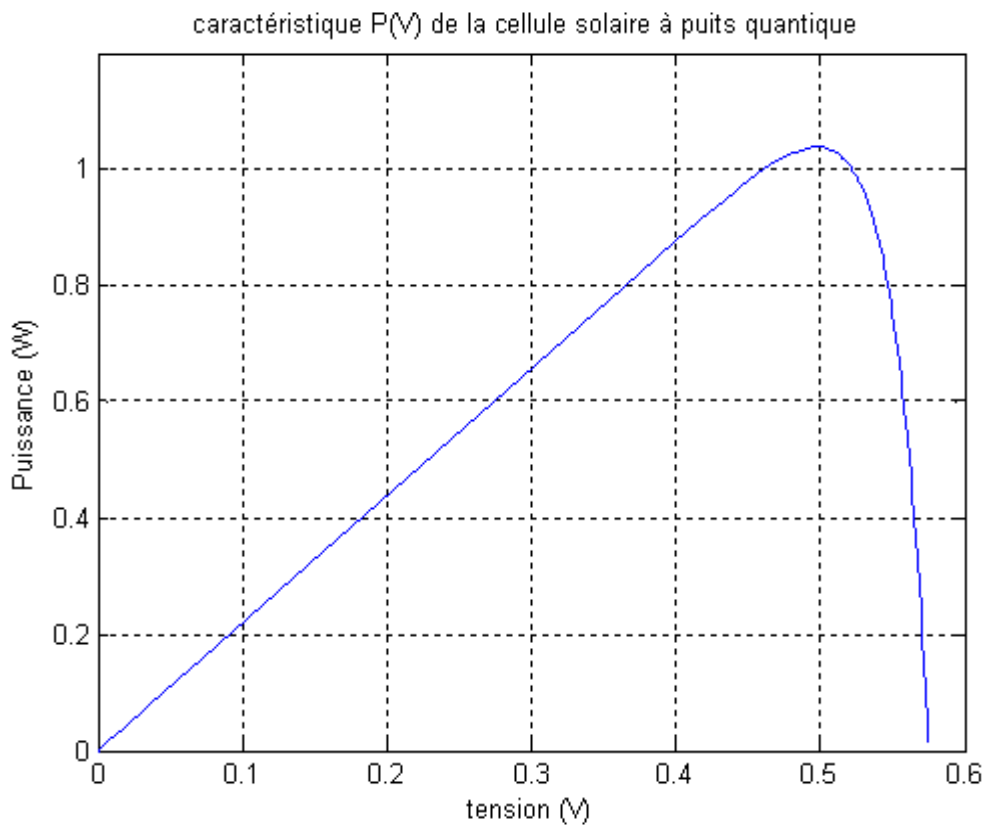
$$I_s = 5 \times 10^{-10} \text{ A}$$

$$I_{ph} = 21.98 \times 10^{-1} \text{ A}$$

$$U_T = 0.026 \text{ v à } T = 300 \text{ K}$$



**Figure (IV-1) :** Caractéristique I(V) de la cellule avec  $R_s=0$   $R_{sh}=\infty$



**Figure (IV-2) :** Caractéristique P(V) de la cellule avec  $R_s=0$   $R_{sh}=\infty$

	<b>I<sub>cc</sub> (A)</b>	<b>V<sub>co</sub> (V)</b>	<b>P<sub>m</sub> (W)</b>	<b>I<sub>max</sub>(A)</b>	<b>V<sub>max</sub>(V)</b>	<b>FF%</b>
<b>R<sub>s</sub>= 0 R<sub>sh</sub>= ∞</b>	<b>2.22</b>	<b>0.575</b>	<b>1.05</b>	<b>2.1</b>	<b>0.5</b>	<b>82.26</b>

**Tableau (IV-1)- Les Caractéristiques de la cellule solaire avec R<sub>s</sub>=0 et R<sub>sh</sub>= ∞**

Les courbes IV-1 et IV-2 sont obtenue par l'utilisation du logicielle MATLAB .nous avons résolu l'équation I(V) de la cellule idéal, en créant une fonction prédéfinie par MATLAB (1) ensuite nous avons fait appel à cette fonction en utilisant la commande « f plot »(2).

(1) `function y = Untitled(x)`  
`y=(x);`

(2) `fplot ('Untitled');xlabel( );ylabel()`

## I-2 La caractéristique I(V) dans le cas ou $R_s = 3 \Omega$ et $R_{sh} = 1000\Omega$ :

D'après la relation III-7 (chapitre 3), l'expression du courant en fonction de la tension est comme suit :

$$I = e \times \left[ \frac{me}{\pi h^2} (E_f - E_1) + KT \frac{me}{\pi h^2} e^{(E_f - E_2)/KT} \right] \times v \times S - I_s \left[ \exp\left(\frac{(V + R_s I)}{AU_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right)$$

La caractéristique courante tension I (V) se présente sous forme d'une équation non linéaire, Alors que le travail numérique a porté sur la résolution de cette équation.

Pour résoudre l'équation I(V), plusieurs méthodes de résolution approximatives peuvent être Utilisées, ces méthodes sont : [31]

- ✓ La méthode de dichotomie
- ✓ La méthode de Newton Raphson
- ✓ La méthode de Lagrange
- ✓ La méthode de point fixe

La méthode que nous avons adoptée pour notre étude est celle de Newton Raphson et ce pour sa leur précision ainsi que sa vitesse de convergence élevée. Cette méthode est considérée autant meilleure que celle de dichotomie pour la solution des équations non linéaires.



### I-2-1 La méthode de Newton-Raphson [15]

La méthode des tangentes porte le nom des mathématiciens anglais Isaac Newton et Josef Raphson, qui furent les premiers à la décrire pour l'appliquer à la recherche des zéros d'une équation non linéaire.

La méthode de Newton-Raphson est de loin la méthode numérique la plus utilisée pour approximer les fonctions. Cette méthode suppose que la fonction  $f$  est dérivable dans l'entourage de la fonction et que la dérivée, peu importe où dans l'entourage, n'est pas zéro.

En supposant que  $x_0$  est un point suffisamment près de la racine de la fonction, le graphe de la fonction  $y=f(x)$  est approximé par la tangente de la courbe au point

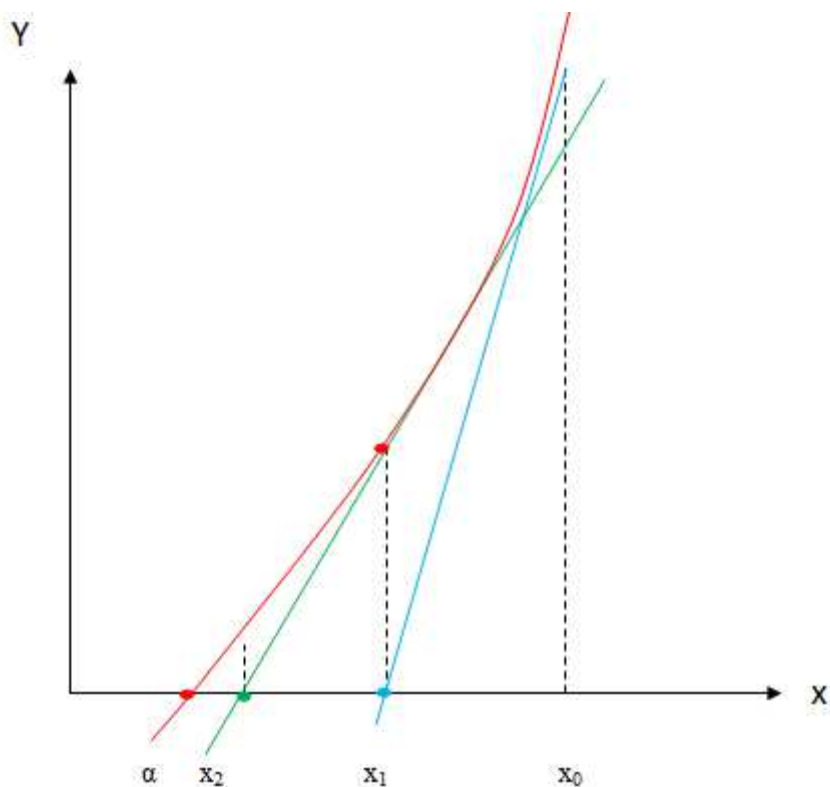


Figure (IV-3) : Illustration de la méthode de Newton-Raphson

L'équation de la tangente à partir du point  $(x_0, f(x_0))$  dans la courbe  $y=f(x)$  est :

$$y \cong f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

Cette tangente coupe l'axe des  $x$  au point  $x_1$  dont la valeur est :

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Le point  $x_1$  en général a de bonnes chances d'être plus proche du vrai zéro de  $f$  que le point  $x_0$  précédent. La valeur  $x_1$  est alors admise comme une nouvelle valeur de la fonction.

Le point  $(x_1, f(x_1))$  peut être utilisé comme un nouveau point servant à dessiner une tangente.

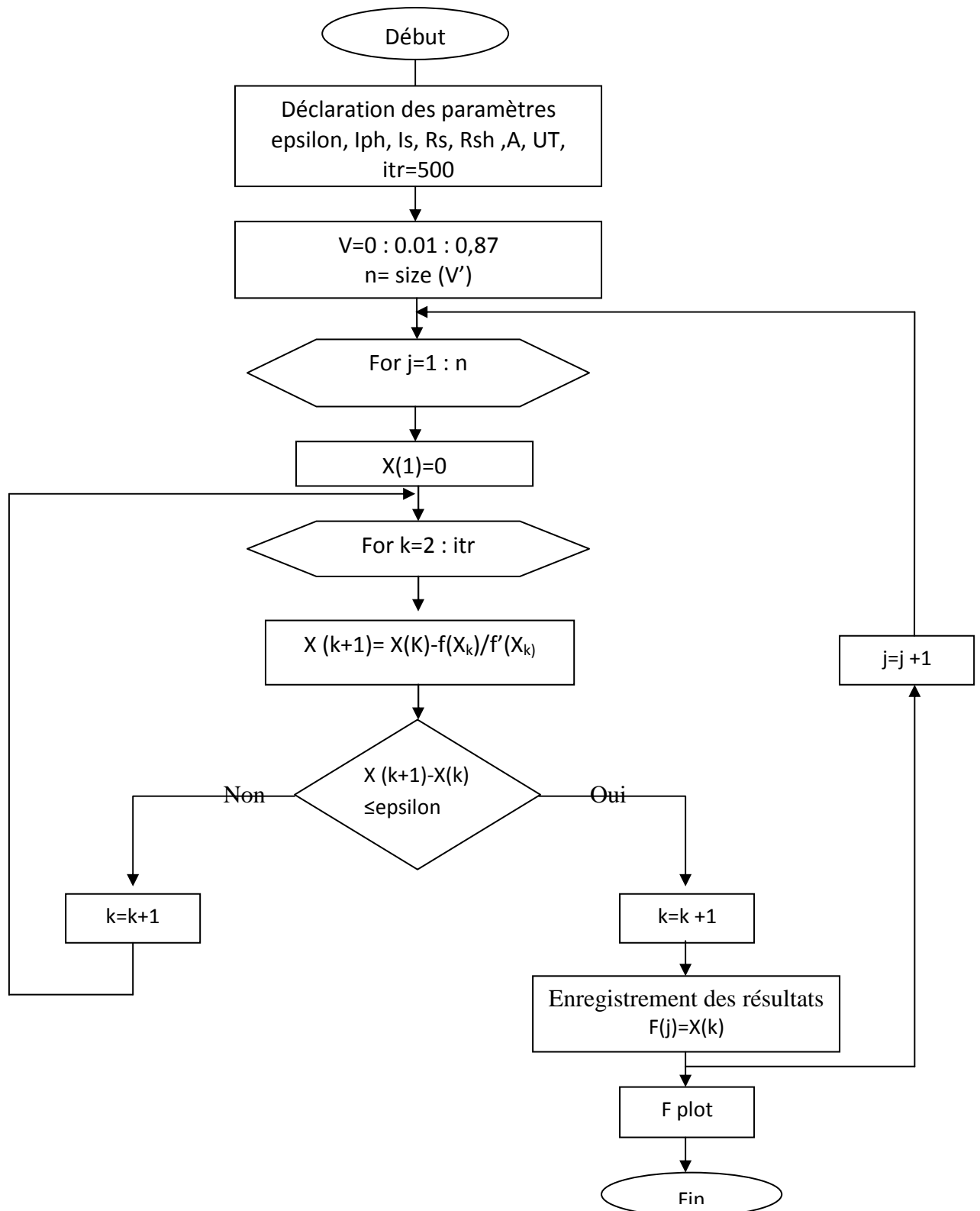
Son intersection avec l'axe des  $x$  en  $x_2$ , décrite comme suit :

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$$

$x_2$  est également admise comme une nouvelle approximation de la racine. Ce procédé peut être répété maintes fois, et mène à la méthode d'itération donnée par la formule de Newton-Raphson :

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

I-2-2 L'organigramme principal :



**Organigramme globale pour le calcul de I(V) par la méthode de Newton Raphson**

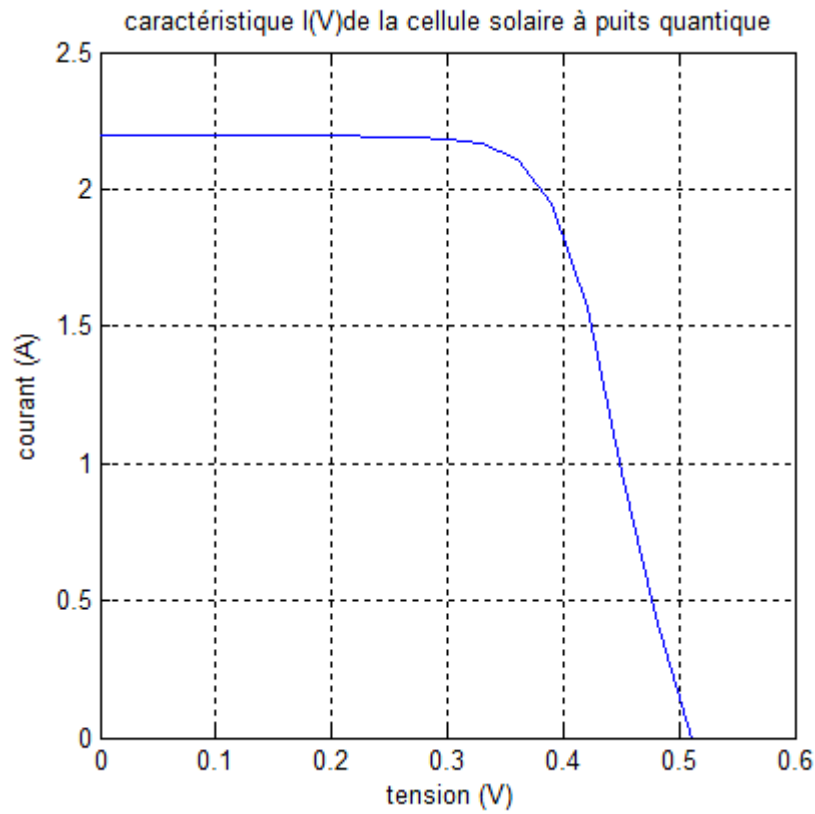


Figure (IV-4) : Caractéristique I(V) de la cellule avec  $R_s = 3\Omega$ ;  $R_{sh} = 1000\Omega$

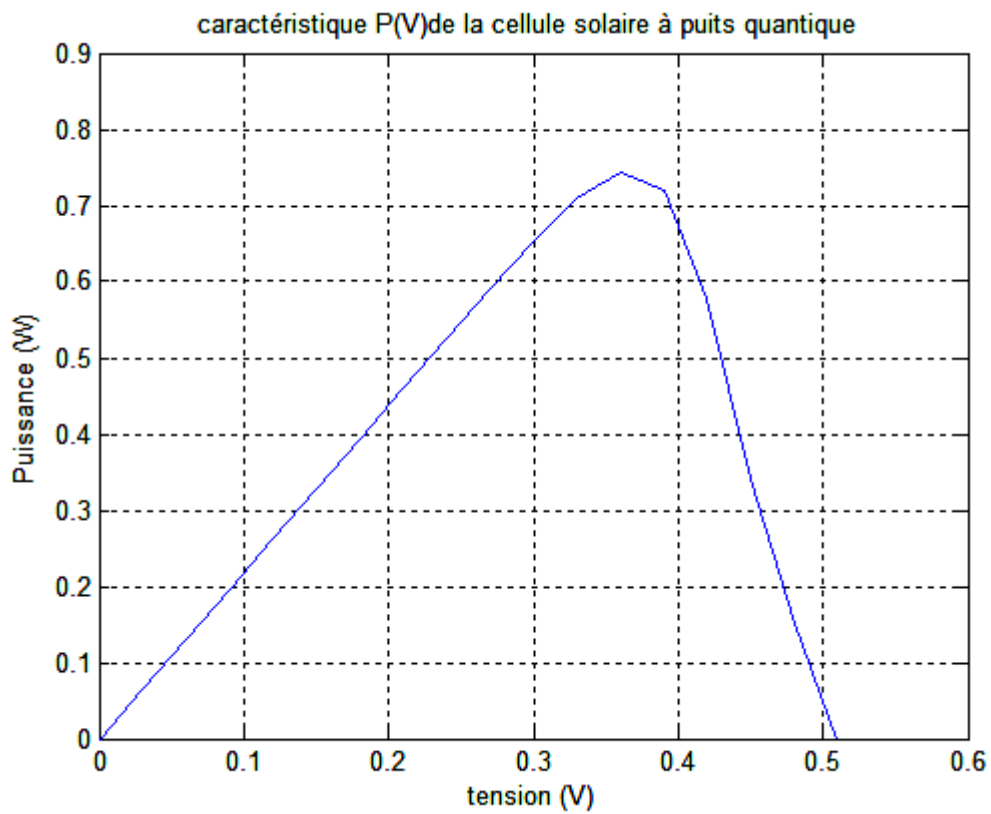


Figure (IV-5) : Caractéristique P(V) de la cellule avec  $R_s = 3\Omega$ ;  $R_{sh} = 1000\Omega$

	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	P <sub>m</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	FF%
<b>Rs= 3 Ω Rsh=1000 Ω</b>	<b>2.191</b>	<b>0.51</b>	<b>0.74</b>	<b>2.05</b>	<b>0.36</b>	<b>66.22</b>

**Tableau (IV-2)- Les Caractéristique de la cellule solaire avec Rs=3 Ω et Rsh=1000 Ω**

Les résultats du tableau N° 2 de la cellule solaire à puits quantique avec Rs=3 Ω et Rsh=1000 Ω, montrent qu'il ya une diminution par rapport à une cellule avec Rs=0 et Rsh=∞, dans le courant de court circuit ainsi que la tension de circuit ouvert, par conséquence une diminution des différents paramètres (P<sub>m</sub>, I<sub>max</sub>, V<sub>max</sub> et FF). Les courbes (IV-6-7) démontrent cette diminution.

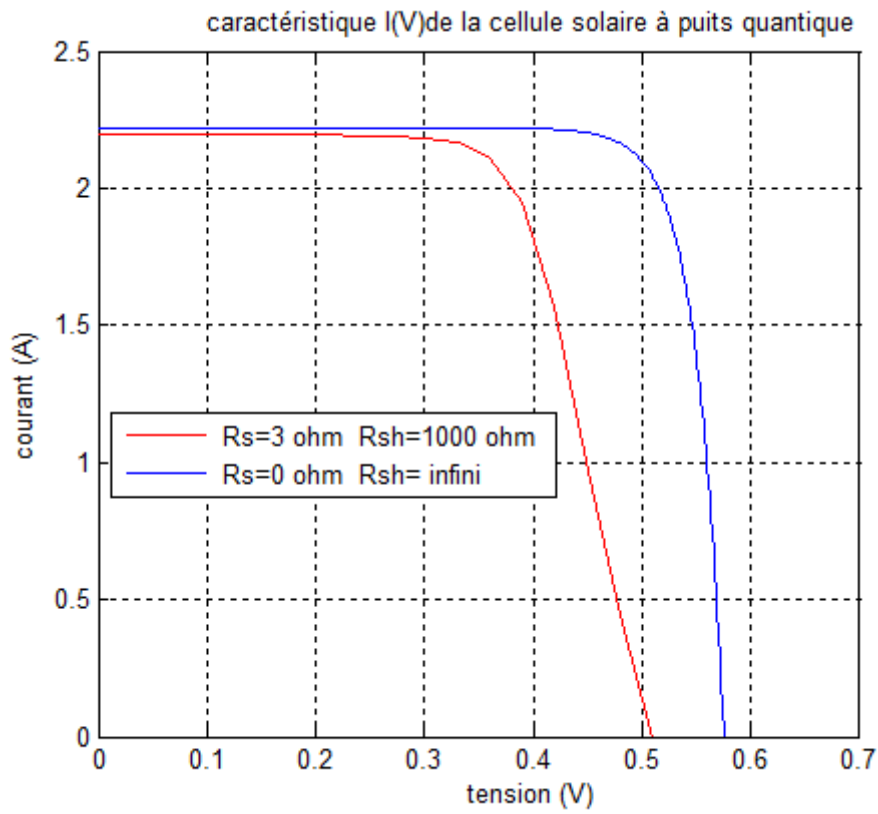


Figure (IV-6) : caractéristique I(V) des deux cellules (avec  $R_s=0$ ,  $R_{sh}=\infty$  et  $R_s=3 \Omega$ ,  $R_{sh}=1000 \Omega$ )

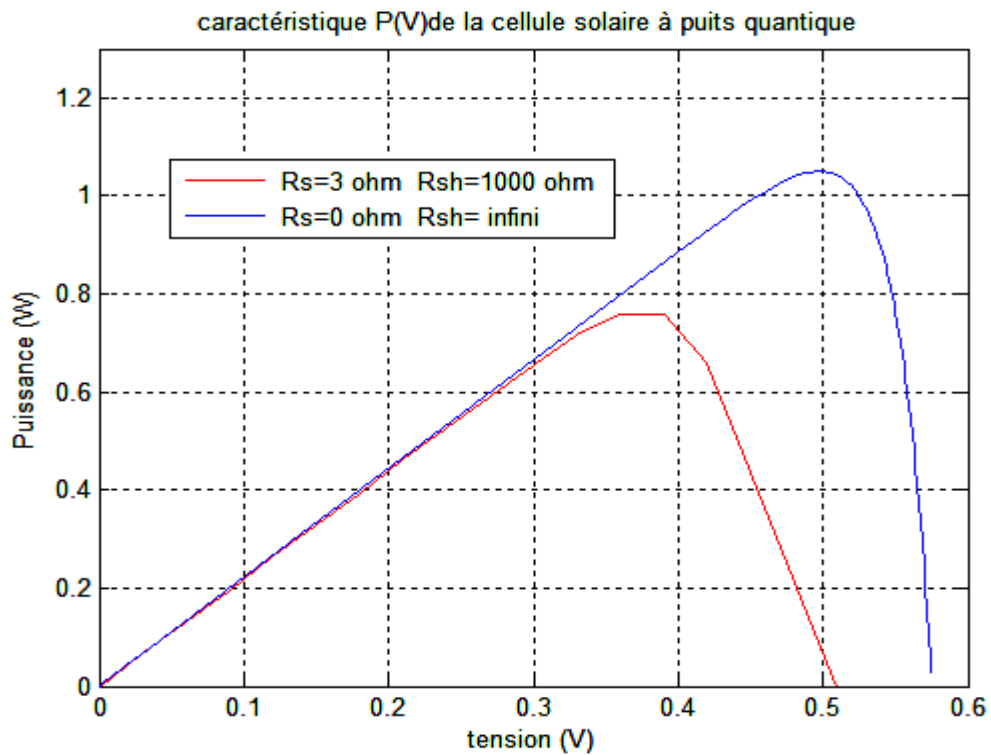


Figure (IV-7) : caractéristique P(V) des deux cellules (avec  $R_s=0$ ,  $R_{sh}=\infty$  et  $R_s=3 \Omega$ ,  $R_{sh}=1000 \Omega$ )

## II- L'influence des paramètres géométriques et technologiques sur la caractéristique I (V) :

### II-1 L'influence de la température T :

On remarque d'après les relations III-7 et III-55 (chapitre 3) que le courant du puits quantique est en fonction de T ainsi que le courant  $I_d$ , les courbes des figures (IV-8-9-10-11-12) démontrent l'agitation de T sur les caractéristiques I(V) et P(V) et plus particulier sur le courant du puits quantique  $I_{QW}$ .

La Figure (IV-8) représente la réaction du courant de puits quantique  $I_{QW}$  à la variation de la température, nous remarquons que pour des valeurs bien précises des  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_f$  (voir chapitre3), le courant  $I_{QW}$  reste toujours constant et indépendant de la température.

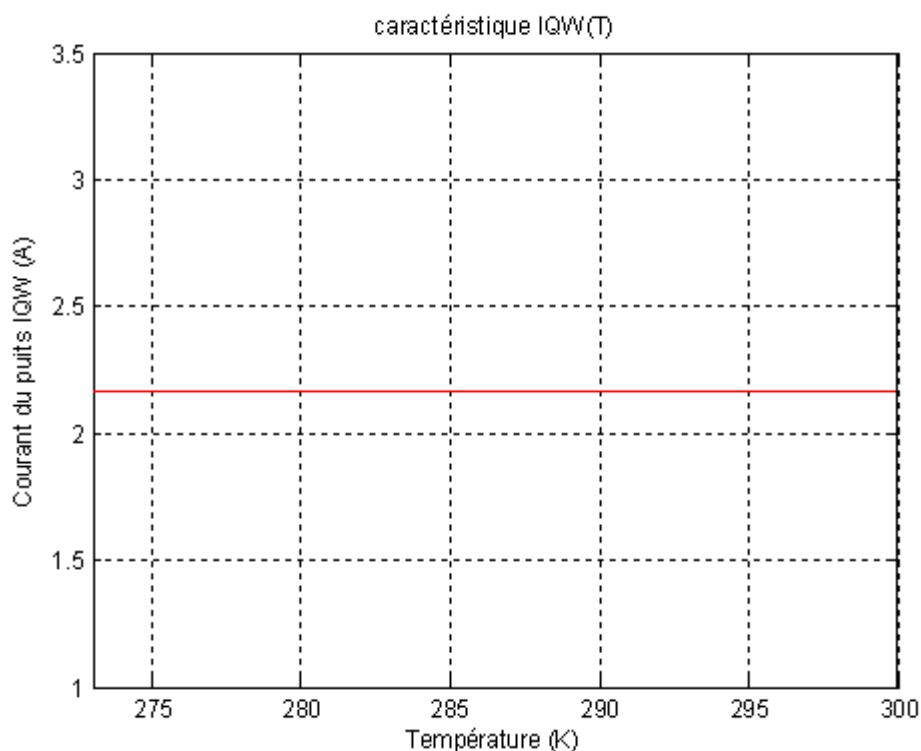


Figure (IV-8) : Influence de la température sur le courant du puits quantique  $I_{QW}$

Les Figures (IV-9-10-11-12) représentent la réaction de la cellule à la variation de la température, On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

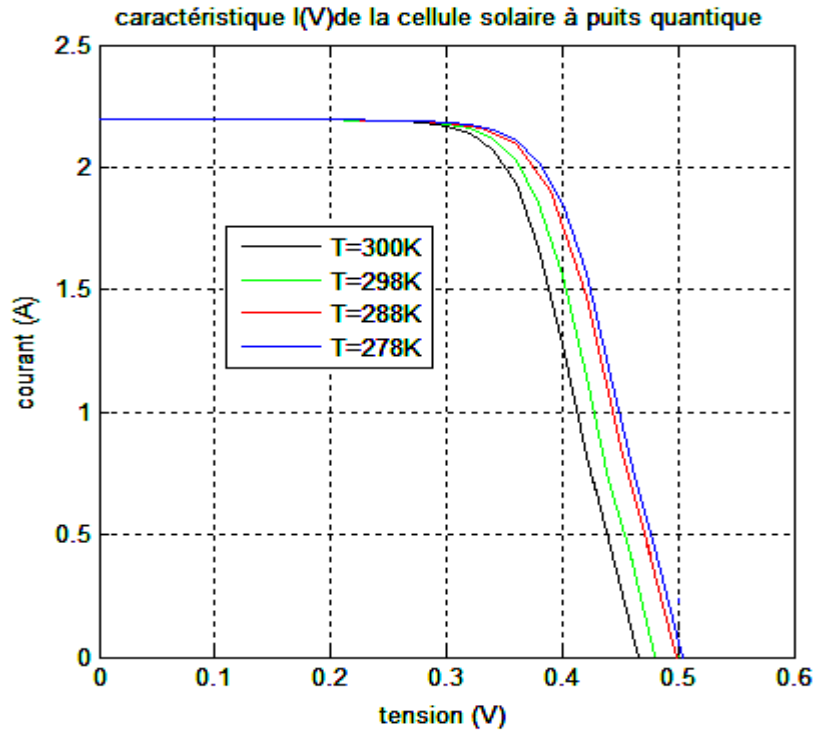


Figure (IV-9) : Influence de la température sur la caractéristique I(V)

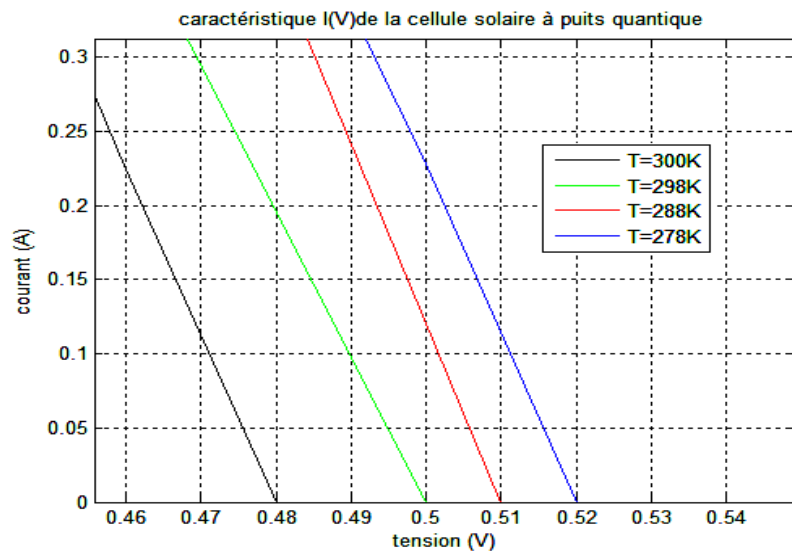


Figure (IV-10) : Influence de la température sur la tension (courbe zoomé)



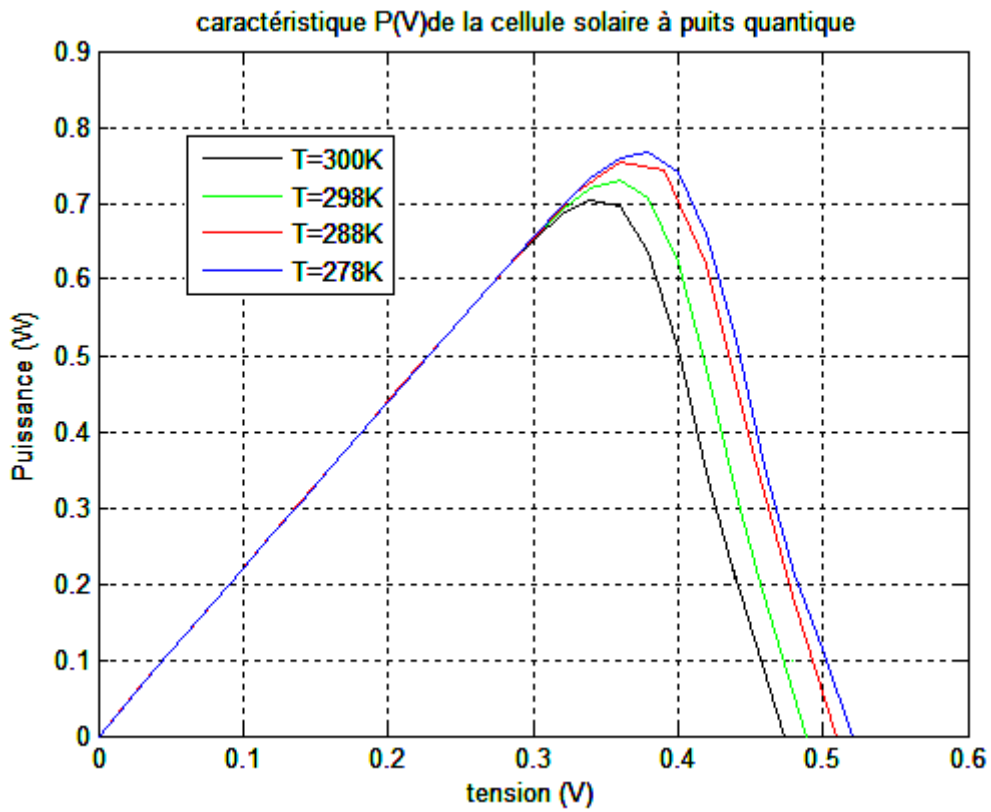


Figure (IV-11) : Influence de la température sur la caractéristique P(V)

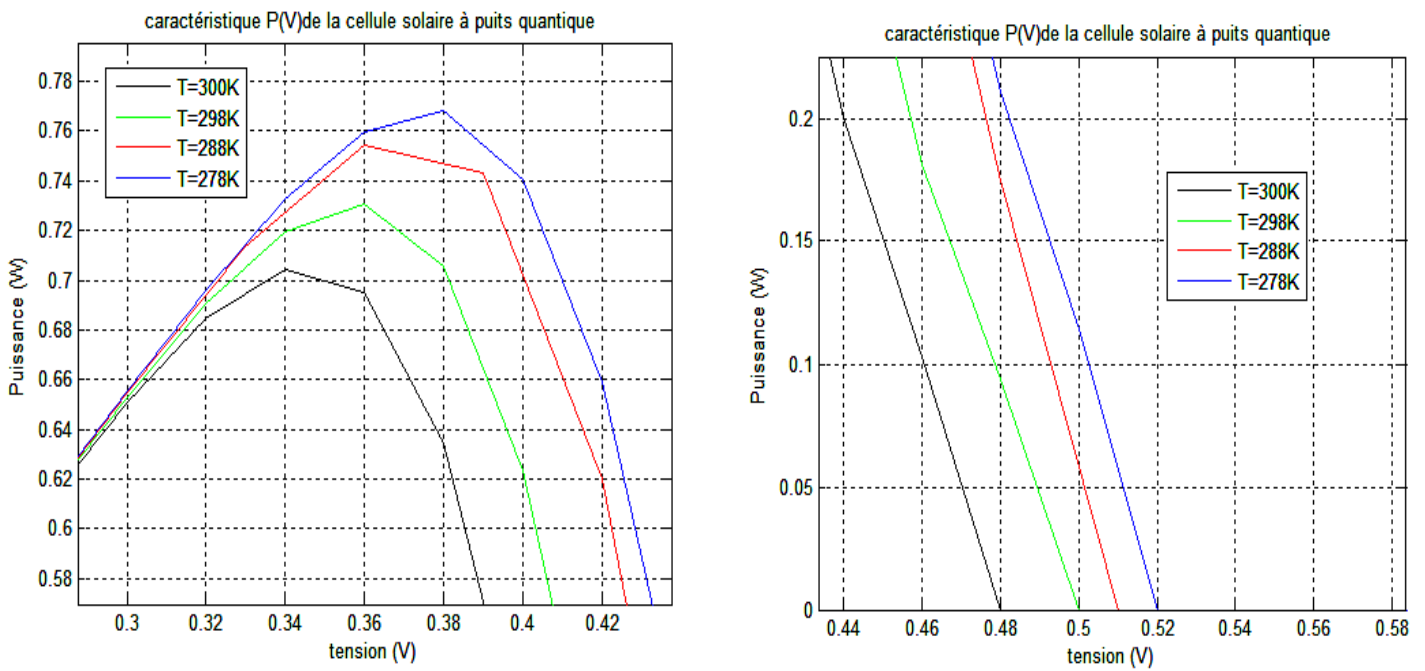
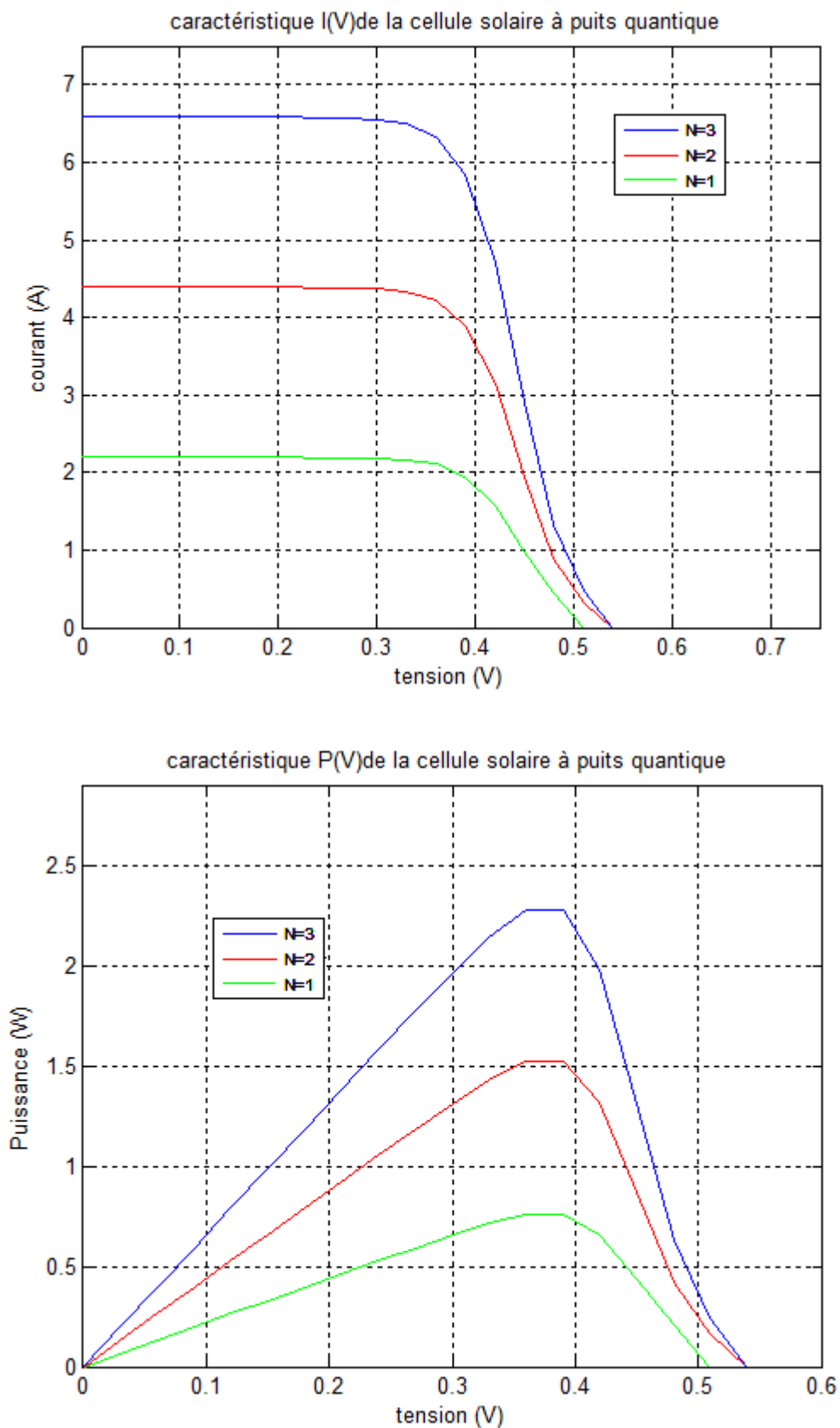


Figure (IV-12) : Influence de la température sur la puissance et la tension (courbe zoomé).

## II-2 L'influence du nombre de puits quantique :

Le nombre de puits quantique a une influence importante sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  surtout sur le courant  $I_{ph}$  qui est égale presque  $I_{QW}$  c'est-à-dire  $I_{ph} \approx I_{QW}$  telle que  $I_{QW}$  est le courant d'un seul puits quantique, donc si on a un nombre  $n$  de puits quantique le courant de photon va être égal  $I_{ph} \approx nI_{QW}$ .

La Figure (IV-13) représente l'influence du nombre de puits quantique  $N$  sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ , nous observons que l'augmentation du nombre de puits quantique crier une augmentation importante de courant de court circuit.



**Figure (IV-13) :** Influence du nombre de puits sur les caractéristiques I(V) et P(V)

### II-3 L'influence du dopage :

Le dopage a une influence direct sur le courant totale surtout sur le courant de saturation  $I_s$ , par conséquent une influence direct sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ .

En ce qui concerne le courant de puits quantique  $I_{QW}$ , l'influence du dopage sur ce dernier est remarquable au niveau de  $E_f$ .

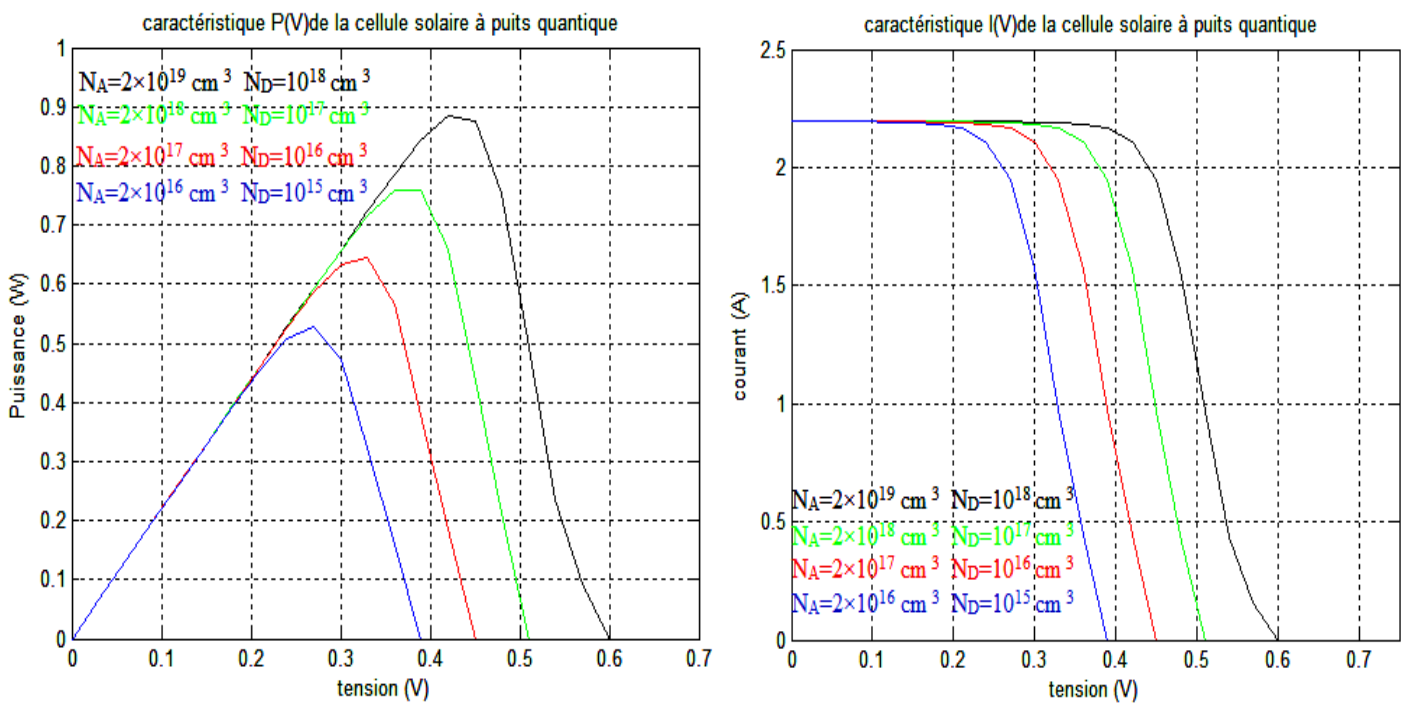


Figure (IV-14) : Influence du dopage sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$

La Figure (IV-14) représente la réaction de la cellule à la variation du dopage, nous observons une augmentation de la tension de circuit ouvert avec l'augmentation du dopage ce qui implique une augmentation de la puissance maximale.

## II-4 Influence des énergie E1, E2 :

La figure (IV-15) représente la réaction de la cellule à la variation de l'énergie de confinement, nous Observons que l'énergie de confinement agit sur le courant de court circuit de la caractéristique de telle sorte que si l'énergie de confinement diminue le courant  $I_{cc}$  sera augmenté et si l'énergie augmente le  $I_{cc}$  sera diminué.

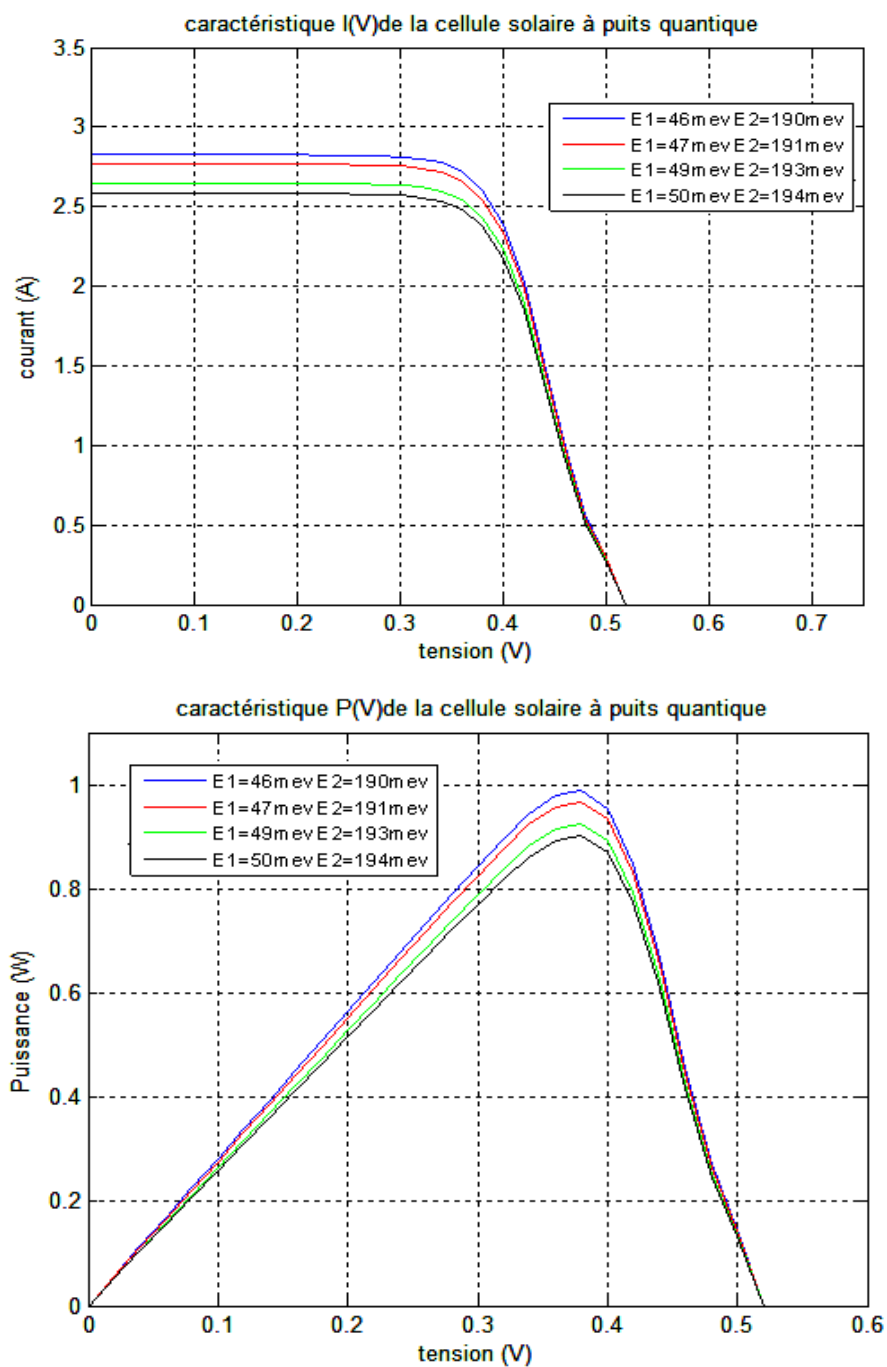
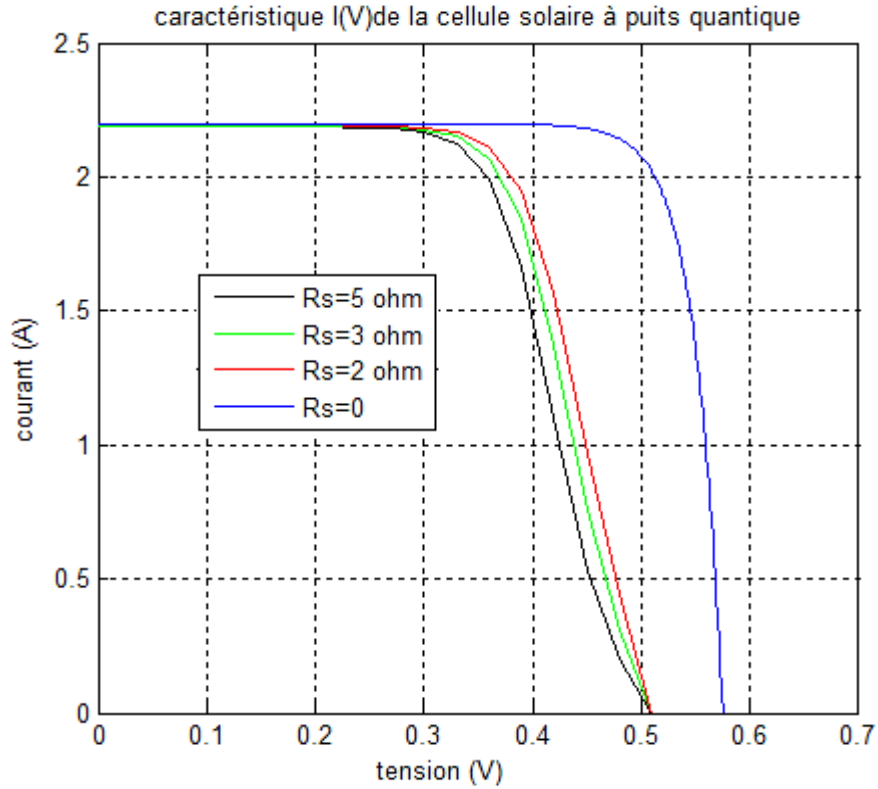


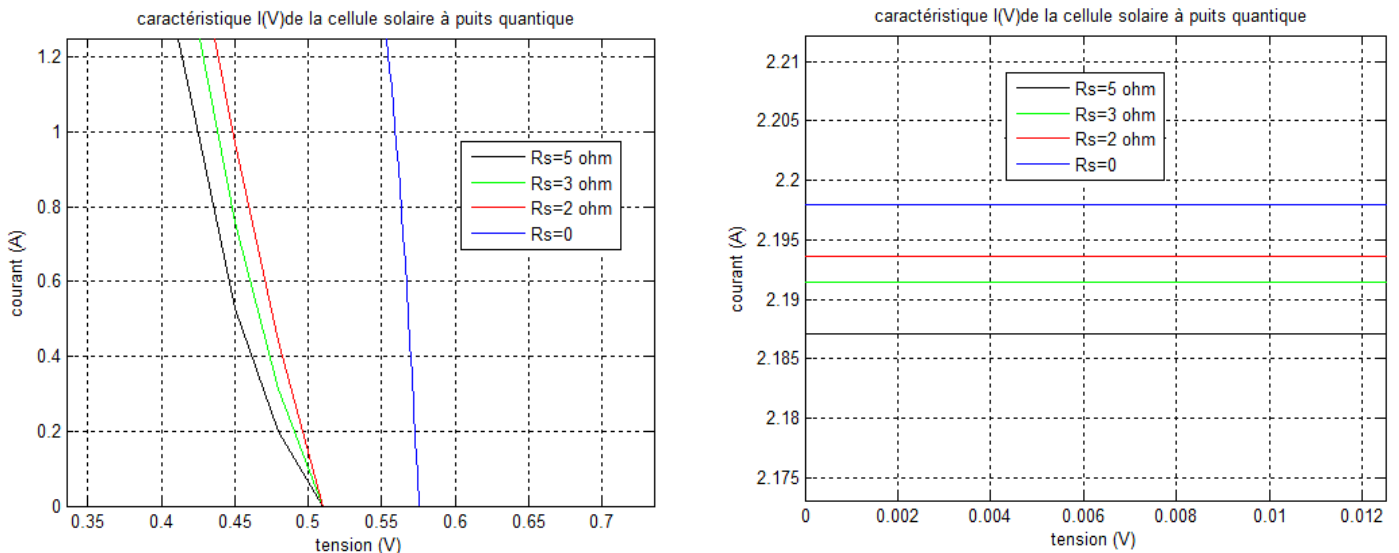
Figure (IV-15) : Influence de l'énergie de confinement sur les caractéristiques I(V) et P(V)

## II-5 Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit. Figures (IV-16-17-18-19).



**Figure (IV-16) :** Influence de la résistance  $R_s$  sur la caractéristique I(V)



**Figure (IV-17) :** Influence de la résistance  $R_s$  sur le courant et la tension (courbe zoomé).

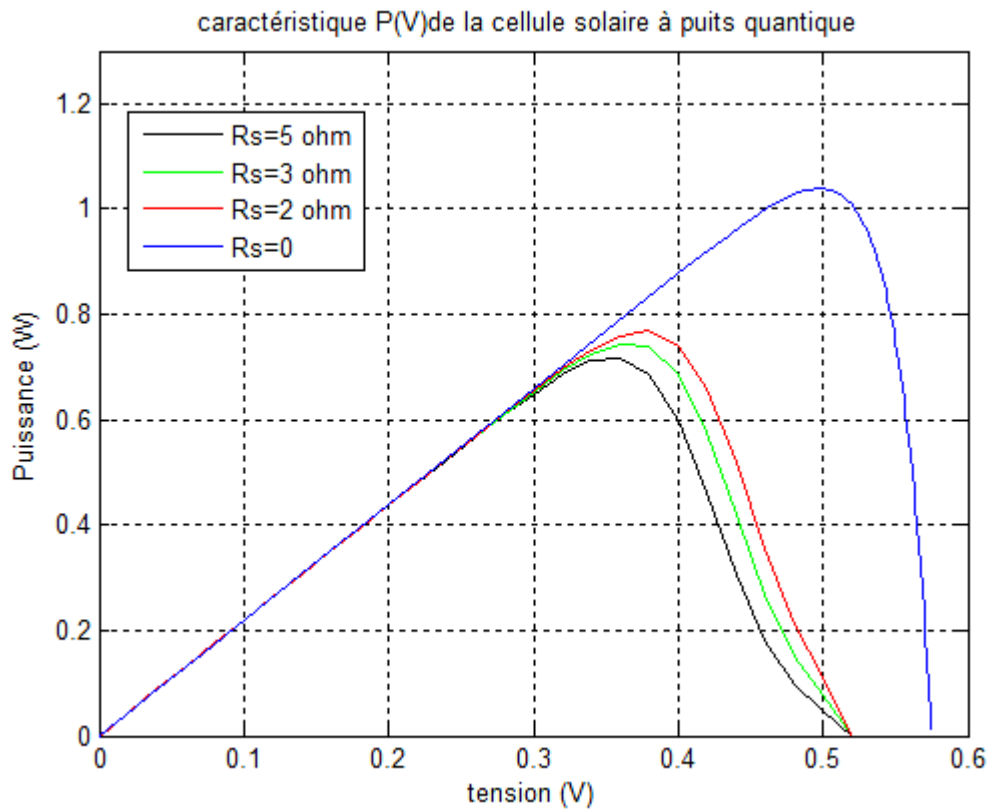


Figure (IV-18) : Influence de la résistance  $R_s$  sur la caractéristique P(V).

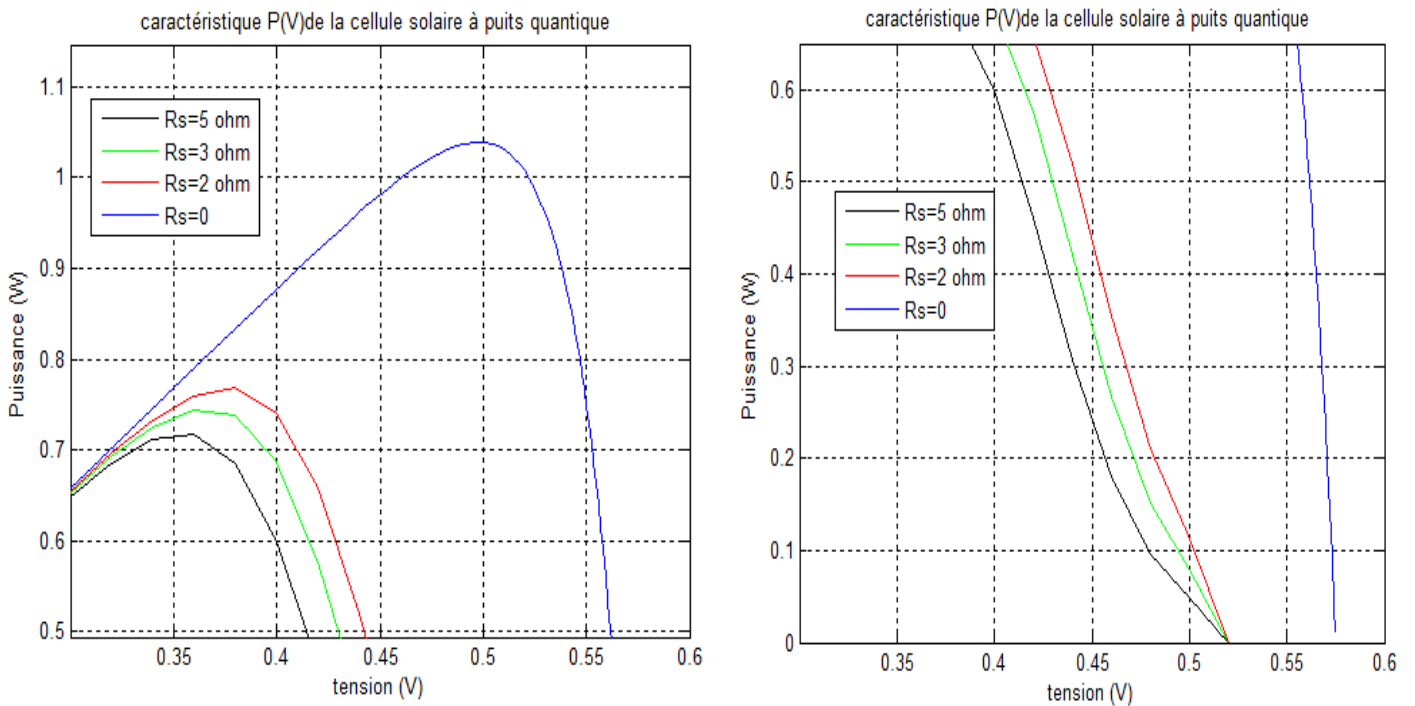


Figure (IV-19) : Influence de la résistance  $R_s$  sur la puissance et la tension (courbe zoomé).

## **II-6 Influence de la résistance de shunte (parallèle) :**

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. (Micro court circuit).

En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

Les figures (**IV-20-21-22-23**) montrent l'influence de  $R_{sh}$  sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ , on remarque que l'augmentation de la résistance parallèle va provoquer l'augmentation du courant de court circuit, par conséquent une augmentation de la puissance maximale.



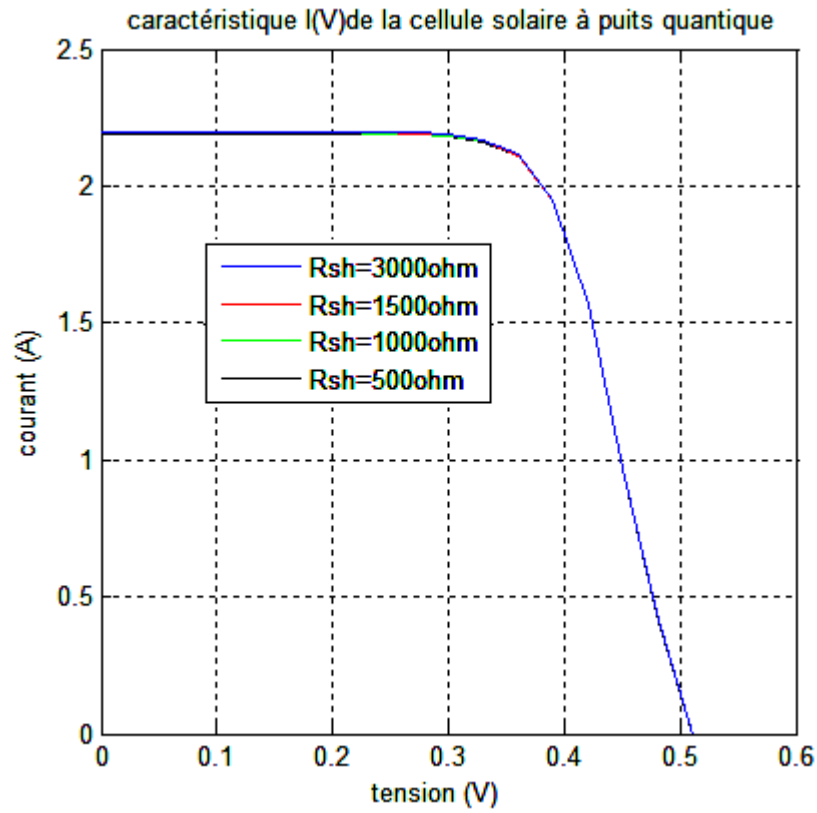


Figure (IV-20) : Influence de la résistance  $R_{sh}$  sur la caractéristique I(V).

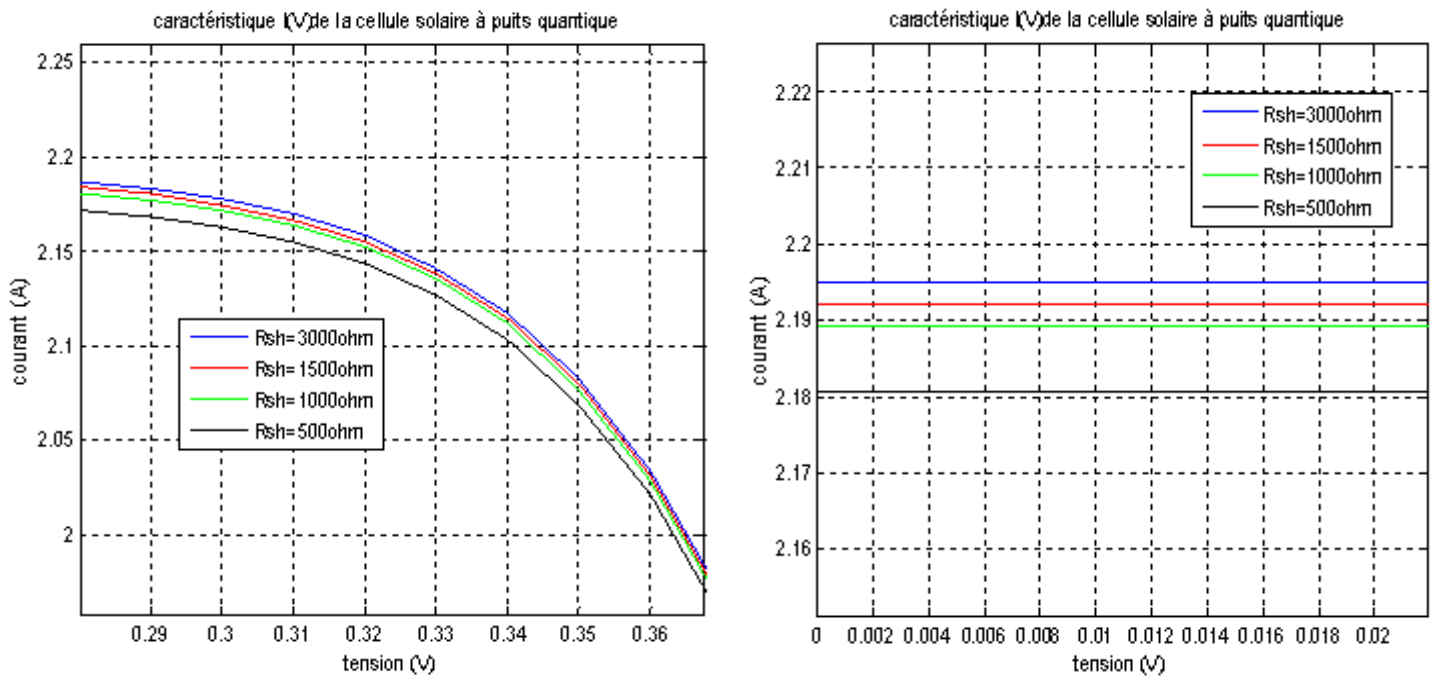


Figure (IV-21) : Influence de la résistance  $R_{sh}$  la tension (courbe zoomé).

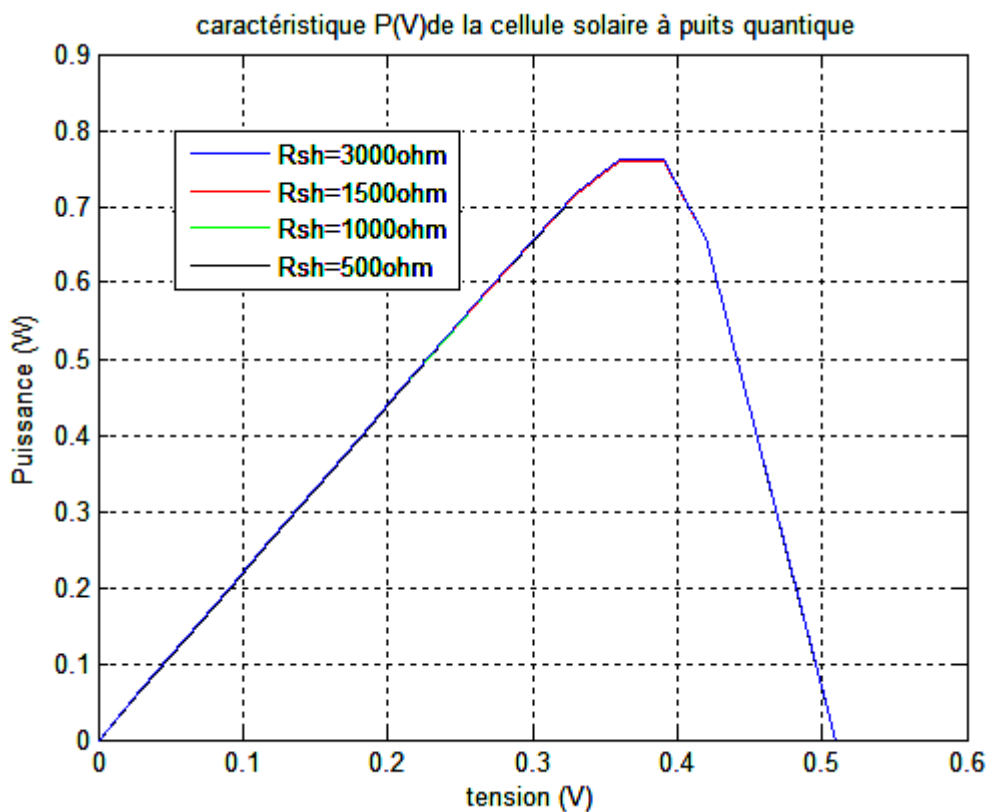


Figure (IV-22) : Influence de la résistance  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $P(V)$ .

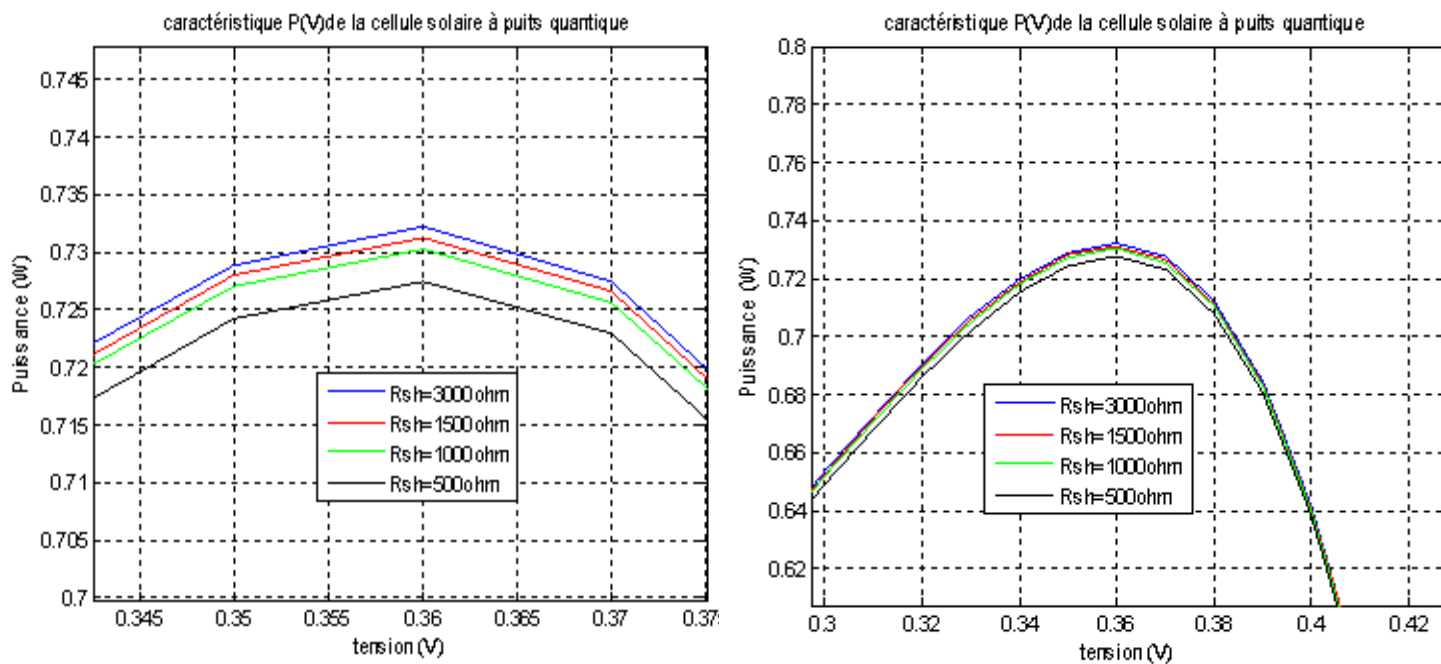


Figure (IV-23) : Influence de la résistance  $R_{sh}$  sur la puissance (courbe zoomé).

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation et à l'analyse des résultats du modèle que nous avons adopté. Nous avons tracé la caractéristique  $I(V)$  et la caractéristique  $P(V)$  à travers un programme et par l'utilisation de la méthode de calcul numérique de Newton Raphson.

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

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

En somme, et en guise de conclusion, nous pouvons dire que durant ces dernières années de nombreuses études ont été conduites afin de réaliser des cellules solaires à haut rendement. En effet, si la technologie des cellules au silicium est bien maîtrisée les cellules solaire à puits quantique à l'arséniure de gallium offrent un rendement théorique plus élevé, dû au fait que GaAs a presque la valeur optimum de largeur de bande interdite ,elles offrent également de meilleures performances de fonctionnement à haute température et une plus grande résistance aux rayonnements (électrons et rayons  $\gamma$ ) : le coefficient d'absorption optique du GaAs étant beaucoup plus élevé que celui du Si, les cellules solaires à puits quantique au GaAs fonctionneront efficacement pendant des laps de temps beaucoup plus courts que les cellules au Si .

Notre travail a concerné de la modélisation d'une cellule solaire à puits quantique à base de l'arsenic de galium GaAs à traves de la fenêtre AlGaAs. Le but était de bénéficier des qualités électroniques et physiques de ces deux matériaux, un courant de court circuit, une tension de circuit ouvert et une bonne absorption des rayons proches de l'infra rouge.

Dans cette optique nous avons étudié les cellules solaires à puits quantique et nous avons commencé par les propriétés physiques et électroniques des matériaux utilisés (GaAs /AlGaAs). Ensuite nous avons montré le principe de fonctionnement des cellules à hétérojonction à travers le modèle d'ANDERSON, après, nous avons présentés l'hétérostructure à base des matériaux GaAs /AlGaAs avant et après le contact, surtout la discontinuité de la bande de conduction (le puits quantique).

A travers les résultats de notre modèle ainsi que les paramètres de sortie de la cellule étudiée nous avons pu constater et remarquer l'importance de notre modèle .parmi les résultats satisfaisants, nous pouvons citer le courant de court circuit  $I_{cc}$  qui est d'une grande importance et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et par conséquent la puissance maximale  $P_m$ .

De ce qui précède, on peut dire que l'importance de ce modèle réside dans le courant du puits quantique calculé et qui démontre la valeur de ce modèle sans pour autant dévaloriser les autres paramètres qui constituent le courant total.

Nous avons aussi constaté à travers ce travail que plus la densité des électrons dans le puits est importante plus le courant  $I_{cc}$  est considérable. Cette dernière est déterminée par plusieurs paramètres parmi lesquels les valeurs de niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$  indirectement la largeur du puits.

Ajoutons que nous avons constaté qu'à partir des résultats obtenus, l'influence des paramètres physiques et géométrique (dopage et température). En ce qui concerne la température, nous avons remarqué que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Pour le dopage, nous remarquons son influence sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ , l'augmentation du dopage fait monter la tension  $V_{co}$ .

Notre modèle n'a pas ignoré l'influence du nombre de puits quantique de manière à ce que l'augmentation du nombre de puits agisse d'une façon considérable sur le courant  $I_{cc}$  qui arrive parfois à une double valeur, ce qui nous mène à dire que cet élément est très important.

Nous ajoutons à ces éléments influençant, la résistance série  $R_s$  et la résistance shunte  $R_{sh}$ , son influence comme nous le savons porte sur  $I_{cc}$  qui diminue en fonction de l'augmentation de  $R_s$ . Contrairement la  $R_{sh}$  augmente le courant  $I_{cc}$ .

En somme, on peut dire que ce modèle nous permet beaucoup de choses et choix pour améliorer les paramètres de la cellule solaire ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_m$  et  $FF$ ), ce qui n'est pas le cas pour les cellules classiques.

Et pour terminer, les cellules solaires sont un champ très vaste et ont des horizons promettant dans le domaine de photovoltaïque.

# *Annex*

## Liste des figures

Figures.....	pages
<b>Figure (IV-1) :</b> Caractéristique I(V) de la cellule avec $R_s=0$ $R_{sh}=\infty$ .....	2
<b>Figure (I-2) :</b> Le mouvement de la terre autour de soleil.....	3
<b>Figure (I-3) :</b> Les coordonnées horaires et horizontales.....	4
<b>Figure (I-4) :</b> Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse.....	6
<b>Figure (I-5) :</b> Différents composants d'un rayonnement.....	7
<b>Figure (I-6) :</b> Répartition spectrale de rayonnement solaire.....	9
<b>Figure (I-7)</b> Transitions électroniques entre les extrema des bandes de valence et de conduction.....	13
a) Semi-conducteur à gap direct, les transitions sont verticales et par suite radiatives.....	13
b) Semi-conducteur gap indirect, les transitions sont obliques et non radiatives au premier ordre....	13
c) Absorption directe de photons dans un semi-conducteur à gap indirect.....	13
<b>Figure I-8 :</b> (a) Génération de paires électrons-trous.....	14
(b) Absorption optique dans un semi-conducteur.....	14
<b>Figure (I-9) :</b> Cellules photovoltaïques.....	16
<b>Figure (I-10) :</b> Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	16
<b>Figure (I-11):</b> Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	17
<b>Figure (II-1) :</b> structure cristalline du GaAs (structure zinc blende).....	20
<b>Figure (II-2):</b> structure de bande du GaAs.....	21
<b>Figure (II-3) :</b> deux matériaux infiniment rapproché électriquement neutre.....	24
<b>Figure (II-4) :</b> Diagramme énergie- bande d'une hétérojonction à l'équilibre.....	25
<b>Figure (II-5) :</b> hétérojonction graduelle.....	26



<b>Figure (II-6) : hétérojonction abrupte.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure (II-7) : Divers types d'hétérojonctions définis par la position relative des Bandes des semi-conducteurs A et B ; le type I est le plus utilisé.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure (II-8) : Diagramme de bandes d'énergie de deux matériaux de gap différents (AlGaAs et GaAs).....</b>	<b>29</b>
<b>Figure (II-9) : Diagramme de bandes d'une hétérojonction.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure (II-10) : densité d'état d'un système quasi bidimensionnel.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure III-1 : Structure d'une cellule solaire à puits quantique.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure III-2 : dynamique des porteurs dans le puits quantique.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure III-3 : génération au niveau du puits quantique.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure III-4 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III-5 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III-6 : Schéma de la cellule à étudier.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III-7 : diagramme énergétique de la structure.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure III-8 : Densité d'état électronique dans le puits quantique.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure (IV-1) : Caractéristique I(V) de la cellule avec <math>R_s=0</math> <math>R_{sh}=\infty</math>.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure (IV-2) : Caractéristique P(V) de la cellule avec <math>R_s=0</math> <math>R_{sh}=\infty</math>.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure (IV-3) : Illustration de la méthode de Newton-Raphson.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure (IV-4) : Caractéristique I(V) de la cellule avec <math>R_s= 3\Omega</math>; <math>R_{sh} \Omega=1000 \Omega</math>.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure (IV-5) : Caractéristique P(V) de la cellule avec <math>R_s= 3\Omega</math>; <math>R_{sh} \Omega=1000 \Omega</math>.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure (IV-6) : caractéristique I(V) des deux cellules (avec <math>R_s=0</math>, <math>R_{sh}=\infty</math> et <math>R_s=3 \Omega</math>, <math>R_{sh}=1000 \Omega</math>).....</b>	<b>67</b>

<b>Figure (IV-7) : caractéristique P(V) des deux cellules</b>	
(avec $R_s=0$ , $R_{sh}=\infty$ et $R_s=3 \Omega$ , $R_{sh}=1000 \Omega$ ).....	67
<b>Figure (IV-8) : Influence de la température sur le courant du puits quantique <math>I_{QW}</math></b> .....	68
<b>Figure (IV-9) : Influence de la température sur la caractéristique I(V)</b> .....	69
<b>Figure (IV-10) : Influence de la température sur la tension (courbe zoomé)</b> .....	69
<b>Figure (IV-11) : Influence de la température sur la caractéristique P(V)</b> .....	70
<b>Figure (IV-12) : Influence de la température sur la puissance et la tension</b>	
(courbe zoomé).....	70
<b>Figure (IV-13) : Influence du nombre de puits sur les caractéristiques I(V) et P(V)</b> .....	72
<b>Figure (IV-14) : Influence du dopage sur les caractéristiques I(V) et P(V)</b> .....	73
<b>Figure (IV-15) : Influence de l'énergie E1 et E2 sur les caractéristiques</b>	
I(V) et P(V).....	74
<b>Figure (IV-16) : Influence de la résistance <math>R_s</math> sur la caractéristique I(V)</b> .....	75
<b>Figure (IV-17) : Influence de la résistance <math>R_s</math> sur le courant et la tension (courbe zoomé)</b> ..	75
<b>Figure (IV-18) : Influence de la résistance <math>R_s</math> sur la caractéristique P(V)</b> .....	76
<b>Figure (IV-19) : Influence de la résistance <math>R_s</math> sur la puissance et la tension (courbe zoomé)</b>	76
<b>Figure (IV-20) : Influence de la résistance <math>R_{sh}</math> sur la caractéristique I(V)</b> .....	78
<b>Figure (IV-21) : Influence de la résistance <math>R_{sh}</math> la tension (courbe zoomé)</b> .....	78
<b>Figure (IV-22) : Influence de la résistance <math>R_{sh}</math> sur la caractéristique P(V)</b> .....	79
<b>Figure (IV-23) : Influence de la résistance <math>R_{sh}</math> sur la puissance (courbe zoomé)</b> .....	79

## Liste des tableaux

<b>Tableaux .....</b>	<b>pages</b>
Tableau (IV-1)- Les Caractéristique de la cellule solaire avec $R_s=0$ et $R_{sh}=\infty$ .....	60
Tableau (IV-2)- Les Caractéristique de la cellule solaire avec $R_s=3 \Omega$ et $R_{sh}=1000 \Omega$ .....	66

## Liste des symboles

Symbole Unité Définition

$h$  constante de Planck  $J.s$

$E$  quantité d'énergie  $eV$

$c$  vitesse de lumière  $m/s$

$Z$  altitude  $km$

$J$  jour numéro du jour de l'année

$m$  mass d'air

$\lambda$  longitude du lieu  $^\circ$

$\varphi$  latitude du lieu

$\delta$  déclinaison du soleil

$H$  angle horaire du soleil

$h$  hauteur du soleil

$\psi$  azimut du soleil

$\gamma$  la hauteur du capteur

$\alpha$  azimut du capteur

$\beta$  angle d'inclinaison

$t$  temps

$\lambda$  longueur d'onde

$E$  énergies de photon  $W/m^2$

$\Phi$  flux reçue par une surface  $W/sr$

$S$  surfaces  $m^2$

$L$  luminance

$E_0$  Intensité lumineuse incidente

$E$  Intensité lumineuse transmise

$\alpha$  coefficient d'absorption

$z$  profondeur

$R$  coefficient de réflexion

$F_i$  nombre de photons d'énergie  $E_{ph}$   $/cm^2/s$

$I$  rayonnement direct

$D$  rayonnement diffus

$G$  rayonnement global  $W/m^2$

$G$  facteur de génération

UL énergie de liaison  
 Alb albédo du sol  
 I<sub>ph</sub> photo- courant.  
 I<sub>d</sub> courant traversant la diode A  
 E<sub>g</sub> énergie de la bande interdite eV  
 k la constante de boltzman. J/k  
 I<sub>s</sub> courant de saturation. A  
 I courant de la cellule A  
 U<sub>T</sub> tension thermique. V  
 T température absolue. K  
 R<sub>s</sub> résistance série Ω  
 R<sub>sh</sub> résistance shunt Ω  
 ICC courant de court-circuit A  
 V<sub>co</sub> tension à circuit ouvert V  
 A facteur de qualité  
 I<sub>max</sub> Courant de la puissance maximale A  
 V<sub>max</sub> tension de la puissance maximale V  
 P<sub>max</sub> puissance maximale W  
 FF Facteur de forme %  
 P<sub>incident</sub> puissance du rayonnement solaire incident W  
 η Rendement d'une cellule solaire %  
 a constante de maille A°  
 x taux d'aluminium.  
 E<sub>G1</sub> largeur de la bande interdite du matériau 1.  
 E<sub>G2</sub> largeur de la bande interdite du matériau 2.  
 E<sub>c1</sub> bande de conduction du matériau 1.  
 E<sub>c2</sub> bande de conduction du matériau 2.  
 E<sub>v1</sub> bande de valence du matériau 1.  
 E<sub>v2</sub> bande de valence du matériau 2.  
 E<sub>F1</sub> niveau de Fermi du matériau 1.  
 E<sub>F2</sub> niveau de Fermi du matériau 2.  
 ΔE<sub>c</sub> différence des bandes de conduction E<sub>c1</sub> et E<sub>c2</sub>.

$\Delta E_v$  différence des bandes de valence  $E_{v1}$  et  $E_{v2}$ .  
 $\chi_1$  affinité électronique du matériau 1.  
 $\chi_2$  affinité électronique du matériau 2.  
 $\phi_1$  travail de sortie du matériau 1.  
 $\phi_2$  travail de sortie du matériau 2.  
 $I_{QW}$  courant du puits quantique  
 $e$  charge des électrons ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)  
 $n_s$  densité des électrons dans le puits quantique  
 $v$  vitesse des électrons m/s  
**QW** Quantum well ou bien le puits quantique.  
 $x_j$  épaisseur de la partie GM1  
 $x_{j+h}$  épaisseur de la partie QW  
 $H$  épaisseur total  
 $\tau_{p1}$  la durée de vie des trous dans la région dopé type n.  
 $\tau_{n2}$  la durée de vie des électrons dans la région dopé type p.  
 $n_{p0}$  la densité des électrons dans la région dopé type p à l'équilibre.  
 $p_{n0}$  la densité des trous dans la région dopé type n à l'équilibre.  
 $D_{p1}$  la constante de diffusion des trous dans le semi-conducteur 1.  
 $D_{n2}$  la constante de diffusion des électrons dans le semi-conducteur 2 (type p).  
 $L_n$  longueur de diffusion  
 $\mu_{p1}$  la mobilité des trous dans le semi-conducteur 1.  
 $\mu_{n2}$  la mobilité des électrons dans le semi-conducteur 2.  
 $\psi(z)$  la fonction d'onde  
 $V(z)$  l'énergie potentielle  
 $m_e$  masse des électrons  
 $E_j$  les niveaux d'énergie .eV  
 $ns$  densité d'état

## Liste des paramètres utilisés

$$N_A=2\times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ [32]}$$

$$E_{g1}=1.84 \text{ eV} \text{ [32]}$$

$$\mu_n=2500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1} \text{ [32]}$$

$$L_n=3\mu\text{m} \text{ [32]}$$

$$\tau_n=1.4 \text{ ns} \text{ [32]}$$

$$D_n=6.42\text{mm} \text{ [32]}$$

$$N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ [32]}$$

$$E_{g2}=1.42 \text{ eV} \text{ [32]}$$

$$\mu_p=150 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1} \text{ [32]}$$

$$L_p=2\mu\text{m} \text{ [32]}$$

$$\tau_p=10.3 \text{ ns} \text{ [32]}$$

$$D_p=0.38\text{mm} \text{ [32]}$$

$$n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ [32]}$$

$$S=100\text{cm}^2$$

$$V=1.5\times 10^7\text{m}^3 \text{ [32]}$$

$$U_T=0.026 \text{ à } t= 300\text{K} \text{ [30]}$$

$$e=1.610^{-19}\text{C} \text{ [30]}$$

$$h=6.62\times 10^{-34}\text{JS} \text{ [30]}$$

$$E_f=100 \text{ meV} \text{ [30]}$$

$$E_1=48\text{meV} \text{ [30]}$$

$$E_2=192\text{meV} \text{ [30]}$$

$$m_e=0.067m_0 \text{ [30]}$$

$$R_S=3\Omega$$

$$R_{sh}=1000\Omega$$

# ***Bibliographie***



## Références bibliographiques :

- [1] M .Bouafia. «Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS)». Mémoire de Master professionnel, Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2012.
- [2] S. Mouetsi, «contribution a l'etude du bruit basse frequence dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs/AlGaAs». Thèse de doctorat, Université Mentouri. Constantine, 2010.
- [3] M. Elmoufakkir, « Etude des propriétés optiques dans l'infrarouge lointain des hétéro structures à base de semi conducteurs Gaas/ Algaas modèle de la fonction diélectrique ».Mémoire de master, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah faculté des sciences Dhar El Mehraz Fès. Maroc, 2012.
- [4] A .Ricaud, « photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés ».Editeur : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [5] K .Mehdi, « contribution et réalisation d'un concentrateur sphérique ». Mémoire de magister, université de Constantine, 2008.
- [6] M .Slema Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de magister, université de Setif.
- [7] M.Orgeret, « les piles solaires le composant et ses applications ». Masson, 1985.
- [8] F. Zouach, «étude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque». Mémoire de magister, Université de Constantine, 2009.
- [9] A .Labouret- M. Viloz, « énergie solaire photovoltaïque (le manuel du professionnel) ». Dunod, 2003.
- [10] A.Lauger J-A.Roger, «les photopiles solaires». Editeur : technique et documentation, 1981.
- [11] F .Meziani, «détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG». Mémoire de magister, Université Mouloud Maammeri Tizi-Ouzou, 2011.
- [12] M .Hadj belkacemi, «Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé». Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid .Tlemcen, 2011.
- [13] C. Voyant, «Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels». Thèse de doctorat, Université de corse-pascal paoli. Corsica, 2011.
- [14] D. Baratoux, «Etude photométrique de la surface de Mars à partir de la caméra HRSC à bord de la sonde Mars Express». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier .France, 2008.

- [15] K. DIB, «Etude théorique des cellules solaires à base de Si et SiGe». Mémoire de Magister, Université de Jijel, 2013.
- [16] M .Bouafia. «Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS )». Mémoire de Master professionnel, Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2012.
- [17] [https://fr .wikipedia .org /wiki /cellule solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/cellule_solaire)
- [18] B. Euquer, « Energie solaire photovoltaïque », 1993
- [19] H. Ben Slimane et A. Helmaoui, « Etude analytique d'une cellule solaire à hétérojonction p<sup>+</sup> (GaAs)/n (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)/N (Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As), Revue des Energies Renouvelables 11, pp. 259-266, 2008.
- [20] R.Castagné, J.P.Duchemin, M.Gloanecet Ch.Rumelhard, «circuits intégrés en Arséniure de galilum ». Physique, et règles de conception, Masson, 1989.Pour Le Suivit In-Situ Des Contaminants“, Revue F.S.B 2, 2003, 92-98.
- [21] G.Bastart, « Wave Mechanics applied to semiconductors heterostructures ». Les éditions de physiques, 1988.
- [22] Henry Mathieu, « Physiques des semi-conducteurs et des composants électroniques ». Quatrième édition, Masson, 2001..
- [23] D.Bimberg, M.G.Rundmann, N.N.Ledentsov, «Quantums Dots Heterostructures ». Wiley, 2001.
- [24] R.L.Anderson, «Experiments on GaAs Heterojunctions », Solid-State Electron 5, pp. 341-351, 1962.
- [25] B.R. Nag L. R. Carley, G. Declerck, F. M. Klaassen, «Physics of Quantum Well Devices», Kluwer Academic Publishers, 2002..
- [26] P. Harrison, «Quantum Well,Wires and Dots», John Wiley & Sons, 2002.
- [27] B. Vinter, «Optoelectronique», Emannul Rosencher, Masson, 1998.
- [28] N. Bedda, «étude des propriétés des semi conducteurs Si, GaAs, AlGaAs ; simulation des cellules soalires à base de Si et GaAs». Mémoire de magister, Université Elhadj Lakhdar .Batna, 2011.
- [29] C.Y. Tsai, «Effects of Carrier Escape and Capture Processes on Quantum Well Solar Cells ». Department of Applied Physics National University of Kaohsiung, Taiwan.
- [30] H. Mathieu, T. Bretagnon, P. Lefebre, « Physique des semi conducteurs et des composants électroniques : problèmes résolus », Dunod, 2001.

- [31] H. Benis. «Contribution à la modélisation du Problème de (Hot Spot) dans les modules solaire Photovoltaïque occultées». Mémoire de magister, Université de Mentouri, Constantine, 2008.
- [32] J.E Bourée, F .Therez, « Cellule solaire au GaAlAs /GaAs à faible et forte niveau du courant ».Toulouse, 1979.

## Abstract

The greatest challenge of the researchers being interested in the renewable environment and energies is to carry out a good output /price on the solar generators in particular in die statement With regard to the third generation of solar cells, the quantum solar cells represent the response to many interrogations.

The work of our thesis related to modeling of a solar cell with heterojunction, with quantum well containing the arsenic of galium GaAs to notched joints of the AlGaAs window. The goal and to determine characteristic I (V) of the cell, the influence of the parameters physical and geometrical on the output of conversion especially the density of the electrons in the quantum well and to profit from electronics qualities and physics as of these two materials, a current of short circuit, a tension of open circuit and a close absorption will infra it red better.

**Key Mot: quantum well, heterojunction, solar cell with heterojunction, Ga.As, ALGaAs**

## Résumé

Le plus grand défi des chercheurs s'intéressant à l'environnement et aux énergies renouvelable est de réaliser un bon rendement, prix sur les générateurs solaires en particulier dans la filière PV. En ce qui concerne la troisième génération de cellules solaires, les cellules solaires quantiques représentent la réponse à de nombreuses interrogations.

Le travail de notre thèse a concerné de la modélisation d'une cellule solaire à hétérojonction, à puits quantique à base de l'arsenic de galium GaAs à traves de la fenêtre AlGaAs. Le but et de déterminer la caractéristique I(V) de la cellule, l'influence des paramètres physique et géométrique sur le rendement de conversion surtout la densité des électrons dans le puits quantique et de bénéficier des qualités électronique et physique des ces deux matériaux, un courant de court circuit, une tension de circuit ouvert et une absorption proche l'infra rouge meilleure.

**Mots clés : puits quantique, hétérojonction, cellules solaires quantiques, Ga.As, ALGaAs**

## ملخص

إن أكبر تحدي للباحثين موجه للبيئة و الطاقات المتجددة و المردود الجيد و كلفة المولدات الشمسية و بالخصوص الصفائح الشمسية. و فيما يخص الجيل الثالث للخلايا الشمسية المتمثلة في الخلايا الشمسية الكوانتية، هذه الأخيرة تمثل متطلب و إجابة عن كثير الاستفهام.

عمل هذه المذكرة منسب حول نموذج خلية شمسية ذات طبقات متعددة و مختلفة تحتوي على حفر كوانتية على أساس Ga.As من خلال نافذة ALGaAs

الهدف من هذا العمل هو إيجاد الخاصية لهذه الخلية و كذا تأثير بعض العناصر الفيزيائية و الجيومترية على مردود التحويل خاصة كثافة الإلكترونات في الحفر الكوانتية و الاستفادة من النوعية الكهربائية و الفيزيائية لهذه المواد القصيرة توتر الدارة المفتوحة و امتصاص قريب من الأشعة تيار الدارة تحت حمراء جيدة

**الكلمات المساعدة(المفاتيح)**

**Ga.As ALGaAs الحفر الكوانتية خلية شمسية ذات طبقات متعددة و مختلفة الخلايا الشمسية الكوانتية**