



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES ENERGIES  
RENOUVELABLES



# Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

## MASTER

ENERGIES RENOUVLABLES

OPTION : CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Thème :

### **Etude et simulation d'une cellule solaire à base de GaAs**

Par :

**Mr ALLAQUI Mohammed**

Soutenu le 21/06/2016 devant le jury compose de :

Dr A.BEDIA	USDB1	présidente
Dr H.MAZOUZ	USDB1	Examinatrice
Dr H.KAHLANE	USDB1	Examineur
Pr NACER Said	USDB1	promoteur

2015/2016

## Remerciements

---

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

Je remercie cordialement Mr NACER Said, professeur à l'université de Blida, d'avoir accepté de présider et juger ce mémoire.

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

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de la présente thèse.

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

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles et qui ont prié Dieu pour moi.

Ma chère femme et mes enfants Iyad et Hiba.

Mes frères Billal, Hamza et mes sœurs.

A tous mes amis de travail en particulier : Bestam, Larfi, Bourouina, Zaki et Boutikane.

## ملخص :

الخلية الضوئية تحول مباشرة الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. اعتمادا على الاحتياجات، والكهرباء يمكن استخدامها لتشغيل مواقع معزولة أو بيعها كلياً أو جزئياً إلى شبكة التوزيع. هذا العمل هو دراسة ومحاكاة خلية شمسية مصنوعة من مواد زرنيخ الغاليوم و الارسنيور بعد أن ذكر خصائص الخلايا الشمسية، وتأثير المعاملات المختلفة على خصائص الخلية المدروسة. ونتائج المحاكاة تظهر أن هذه المعاملات تؤثر بشكل كبير على أداء الخلية .

**كلمات البحث:** الخلية الضوئية، المحاكاة، زرنيخ الغاليوم الارسنيور، والأداء

---

## Résumé :

La cellule solaire convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue en tout ou partie au réseau de Distribution. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire à base du matériau GaAs. Après avoir rappelé les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule a été déterminée. Les résultats de simulation montrent que ces paramètres influent considérablement sur le rendement de la cellule.

**Mots clés :** photovoltaïque, simulation, GaAs, rendement.

---

## Abstract:

Solar cells convert light energy directly into electrical energy by solar cells. Depending on requirements, the electricity generated can be used to supply site isolation or sold in whole or in part to the distribution network. This work aim to study and simulate solar cell based on GaAs material .After having recalled the characteristics of a solar cell, the influence of different parameters on the characteristics of the studied cell. The simulation results show that these parameters affect significantly the performance of the cell.

**Keywords:** solar cell; photovoltaic; simulation; GaAs, efficiency.

## Introduction générale

---

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[1].

Les conséquences de l'utilisation des énergies fossiles, imposent la recherche d'autres sources d'approvisionnement. Parmi les choix qui satisferont le coût, la durabilité et qui respectent l'environnement, les énergies renouvelables apparaissent comme un bon compromis. Ce sont des énergies inépuisables fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la chaleur de la terre...etc. Leur exploitation n'engendre pas d'émissions polluantes. Parmi ces énergies de l'avenir, l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de convertir directement le rayonnement du soleil en électricité occupe une grande place dans la recherche, et connaît une croissance de plus en plus importante depuis 1990. Cette recherche est orientée sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmentation du rendement de la cellule, et la diminution du coût de production [2].

Ce développement passe essentiellement par la maîtrise des matériaux utilisés dans la conception des composants. La plupart de ces matériaux sont obtenus par alliage

Vu le gisement solaire important dont dispose l'Algérie, le programme national des énergies renouvelables se concentre essentiellement sur le développement de l'énergie photovoltaïque. Le tableau 1 montre le potentiel solaire en Algérie.

Région	Région côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau 1** Le potentiel solaire en Algérie

L'objectif de la stratégie du développement de l'énergie photovoltaïque en Algérie est d'atteindre 40 % de la production nationale d'électricité d'ici 2030.

L'amélioration du rendement de conversion nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication en faisant un bon choix pour la structure de la cellule.

## Introduction générale

---

L'objectif principal de ce mémoire est de simuler et d'optimiser le rendement, et la puissance délivrée d'une cellule solaire à base de GaAs, en modulant les différents paramètres tels que les épaisseurs, les dopages

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques du soleil tels que le spectre solaire, le corps noir, le flux incident ainsi que l'architecture de la cellule solaire l'étude du matériau GaAs et ses caractéristiques structurelles, électriques et optiques.

Le deuxième chapitre présente la physique de la cellule solaire ainsi que les équations nécessaires aux simulations.

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

## 1.1 Introduction

La consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter à cause du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication. Plus de 85% de la consommation mondiale repose sur les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, uranium). Cependant, ces ressources sont limitées et pourront difficilement satisfaire les besoins mondiaux. A cet effet, les Etats cherchent des nouvelles voies de production et de consommation d'énergie afin de réduire leur dépendance vis-à-vis de ce combustible. À cette situation vient s'ajouter l'échauffement climatique de notre planète dû aux émissions de gaz à effet de serre induites par l'utilisation massive des énergies fossiles [1].

Parmi les choix qui satisfont la durabilité et qui respectent l'environnement, les énergies renouvelables apparaissent comme un bon compromis. Ce sont des énergies inépuisables fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la chaleur de la terre...etc.

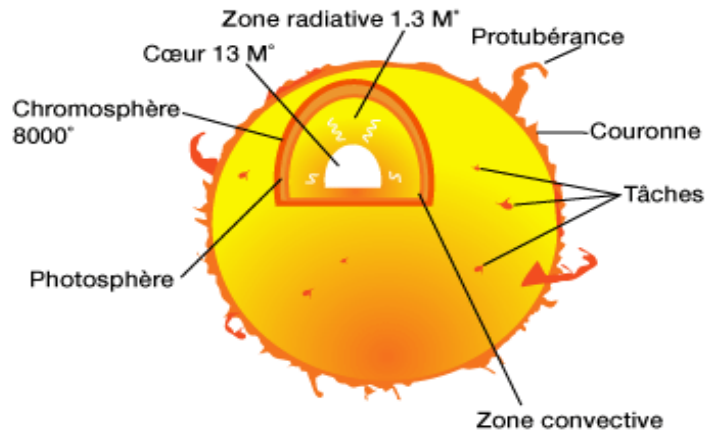
Leur exploitation n'engendre pas d'émissions polluantes. Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de convertir directement le rayonnement du soleil en électricité occupe une grande place dans la recherche, et connaît une croissance de plus en plus importante depuis 1990.

Cette recherche est orientée sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmentation du rendement de la cellule, et la diminution du coût de production [2].

## 1.2 Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000km. Il est situé à une distance moyenne de 1,49675 10<sup>8</sup>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<sup>7</sup>K.

On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [3] figure1.1.



**Figure1.1** Schéma du soleil

### **Le noyau :**

C'est le cœur du soleil, sa température est très élevée ( $15 \times 10^6$  K) ainsi que sa pression ( $2 \times 10^{11}$  bars) et sa densité ( $\sim 10^5$  Kg m<sup>-3</sup>), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

### **La photosphère :**

Est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.

### **La chromosphère :**

Est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.

### **La couronne :**

Est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2% restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

## 1.2.1 Caractéristiques générales du soleil

### 1.2.1.1 les effets atmosphériques

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 [4] figure 1.2

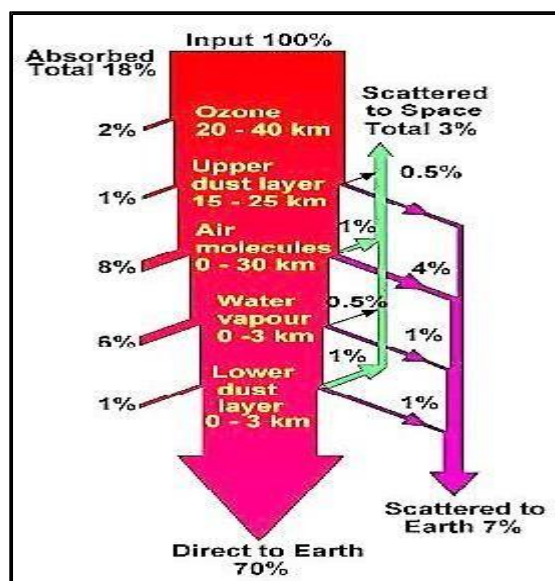


Figure 1.2 Effet atmosphère sur les rayons solaires

### 1.2.1.2 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 [5].

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.

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.1)$$

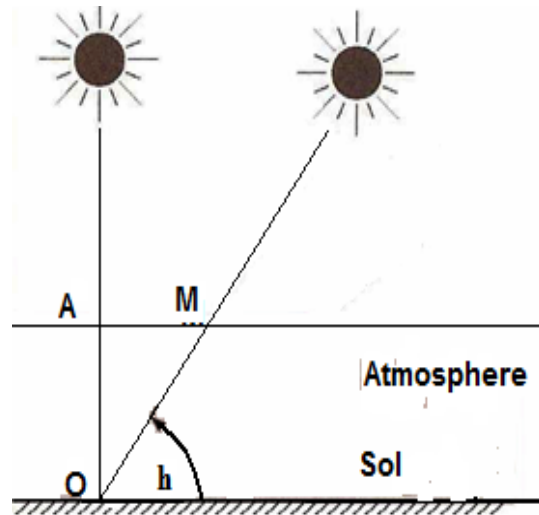
Où :

$h$  : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (deg).



## Chapitre I : Généralité sur le photovoltaïque

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension  $AM_x$  comme montré dans la figure 1.3.



**Figure 1.3** Définition d'air masse  $AM_x$

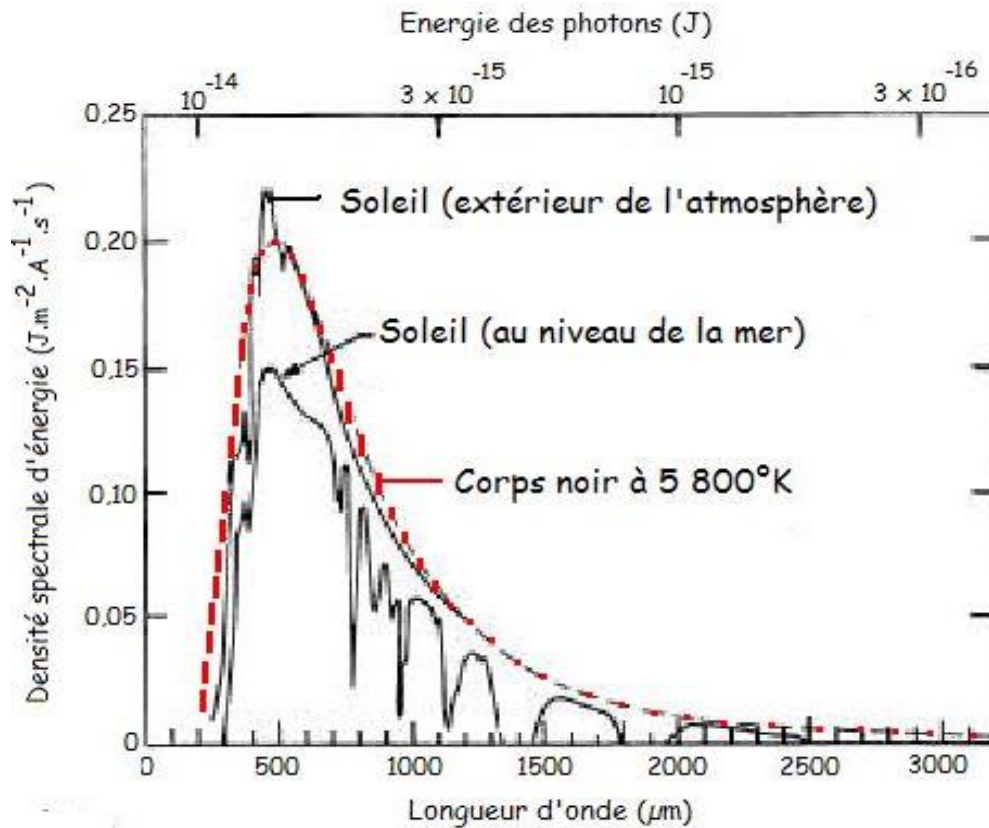
$$OM = \frac{OA}{\sin h} \text{ et } AM = \frac{OM}{OA} \Rightarrow AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.2)$$

Le spectre solaire  $AM_0$  correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale,  $AM_1$  pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et  $AM_{1.5}$  pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  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].

Hors atmosphère le rayonnement émis par le soleil ( $AM_0$ ) est constitué de :

- 9% d'UV ( $0.1 < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$ )
- 43% de visible ( $0.4 < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ )
- 48% d'infrarouge ( $0.75 < \lambda < 5 \mu\text{m}$ )

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiation en fonction de la longueur d'onde (figure 1.4)



**Figure 1.4** Spectre extraterrestre (AM0), terrestre (AM1) et (AM1.5)

Pour simplifier on utilise les notations suivantes :

- AM0: hors atmosphère (applications spatial).  $P=1353 \text{ W. m}^{-2}$ .
- AM1: le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM1.5 : spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P=1000 \text{ W. m}^{-2}$ .

### 1.2.1.3 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est la description de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques classés par fréquence, longueur d'onde ou énergie. Le spectre électromagnétique s'étend théoriquement de zéro à l'infini en fréquence (ou en longueur d'onde), de façon continue. Ce qui indique que la lumière est faite d'ondes (figure 1.5)

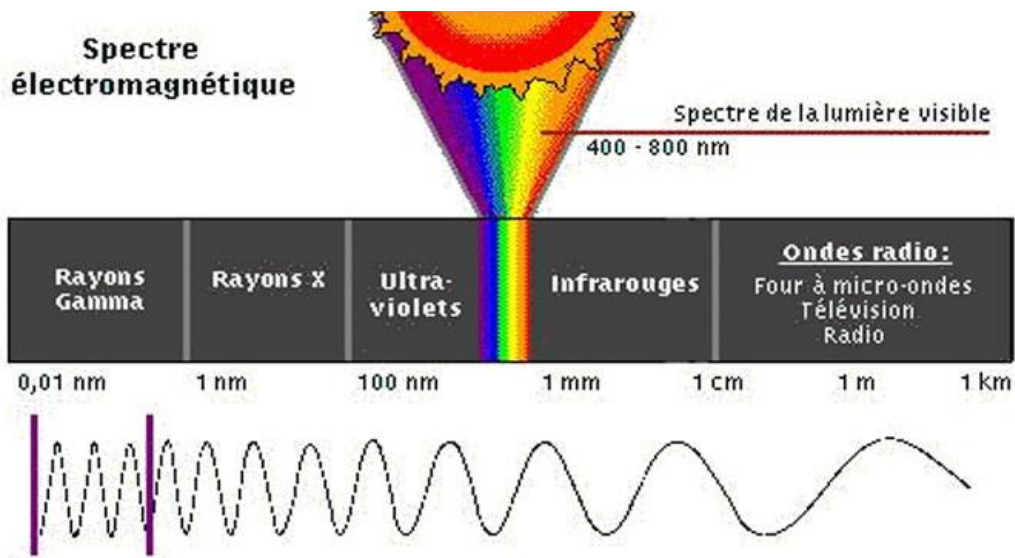


Figure 1.5 Spectres électromagnétiques

### 1.2.1.4 Radiation d'un corps noir :

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température.

Les sources corps noirs qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible. L'irradiation spectrale d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée par l'équation suivante:

$$F(\lambda) = 2\pi A \cdot \frac{c}{\lambda^2 (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} \quad (1.5)$$

Avec  $A = (\frac{R_s}{d})^2$

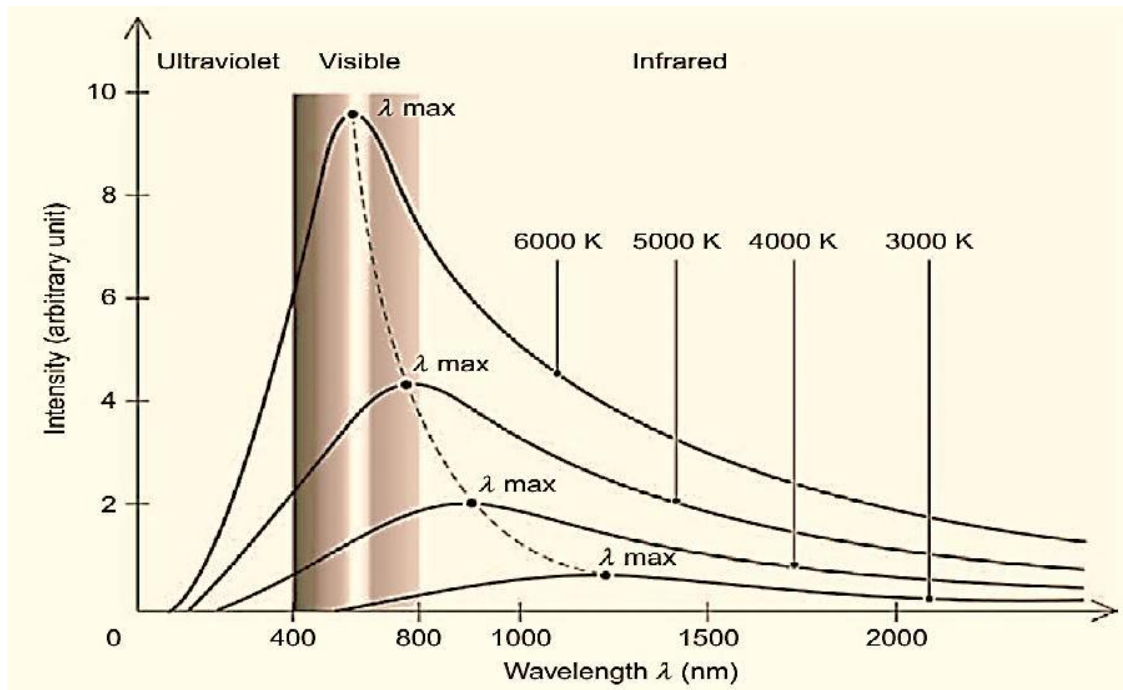
$\nu$  : La fréquence de la lumière.

$R_s$  : rayon du soleil ( $R_s = 6,96 \cdot 10^5$  Km).

$d$  : distance soleil – terre ( $d = 1,5 \cdot 10^8$  Km).

La figure 1.6 montrent que la distribution spectrale et la puissance de la lumière émise augmente en fonction de la température d'un corps noir. Par exemple, près de la température ambiante, un émetteur de corps noir va émettre un rayonnement de faible puissance à des longueurs d'onde en majorité supérieure à 1µm, bien au-delà de la portée visuelle de l'observation humaine. Si le corps noir est chauffé à 3000 K, il s'allume en rouge car le spectre de la lumière émise se déplace vers des énergies plus élevées dans le spectre visible. Si la

température du filament est en outre augmentée à 6000K, le rayonnement est émis à des longueurs d'onde dans le spectre visible allant du rouge au violet et la lumière apparaît blanche.



**Figure 1.6** Variation du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde [8]

### 1.3L'architecture d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

**La couche active ou l'absorbeur** constitué d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;

**Les contacts métalliques avant et arrière** constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré ;

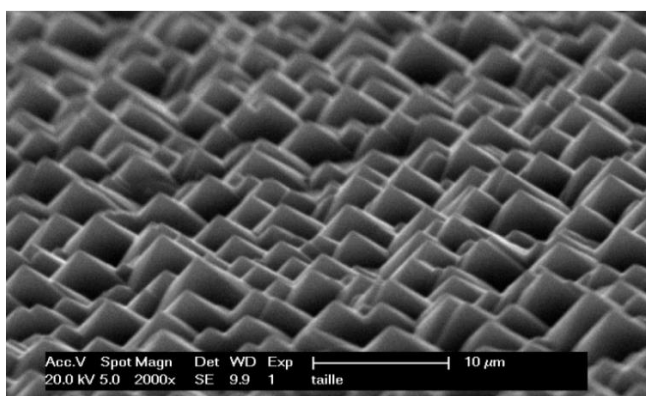
**Des couches supplémentaires** comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc. Ainsi, ce qui différencie

## Chapitre I : Généralité sur le photovoltaïque

---

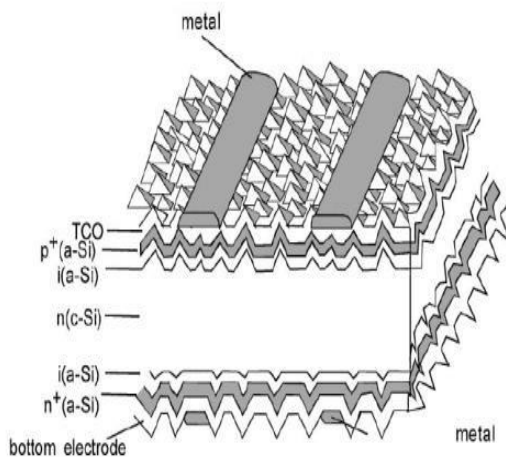
une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (anti-reflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes etc.

Le rendement de la cellule photovoltaïque dépend à la base du nombre des photons incidents. Cette quantité d'énergie est limitée par le coefficient de réflexion de la surface de la cellule  $R$ , qui pondère toutes les équations de photo courant de génération par un facteur  $(1-R)$ , le coefficient de réflexion peut être optimisé par la mise en œuvre des traitements de surface appropriés et de couche antireflet La technique la plus utilisée est une texturation de la surface en forme de pyramides (Figure 1.7) ou de pyramides inversées (Figure 1.8) [9]..

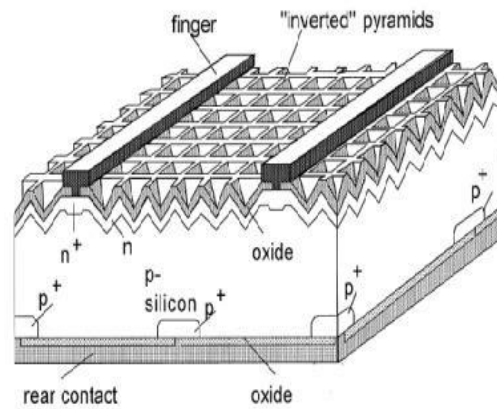


**Figure 1.7** Image de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides [10].

Cette texturation peut se faire au niveau du substrat (Figure 1.8), dans ce cas toutes les couches déposées ensuite présentent la même texturation, ou bien seulement sur la dernière couche déposée (Figure 1.9). Le but de cette structure est double, premièrement, elle permet de minimiser les réflexions directes à la surface grâce aux facettes, et deuxièmement, elle piège la lumière à l'intérieur du composant à l'aide de réflexions totales internes.



**Figure 1.8 :** Structure de la cellule PERL à base de silicium avec une texturation de Pyramides inversées en face avant [11].



**Figure 1.9 :** Structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches [11].

## 1.4 L'état de l'art du Photovoltaïque

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à l'année 1839 quand le physicien français Edmond Becquerel observa le changement de la tension d'une électrode en platine sous l'effet de la lumière, Einstein en expliqua le mécanisme en 1912, mais cela reste une curiosité scientifique de laboratoire. La génération d'une petite quantité d'électricité par illumination de certains solides tels que le sélénium fut étudiée par Heinrich Hertz dès les années 1870 avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par des photographes comme luxmètre[48].

De rapide progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes des BELL LABORATORIES aux Etats-Unis qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin d'un rendement de 4% à partir de procédé de tirage de Czochralski. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technologie ces premières applications pratiques.

En 1958 le satellite artificiel américain Vanguard1 emporte un petit générateur solaire pour alimenter sa radio. Jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier qu'un intérêt véritable s'est rapidement propagé à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres des photopiles [48].

### 1.4.1 Historique des cellules solaires en GaAs

Les premières cellules solaires en GaAs, fabriquées par Jenny et al en 1956 ont été sous forme d'homo-jonction p/n avec une efficacité de conversion de 3 à 6 % seulement [52]. En 1962, l'efficacité de ces cellules solaires a été améliorée à 11% pour le spectre AM1. Ensuite, en 1970, Alferov a essayé une approche différente pour la conception des cellules solaires à base du GaAs. En utilisant des composants ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , il a fabriqué la première cellule solaire hétérojonction p-AlGaAs/n-GaAs. Bien que cette première cellule n'avait qu'un rendement de 10-11%, Alferov a démontré un point important, en employant un matériau d'un gap d'énergie large entre la région de base en GaAs et la surface avant, la réponse spectrale de la cellule s'est améliorée pour les longueurs d'ondes courtes. En se basant sur cette idée, en 1972 Woodall et Hovel ont plutôt fabriqué une cellule à hétéro-face (juste la face avant qui est en AlGaAs) AlGaAs p/n. La génération des porteurs s'est élevée dans l'émetteur, et avec un matériau d'un grand gap d'énergie pour passiver la surface avant, le nouveau design de Woodall et Hovel a montré un rendement de 15.3% pour AM1 et 19.1% pour AM2. Cinq ans plus tard, Woodall et Hovel ont amélioré le rendement de leur cellule à 21.9% pour AM1. En parallèle, Sahai et al ont fabriqué une cellule à hétéro-face mais avec une couche graduelle de l'émetteur AlGaAs et le rendement atteint de la cellule était 24.7%. En 1978, Fan et Bosler ont proposé une nouvelle approche. En fabriquant une cellule homo-jonction  $n^+/p^+$  avec une couche étroite de l'émetteur, ils ont réalisé que l'efficacité de collection peut rester élevée sans l'incorporation d'une couche AlGaAs. Leur première cellule avait une jonction émettrice de 0.045  $\mu\text{m}$ , ce qui signifie qu'une fraction importante des porteurs générés se trouve dans la région de base faiblement dopée. Ce qui a rendu leur cellule si connue était la simplicité du design et la couche oxyde de l'anode sur la surface avant utilisée comme couche antireflets. Cette première tentative a donné un rendement de 20% pour AM1 [52]. Ensuite des cellules similaires avec des jonctions émettrices de 0.06  $\mu\text{m}$  ont été conçues pour les concentrateurs. Ces jonctions émettrices étroites ont présenté de faibles pertes par résistances causées par les courants latéraux lorsque l'émetteur  $n^+$  est fortement dopé. En 1984, Gale et al ont ajouté une hétérojonction à la face arrière de la cellule homo-jonction qui fait apparaître un champ électrique important de la face arrière. Ceci a donné une amélioration dans la tension de circuit ouvert. Pour AM1 le rendement était de 22% et la tension du circuit ouvert est de 1.01 V.

Pendant que la cellule n/p à homo-jonction étroite se développée durant le début des années 80, la cellule p/n à hétéro-face a montré des améliorations assez lentes jusqu'à 1985 quand Hamaker et al ont présenté des cellules avec un rendement de 26% à 753 Suns AM1.5. Une couche fenêtre de juste 300 Å a été développée pour supprimer les pertes indésirables dans l'absorption [48]. En 1987 le groupe Spire atteint un rendement de 23.7% pour 1 sun AM1.5 qui était à l'époque un rendement record [48].

Actuellement le design le plus fréquent pour les cellules solaires à base du GaAs est la jonction p/n à hétéro-face [48].

### 1.5 Les différentes filières du photovoltaïque

Le nombre de matériaux considérés pour la fabrication des piles solaires et des modules est déjà grand et accroissant toujours. Les choix originaux ont été motivés principalement par la disponibilité du matériel et des possibilités de traitement, mais la poussée récente dans l'intérêt pour le photovoltaïque déclencha également une recherche plus systématique sur de nouveaux matériaux et les structures de cellules qui peuvent aussi remplir les conditions finales de l'efficacité, de coût, de stabilité, et des effets sur l'environnement. Il existe deux approches de base dans la réalisation de cellules solaires. La première consiste à réaliser la cellule en couches minces [52], généralement amorphe ou polycristalline. La seconde approche consiste à réaliser la cellule avec du matériau monocristallin de haute qualité.

#### 1.5.1 La filière silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le poly cristallin [13].

##### a. Le monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitent cependant une dépense d'énergies considérable, proche du 7MWh et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup> (Université de New South Wales, Australie) [14].

La filière du silicium monocristallin a l'avantage de présenter les plus hauts rendements de



conversion avec un record à 27,6 %, par l'entreprise Amonix, sous concentrateur (x92soleils). Les modules commerciaux présentent des rendements entre 12 et 18 %. Cependant, cette filière est la plus coûteuse des filières silicium.

### **b. Le multicristallin (polycristallin)**

Le silicium polycristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché mondial, son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de productions sont donc plus faibles.

Les rendements des modules commerciaux se situent entre 12 et 15 %.

### **1.5.2 Les couches minces**

Le silicium amorphe (a-Si) peut être déposé sur un substrat de verre ou céramique par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), c'est un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma à base température. Les étapes de processus de la fabrication de cette filière de deuxième génération, comprend quatre étapes de dépôt ; On dépose une couche fine TCO (Transparent Conductive Oxide) qui réduit la réflexion à la surface de semi-conducteur et permet la collection des porteurs de charges. On dépose par la suite plusieurs autres couches sur cette couche de TCO qui sont : une couche de (a-Si) dopé N (émetteur), puis une couche a-Si semi isolante (zone intrinsèque) et à la fin une couche de (a-Si) type P (base). Une dernière couche métallique en argent, assure la collection et la connectique pour l'assemblage des cellules. L'épaisseur totale de ce type de cellules varie entre 1 à 2  $\mu\text{m}$  [48].

Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couche minces comme :

#### **a. La filière au tellure de cadmium(CdTe)**

Une production des panneaux photovoltaïques à grand échelle. Les cellules à base d'hétérojonction CdS/CdTe représentent un rendement de conversion qui dépasse les 15%

[51]. Malgré son rendement à faible coût, l'utilisation de ce matériau est ralentie par sa nature toxique reconnue du cadmium.

La fabrication des cellules à base de CdTe, consiste à déposer une couche de CdS de type N sur le verre puis une couche de CdTe type P d'environ  $2\mu\text{m}$ , afin de réaliser la jonction PN. Finalement une couche conductrice servant la connexion entre les cellules. Le rendement de cette cellule dépend fortement de la température de dépôt des couches actives [52].

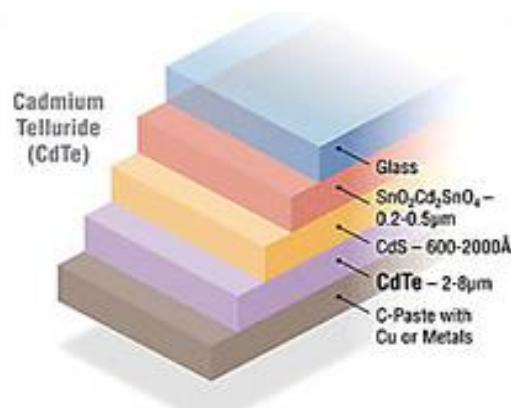


Figure 1.10 : Structure d'une technologie CdTe.

### b. La filière au diséléniure de cuivre et d'indium (filière CIGS)

La fabrication d'une cellule à base de CIGS consiste d'empiler plusieurs couches. Une couche métallique de  $0,5\mu\text{m}$  comme un contacte arrière, est déposée sur un substrat de verre dans le but de réduire le coût, puis un dépôt d'une couche de CIGS de  $2\mu\text{m}$  dopé P, la jonction est réalisée par une technique de dépôt par bain chimique (CBD). D'une couche  $\text{CdS}$  ou  $\text{ZnS}$  d'épaisseur  $50\text{nm}$ . Finalement, une couche TCO  $\text{ZnO}$  dopé N d'environ  $1\mu\text{m}$  et de forte résistance [49]. Leur rendement record est de 20% [50]. Le but de la recherche dans cette filière de CIGS est d'affaiblir le coût de fabrication par la réduction de la quantité du matériau utilisé et tente de remplacer le InGa (Indium Gallium) qui est chère par le Al.

### 1.5.3 Les cellules multi jonction (Tandem)

Cette génération utilise des nouveaux matériaux III-V comme le **GaAs** avec des structures complexes, pour absorber la plus grande partie du spectre solaire, notamment les puits quantique les boîtes quantique les nano fils et les multi jonctions qui représentent des rendements très élevée (dépasse les 40% aux laboratoires) [15]. Les couts de fabrication de ce

types des cellules est très élevé et il ne permet pas une utilisation domestique et leur application reste surtout dans les applications spatiales.

L'utilisation des concentrateurs, permet d'augmenter le rendement de ce type des cellules, on note que pour une cellule à triple jonction (InGaP/InGaAs/Ge) le rendement est de 23.11% [47] sans concentrateurs et de 34.1% [48] avec concentrateur, ce qui permet de réduire de la surface de la cellule donc le prix de  $W_c$ . Mais cette technique à ses défauts ; un panneau photovoltaïque à base de cellule à concentrateur (lentilles) doit être équipé d'un système de poursuite du soleil.

### 1.5.4 Les cellules solaires organiques

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie  $\eta$  très faibles, de l'ordre de 10-5 %. Dès 1978, Merritt prévoyait que les valeurs de  $\eta$  pourraient dépasser les 1% [12], mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint avec les travaux de Tang (PCE = 0,95 %) [13]. Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite avec des matériaux différents mais elle n'a jamais été améliorée.

Aujourd'hui, le record au niveau industriel est détenu par la firme Konarka avec un rendement qui dépasse les 5 % [16]. L'équipe de Heeger a même obtenu un rendement de 6,7% avec des cellules de type « tandem »

### 1.5.5 Cellules à base de colorant ou cellules Graätzel

Ce type de cellules inventées par Mickael Graätzel au début des années 90 [53], inspirée par le processus bioénergétique de la photosynthèse utilisée par les plantes (le colorant absorbe les photons et la chlorophylle (colorant) transforme l'énergie en matière organique, plusieurs réactions chimiques permettent par la suite la génération de la chlorophylle). Ces cellules s'ont constituées d'un colorant qui sert à absorber le rayonnement solaire, la régénération des électrons est assurée par l'intermédiaire d'un électrolyte liquide et le transport de charges au moyen d'une couche dioxyde de titane nano-poreux ( $TiO_2$ ) [53, 54]. Ces cellules ont les mêmes avantages que les cellules organiques ; faible cout, facilité de fabrication, flexibilité etc.... cependant, à cause de l'instabilité et les fuites de l'électrolyte par d'évaporation, ce dernier été remplacé par un électrolyte solide mais le rendement à chuté d'environ 4% (10.4% avec un électrolyte liquide contre 6.7% avec un électrolyte Solide)

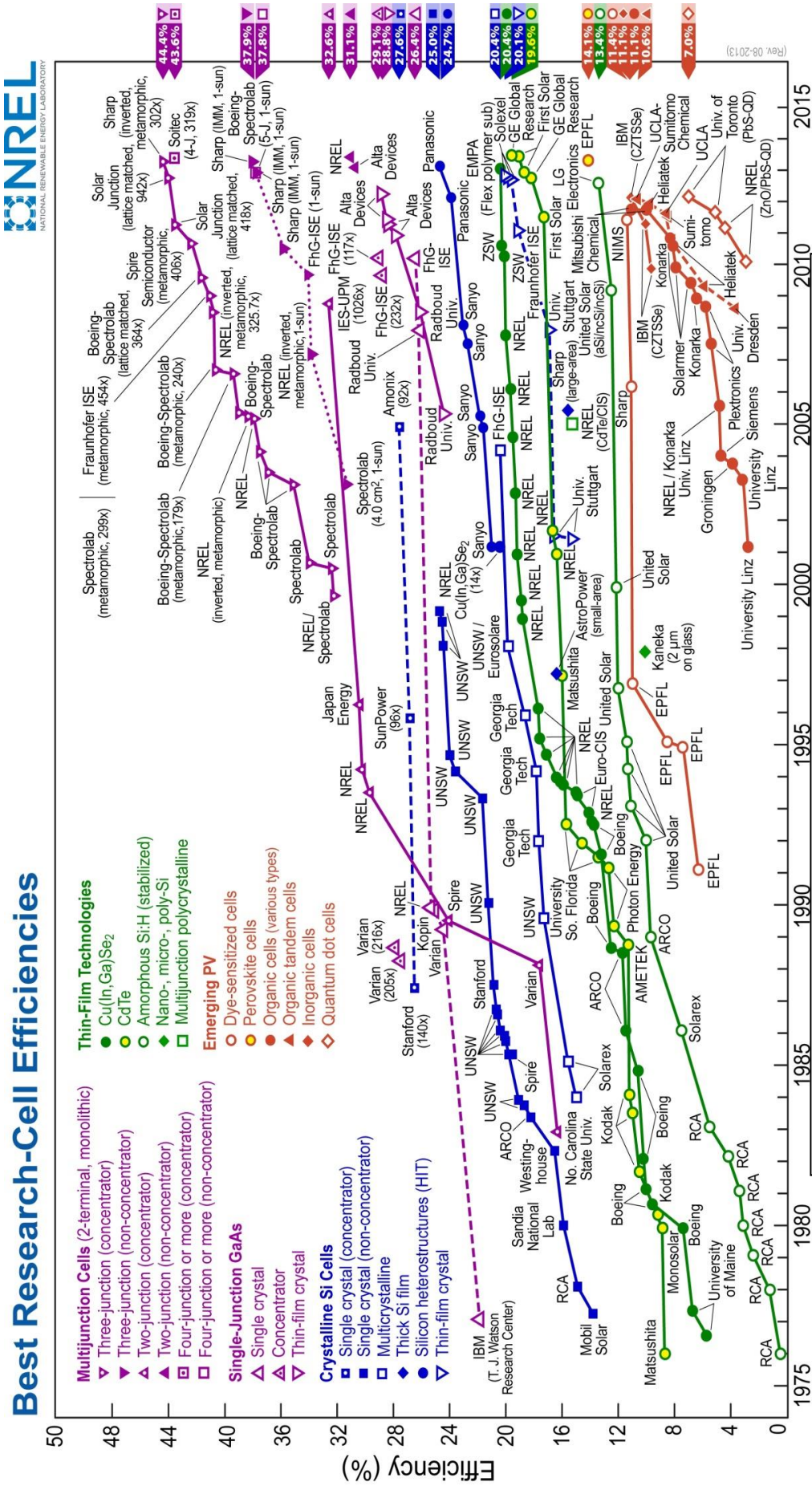


Figure 1.11 Rendements record des cellules photovoltaïques dans les différentes filières [17]

## 1.6 Structure de L'arséniure de gallium

### 1.6.1 L'arséniure de Gallium (GaAs)

L'arséniure de gallium (GaAs) a été reconnu depuis longtemps comme étant un matériau très favorable pour la conversion photovoltaïque grâce à ses propriétés importantes dont on cite: une bande interdite directe de 1.43eV et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de l'ordre de 2-3 $\mu$ m [18].

L'arséniure de gallium (GaAs) est un semi-conducteur composé d'un mélange de deux éléments, gallium (Ga) et l'arséniure (As). Le gallium est un élément chimique métallique d'atomique 31. On le trouve en petite quantités dans certaines variétés de blende, de bauxite, de pyrite, de magnétite et de kaolin. On obtient le gallium comme sous produits de métallurgie de zinc et des bauxites.

Le métal pur est préparé par électrolyse de sels alcalins. Le gallium reste facilement en surfusion. En effet, il peut rester liquide jusqu'à près de 2000 C°. Comme l'eau, il se dilate lors de sa cristallisation. Le gallium est chimiquement proche de l'aluminium: tous deux forment des sels et des oxydes dans les quels le métal est trivalent. Ils forment également des composés monovalents et divalents.

### 1.6.2 Structure cristalline

La figure (I.12) montre la structure tétraédrique de base du (GaAs) dans laquelle chaque atome de "Ga" a quatre plus proches voisins de "As", et celui-ci a comme plus proches voisins quatre atomes de Ga. Cette figure montre également l'interpénétration des deux sous-réseaux semblables au réseau de diamant avec une constante de réseau  $a_0 = 5.6533\text{\AA}$  [20]

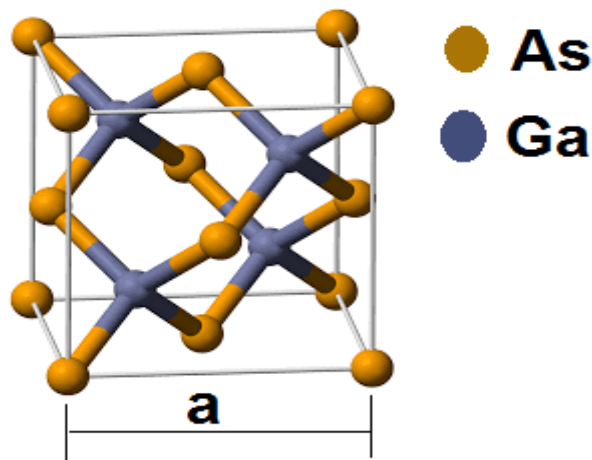


Figure 1.12 Structure cristalline du GaAs [8]

### 1.6.3 Structure de bande d'énergie de GaAs

Le GaAs est un semi-conducteur III-V, qui comprend aussi 8 électrons par cellule unité (3 provenant du "Ga" et 5 de "As"). Sa structure a un nombre égal de Ga et As distribués sur un réseau de type diamant. Il possède donc, comme le Si et le Ge, 8 bandes dérivées des orbitales SP 3, dont 4 sont entièrement remplies. Sa structure de bande est donnée dans la figure (I.13). On remarque que dans ce cas le minimum de la bande de conduction est situé au centre de la zone de Brillouin. C'est un semi-conducteur à gap direct situé au point  $\Gamma$ . Si le minimum de la bande supérieure correspond au même vecteur d'onde que le maximum de la bande inférieure alors on dit que la bande interdite est directe (gap direct), dans l'autre cas la bande interdite est indirecte voir figure (I.14) [21-22].

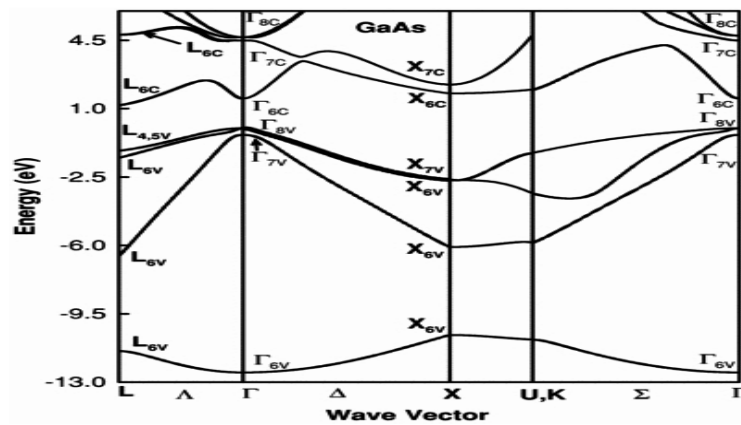


Figure I.13 Structure de bande de GaAs

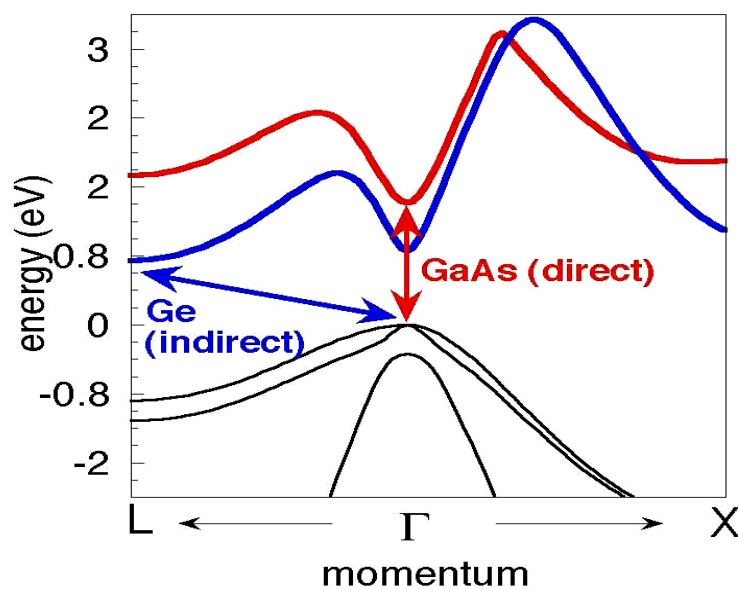


Figure I.14 Structure de bande schématisée d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect.

### 1.7 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite  $E_g$ , et de sa densité de porteurs. Avant de détailler ces valeurs pour le GaAs, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction.

#### a. Gap d'énergie interdite dans le GaAs

La caractéristique principale pour laquelle les III-V sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, Le gap d'énergie interdite du GaAs est de 1.43 eV à température ambiante 300 K°

Le gap  $E_g$  dépend de la température suivant la relation [16] :

$$E_g(T) = E_{g0} - \frac{\alpha(T)^2}{\beta + T} \quad (1.7)$$

Avec :

$$\alpha = 0.5405 \text{ meV/K}$$

$$\beta = 204\text{K}$$

#### b. Notion de masse effective [25]

Un électron dans la bande de conduction est caractérisé par une fonction d'onde. En terme corpusculaire, il est considéré comme une particule quasi-libre dans un potentiel cristallin de masse  $m_0$  et de charge  $e^-$ . On représente cette particule quasi-libre par une quasi-particule libre de charge  $e^-$  et de masse  $m_e^*$  qu'on appelle masse effective de l'électron

Comme le cristal n'est pas isolé l'électron est soumis à une force externe (champ électrique appliqué) et une force interne qui n'est pas connue causée par le potentiel cristallin.

## Chapitre I : Généralité sur le photovoltaïque

semi-conducteur	Masse effective des électrons	Paramètres de la bande de valence			Masse effective des trous	
		$m_e/m_0$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$m_{hh}/m_0$
GaAs	0.067	7.65	2.41	3.28	0.62	0.074

Tableau 1.2 : Masse effective des électrons et des trous aux extrema des bandes, et paramètre caractéristiques de la bande de valence.

### c. Densité d'état

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

La densité d'état aux bornes des bandes de conduction et de valence, respectivement, est donnée par [23] :

$$N_c(T) = 2.5 * 10^{19} (0.067)^{1.5} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.5} \quad (1.8)$$

$$N_v(T) = 2.5 * 10^{19} (0.45)^{1.5} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.5} \quad (1.9)$$

Avec : T la température

### d. concentration intrinsèque $n_i$

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur pur, c'est-à-dire tout d'abord non dopé, ne contenant pas d'impuretés ou d'additifs et sans défaut (ni chimique ni structural). Il est à noter que les additifs sont susceptibles de modifier les densités des porteurs de charge. Dans le cas de non dégénérescence du a un dopage excessif, le niveau de fermi se situe dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque soit dopé, dans la bande interdite alors que dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ce dernier se situe au milieu de la bande interdite.

Par définition, un semi-conducteur intrinsèque est tel que chaque électron dans la bande de conduction provient de la bande de valence où un trou lui correspond. Cette



situation conduit à une condition de neutralité électrique pour le semi-conducteur intrinsèque, écrite pour le nombre volumique de porteurs de charge

$$n = p = n_i \quad (1.10)$$

Où  $n_i$  représente la concentration intrinsèque des porteurs de charges dans un semi-conducteur intrinsèque peut être exprimée par la loi d'action des masses qui peut être exprimée par:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.11)$$

### 1.7.1 Longueur de diffusion

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

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (1.12)$$

Avec :

$\tau$  : La durée de vie des porteurs.

$D$  : le coefficient de diffusion des porteurs, défini par :  $D = \frac{kT}{q} \mu$

Avec :  $\mu$  la mobilité des porteurs

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire.

### 1.7.2 Mécanisme de recombinaisons

Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trous, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par: [26]

$$\tau_{n,p} = \frac{\Delta n, p}{R_{n,p}} \quad (1.13)$$

Avec :

$\Delta n, p = n, p - n_e, p_e$  : La densité des porteurs générés.

$n_e, p_e$  : La densité des porteurs à l'équilibre.

$\tau_{n,p}$  : La durée de vie de ces porteurs.

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que

pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$ s) [25]. Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons (mécanisme).

Les types de recombinaison peuvent se classer comme suit [27]. Trois types des recombinaisons en volume:

### 1.7.2.1 Recombinaison en volume de type radiatif

Le processus de recombinaison radiative ou inter-bandes est défini comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique. Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe comme le GaAs et faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Si. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous [28-29]:

$$R_d = B(np - n_i^2) \quad (1.14)$$

Avec : B est le coefficient de recombinaison radiative

### 1.7.2.2 Recombinaison en volume de type Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées [33]. Le taux de recombinaison est donné par la relation [30]:

$$R_{Au} = (c_n n + c_p p)(np - n_i^2) \quad (1.15)$$

Avec:

$C_n$  et  $C_p$  sont des coefficients d'Auger pour les électrons et les trous respectivement.

### 1.7.2.3 Recombinaison en volume de type piège

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les pièges appelé recombinaison SRH [22-31-32-33]. Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison des porteurs piégés  $R_{SRH}$  est défini comme étant le taux net de capture à ce niveau par l'expression :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i}{\tau_{SRH,n} \left( p + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{KT}} \right) + \tau_{SRH,p} \left( n + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{KT}} \right)} \quad (1.16)$$

Avec :

$E_i$  : le niveau de fermi intrinsèque.

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

### 1.7.2.4 Recombinaison en surface

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante ( $T=300$  K) [25]. Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités des défauts.

La vitesse de recombinaison en surface est très sensible aux conditions de préparation. Pour le GaAs une surface non passivée peut montrer une vitesse de recombinaison de  $10^7$  cm/s [34].

## 1.8 propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau dépendent principalement de son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant formé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction.

### 1.8.1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction, souvent noté  $n$ , est une grandeur sans dimension caractéristique d'un milieu, décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci ; il dépend de la longueur d'onde de mesure mais aussi des caractéristiques de l'environnement dans lequel se propage la lumière.

La définition la plus répandue pour l'indice de réfraction est qu'il est la quantité résultante du rapport entre la vitesse de la lumière ( $c$ ) dans le vide, et la vitesse de phase ( $v$ ) de la lumière dans ce milieu :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.17)$$

Le coefficient de réflexion ( $R$ ) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie ( $I_r$ ) sur l'intensité incidente ( $I_i$ ) :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.18)$$

On montre que :

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.19)$$

Avec :

$n_1$  : indice de réfraction de l'air ( $n_1 = 1$ )

$n_2$  : indice de réfraction du matériau GaAs

### 1.8.2 L'absorption

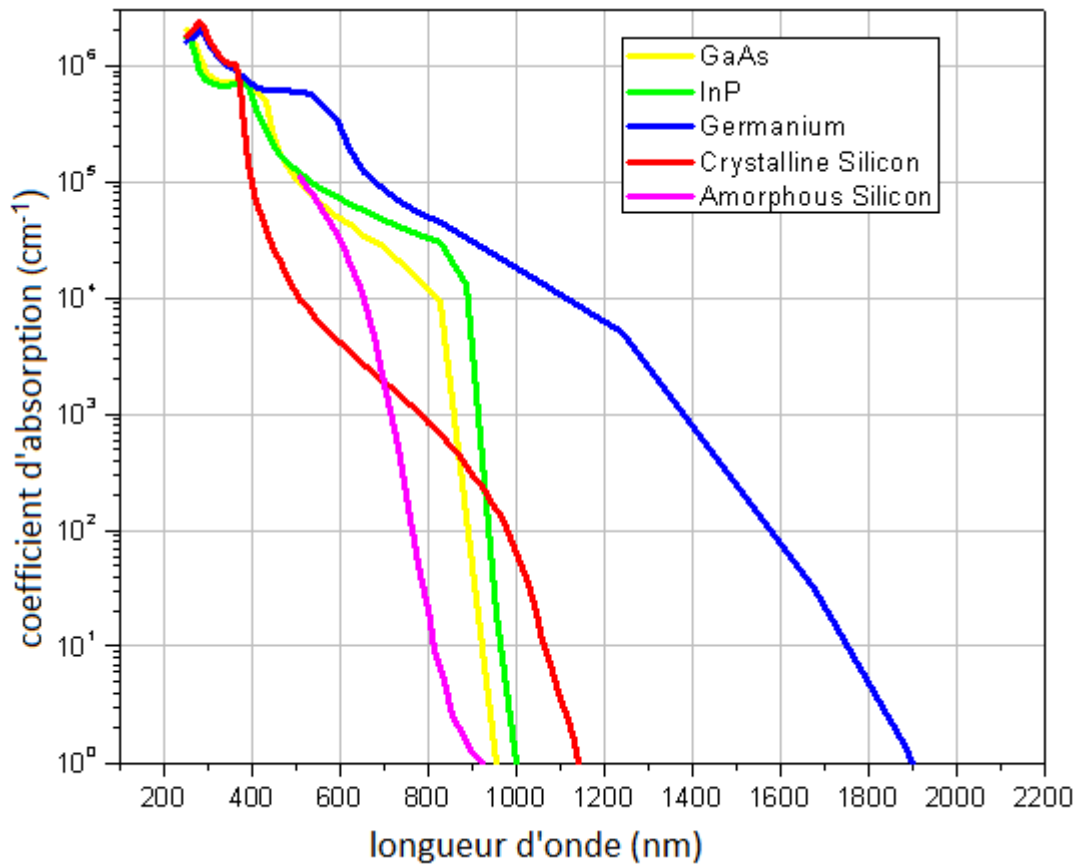
Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau [34].

Le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau figure( 1.15). Et est défini par l'expression :

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (1.20)$$

Avec :

K : coefficient d'extinction



**Figure 1.15** Coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) en fonction de la longueur d'onde de différents matériaux.

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et le flux incident, ces connaissances sont indispensables dans les recherches d'énergies solaires et renouvelables.

Nous avons présenté les technologies photovoltaïques et leur architecture ainsi que les marchés mondiaux et les records d'efficacités.

### 2.1 Introduction

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap"  $E_g$ , en électronvolts (eV).

Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule comme le montre la figure 2.1.

$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Avec :

$h$  : constante de Planck.

$\nu$  : fréquence du photon.

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide.

$\lambda$  : la longueur d'onde du photon.

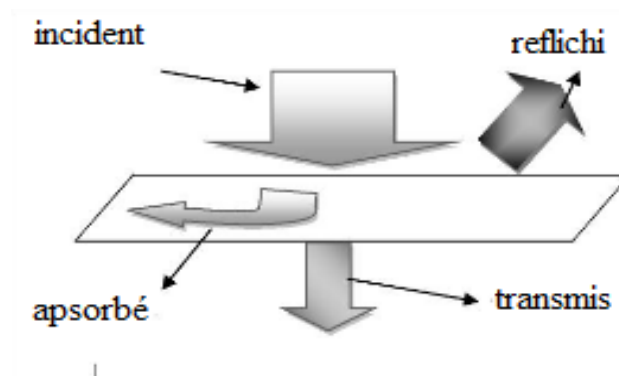


Figure 2.1 les phénomènes subit au flux incident

### 2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule

#### 2.2.1 La jonction PN

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des

## Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque

contacts métalliques. En pratique, on part d'une plaque de silicium dopée N sur laquelle on crée en général par diffusion une zone dopée P. On sait donner à la zone de séparation entre les deux matériaux nommée la zone de transition ou zone de charge d'espace (ZCE), une épaisseur très faible (typiquement  $0,5 \mu\text{m}$ ). Dans cette zone, les taux de dopages et donc le nombre de porteurs libres varient avec la distance.

Dans la zone P les porteurs majoritaires sont les trous. Les atomes accepteurs constituent un réseau d'ions négatifs. De même dans la zone N les porteurs majoritaires sont les électrons. Les atomes donneurs constituent un réseau d'ions positifs. Les trous ont tendance à gagner la zone N où ils se recombinent avec des électrons. De même des électrons de la zone N vont combler des trous de la zone P. Dans la zone de transition existe une charge d'espace due aux charges non compensées des noyaux des impuretés. En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs. Les porteurs minoritaires induisent le courant de diffusion ; les porteurs majoritaires créent le courant de saturation. En l'absence de polarisation, ces deux courants sont égaux.

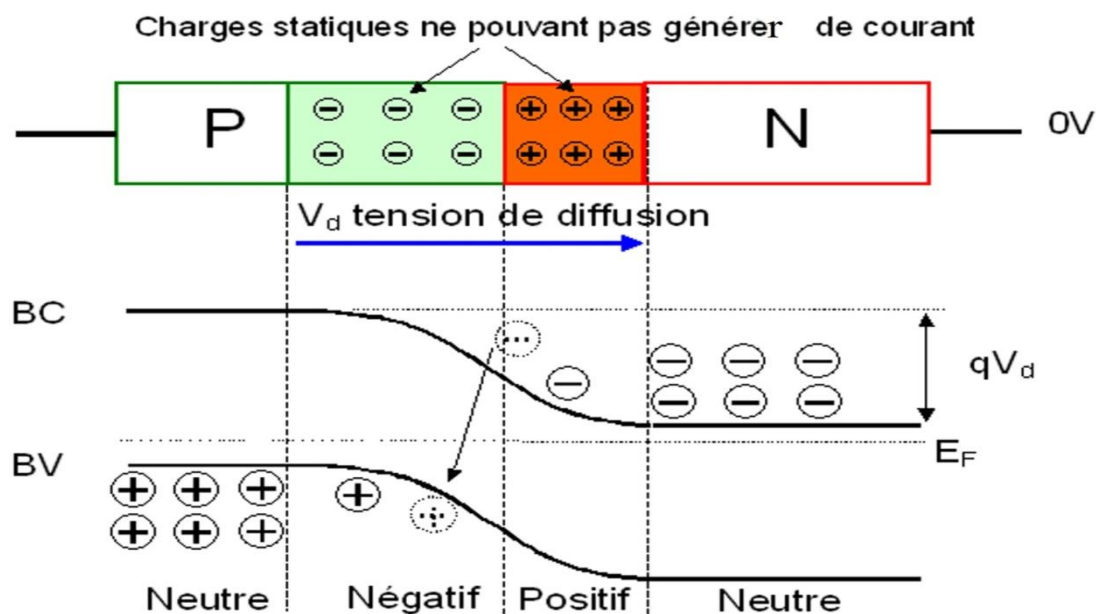


Figure 2.2 Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

### a. A l'équilibre thermodynamique

On s'intéresse d'abord au cas d'une jonction à l'équilibre thermodynamique à la température T. il faut alors distinguer deux régions dans ce semi-conducteur inhomogène

La région centrale appelée zone de déplétion

Les régions homogènes n et p, loin de la jonction

Du côté n, le niveau de Fermi étant proche de la bande de conduction, la densité d'électrons est proche de la densité de donneurs  $N_d$ . De même la densité de trous est voisine de  $N_a$  du côté p. La zone n (resp. Zone p) est donc un réservoir d'électrons (resp. De trous) retenu par la barrière de potentiel  $V_b$ . On a l'habitude d'introduire une classification des porteurs en deux catégories, porteurs majoritaires (électrons dans la zone n et trous dans la zone p) et porteurs minoritaires (électrons dans la zone p et trous dans la zone n). Les poids relatifs des courants dans la jonction sont tels que :

Dans la zone de déplétion, à la fois les courants de dérive et de diffusion des électrons et des trous sont importants.

Dans les régions homogènes, seul domine le courant de dérive des porteurs majoritaires. A l'équilibre thermodynamique, aucun courant d'électrons ni de trous ne traverse la jonction. C'est à dire que le courant d'électrons (resp. de trous) majoritaires de p vers n (resp. de n vers p) compense exactement le courant des électrons (resp. de trous) majoritaires de n vers p (resp. de p vers n).

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

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{ni^2}\right) \quad (2.2)$$

A l'équilibre, le niveau de Fermi est constant dans la jonction et la barrière de potentiel interne est égal à la différence entre les niveaux de Fermi avant mise en contact :

$$V_b = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.3)$$

La largeur de la zone de charge d'espace(W) a l'équilibre thermodynamique égale a :  
 $W=X_n+X_p$  est montrer comme :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) V_0 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.4)$$



Avec :

$V_n$  et  $V_p$  : les potentiels dans les matériaux N et P régions neutre respectivement

K : constante de Boltzmann

T : la température

$n_i$  : la concentration intrinsèques de porteurs libres.

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

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

q : la charge élémentaire

### **b. Hors équilibre thermodynamique**

Lorsque le semi-conducteur n'est pas à l'équilibre à cause de l'application d'un champ électrique ou de l'éclairement de la structure, les quasis niveaux de Fermi permettent de décrire les populations d'électrons et de trous qui ne sont pas à l'équilibre ni entre elles ni même avec le cristal.

Etudions maintenant une jonction lorsqu'un potentiel externe  $V$  est appliqué à celle-ci. Cette tension externe modifie la hauteur de la barrière de potentiel et un courant non nul aussi bien d'électrons que de trous traverse maintenant la jonction. Ainsi, aux bornes de la zone de déplétion, les concentrations de porteurs diffèrent de leur valeur d'équilibre.

Dans une jonction p-n hors- équilibre, il faut maintenant distinguer trois régions (figure 2.3) :

- La zone de déplétion qui est toujours le siège de forts gradients de concentration et d'un champ électrique intense.
- Les régions homogènes très loin de la zone de déplétion où les électrons et les trous sont à l'équilibre thermodynamique.
- Les régions de diffusion. Ces régions sont situées de part et d'autre de la zone de déplétion, entre celle-ci et les régions homogènes. Le champ électrique et la charge d'espace y sont faibles mais les gradients de concentration restent importants. En effet, l'application d'une tension aux bornes de la jonction induit un excès (ou un déficit) de porteurs par rapport aux valeurs d'équilibre aux bornes de la zone de déplétion. La longueur de diffusion est la distance qu'il faut pour que la densité de porteurs relaxe vers sa valeur d'équilibre [37].

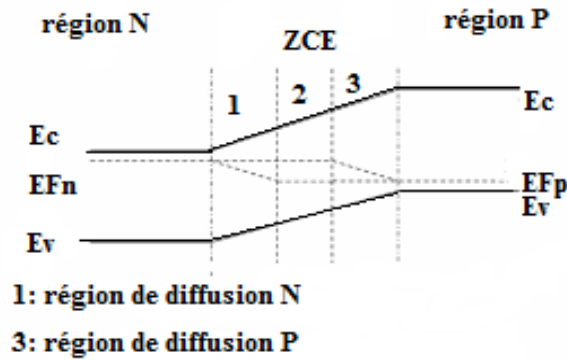


Figure 2.3 schéma des différentes régions dans une jonction hors équilibre

Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel :

$$V_{tot} = V_0 - V = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{ni^2}\right) - V \quad (2.5)$$

La largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation (V) est :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon}{q}\right) (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.6)$$

Avec :

$V_0$  : Le potentiel de diffusion

$V$  : le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

## 2.3 Paramètre d'une cellule photovoltaïque

### 2.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

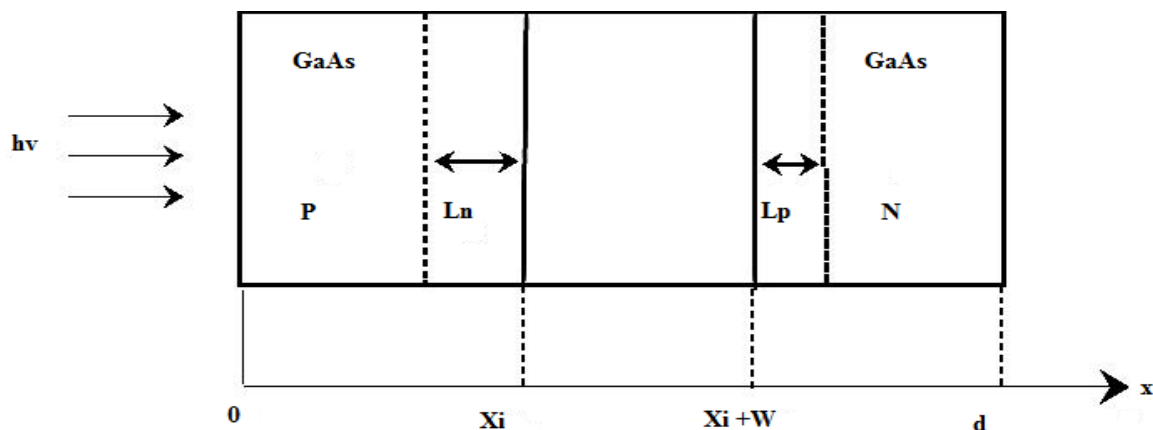


Figure 2.4 schéma d'une jonction GaAs éclairée

## Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque

---

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si  $E_{inc}$  est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur  $x$  s'écrit :

$$E = E_{inc} \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

Donc, l'énergie absorbée dans l'épaisseur  $x$  est égale à :

$$E = E_{inc} - E_{inc} \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

$$E = E_{inc}(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.9)$$

Le taux de génération des électron-trou dans un matériau semi-conducteur à une profondeur  $x$  de la surface  $G(\lambda, x)$ , dépend du flux des photons incidents, de la réflexion et du coefficient d'absorption [38]:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)\phi_i(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2.10)$$

Ceci si on suppose que chaque photon absorbé crée une paire électron-trou.

$E$  : Intensité lumineuse transmise.

$E_{inc}$  : Intensité lumineuse incidente.

$\phi_i$  : flux des photons incidents

$R$  : coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

$\alpha$ : coefficient d'absorption.

Pour un gap direct(GaAs),  $\alpha$  Peut être exprimé sous la forme :

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.11)$$

Avec

$A$  : constante dépend du matériau

Le photo-courant résultant dans la jonction P-N est l'intégrale de la somme de trois composantes ( $J_n$ ,  $J_p$ ,  $J_d$ ) sur toutes les longueurs d'ondes de spectre solaire.

Le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p ( $J_n$ ), Le courant de photo-génération dans la zone de charge d'espace ( $J_d$ ) et le courant de diffusion phototrous de la région de type n ( $J_p$ ).

La densité de courant d'électrons dans l'émetteur est exprimée par [39]

$$J_n = q\phi(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} + \alpha L_n \right)}{\left[ \left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \right) \cdot \sinh \frac{X_j}{L_n} + \cosh \frac{X_j}{L_n} \right]} \right] - \left[ \alpha L_n + \frac{\left[ \left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \cosh \frac{X_j}{L_n} + \sinh \frac{X_j}{L_n} \right) \right]}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \left( \sinh \frac{X_j}{L_n} \right) + \cosh \frac{X_j}{L_n}} \right] \cdot e^{-\alpha X_j} \quad (2.12)$$

La densité de courant de trous est donnée par [20] :

$$J_p = \left[ \alpha L_p - \frac{\left[ \left( \frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh \frac{d}{L_p} + \sinh \frac{d}{L_p} \right) \right]}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \left( \sinh \frac{d}{L_p} \right) + \cosh \frac{d}{L_p}} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{-S_p \cdot L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \cdot e^{\alpha d}}{\left[ \left( \frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \right) \cdot \sinh \frac{d}{L_p} + \cosh \frac{d}{L_p} \right]} \right] \cdot e^{-\alpha(X_j+W)} \cdot q\phi(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \quad (2.13)$$

La densité de courant dans la région de charge d'espace est donnée par :

$$J_d = q\phi(1 - R) \left( e^{-\alpha x_j} - e^{-\alpha(x_j+W)} \right) \quad (2.14)$$

Le photon courant  $J_{ph}$  est calculé par l'intégration de tout le spectre solaire comme suite :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.15)$$

La densité de courant totale est donné par :

$$J_{tot} = J_{ph} - J_{obs} \quad (2.16)$$

Avec :

**$J_{obs}$**  : le courant d'obscurité exprimé par :

$$J_{obs} = J_0 \left( e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

$X_j$  : l'épaisseur de l'émetteur.

$W$  : la largeur de la zone de charge d'espace.

$J_0$  : le courant de saturation

$S_n$  : la vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès a la surface avant.

$S_p$  : la vitesse de recombinaison de surface des trous en excès a la surface arrière.

$L_n$  : longueur de diffusion des électrons dans le matériau P, avec  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$

$L_p$  : longueur de diffusion des trous dans le matériau N, avec  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

$\tau_p$  et  $\tau_n$  et : les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous, Respectivement.

$D_n$  : le coefficient de diffusion des électrons

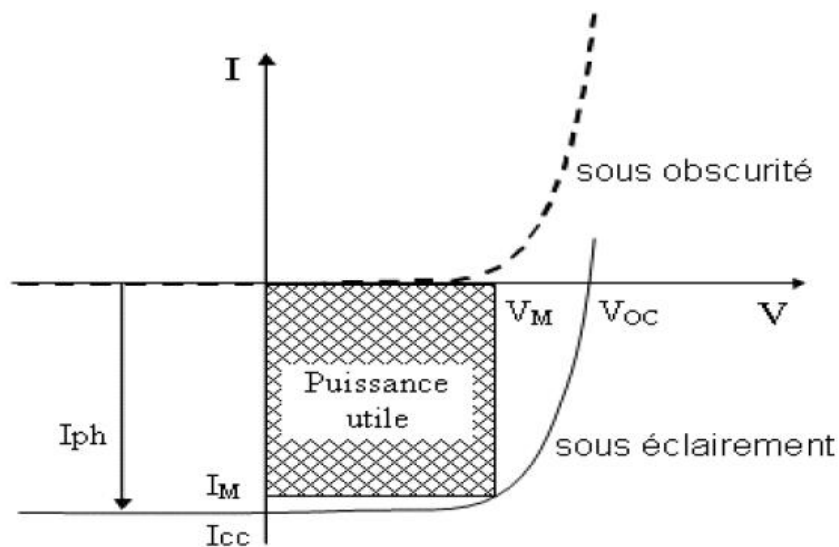
## Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque

$D_p$  : le coefficient de diffusion des trous

Le courant de court-circuit est le courant délivré par la cellule solaire pour une tension ( $V=0$ )

$$J_{cc} = J_{ph}(V = 0) \quad (2.18)$$

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairage, la caractéristique courant-tension a l'allure présentée sur la (figure 2.5).



**Figure 2.5** caractéristique courant-tension  $I = f(V)$  en obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque à base de GaAs [40]

A partir de la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque, on peut déduire les paramètres propres à la cellule et particulièrement :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ ).

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

$I_M$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$V_M$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$\eta$  : Rendement de conversion.

FF : Facteur de forme.

Avec :

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{CC}} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Le courant de court circuit ( $I_{CC}$ )

Le courant de court circuit  $I_{CC}$  est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ( $V=0$ ).

$$I_{CC} = I_{ph} \quad (2.20)$$

### 2.3.3 Tension de circuit ouvert $V_{CO}$

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.21)$$

Avec :

$J_0$  : Le courant de saturation

$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (2.22)$$

### 2.3.4 La puissance maximale $P_m$

Suivant la formule  $P = VI$ , pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit  $VI$  est maximal : c'est le point de charge idéal de la cellule, ou point de puissance maximale  $P_m$  (figure 2.6), elle est donnée par la relation suivante :

$$P_m = V_m * I_m \quad (2.23)$$

Avec :

$I_m$  : C'est le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

$V_m$  : C'est la tension correspondante à la puissance maximale fournie.

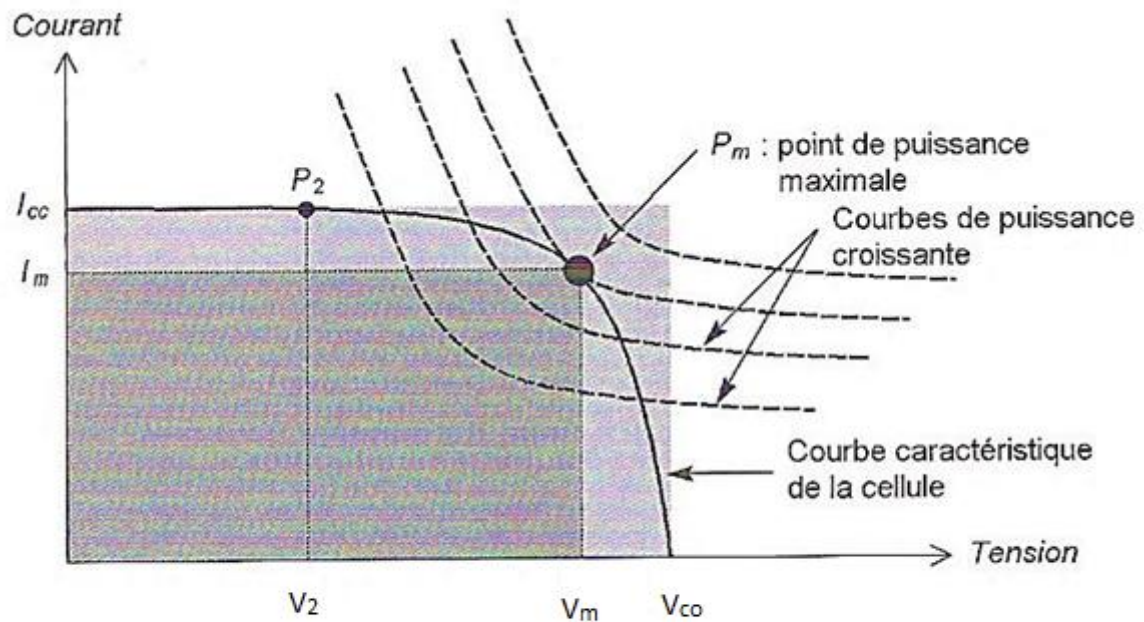


Figure 2.6 : Courbe I-V d'une cellule solaire.

Le point de fonctionnement optimum d'une cellule solaire est donc en  $P_{max}$ , où le Produit  $I.V$  est maximum. Sous un spectre  $AM_{1.5}$  à  $25^{\circ}C$ , cette puissance maximale est aussi appelée puissance crête et sert de référence pour comparer différentes cellules.

### 2.3.5 Facteur de forme(FF)

Le facteur de forme ( $FF$ ) « en anglais : Fill Factor » est défini [41] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc} \cdot V_{co}$ ) figure 2.7, d'où il est donné par la relation :

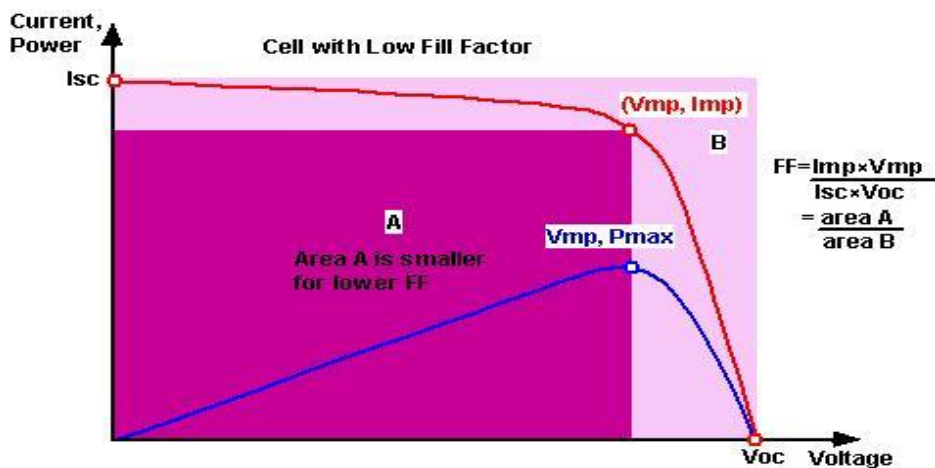


Figure 2.7: Le facteur de forme dans la courbe I-V [42].

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance  $P_m$  sera égale à  $(I_{cc} \cdot V_{co})$ . Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

### 2.3.6 Le rendement de conversion

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si  $S$  est la surface de la cellule (en  $m^2$ ) et  $E$  est l'éclairement -irradiance- (en  $W/m^2$ ) le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{E \cdot S} \quad (2.24)$$

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

L'efficacité de la cellule solaire est déterminée comme étant la fraction de la puissance incidente qui est convertie en électricité, la figure 2.8

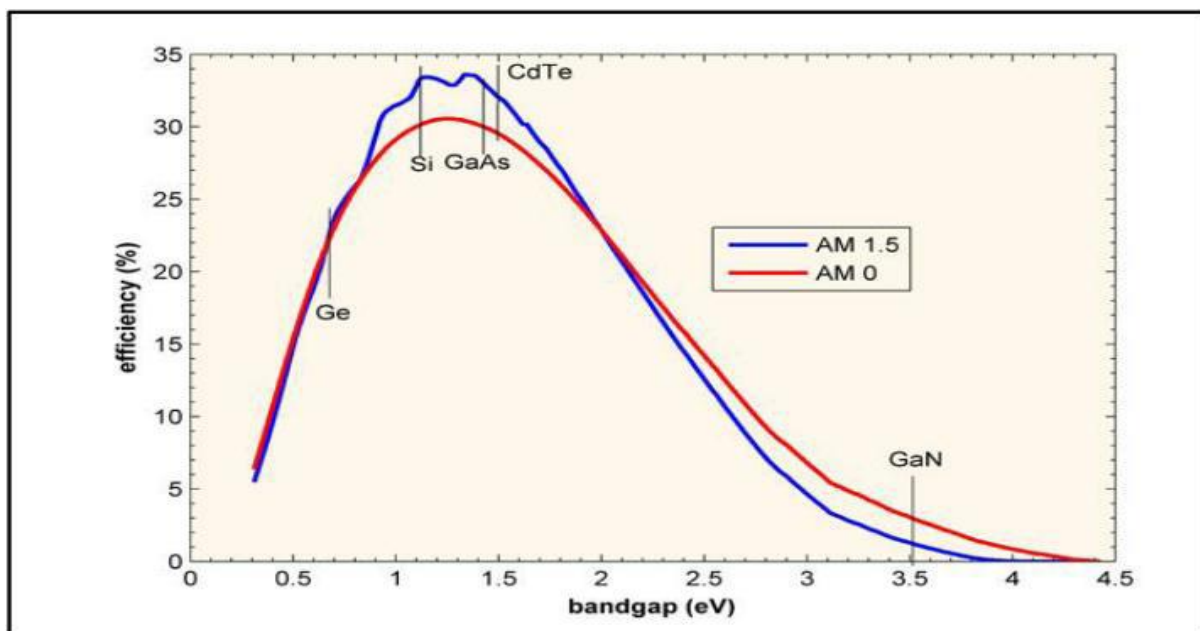


Figure 2.8 : Le rendement en fonction du gap d'énergie [39].



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

### 2.4 Rendement théorique maximum

Le rendement théorique maximum est déterminé à partir du spectre solaire et du calcul du courant d'une cellule idéale en tenant compte des pertes dues, d'une part à l'absorption incomplète des photons dans l'infrarouge (due au gap d'énergie), et d'autre part à l'excès d'énergie des photons dans l'ultraviolet (thermalisation).

Le premier élément pour obtenir le rendement maximum d'une cellule Photovoltaïque est le choix d'un matériau adapté au rayonnement incident. Nous avons vu que le maximum d'énergie solaire se situe entre 500 et 700 nm (entre 2,5 et 1,5 eV). Il faut donc utiliser un semi-conducteur possédant un gap d'énergie proche de cette gamme d'énergie. La Figure 2.9 présente le spectre solaire AM1.5 et les gaps d'énergie des principaux semi-conducteurs. On rappelle que les semi-conducteurs peuvent absorber une partie de l'énergie au-dessus de leur gap (longueurs d'onde plus petites). Toutefois, une partie de cette énergie est perdue en chaleur. D'après cette figure, on observe que l'alliage CIGS, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H), le CdTe et l'GaAs possèdent des gaps d'énergie intéressants pour la conversion photovoltaïque en utilisant une simple jonction.

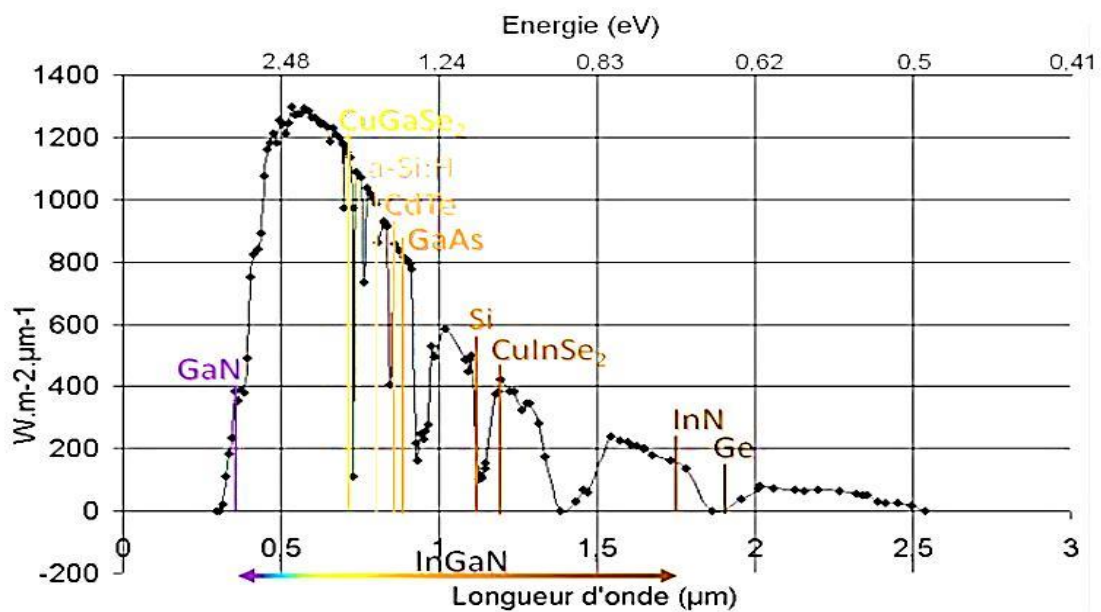


Figure 2.9 : Spectre solaire AM1.5 et gap d'énergie des principaux semi-conducteurs

### 2.5 Facteurs limitant le rendement

Les différents facteurs de pertes, sont dus soit aux limites purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix de technologies appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur la limitation intrinsèque du matériau [44]

#### 2.5.1 Pertes physiques

Le photon qui possèdent une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ( $\lambda_{ph} > \lambda_g$ ), ne peuvent pas générer des paires électrons-trous et sont donc perdus.

Le photon d'énergie supérieure au gap, ne peuvent générer qu'une seule paire électron-trou, l'excès d'énergie supérieure à la longueur de la bande interdite, est dissipé sous forme de chaleur (thermalisation).

Le Facteur de tension ( $\frac{qV_{CO}}{E_g}$ ), est le rapport de l'énergie maximale développée par la cellule par l'énergie de gap. la tension aux bornes de la cellule n'est qu'une fraction de l'énergie de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction

Le facteur de forme, ne peut dépasser 0.86 [46], car les courbes courant-tension sont générées par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ( $\exp(qV/kT)$ ), donc il n'existe pas des courbes  $I(V)$  de forme rectangulaire, même dans le cas d'une cellule idéale (voir la figure 2.8). Ce paramètre dépend également de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction des matériaux utilisés, de la résistivité des contacts métalliques, etc.

Ces facteurs physiques étant considérés comme limitatifs pour une structure donnée de cellules photovoltaïque, les facteurs technologiques sont les seuls acteurs qui peuvent améliorer le rendement de la cellule.

#### 2.5.2 Pertes technologiques

Le rendement de la cellule photovoltaïque dépend à la base du nombre des photons incidents. Cette quantité d'énergie est limitée par le coefficient de réflexion de la surface de la cellule  $R$ , qui pondère toutes les équations de photocourant de génération par un facteur

## Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque

---

(1-R), le coefficient de réflexion peut être optimisé par la mise en œuvre des traitements de surface appropriés et de couche antireflet.

Les contacts métalliques présents sur la face avant de la cellule afin de collecter les porteurs, entraîne des pertes de puissance car ils couvrent des parties de la surface réceptrice de la cellule (effet d'ombre). La largeur de métal, engendre un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes de facteur de forme FF provoquées par la résistance série (liée à la largeur de la métallisation).

Il y a des photons, ayant l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou, mais traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce nombre de photons devient important surtout dans les cellules minces d'épaisseur ( $< 100 \mu\text{m}$ ). Ce phénomène réduit le rendement d'absorption, et peut être diminué en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (appelé réflecteur arrière ou miroir arrière « BSR ») [47].

Le rendement de collecte, c'est le rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés, et le nombre des porteurs photogénèses. En effet, certains porteurs se recombinent à la surface ou dans le volume de la cellule photovoltaïque. Ce phénomène est lié directement à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire). Egalement ; il est possible d'améliorer la collecten par l'utilisation (diffusion) d'un champ arrière  $P^+$  dans le cas de la structure NP (BSF) [47].

Ces phénomènes peuvent être optimisés à l'aide des technologies de fabrication des cellules photovoltaïques.

### 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions fondamentales et principales qui concernent le principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de GaAs ainsi qu'une description physique et électrique de l'élément essentiel dans notre étude, et de présenter la nature des principaux facteurs limitant le rendement de conversion.

## Listes des acronymes et abréviations

---

AM	Masse d'air
h	Constante de Planck
$\lambda$	Longueur d'onde
H	La densité de puissance des photons
$\Phi$	Flux de photons
$\Delta\lambda$	Les longueurs d'ondes du spectre
E	L'énergie de photon incident $\nu$
$\nu$	Fréquence de la lumière
$R_s$	Rayon du soleil
d	Distance soleil – terre
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$V_n$	Potentiel dans le matériau N
$V_p$	Potentiel dans le matériau P
K	La constante de Boltzmann
T	La température
$n_i$	La concentration de porteurs libres intrinsèques
$p_0$	La concentration de trous à l'équilibre
$N_d$	La concentration de dopants donneurs dans le matériau N
$N_a$	La concentration de dopants accepteurs dans le matériau P
$N_c$	Densité équivalent d'états au bord de la bande de conduction
$N_v$	Densité équivalent d'états au bord de la bande de valence
$V_0$	Le potentiel de diffusion
V	Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction
$I_s$	Le courant de saturation
n	Le facteur d'idéalité
$\phi$	Flux des photons incidents
$S_n$	La vitesse de recombinaison de surface des électrons
$L_n$	Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P
$D_n$	Le coefficient de diffusion des électrons

## Listes des acronymes et abréviations

---

$S_p$	La vitesse de recombinaison de surface des trous
$L_p$	Longueur de diffusion des trous dans le matériau N
$D_p$	Le coefficient de diffusion des trous
$\lambda_{\min}$	La longueur d'onde la plus petite
$\lambda_{\max}$	La longueur d'onde la plus grande
$J_0$	Courant de saturation
$\tau_n$	Durée de vie des électrons
$\tau_p$	Durée de vie des trous
$P_i$	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface
$S$	La surface de la cellule PV
$\mu$	La mobilité des porteurs
$n$	La densité d'électrons libres
$B_{\text{radiatif}}$	Constante qui dépend du matériau
$B_{\text{Auger}}$	Constante qui dépend du matériau
$n_1$	Indice de réfraction de l'air
$n_2$	Indice de réfraction du matériau GaAs
$\theta$	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
$I_r$	L'intensité réfléchie
$I_i$	L'intensité incidente
BSF	Back surface field
SRH	Shockley-Read-Hall
Ga	Gallium
As	Arséniure
$X_j$	L'épaisseur de l'émetteur
$B_c$	Bande de conduction
$B_v$	Bande de valence
$E_g$	Energie de la bande interdite
$E_c$	Energie de la bande de conduction

## Listes des acronymes et abréviations

---

$E_v$	Energie de la bande de valence
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$n$	Indice de réfraction
$R$	Coefficient de réflexion
$q$	Charge élémentaire
$k$	Constante de Boltzmann
ZCE	Zone de charge d'espace
$J_n$	La densité de courant d'électrons
$J_p$	La densité de courant de trous
$J_d$	La densité de courant photoélectrique
$J_{ph}$	Le photo-courant
$J_{tot}$	La densité de courant totale
$J_{obs}$	La densité de courant d'obscurité
$J_{cc}$	Densité de de courant de court-circuit
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$V_m$	Tension correspondant à $P_{max}$
$I_m$	Courant correspondant à $P_{max}$
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
FF	Facteur de forme
$\eta$	Rendement
$n_0$	La concentration d'électrons à l'équilibre
$c$	La vitesse de la lumière dans le vide

**A.1 paramètres physique de la structure GaAs**

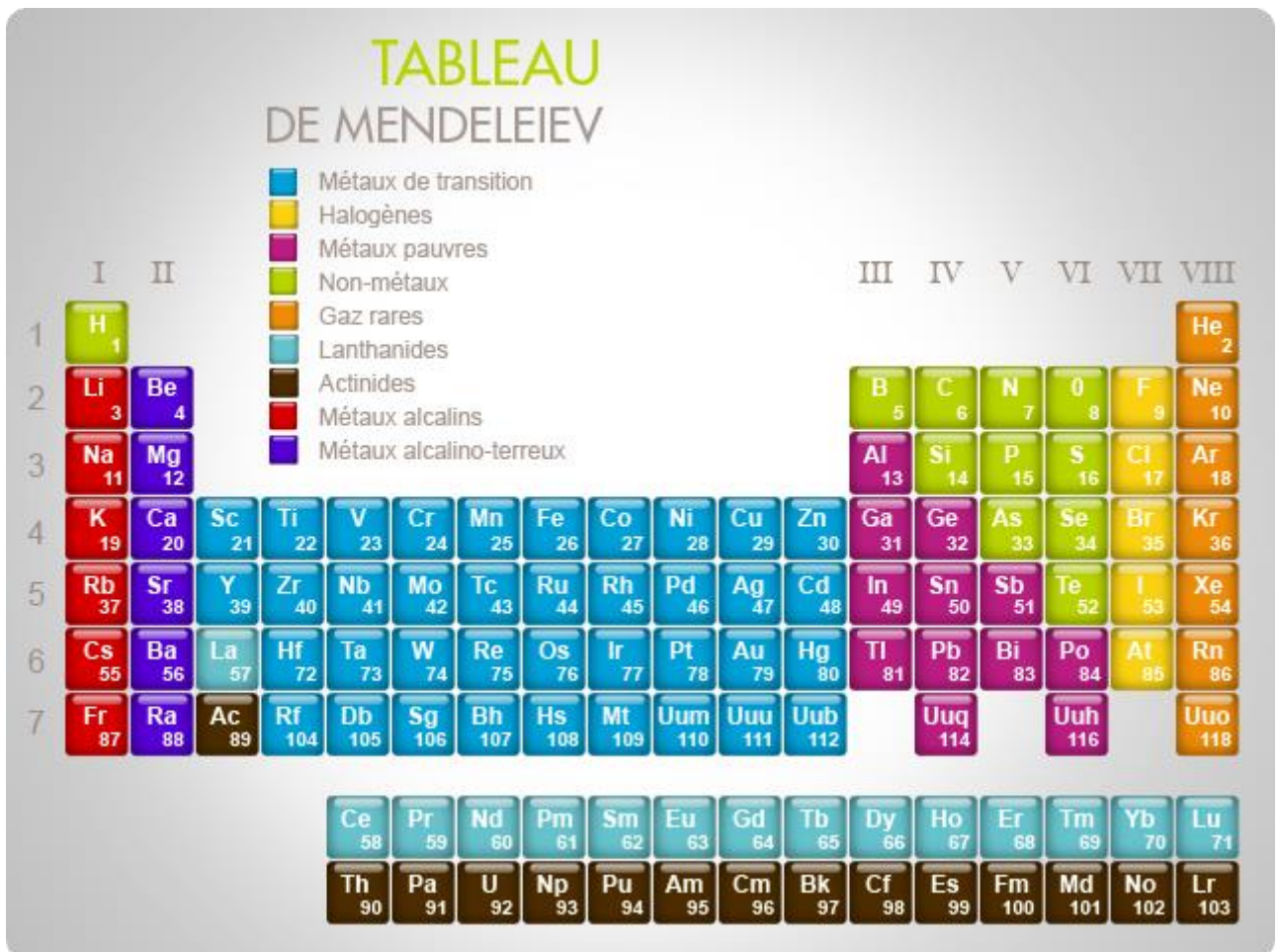
<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
$L_n$ (cm)	$1,48 \cdot 10^{-3}$
$L_p$ (cm)	$3,21 \cdot 10^{-4}$
$D_n$ (cm <sup>2</sup> /s)	219,2
$D_p$ (cm <sup>2</sup> /s)	10,34
$N_d$ (cm <sup>-3</sup> )	$5 \cdot 10^{17}$
$S_n$ (cm/s)	$10^3$
$S_p$ (cm/s)	$10^3$
$\epsilon_0$ (F.cm <sup>-1</sup> )	$8,85 \cdot 10^{-14}$
T(K)	300
d (cm)	$1.5 \cdot 10^{-4}$
$X_j$ (cm)	$10^{-5}$
$N_a$ (cm <sup>-3</sup> )	$5 \cdot 10^{17}$
$\tau_n$ (ns)	10
$\tau_p$ (ns)	10
$p_{inc}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	138

## Annexes

$q(c)$	$1,6*10^{-19}$
$K (eV.K^{-1})$	$8,617*10^{-5}$
$E_g (eV)$	1,429
$c (cm/s)$	$3*10^{10}$
$h (J.s)$	$6,626*10^{-34}$

**Tableau A.1 :** Les constantes de la structure GaAs

### A.2 Tableau périodiques de Mendeleïev



**Figure A.1 :** Table périodique de Mendeleïev



# Table de matières

---

## Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Généralité sur le photovoltaïque.....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Le soleil.....	3
1.2.1 Caractéristiques générales du soleil .....	5
1.2.1.1. Les effets atmosphériques.....	5
1.2.1.2 Masse d'air .....	5
1.2.1.3 Le spectre électromagnétique.....	7
1.2.1.4 Radiation d'un corps noir.....	8
1.3 L'architecture d'une cellule photovoltaïque .....	9
1.4 L'état de l'art du Photovoltaïque.....	11
1.4.1 Historique des cellules solaires en GaAs .....	12
1.5 Les différentes filières du photovoltaïque.....	13
1.5.1 La filière silicium.....	13
a. Le monocristallin.....	13
b. Le multicristallin (polycristallin) .....	14
1.5.2 Les couches minces.....	14
a. La filière au tellure de cadmium(CdTe).....	14
b. La filière au diséléniure de cuivre et d'indium (filière CIS).....	15
1.5.3 Les cellules multi jonction (Tandem).....	15
1.5.4 Les cellules solaires organiques .....	16
1.5.5 Cellules à base de colorant ou cellules Graätzel.....	16
1.6 Structure de L'arséniure de gallium.....	18
1.6.1 L'arséniure de Gallium (GaAs).....	18

## Table de matières

---

1.6.2 Structure cristalline.....	18
1.6.3 Structure de bande d'énergie de GaAs.....	19
1.7 Propriétés électriques.....	20
a. Gap d'énergie interdite dans le GaAs.....	20
b. Notion de masse effective .....	21
c. Densité d'état .....	21
d. concentration intrinsèque $n_i$ .....	21
1.7.1 Longueur de diffusion.....	22
1.7.2 Mécanisme de recombinaisons.....	22
1.7.2.1 Recombinaison en volume de type radiatif.....	23
1.7.2.2 Recombinaison en volume de type Auger.....	23
1.7.2.3 Recombinaison en volume de type piège.....	24
1.7.2.4 Recombinaison en surface.....	24
1.8 Propriétés optiques.....	24
1.8.1 Indice de réfraction .....	24
1.8.2 L'absorption.....	25
1.9 Conclusion.....	26
Chapitre 2 : physique de la cellule photovoltaïque.....	27
2.1 Introduction .....	27
2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	27
2.2.1 La jonction PN.....	27
a. A l'équilibre thermodynamique .....	29
b. Hors équilibre thermodynamique .....	30
2.3 Paramètre d'une cellule photovoltaïque.....	31
2.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .....	31
2.3.2 Le courant de court circuit $I_{cc}$ .....	35
2.3.3 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	35
2.3.4 La puissance maximale $P_m$ .....	35

## Table de matières

---

---

2.3.5 Facteur de forme.....	36
2.3.6 Rendement de conversion d'énergie.....	37
2.4 Rendement théorique maximum.....	38
2.5 Facteurs limitant le rendement.....	39
2.5.1 Pertes physiques .....	39
2.5.2 pertes technologiques .....	39
2.6 Conclusion .....	40
Chapitre 3 : simulation et résultats.....	41
3.1 Introduction.....	41
3.2 Irradiation d'un corps noir.....	42
3.3 Absorption.....	42
3.4 Influence de l'épaisseur de la cellule.....	43
3.4.1 Courant de court circuit $J_{CC}$ .....	43
3.4.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	43
3.4.3 Caractéristique $J(V)$ .....	44
3.4.4 Puissance maximale délivrée.....	44
3.4.5 Rendement.....	45
3.5 Influence de la température .....	45
3.5.1 Courant de court circuit $J_{CC}$ .....	45
3.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	46
3.5.3 Caractéristique $J(V)$ .....	46
3.5.4 La puissance maximale délivrée .....	47
3.5.5 Rendement .....	47

## Table de matières

---

3.6 Influence de l'épaisseur de l'émetteur $X_j$ .....	48
3.6.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	48
3.6.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	49
3.6.3 Caractéristique $J(V)$ .....	49
3.6.4 Puissance maximale délivrée .....	50
3.6.5 Rendement .....	51
3.7 Influence de dopage $N_a$ et $N_d$ .....	51
3.7.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	51
3.7.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	52
3.7.3 Caractéristique $J(V)$ .....	53
3.7.4 Puissance maximale délivrée .....	54
3.7.5 Rendement.....	55
3.8 Influence de la durée de vie des porteurs et.....	56
3.8.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	56
3.8.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	57
3.8.3 Caractéristique $J(V)$ .....	58
3.8.4 Puissance maximale délivrée .....	58
3.8.5 Rendement.....	59
3.9 Influence de la vitesse de recombinaisons $S_n$ et $S_p$ .....	60
3.9.1 Courant de court circuit $J_{cc}$ .....	60
3.9.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	60
3.9.3 Caractéristique $J(V)$ .....	61
3.9.4 Puissance maximale délivrée .....	62
3.9.5 Rendement .....	62
3.10 Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Annexes.....	66

## Table de matières

---

Bibliographie .....	68
---------------------	----

## Conclusion générale

---

L'objectif de ce travail est l'étude des effets de la température, de l'épaisseur de l'émetteur, de l'épaisseur de la cellule, du dopage et de la vitesse de recombinaisons sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au GaAs.

Nous avons rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque, le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement et nous avons étudié les caractéristiques cristallines, électriques et optiques du matériau GaAs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la physique des cellules solaires à base des semi-conducteurs III-V afin de connaître leurs propriétés hors et en équilibre. Enfin nous avons abordé les différents facteurs de perte limitant le rendement de conversion.

Dans le dernier chapitre, le programme de la simulation a été utilisé comme un moyen pour prédire les paramètres optimums de la cellule, Le programme de calcul que nous avons élaboré, nous permet d'étudier l'influence de la géométrie de la cellule en l'occurrence, les épaisseurs des deux régions, et les propriétés du matériau à savoir le gap optique et le dopage. Les simulations réalisées dans ce Projet montrent que pour atteindre un rendement optimal de 26.8% il faut :

- Augmenter le dopage de la région P ( $N_a$ )  $2 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- Fixer le dopage de la région N ( $N_d$ )  $2 * 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- Ne pas dépassé l'épaisseur de la cellule  $1,5 \mu\text{m}$ .
- Il faut avoir une vitesse de recombinaisons des porteurs inférieur à  $10^3 \text{ (cm/s)}$
- Il faut avoir des durées de vie des porteurs supérieurs à 20 ns.

### 3.1 Introduction

Dans ce travail nous allons étudier et simulé les caractéristiques électriques de la cellule solaire à homojonction (GaAs) de structure PN. Les performances d'une cellule solaire proviennent de l'étude de toutes les couches formant la cellule solaire. La recherche des meilleurs paramètres de cellules dans les différentes régions offrant les meilleures caractéristiques (I-V) de sortie des cellules fait l'objet de ce chapitre.

A partir des caractéristiques (I-V), on peut déterminer les valeurs des facteurs caractérisant les cellules tels que le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement  $\eta$ . Notre cellule solaire est réalisée à partir du matériau GaAs, ses paramètres sont regroupés dans le tableau 3.1 :

Paramètre de GaAs	Valeurs
Dopage	$N_a, N_d = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Mobilité des électrons	$\mu_n = 8500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$
Mobilité des trous	$\mu_p = 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$
Durée de vie des porteurs	$\tau_n = \tau_p = 10 \text{ ns}$
Coefficient de diffusion des électrons	$D_n = 219.73 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Coefficient de diffusion des trous	$D_p = 10.34 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Longueur de diffusion des électrons	$L_n = 4.68 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$
Longueur de diffusion des trous	$L_p = 1.017 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$
a (nm)	0.56533
$E_g (eV)$	1.42
$m_e (m_0)$	0.067
$m_{hh} (m_0)$	0.45
$N_c (10^{17} \text{ cm}^{-3}) \text{ à } 300^\circ \text{ K}$	4.33
$N_v (10^{18} \text{ cm}^{-3}) \text{ à } 300^\circ \text{ K}$	7.5
Permittivité relative	$\epsilon_r = 12.9$

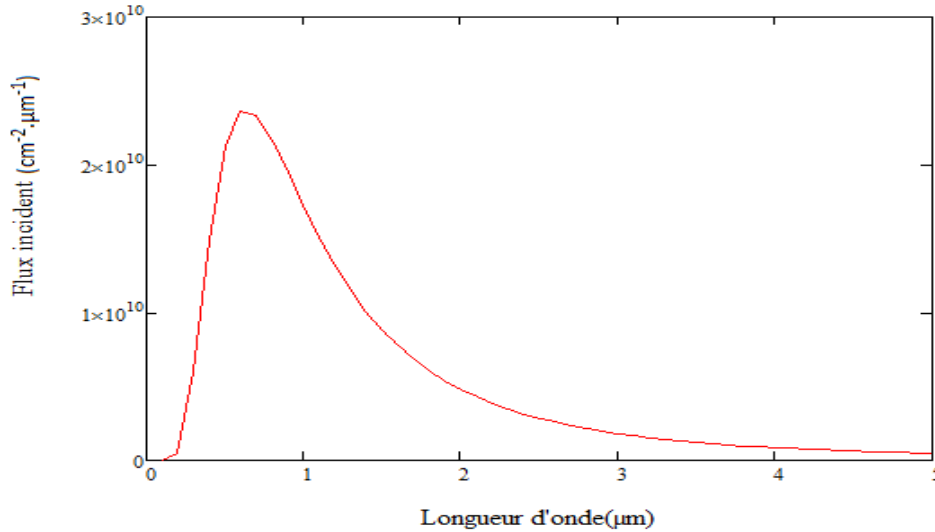
Table A.1 : Paramètres physiques fondamentaux du (GaAs)

### 3.2 Irradiation d'un corps noir

La figure 3.1 représente le flux d'un corps noir pour une température  $T=6000\text{K}$

Ce flux varie avec la longueur d'onde  $\lambda$  et présente un maximum pour  $\lambda=0,8\mu\text{m}$ .

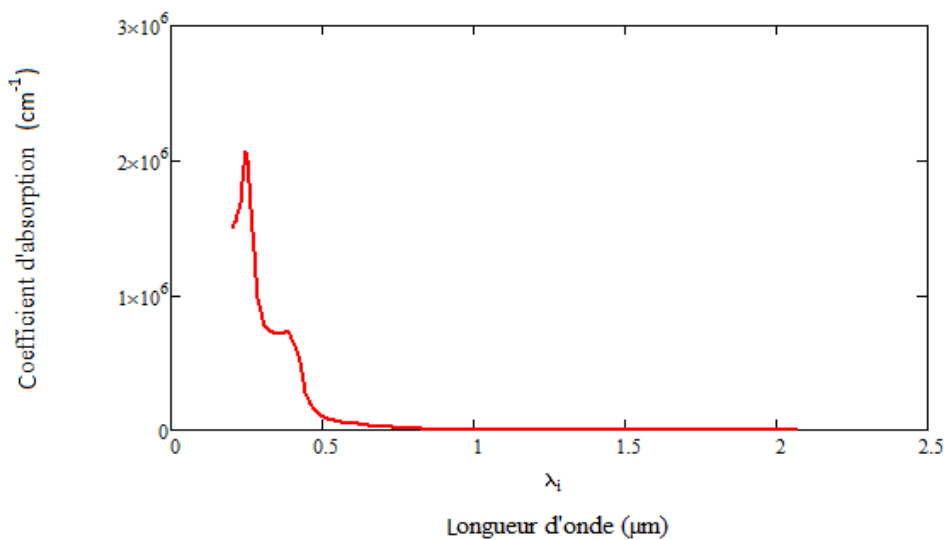
Dans nos simulations nous avons utilisé l'irradiation d'un corps noir à  $T=6000\text{ K}$  qui correspond à l'émission solaire hors atmosphère.



**Figure 3.1** : le flux incident  $F$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  a  $T=6000\text{ }^\circ\text{K}$ .

### 3.3 Absorption

Sur la figure 3.2, nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde. Cette courbe a été tracée à partir de mesures expérimentales de l'indice de réfraction.



**Figure 3.2** variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .



### 3.4 Influence de l'épaisseur de la cellule

#### 3.4.1 Courant de court circuit $J_{CC}$

Dans la figure 3.3, nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le courant de court-circuit  $J_{CC}$ . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une amélioration nette dans la densité de courant de court-circuit, notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à  $3.5 \mu\text{m}$ . Au-delà de  $3.5 \mu\text{m}$ , le courant  $J_{CC}$  devient presque constant.

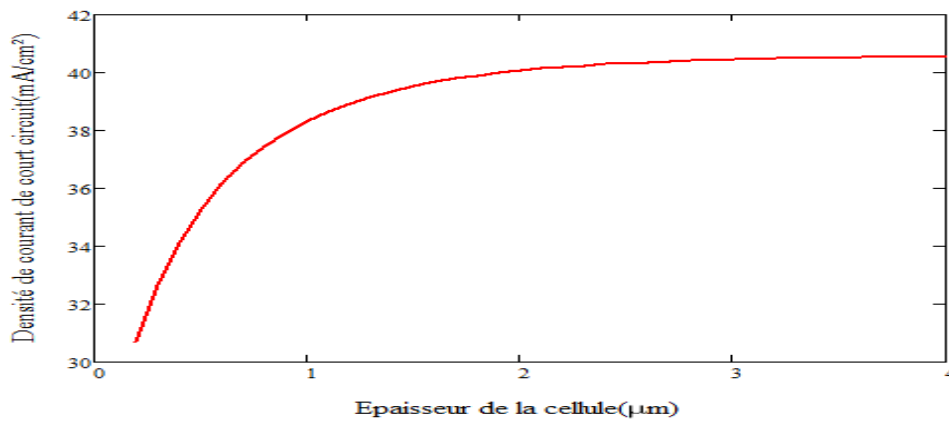


Figure 3.3 variation du courant de court circuit  $J_{CC}$  en fonction de l'épaisseur d.

#### 3.4.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans la figure 3.4 Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la cellule engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à  $1.6 \mu\text{m}$ . Au-delà de  $1.6 \mu\text{m}$ , la tension  $V_{co}$  reste constante.

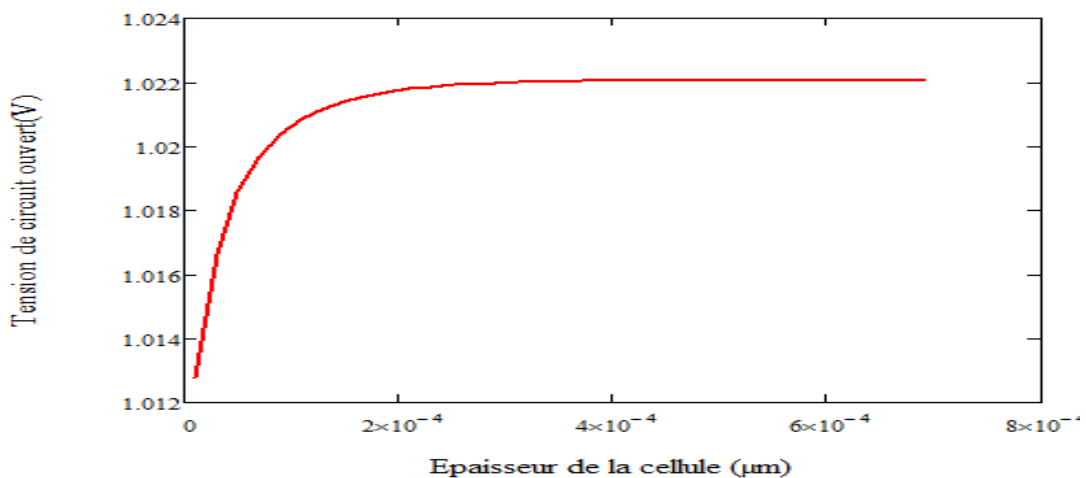
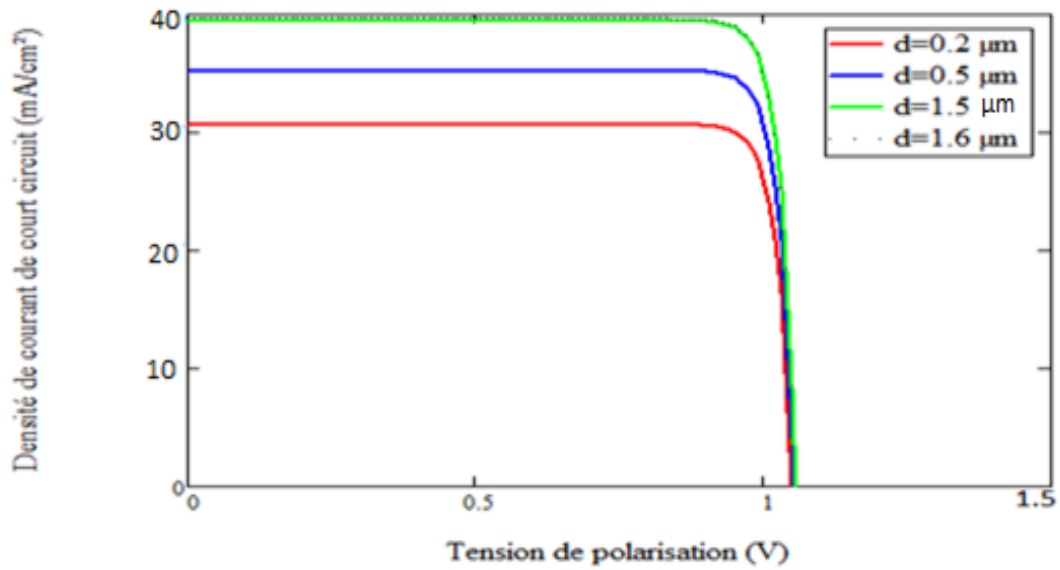


Figure 3.4 variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur d.

### 3.4.3 Caractéristique J(V)

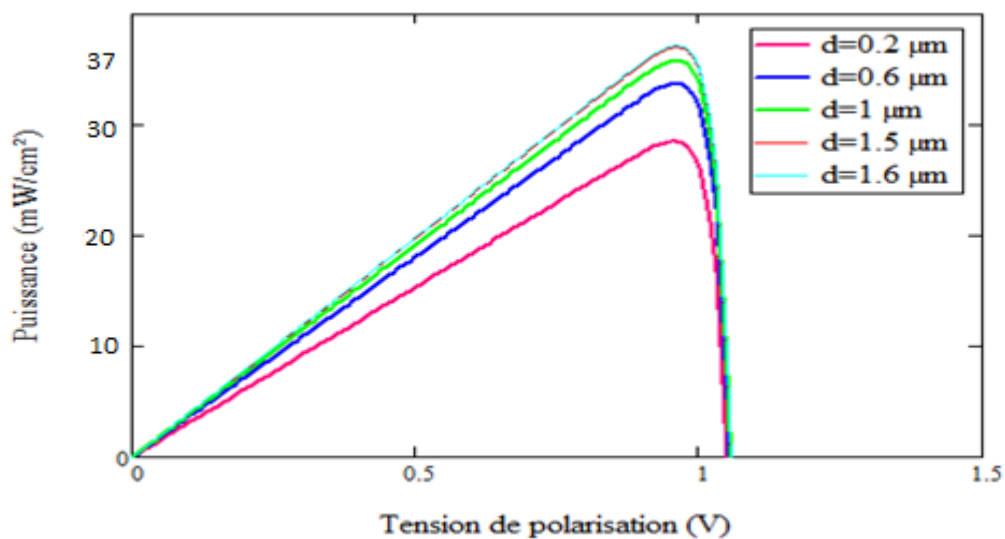


**Figure 3.5 :** Caractéristiques courant-tension de la structure *GaAs* pour différentes épaisseurs.

Sur la figure (3.5) sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différents épaisseurs. On remarque que lorsque on augmente l'épaisseur  $d$ , la tension  $V_{co}$  varie très peu alors que le courant de court circuit  $J_{cc}$  augmente jusqu'à  $d=1.6 \mu\text{m}$  et ensuite il sature.

### 3.4.4 Puissance maximale délivrée

Sur la figure (3.6) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs  $d$ . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .



**Figure 3.6 :** puissance délivrée par la cellule *GaAs* pour plusieurs épaisseurs de la structure.

La puissance maximale atteint sa valeur optimale pour une épaisseur (d) de l'ordre de  $1.5\mu\text{m}$

### 3.4.5 Rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 3.7 qui montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de l'épaisseur. Nous remarquons une amélioration nette du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à la valeur  $1.5\mu\text{m}$ . Le rendement atteint une valeur maximale de 26.8% pour une épaisseur d égale  $1.5\mu\text{m}$ . après il reste constante.

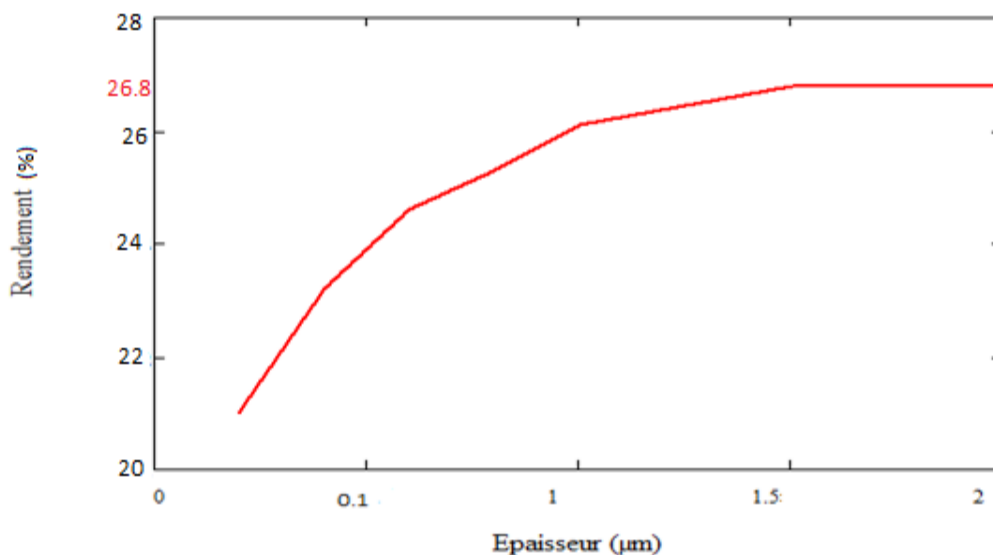
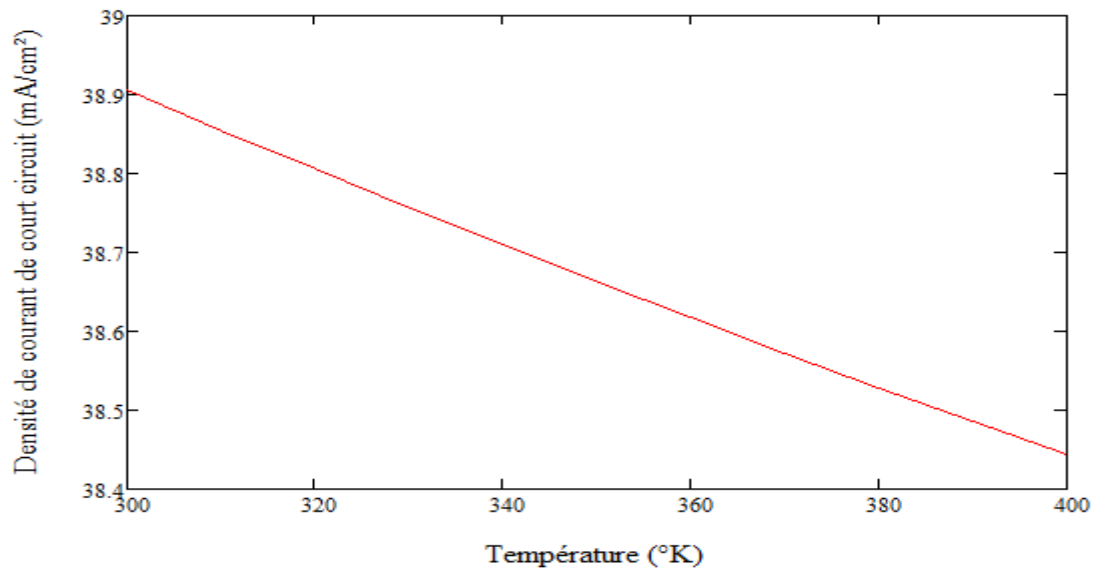


Figure 3.7 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de l'épaisseur.

## 3.5 Influence de la température

### 3.5.1 Courant de court circuit $J_{CC}$

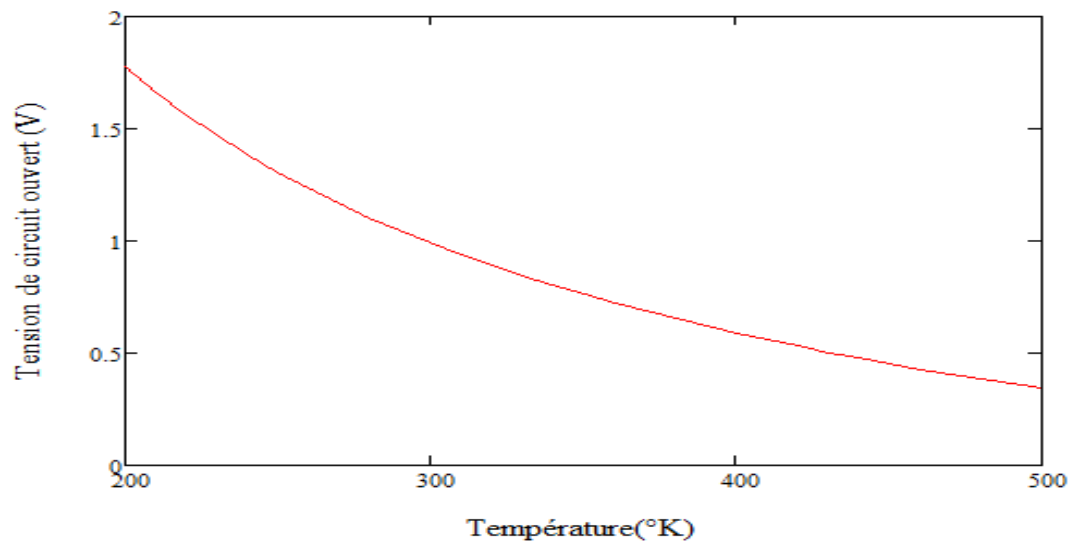
Le Figure 3.8 représente la réaction de la cellule à la variation de la température, On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit



**Figure 3.8** variation du courant de court circuit  $J_{cc}$  en fonction de la température.

### 3.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans la figure 3.9 nous remarquons que l'augmentation de la température de la cellule engendre une baisse importante de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , due à la concentration intrinsèque  $n_i$  et par suite du courant de saturation  $J_0$  voir l'équation (2.23).

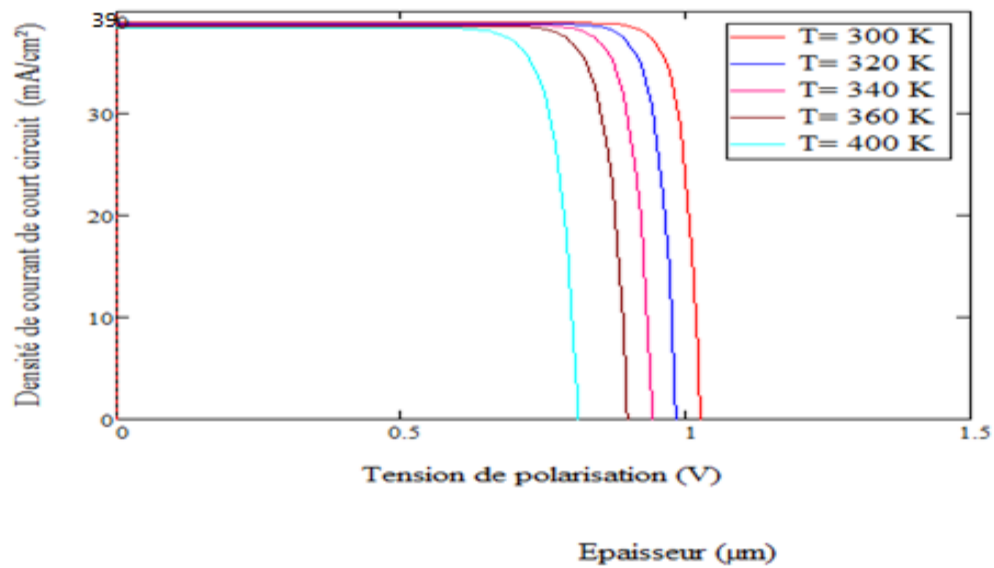


**Figure 3.9** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la température.

### 3.5.3 Caractéristique $J(V)$

La Figure 3.10 représente la variation de la caractéristique  $J(V)$  avec la température, On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court

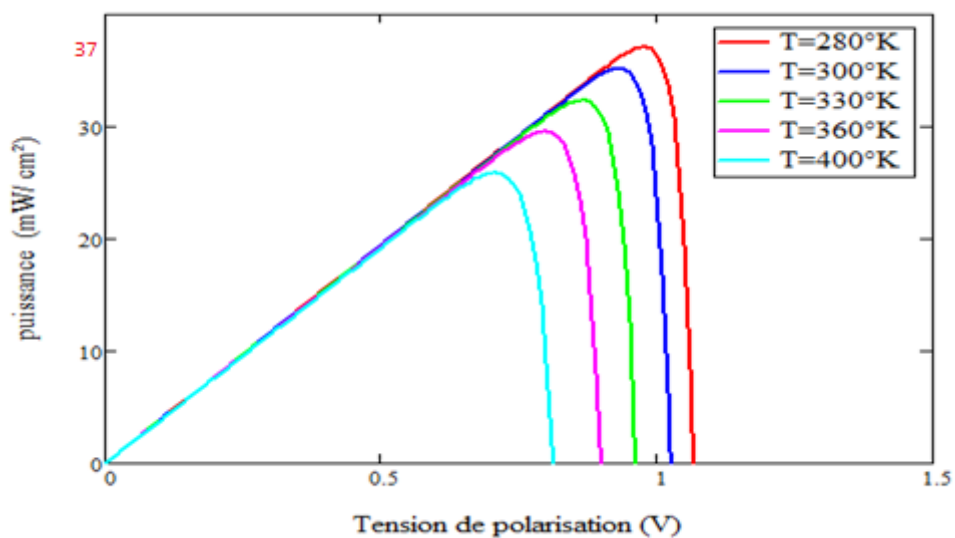
circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert diminue fortement lorsque la température augmente.



**Figure 3.10** Caractéristique courant-tension de la structure *GaAs* pour différentes température.

### 3.5.4 La puissance maximale délivrée

Sur la figure 3.11 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes températures. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{\max}$ .



**Figure 3.11** : puissance délivrée par la cellule *GaAs* en fonction de *V* pour plusieurs Températures.

### 3.5.5 Rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 3.12 qui montre la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction de la température. Nous remarquons une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la température. Le rendement varie de 28.8% à 18.8% lorsque la température varie de 280 à 400°K.

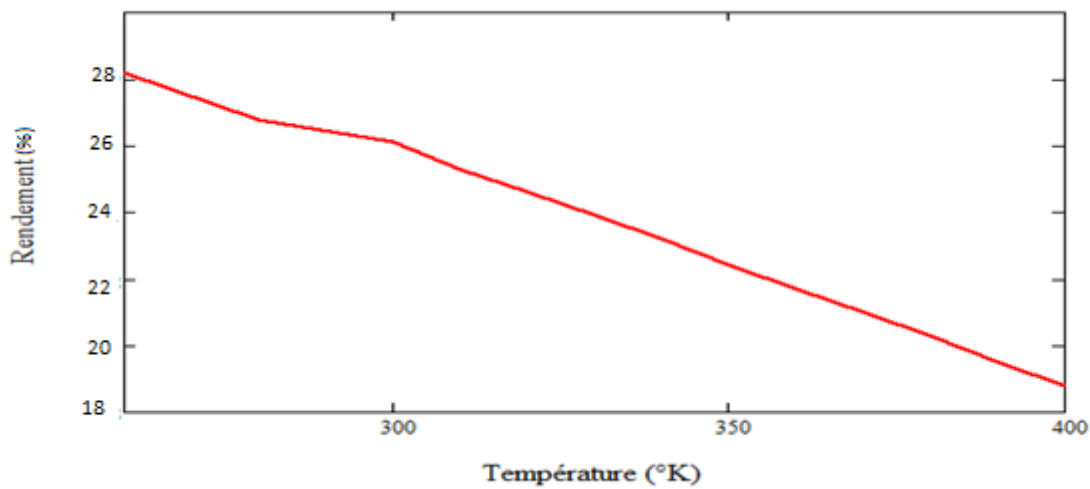
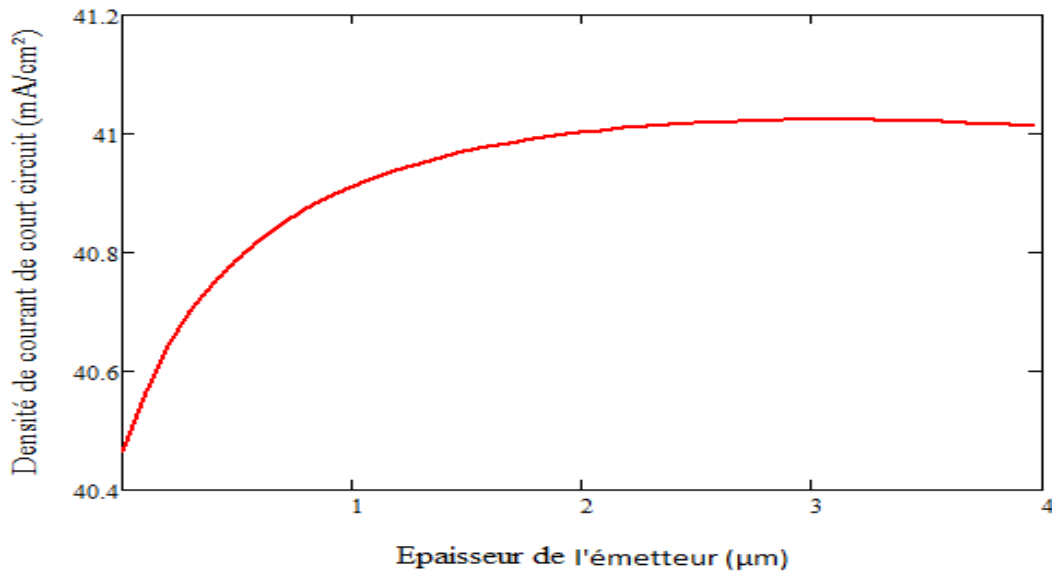


Figure 3.12 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de la température.

## 3.6 Influence de l'épaisseur de l'émetteur $X_j$

### 3.6.1 Courant de court circuit $J_{cc}$

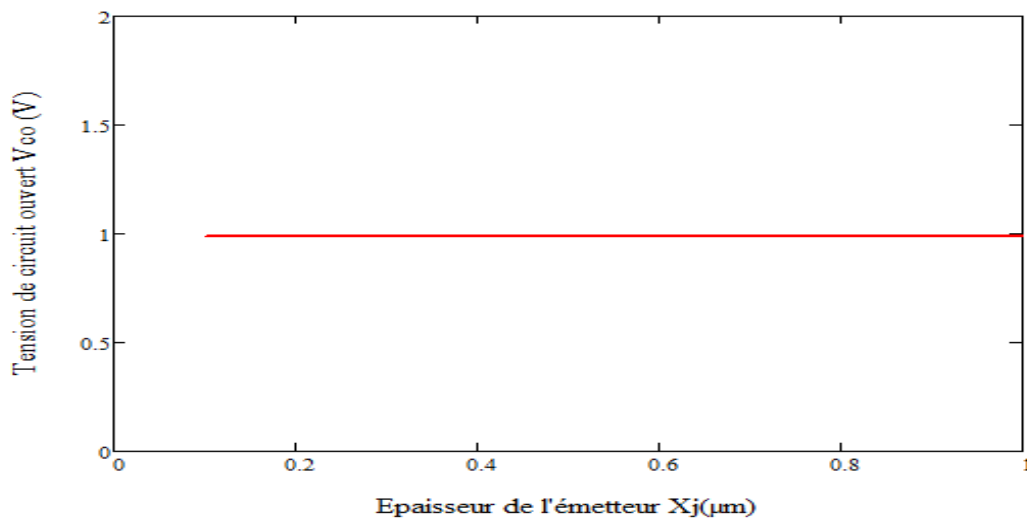
Sur la figure 3.13, nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court-circuit  $J_{ph}$ . Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur  $X_j$  de la cellule engendre une faible amélioration dans la densité de courant de court-circuit, notamment pour les épaisseurs inférieures ou égales à 3  $\mu\text{m}$ . Au-delà de 3  $\mu\text{m}$ , le courant  $J_{cc}$  devient presque constant.



**Figure 3.13** variation du courant de court circuit  $J_{CC}$  en fonction de l'épaisseur de l'émetteur  $X_j$

### 3.6.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

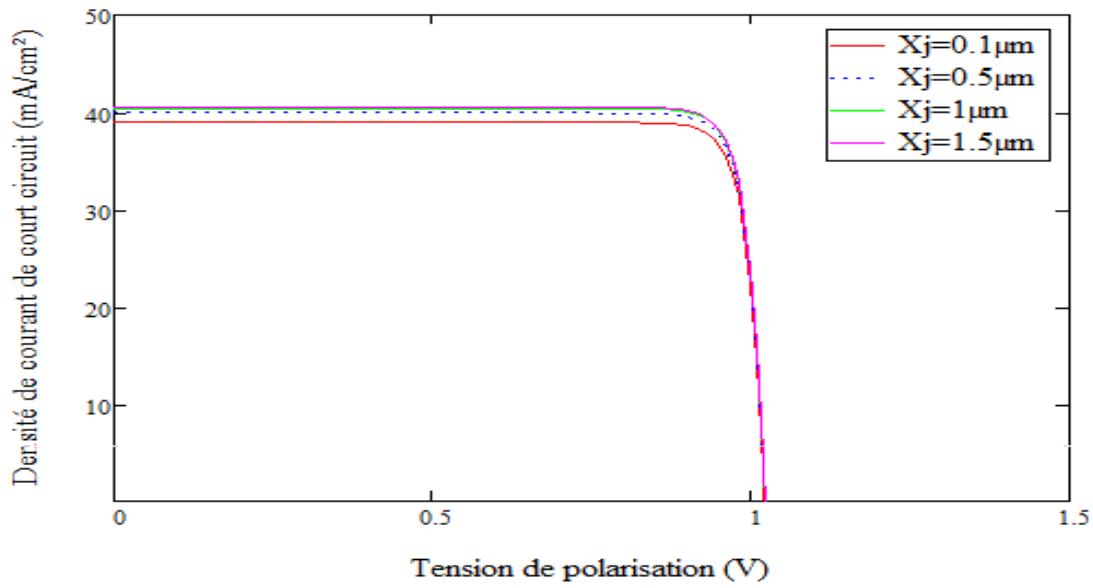
Dans la figure 3.14 Nous remarquons que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur  $X_j$  engendre une très faible augmentation du tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .



**Figure 3.14** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur de l'émetteur  $X_j$ .

### 3.6.3 Caractéristique $J(V)$

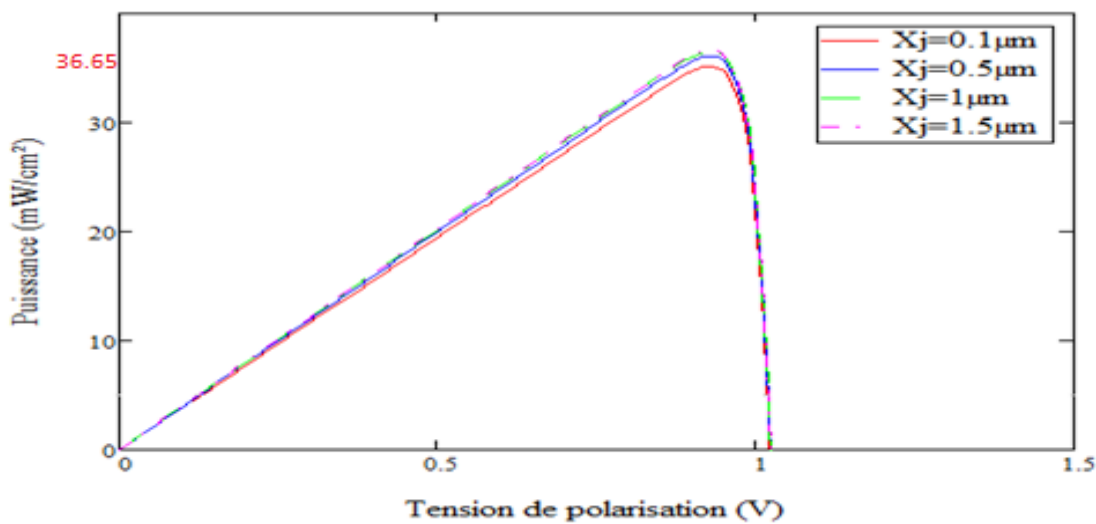
Sur la figure 3.15 sont représentés les caractéristiques courant-tension pour différentes épaisseur de l'émetteur  $X_j$  On remarque que le courant de court-circuit  $I_{CC}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varient très légèrement.



**Figure 3.15** Caractéristiques courant-tension de la structure *GaAs* pour différentes épaisseurs de l'émetteur  $X_j$ .

### 3.6.4 Puissance maximale délivrée

Sur la figure 3.16 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs d'émetteur  $X_j$ .  $P_{\max}$  varie très peu.



**Figure 3.16** puissance délivrée par la cellule *GaAs* en fonction de  $V$  pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de l'émetteur.



### 3.6.5 Rendement

Nous remarquons une faible croissance du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à  $0.7\mu\text{m}$  au delà de cette valeur le rendement reste constante.

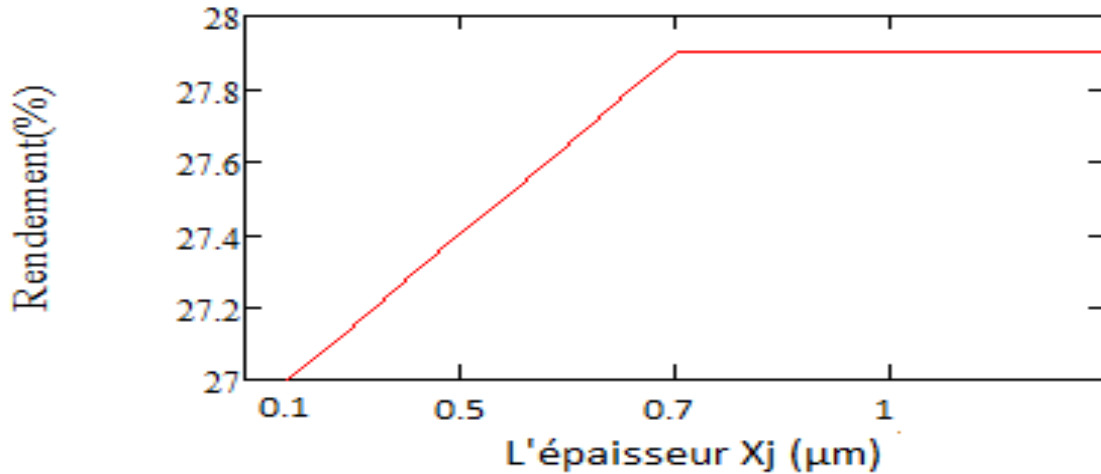


Figure 3.17 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de l'épaisseur  $X_j$ .

## 3.7 Influence de dopage $N_a$ et $N_d$

### 3.7.1 Courant de court circuit $J_{cc}$

Pour étudier l'influence des dopages, nous avons fixé un dopage à  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et nous avons fait varier l'autre de  $1 \cdot 10^{17}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  comme indiqué sur les figures 3.18 et 3.19.

On remarque que le courant de court-circuit  $J_{CC}$  décroît très légèrement avec l'augmentation des dopages  $N_a$  et  $N_d$ .

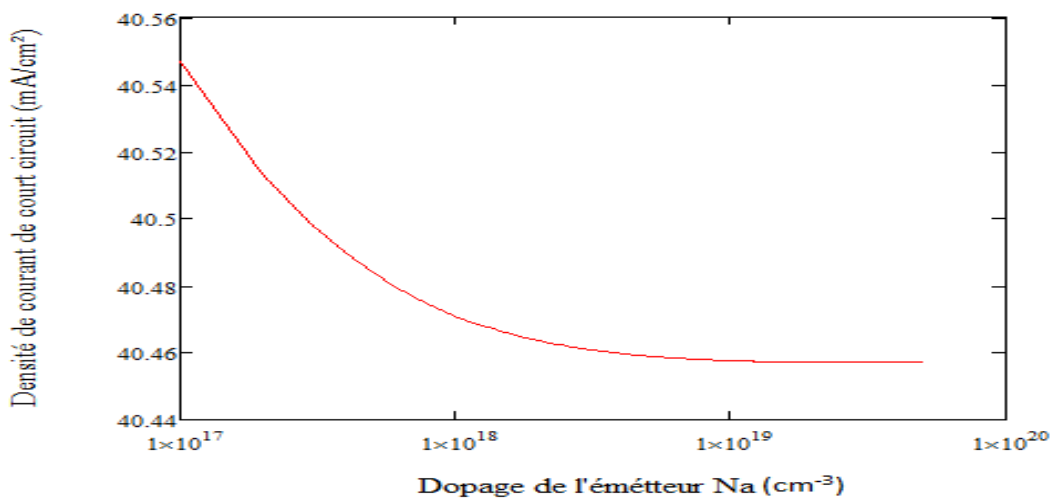
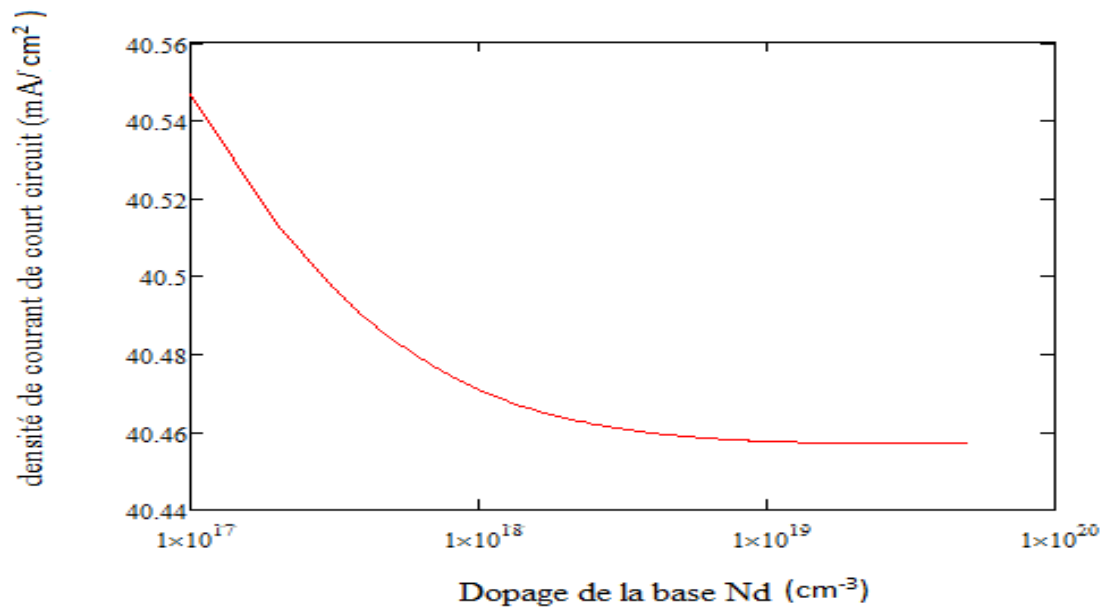


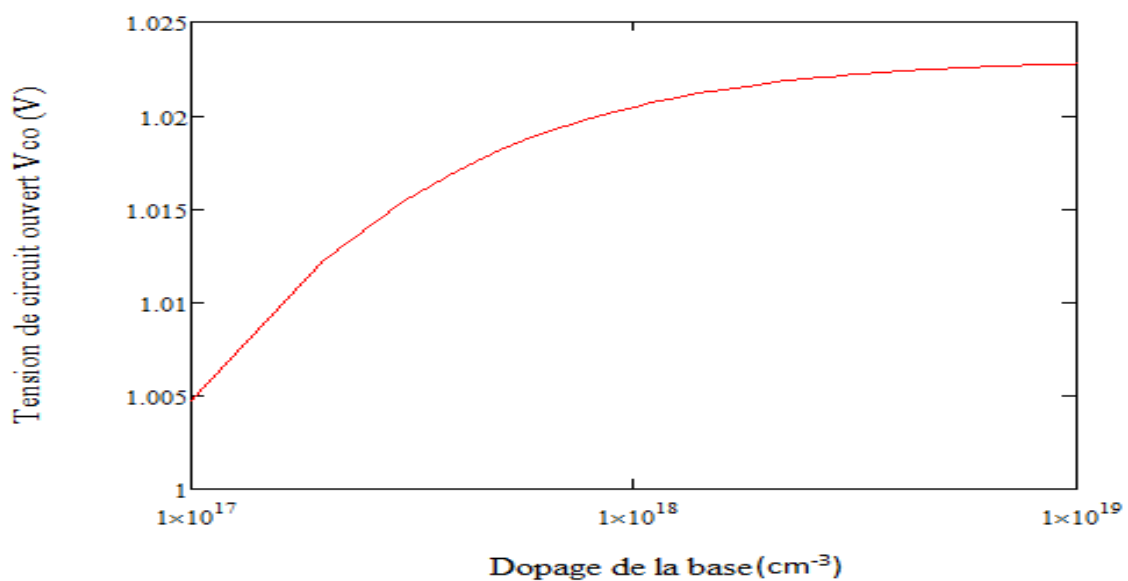
Figure 3.18 variation du courant de court circuit  $J_{CC}$  en fonction de dopage de l'émetteur  $N_a$



**Figure 3.19** variation du courant de court circuit  $J_{cc}$  en fonction de dopage de la base  $N_d$

### 3.7.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Sur les figures 3.20 et 3.21, nous avons reporté l'influence des dopages  $N_a$ ,  $N_d$  sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , nous constatons que l'augmentation des dopages engendre une faible augmentation de la tension de circuit ouvert.



**Figure 3.20** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction du dopage  $N_d$

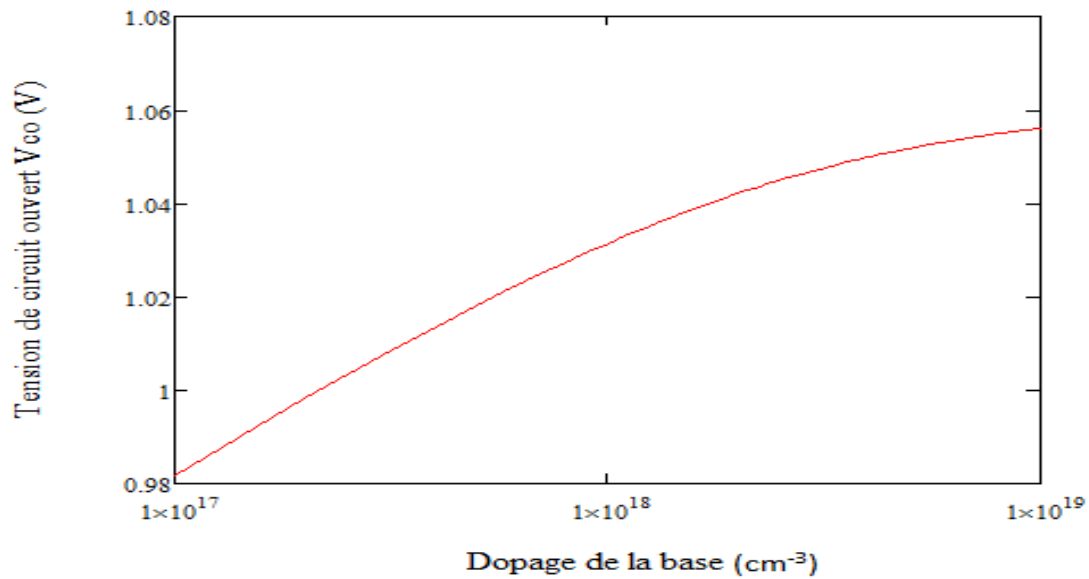


Figure 3.21 variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction du dopage  $N_a$

### 3.7.3 Caractéristique J(V)

Sur les figures 3.22 et 3.23 sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes dopage  $N_a$  et  $N_d$  respectivement. On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varient légèrement en sens inverse,  $I_{cc}$  diminue avec le dopage alors que  $V_{co}$  augmente avec le dopage.

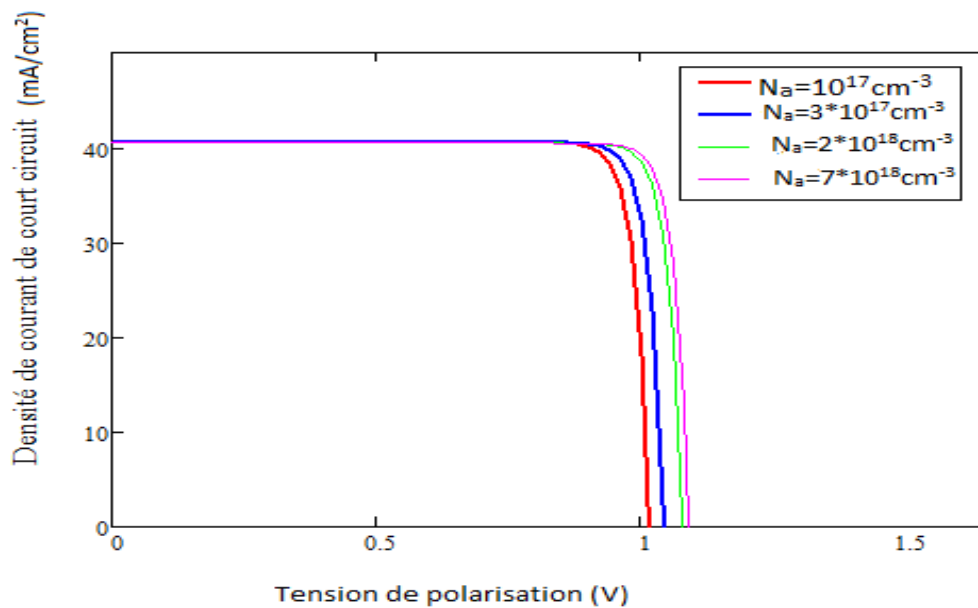


Figure 3.22 Caractéristique courant-tension de la structure *GaAs* pour différents dopages  $N_a$

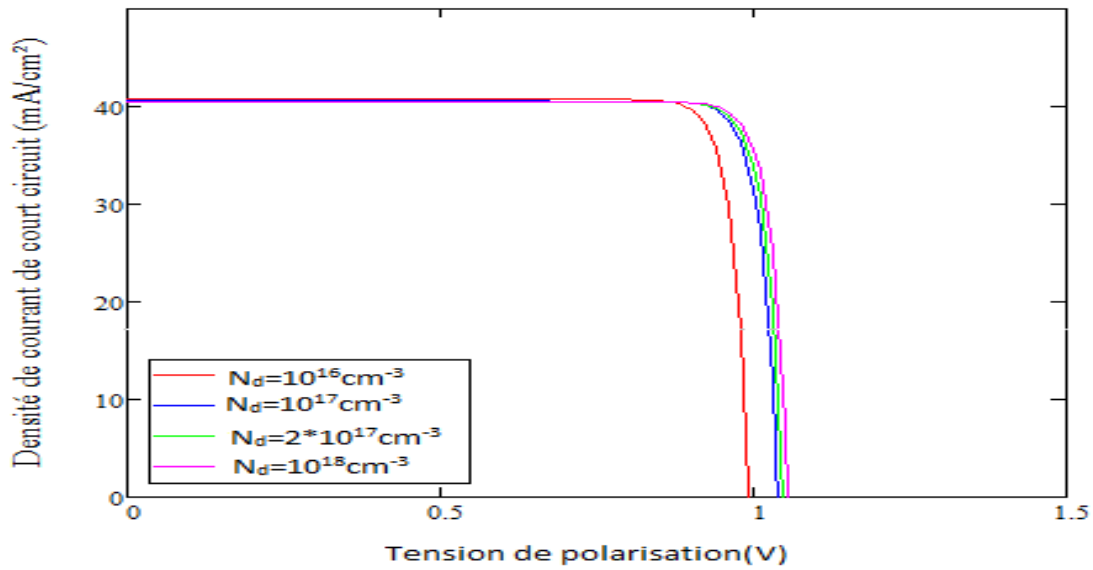


Figure 3.23 Caractéristique courant-tension de la structure *GaAs* pour différent dopages  $N_d$

### 3.7.4 Puissance maximale délivrée

Sur la figure 3.24 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes dopages  $N_a$  et  $N_d$ . Ces courbes présentent des maximums correspondant aux puissances maximales  $P_{max}$

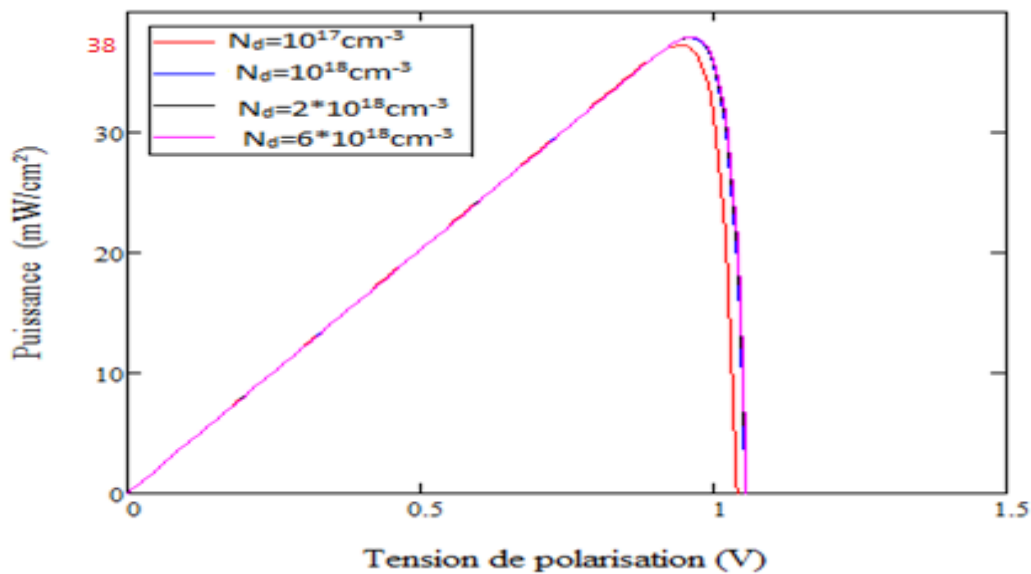
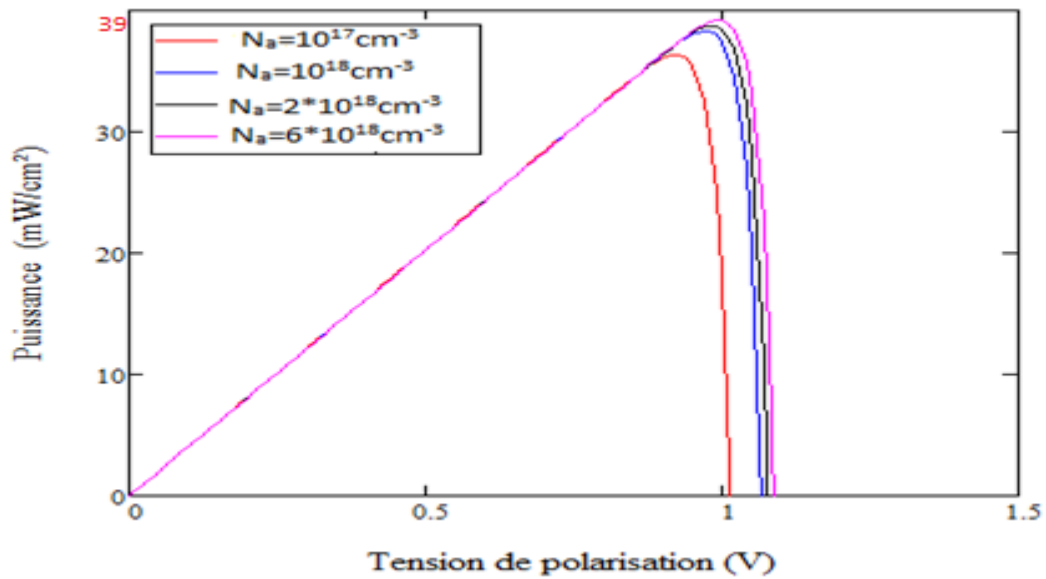


Figure 3.24 puissance délivrée par la cellule *GaAs* en fonction de  $V$  pour plusieurs valeurs de dopage  $N_d$



**Figure 3.25** puissance délivrée par la cellule GaAs en fonction de V pour plusieurs valeurs de dopage  $N_a$

### 3.7.5 Rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 3.26 qui montre la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des dopages  $N_a$  et  $N_d$ . Nous remarquons une augmentation du rendement avec l'augmentation de la concentration de dopage. Le rendement atteint une valeur maximale de 26.8% pour une concentration de  $N_a$  égale  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour le  $N_d$ .

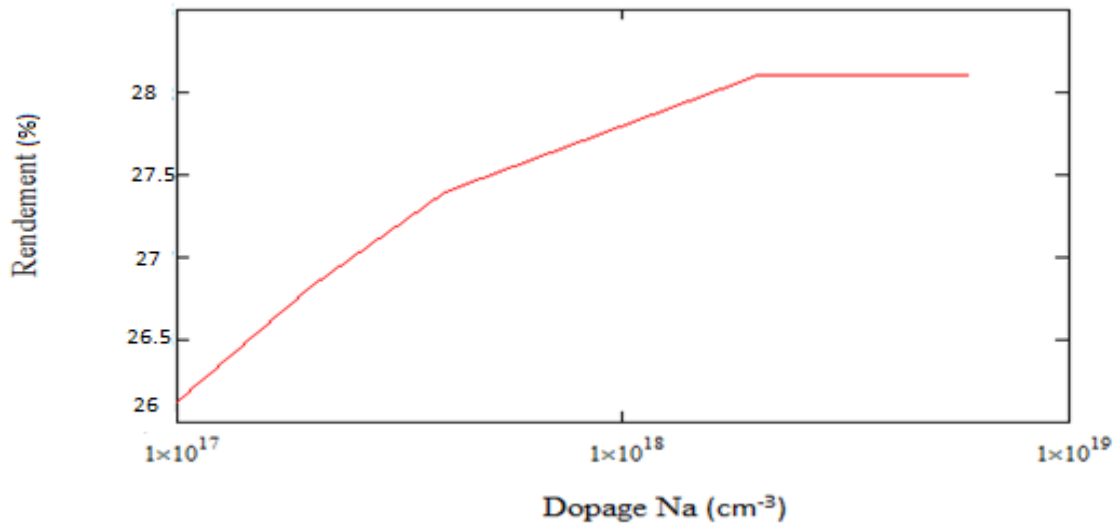


Figure 3.26 Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction du dopage Na.

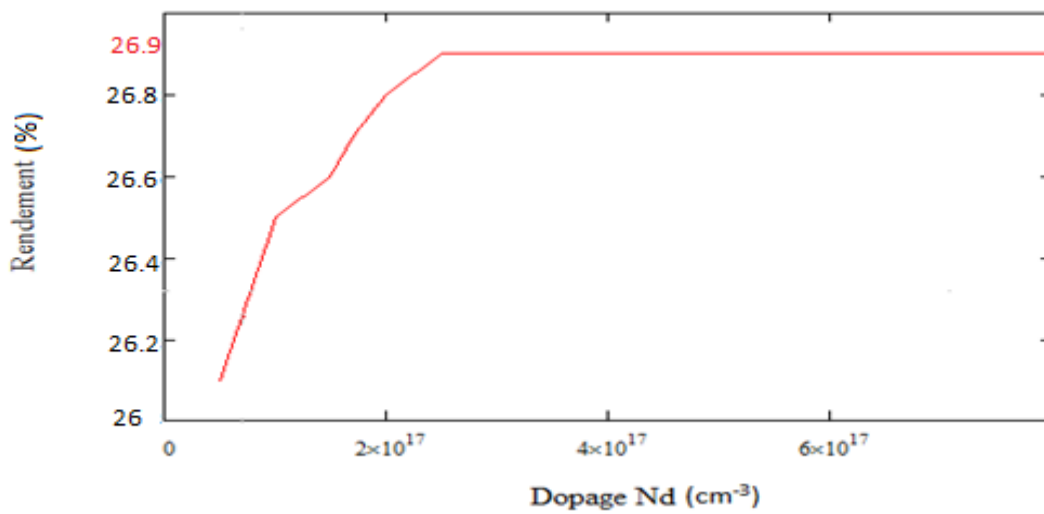


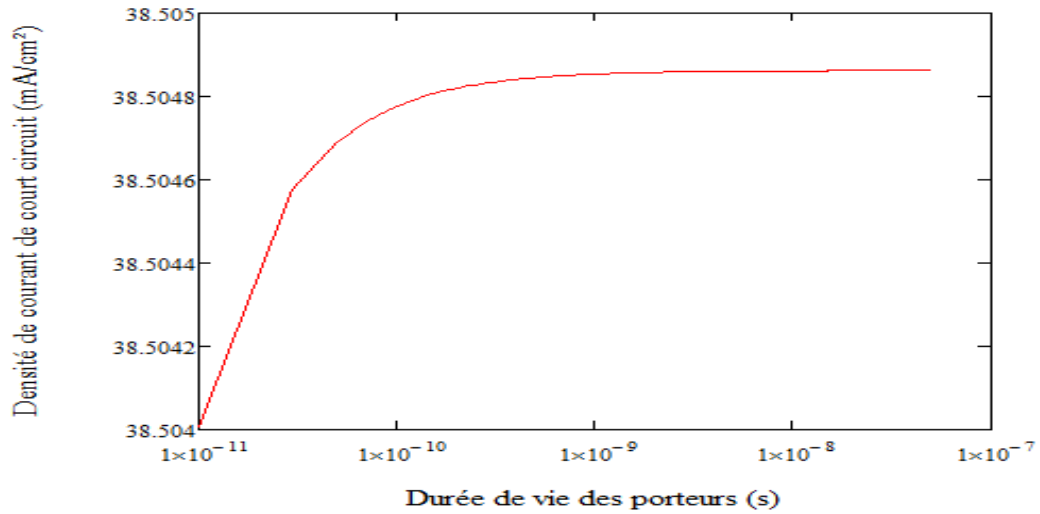
Figure 3.27 Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction du dopage Nd.

### 3.8 Influence de la durée de vie des porteurs $\tau_n$ et $\tau_p$ ( $\tau_n = \tau_p$ )

#### 3.8.1 Courant de court circuit $J_{cc}$

Dans la figure 3.28 nous avons reporté l'influence de la durée de vie des porteurs  $\tau_{n,p}$  sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$ . Nous remarquons que l'augmentation de la durée de vie des porteurs  $\tau_{n,p}$  engendre une légère amélioration dans la densité du courant de court-circuit,

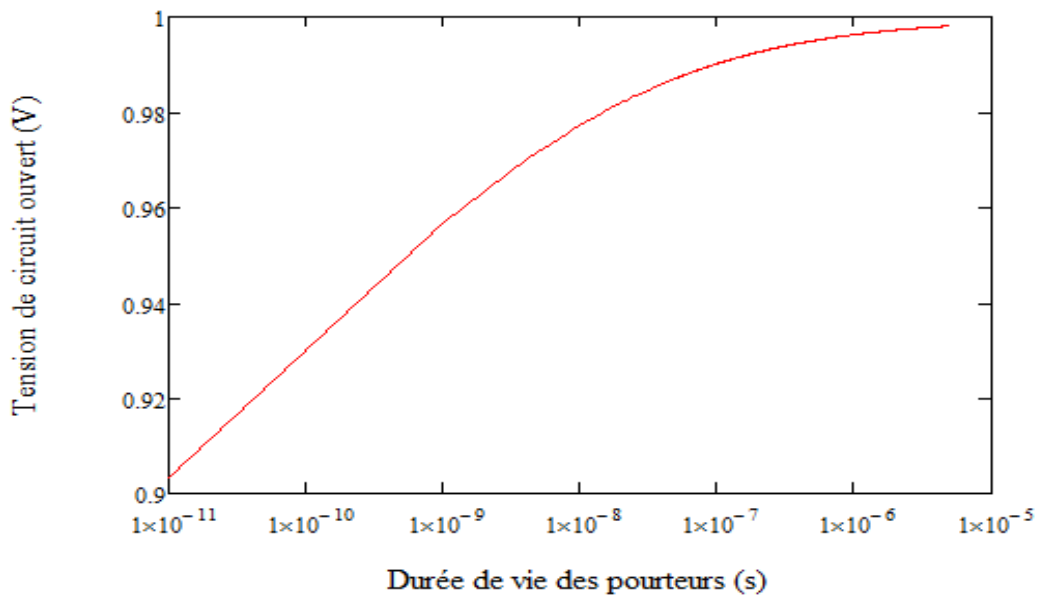
notamment pour les valeurs inférieures ou égales à 25 ns. Au-delà de 25 ns, le courant  $J_{ph}$  devient presque constant.



**Figure 3.28** variation du courant de court circuit  $J_{ph}$  en fonction de la durée de vie des porteurs  $\tau_{n,p}$

### 3.8.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans la figure 3.29, nous avons reporté l'influence de la durée de vie des porteurs  $\tau_{n,p}$  sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , nous constatons que l'augmentation de  $\tau_{n,p}$  engendre une faible amélioration dans la tension en circuit ouvert.



**Figure 3.29** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la durée de vie des porteurs  $\tau_{n,p}$

### 3.8.3 Caractéristique J(V)

Sur la figure 3.30 sont représentés les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de  $\tau_n, \tau_p$ . On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmentent légèrement lorsque les durée de vie augmentent.

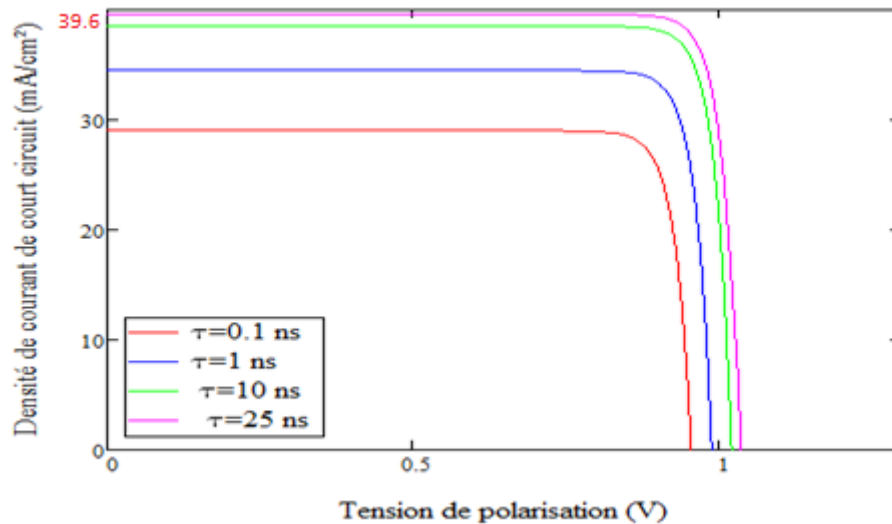
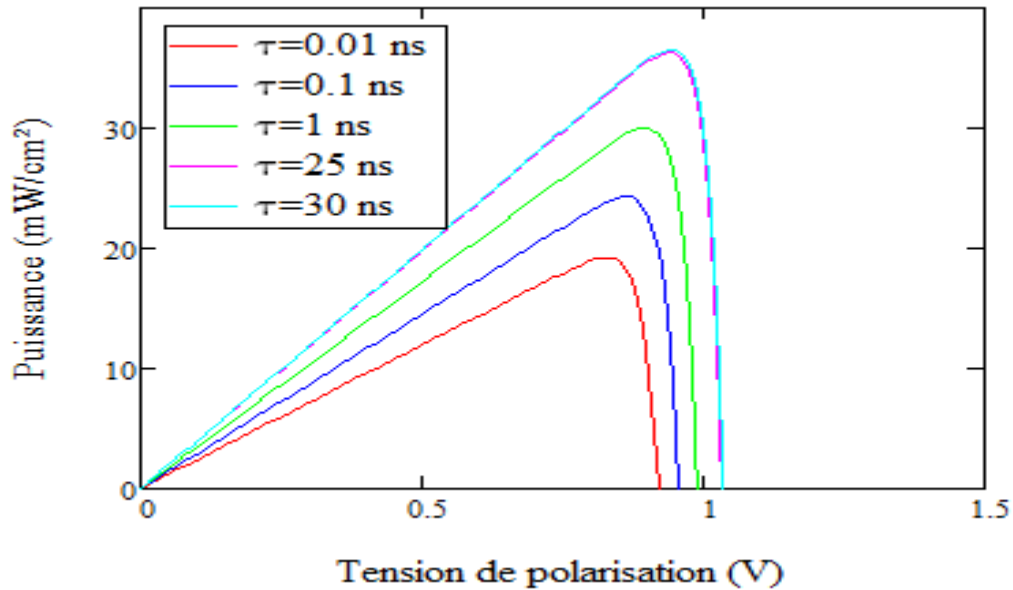


Figure 3.30 Caractéristiques courant-tension de la structure *GaAs* pour différentes valeurs de  $\tau_n, \tau_p$

### 3.8.4 Puissance maximale délivrée

Sur la figure 3.31 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation  $V$  pour différentes valeurs des durées de vie  $\tau_n, \tau_p$ . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .

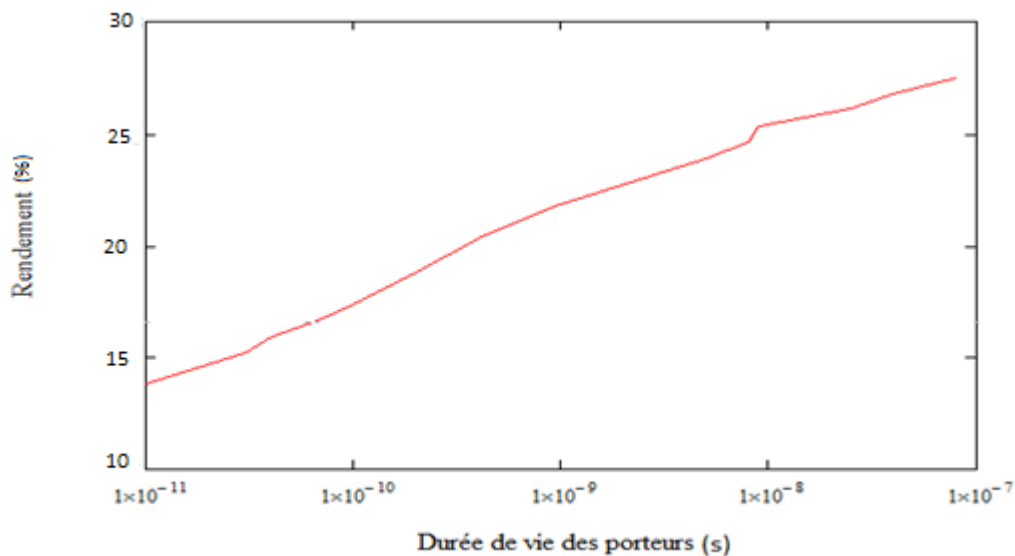




**Figure 3.31** puissances délivrées par la cellule GaAs en fonction de V pour plusieurs valeurs de durée de vie  $\tau_n, \tau_p$

### 3.8.5 Rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 3.32 qui montre la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des durées de vie. Nous remarquons une augmentation du rendement avec l'augmentation de la durée de vie.

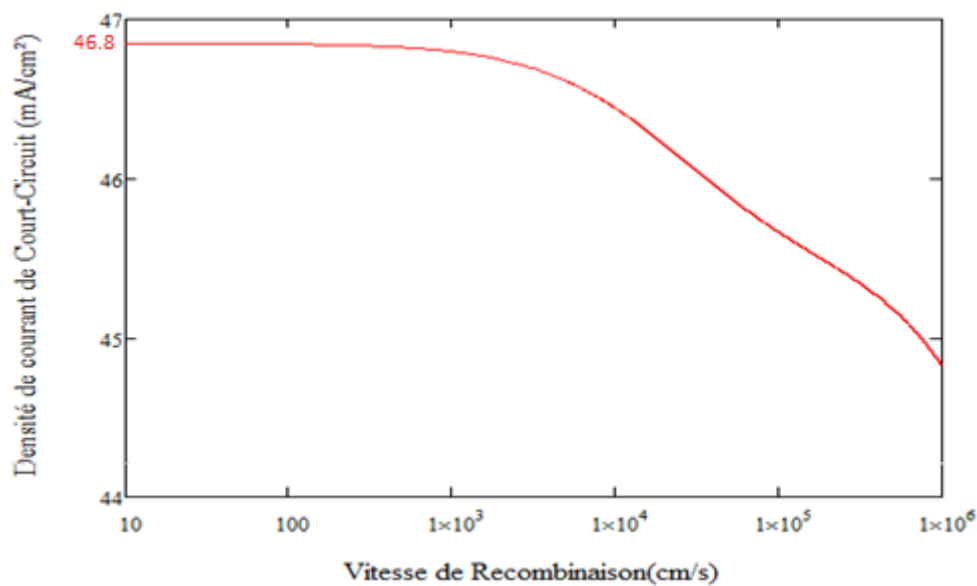


**Figure 3.32** Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction des durées de vie  $\tau_n, \tau_p$

### 3.9 Influence de la vitesse de recombinaisons $S_n$ et $S_p$ ( $S_n=S_p$ )

#### 3.9.1 Courant de court circuit $J_{cc}$

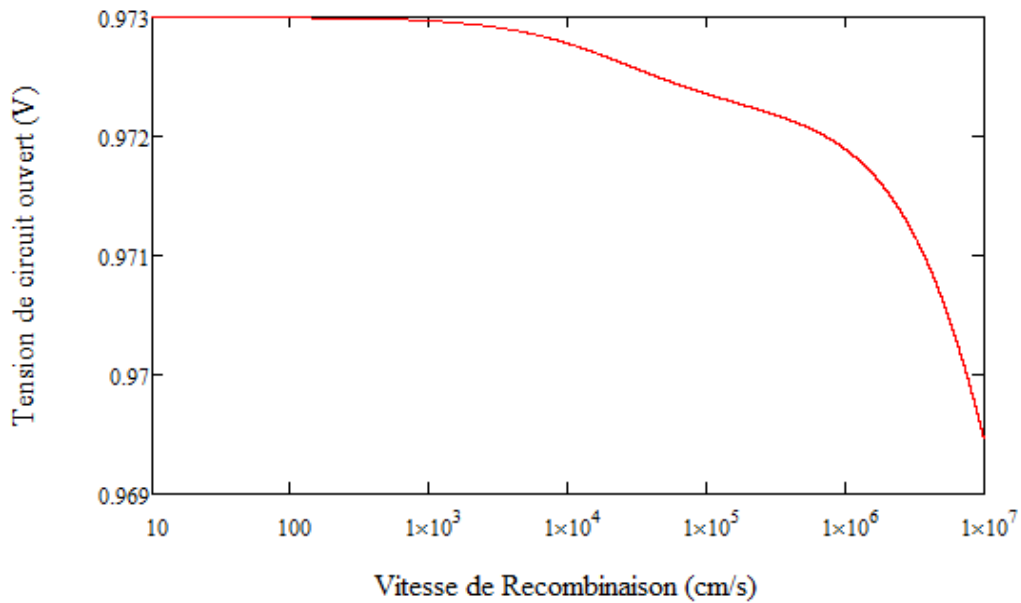
Dans la figure 3.33, nous avons reporté l'influence des vitesses de recombinaisons  $S_n$  et  $S_p$  sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$ . Nous constatons que pour une augmentation de la vitesse de recombinaisons de 0 à  $10^4$ cm/s, le courant de court circuit reste constante. Au delà cette valeur il ya une atténuation nette dans la densité du courant de court-circuit.



**Figure 3.33** variation du courant de court circuit  $J_{cc}$  en fonction des vitesses de recombinaisons.

#### 3.9.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

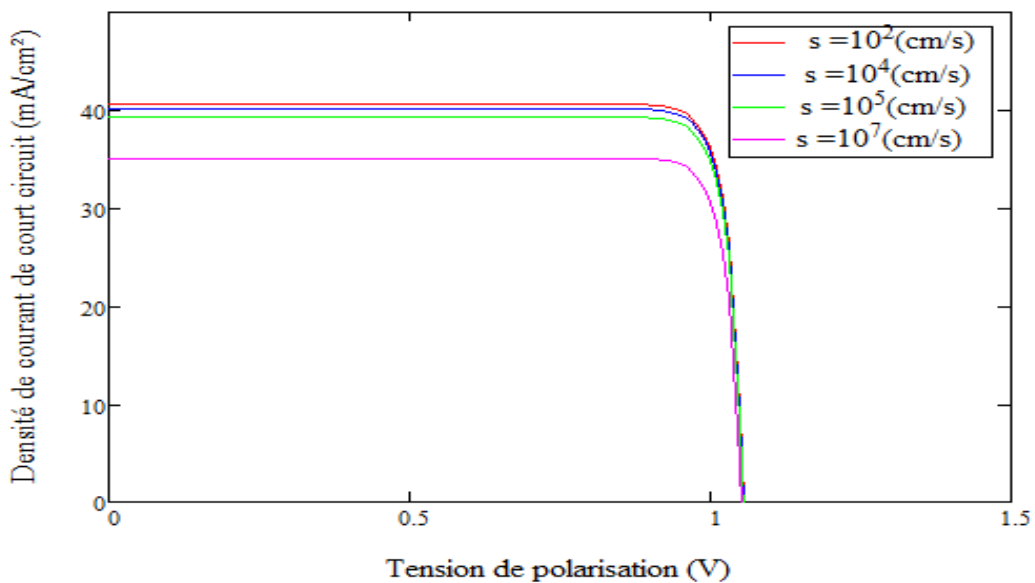
Dans la figure 3.34, nous avons reporté l'influence de la vitesse de recombinaisons  $S_n$  et  $S_p$  sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . Nous constatons que pour une augmentation de la vitesse de recombinaisons de 0 à  $10^5$ cm/s, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  reste constante. Au delà cette valeur il ya une légère atténuation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .



**Figure 3.34** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction des vitesses de recombinaisons

### 3.9.3 Caractéristique J(V)

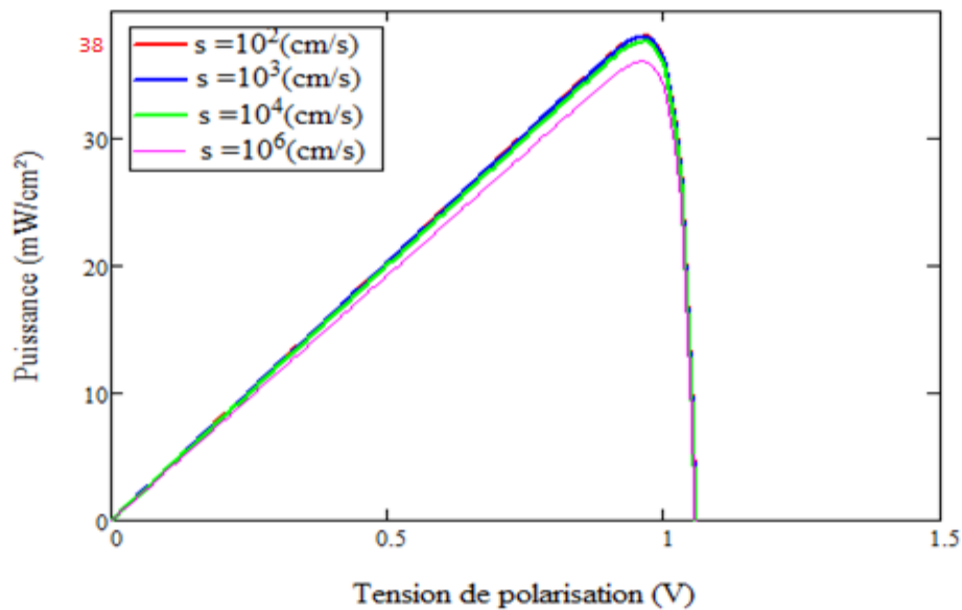
Sur la figure 3.35 sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de  $S_n$  et  $S_p$ . On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  diminue légèrement alors que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  reste pratiquement constante lorsque la vitesse de recombinaisons augmente.



**Figure 3.35** Caractéristiques courant-tension de la structure *GaAs* pour différentes valeurs de  $S_n, S_p$ .

### 3.9.4 Puissance maximale délivrée

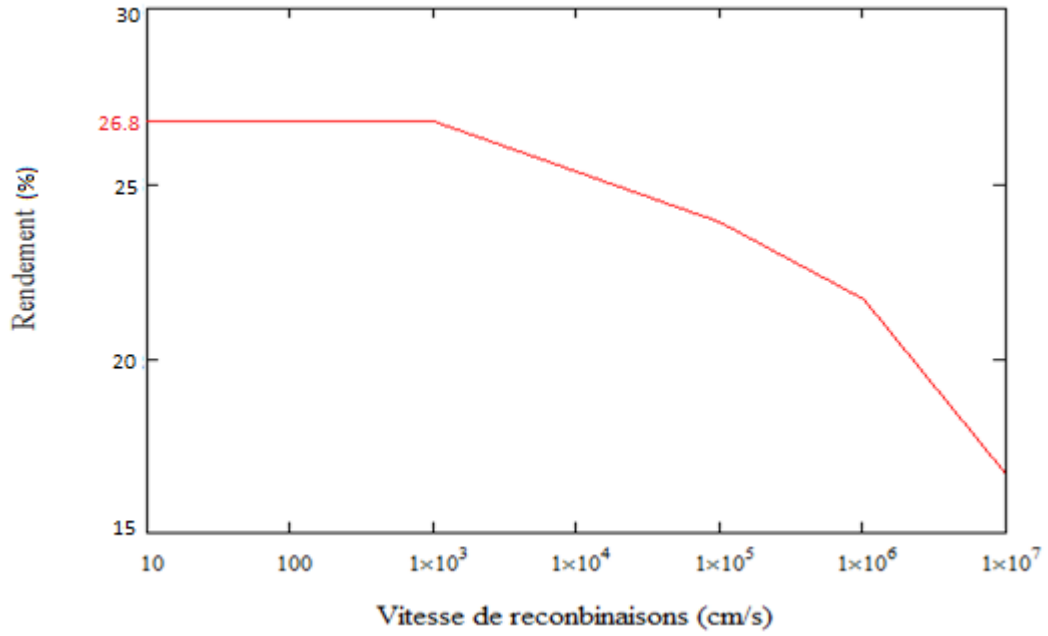
Sur la figure 3.36 sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension de polarisation pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaisons  $S_n$  et  $S_p$ . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .



**Figure 3.36** puissances délivrées par la cellule GaAs en fonction de  $V$  pour plusieurs valeurs de la vitesse de recombinaisons  $S_n, S_p$

### 3.9.5 Rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 3.37 qui montre la variation du rendement de conversion de la structure étudiée en fonction des vitesses de recombinaisons  $S_n = S_p$ . Nous remarquons une stabilité du rendement jusqu'à  $S_n = S_p = 10^3 \text{ cm/s}$ , après une atténuation rapide du rendement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaisons. Le rendement atteint une valeur maximale de 26.8% pour une vitesse nulle de  $S_n = S_p$ .



**Figure 3.37** Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction des vitesses de recombinaisons  $S_n$  et  $S_p$ .

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé une cellule solaire à base de GaAs, ayant une structure P-N.

Nous nous sommes intéressés à la présentation et à l'analyse des résultats du modèle que nous avons adopté. Nous avons représenté le courant de court circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la caractéristique  $I(V)$ , la caractéristique  $P(V)$  et le rendement  $\eta$  utilisant un programme de simulation.

Nous avons relevé 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

La variation de l'épaisseur de la cellule de 0,5 à 1,5  $\mu\text{m}$  a entraîné une augmentation du rendement de la cellule de 2,9% (de 23,9 à 26,8%).

La variation de l'épaisseur de l'émetteur  $X_j$  n'influe pas sur le rendement de la cellule.

L'augmentation de la vitesse de recombinaisons, plus que  $10^3$ , cm/s induit une diminution du rendement de conversion de la cellule.

L'augmentation de la durée de vie des porteurs induit une croissance du rendement de conversion de la cellule.

Nous avons obtenu une valeur optimale du rendement (26,8%) pour la concentration de dopage  $N_a$  égale  $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$  et  $N_d$  égale  $2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$

L'augmentation de la température de 260K à 400K engendre une diminution rapide du rendement de 28,2% à 18,8%.

## Bibliographie

---

- [1] Bailly., "Cellules Photovoltaïques Organiques", thèse l'Université Bordeaux, (03 septembre 2010).
- [2] Bouraoui, A., "Elaboration et Caractérisation des Couches minces CuInSe<sub>2</sub> par Electrodeposition", thèse Université Mentouri, Constantine (08/10/2009).
- [3] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1<sup>ère</sup> édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [4] M.Orgeret, « les piles solaires le composant et ses applications ». Masson, 1985.
- [5] A. Auger J-A.Roger, «les photopiles solaires». Editeur : technique et documentation, 1981.
- [6] M .Slema Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de magister, université de Setif.
- [7] R Sekuler: Perception, New York, 1985.
- [8] S.R Wenham, M.A Green, M.E Watt Corkish: APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition, page 04, 2007.
- [9] M.A Green: Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 65, 9, 2001.
- [10] C. FKlingshirn: Energy Materials and Solar Cells, 2001.
- [11] M.A Green: Solar Energy Materials and Solar, Vol65, 200
- [12] [www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq.1](http://www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq.1).
- [13]Loïc Bailly «cellules photovoltaïques organiques souples a grand surface» thèse de doctorat université Bordeaux 1,2010
- [14] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green et F. Ferrazza, Applied Physics Letters 1998, 73, 1991
- [15] Allen Bernett., 50% efficiency solar cell architecture and designs. Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference, 2006, Vol 2: p 2560-2564, Waikoloa, HI
- [16] National Renewable Energy Laboratory (NREL): 2015.
- [17] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2008, 16, 61
- [18]K.P.pande,DH.Reep,SK.Shastry,AS.Weigner,J.M.Borrego and S.k.Ghandhi, "The preparation and properties of thin polycrystalline GaAs. Solar with.grain boundary Edge passivation", IEEE .Trans.Electron.Dev, (1980), ED.27, Vol.4, pp.635-640.

## Bibliographie

---

- [19] H.C.Hamaker, C.W.Ford, J.G.Werthen, G.F.Virshup, N.R.Kaminar, D.L.King and J.M.Gee, 26% Efficiency Magnesium-doped AlGaAs/GaAs solar Concentrator Cells, Appl. Phys.Left, Vol.47, N°7, (1985), pp.762-764.
- [20] Donald A.Neamen, Mc Graw-Hill, "Semiconductor physics and devices basic principles",Third Edition, 2003.
- [21] Singh, Semiconductor Devices: Basic Principles, John-Wiley, 2001.
- [22] B. Equer, "Energie solaire photovoltaïque ", vol.1, 1993. Ellipses
- [23] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/electric>
- [24] Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan
- [25] A.Laujier, "Les photobiles solaires du matériau du dispositif aux applications», Institut National des Sciences Appliquées-Lyon 1981.
- [26] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997.presses polytechniques et universitaires romandes.
- [27] F.Kurker," Microfabrication based design and simulation of hétérojunction solar cell", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADANA, 2010
- [28] H.Schalangenotto, H.Maeder, and W.Gerlach, Temperature dependence of the radiative recombination coefficient in silicon,Physica Status Solidi (a),vol.21,n01,1974,pp.357-367.
- [29] W.Gerlach,H.Schalangenotto,H.Maeder, On the radiative recombination rate in silicon, Physica Status Solidi (a), vol.13, n01, 1972, pp.277-283.
- [30] J.Dziewior, W.Schmid, Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon, Appl.Phys.Lett, vol.31, n05, 1977, pp.346-348.
- [31] A.Gauffier,J-P. David and O.Gilard,Analytical model for multi-junction solar cells prediction in space environment, Microelectronics Reliability,Vol 48,(2008)1494-1499.
- [32] T.Goudon, V.Miljanovic,C.Schmeiser, On the Shockley-Read-Hall Model:Generation-Recombination in Semiconductors. January 17, 2006.
- [33] M.Zazoui,J.C.Bourgoin,D.Stievenard and D.Deresmes and G. Strobl, Recombination centers in electron-irradiated Czochralski silicon solar cells,J. Appl. Phys, Vol. 76 (1994).
- [34] D.J.Chin and D.H.Navon,"Two-dimensional analysis of the interdigitated back-contact solar cell", solid-stat electronics vol.24,pp.109-114 © pergamon press Ltd,1981.printed in Great Britain
- [35] Bediar, M., "Caracteristiques des Structures Laseres a Puits Quantiques Contraints", thèse Université de Bataba,(2007).



## Bibliographie

---

- [36] Mathieu, H., "Physique des Semiconducteurs et des Composants Electronique ", Masson, paris, (1998).
- [37] S. M. SZE, KWOK K. NG, Physics of Semiconductor Devices, Third Edition, JOHN WILEY & SONS, JNC, 2007.
- [38] S.M.Sze, "Physics of semiconductor devices", 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [39] K. DIB, «Etude théorique des cellules solaires à base de Si et SiGe». Mémoire de Magister,
- [40] Soga, T., "Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion", Elsevier, . Nagoya, Japan, (First Edition 2006). Université de Jijel, 2013
- [41] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [42] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volume 1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1<sup>ère</sup> édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [43] M.A Green : Solar cells fill factors, General graph and empirical expressions, 1981.
- [44] Bestam Rachid : «Modélisation et Simulation d'une Structure à base de Semiconducteur III-V pour le Photovoltaïque », thèse Université Saad Dahleb de Blida, 2012.
- [45] Lelievre, J.-F., "Elaboration de SiNx:H par PECVD: Optimisation des Propriétés Optiques, Passivantes et Structurales pour Applications Photovoltaïques", Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (24 avril 2007).
- [46] Abdo, F., "Croissance des Couches minces de Silicium par Epitaxie en Phase Liquide a basse Temperature pour Applications Photovoltaïques", Institut National des Science Appliquées de Lyon, (8 mars 2007)
- [47] Damon-Lacoste, J., "Vers une Ingénierie de Bandes des Cellules Solaires à Hétérojonctions a-Si:h/c-Si. Role Prépondérant de l'Hydrogène", Ecole Polytechnique, Paris, (05/07/2007).
- [48] A. Shah et al., Photovoltaic technology: the Case for Thin-Film Solar Cells. Science, 1999, VOL 285: p 692-698
- [49] Antonio Luque and Steven Hegedus., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, 2011, United Kingdom
- [50] P. Jackson et al., New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film Solar cells beyond 20%., Prog. Photovolt: Res.Appl, 2011, 19: p 894-897.
- [51] Arturo Morales-Acevedo., Thin film CdTe/CdS solar cells: Research perspectives, Elsevier, Solar Energy, 2006, 80: p 675-681
- [52] N. Romeo, et al., A highly efficient and stable CdTe/CdS thin film solar cells. Elsevier, Solar energy Materials & Solar cells, 1999, 58: p 209-218

## Bibliographie

---

[53] Brian O'Regan, Michael Graätzel., A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*, 1991, Vol 353: p 737-740

[54] Laurent SCHLUR., élaboration des cellules photovoltaïques hybrides solides à base d'oxyde de zinc nanostructuré. Thèse de doctorat, 2012, physique et chimie-physique des matériaux, université de Strasbourg

## Listes des figures

### Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Schéma du soleil .....	4
Figure 1.2 : Effet atmosphère sur les rayons solaire .....	5
Figure 1.3 : Définition d'air masse $AM_x$ .....	6
Figure 1.4 : Spectre extraterrestre (AM0), terrestre(AM1) et (AM1.5) .....	7
Figure 1.5 : Spectres électromagnétiques .....	8
Figure 1.6 : Variation du spectre d'un corps noir en fonction de la température et la longueur d'onde .....	9
Figure 1.7 : Image de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides.....	10
Figure 1.8 : Structure de la cellule PERL a base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant.....	11
Figure 1.9 : Structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches.....	11
Figure 1.10 : Structure d'une technologie CdTe.....	15
Figure 1.11: Rendements record des cellules photovoltaïques dans les différentes filières.....	17
Figure 1.12 : Structure cristalline du GaAs .....	18
Figure I.13: Structure de bande de GaAs.....	19
Figure I.14 : Structure de bande schématique d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect.....	19
Figure 1.15 : Coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) en fonction de la longueur d'onde de différents matériaux.....	26
<b>Chapitre 2 :</b>	
Figure 2.1 : Les phénomènes subits au flux incident.....	27
Figure 2.2 : Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	28
Figure 2.3 : Schéma des différentes régions dans une jonction hors équilibre.....	31

## Listes des figures

---

Figure 2.4 : Schéma d'une jonction GaAs éclairée.....	31
Figure 2.5 : Caractéristique courant-tension $I = f(V)$ en obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque a base de GaAs.....	34
Figure 2.6 : Courbe I-V d'une cellule solaire.....	36
Figure 2.7: Le facteur de forme dans la courbe I-V.....	36
Figure 2.8 : Le rendement en fonction du gap d'énergie.....	37
Figure 2.9 : Spectre solaire AM1.5 et gap d'énergie des principaux semi-conducteurs.....	39
<b>Chapitre 3 :</b>	
Figure 3.1 : Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ a T=6000 °K .....	42
Figure 3.2 : Variation du coefficient d'absorption $\alpha$ en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ .....	42
Figure 3.3 : Variation du courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur d.....	43
Figure 3.4 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de l'épaisseur d.....	43
Figure 3.5 : Caractéristiques courant-tension de la structure GaAs pour différentes épaisseurs.....	44
Figure 3.6 : Puissance délivrée par la cellule GaAs pour plusieurs épaisseurs de la structure.....	44
Figure 3.7 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de l'épaisseur.....	45
Figure 3.8 : Variation du courant de court circuit $J_{ph}$ en fonction de la température.....	46
Figure 3.9 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de la température.....	46
Figure 3.10 : Caractéristique courant-tension de la structure GaAs pour différentes températures.....	47
Figure 3.11:Puissance délivrée par la cellule GaAs en fonction de V pour plusieurs températures.....	47
Figure 3.12 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de la température .....	48
Figure 3.13 : Variation du courant de court circuit $J_{CC}$ en fonction de l'épaisseur de l'émetteur $X_j$ .....	49
Figure 3.14 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de l'épaisseur de l'émetteur $X_j$ .....	49

## Listes des figures

---

Figure 3.15 : Caractéristiques courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes épaisseurs de l'émetteur $X_j$ .....	50
Figure 3.16 : Puissance délivrée par la cellule <i>GaAs</i> en fonction de $V$ pour plusieurs valeurs de l'épaisseur de l'émetteur.....	50
Figure 3.17 : Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction de $X_j$ .....	51
Figure 3.18 : Variation du courant de court circuit $J_{CC}$ en fonction de dopage de l'émetteur $N_a$ .....	51
Figure 3.19 : Variation du courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction de dopage de la base $N_d$ ...52	52
Figure 3.20 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de dopage $N_d$ .....52	52
Figure 3.21 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de dopage $N_a$ .....53	53
Figure 3.22 : Caractéristique courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes dopages $N_a$ .....	53
Figure 3.23 : Caractéristique courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes dopages $N_d$ .....	54
Figure 3.24 : Puissance délivrée par la cellule <i>GaAs</i> en fonction de $V$ pour plusieurs valeurs de dopage $N_d$ .....	54
Figure 3.25 : Puissance délivrée par la cellule <i>GaAs</i> en fonction de $V$ pour plusieurs valeurs de dopage $N_a$ .....	55
Figure 3.26 : Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction de dopage $N_a$ ...56	56
Figure 3.27 : Représentation du rendement de la structure <i>GaAs</i> en fonction de dopage $N_d$ ...56	56
Figure 3.28 : Variation du courant de court circuit $J_{ph}$ en fonction de durée de vie des porteurs $\tau_{n,p}$ .....	57
Figure 3.29 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de la durée de vie $\tau_{n,p}$ .57	57
Figure 3.30 : Caractéristiques courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes valeurs de $\tau_n, \tau_p$ .....	58

## Listes des figures

---

Figure 3.31 : Puissance délivrée par la cellule GaAs en fonction de $V$ pour plusieurs valeurs de durée de vie $\tau_n, \tau_p$ .....	59
Figure 3.32 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de durée de vie $\tau_n, \tau_p$ .....	59
Figure 3.33 : Variation du courant de court circuit $J_{cc}$ en fonction de la vitesse de recombinaisons.....	60
Figure 3.34 : Variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de la vitesse de recombinaisons $S_n$ et $S_p$ .....	61
Figure 3.35 : Caractéristique courant-tension de la structure <i>GaAs</i> pour différentes valeurs de $S_n, S_p$ .....	61
Figure 3.36 : Puissance délivrée par la cellule GaAs en fonction de $V$ pour plusieurs valeurs de la vitesse de recombinaisons $S_n, S_p$ .....	62
Figure 3.37 : Représentation du rendement de la structure GaAs en fonction de la vitesse de recombinaisons $S_n$ et $S_p$ .....	63

### **Annexe :**

Figure A.1 : Table périodique de Mendeleïev .....	67
Tableau A.1 : Paramètre physiques de la cellule GaAs.....	67

### **Liste des tableaux**

#### **Introduction générale :**

Tableau 1 : Potentiel solaire en Algérie.....	1
---	---

#### **Chapitre 1 :**

Tableau 2.1 : Masse effective des électrons et des trous aux extrema des bandes, et paramètres caractéristiques de la bande de valence .....	21
--	----

#### **Chapitre 3 :**

Table 3.1 : Paramètres physiques fondamentaux du GaAs.....	41
--	----