

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Micro-électronique

Présenté par

BAIK Wissem

&

FEDLALLAH Rahil

---

# Simulation et caractérisation des cellules solaires triples jonctions sous concentrateur

---

Proposé par : Pr. AISSAT Abdelkader & Mr.KELLIL Nouamen

Année Universitaire 2018-2019

## Remerciements

---

*Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de l'unité de développement des équipements solaire (UDES).*

*Nos remerciements vont à Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tiendrons à exprimer nos remerciements à notre promoteur Pr. **AISSAT Abdelkader** pour son encadrement et l'aide compétente qu'il nous a apporté ainsi que notre co-promoteur **KELLIL Nouamen** pour nous avoir proposé ce sujet qui nous a mené vers la découverte du monde de l'expérimental et qui nous a bien accueilli pendant toute la période de notre stage, il nous a bien dirigé afin de pouvoir réaliser ce travail de mémoire.*

*Nous n'oublions pas de remercier vivement Mr. **LAIDOUCI Abdelmoumen** pour son aide ainsi que pour les explications et les nombreux conseils qu'il nous a donné.*

*Nous adressons aussi un remerciement pour nos enseignants de Master pour leur travail pendant notre cursus qui nous a menés vers la voie de la réussite et de la continuité.*

*Nos remerciements sont adressés également à nos **chers parents** pour leurs soutien et sacrifices*

*Nous remercions tous nos **confrères** et **consœurs**, qui nous ont toujours encouragées et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au cours de la réalisation de ce travail.*

*On exprime de même nos remerciements aux honorables membres de jury.*

---

**ملخص:** تعتبر الخلايا الشمسية متعددة الموصلات الموضوعه تحت المكثفات البصرية من أحدث التقنيات المستمرة فالتطور وذلك بفضل زيادة مردودها حيث تقدر بـ46%. في هذا العمل سوف نركز اهتمامنا حول الدراسة محاكاة وكذلك الدراسة التطبيقية للخلية الشمسية ثلاثية الموصلات بناء على شبه موصلات 3-5 تحت المكثف وكذلك تأثير انحراف اللوني للشعاع الضوئي.

يركز هذا العمل على دراسة سلوك الخاصية بالإضافة الى نسبة مردودها.

**كلمات المفاتيح:** الخلايا الشمسية متعددة المواصلات، المكثفات البصرية.

---

**Résumé :** Les cellules solaires multi-jonctions (CSMJ) mises sous concentrateurs optique présentent une technologie qui ne cesse de développer. Avec un rendement de conversion photovoltaïque (PV) qui avoisine 46%. Dans ce travail nous avons concentré notre attention sur l'étude expérimentale et la simulation des cellules solaires triples jonctions (CSTJ) à base de matériau semi-conducteur III-V sous concentrateur. Ainsi que l'effet de l'aberration chromatique du faisceau lumineux. Ce travail est focalisé sur le comportement de la caractéristique I-V des CSTJ ainsi que leurs rendements.

**Mots clés :** Les cellules solaires multi-jonctions, concentrateurs optiques.

---

**Abstract:** The multi-junction solar cells (CSMJ) placed under optical concentrators present a technology that continues to develop. With a photovoltaic conversion efficiency (PV) which is around 46%. In this work we focused our attention on the experimental study and simulation of triple junction solar cells (CSTJ) based on III-V semiconductor material under concentrator. As well as the effect of the chromatic aberration of the light beam. This work focuses on the behavior of the I-V characteristic of the CSTJ and their yields. I-V

**Keywords:** The multi-junction solar cells, optical concentrators.

---

## Listes des acronymes et abréviations

PV	: photovoltaïque	
Si	: Silicium	
AM	: Air Mass.	
AM <sub>0</sub>	: Spectre solaire hors atmosphère.	
AM <sub>1</sub>	: Spectre solaire terrestre zénith	
AM <sub>1.5G</sub>	: Spectre solaire terrestre (global).	
SC	: semi-conducteurs	
BV	: Bande de valence	
BC	: Bande de conduction	
gap	: Bande interdite	
CSTJ	: Cellule solaire triple jonction	
PMMA	: Poly-méthacrylate de méthyle.	
n	: indice de réfraction.	
n <sub>PMMA</sub>	: indice de réfraction PMMA	
n <sub>Air</sub>	: indice de réfraction d'air	
Θ	: L'angle de diffraction	(Rad)
E <sub>ph</sub>	: L'énergie d'un photon	(eV)
H	: La constante de Planck	(J.s)
C	: La vitesse de la lumière	(m/s)
λ	: La longueur d'onde	(μm)
R <sub>sh</sub>	: La résistance parallèle (ou shunt)	(Ω)
R <sub>s</sub>	: La résistance série	(Ω)
I <sub>ph</sub>	: Le courant photon généré	(A)
I <sub>s</sub>	: Le courant de saturation de la diode	(A)
K	: La constante de Boltzmann = 1.38.10 <sup>-23</sup>	(J/K)
T	: La température de la cellule	(K)
q	: La charge de l'électron = 1.602.10 <sup>-19</sup>	(C)
V <sub>co</sub>	: La tension à circuit ouvert	(V)
I <sub>cc</sub>	: Le courant de court-circuit	(A)
P <sub>max</sub>	: La puissance maximale	(W)
V <sub>max</sub>	: La tension maximale	(V)
I <sub>max</sub>	: Le courant maximal	(A)
η	: Le rendement de la cellule	(%)
E <sub>g</sub>	: L'énergie de gap	(eV)
P <sub>in</sub>	: La puissance incidente	(W)
FF	: Le facteur de forme	(%)
x, y	: Les concentrations des matériaux dans les alliages	
a <sub>0</sub>	: La constante du réseau	
c	: la hauteur du réseau	
l	: la longueur de liaison III-V	
α	: Le coefficient d'absorption	
A	: Le facteur de qualité de la diode	
a, b	: Des constantes du matériau (a = 1.468 ; b=5.2*10 <sup>-19</sup> )	(m <sup>2</sup> )
L	: La largeur du concentrateur	(mm)
F	: La distance focale de chaque longueur d'onde	(mm)
J <sub>sc</sub>	: La densité de courant	(mA/cm <sup>2</sup> )

# Table de matière

Introduction générale .....	1
Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques triples jonctions sous concentration.....	4
1.1 Introduction .....	4
1.2 Le rayonnement solaire.....	4
1.3 L'effet photovoltaïque.....	6
1.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires .....	7
1.5 Le modèle électrique d'une cellule PV et ces caractéristiques .....	8
1.5.1 Le schéma électrique d'une cellule solaire .....	8
1.5.2 La caractéristique tension-courant (I-V).....	9
1.5.3 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque : .....	10
a Tension de circuit-ouvert $V_{co}$ .....	10
b Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	10
c La puissance maximale $P_m$ .....	10
d Le rendement $\eta$ .....	11
e Facteur de forme $FF$ .....	11
1.6 Influence de quelques paramètres sur le rendement PV .....	11
1.6.1 Influence des paramètres externes.....	11
a Influence de l'éclairement solaire .....	11
b Influence de la température.....	12
1.6.2 L'influence des paramètres internes.....	13
a Influence des résistances shunt $R_{sh}$ .....	13
b Influence des résistances série $R_s$ .....	13
1.7 Evolution de la technologie des cellules PV.....	14
1.7.1 La 1 <sup>ère</sup> génération.....	14
1.7.2 La 2 <sup>ème</sup> génération.....	14
1.7.3 La 3 <sup>ème</sup> génération .....	15
1.7.4 La 4 <sup>ème</sup> génération .....	15
1.8 Les matériaux semi-conducteurs III-V.....	16
1.8.1 Définitions.....	16
1.8.2 Les propriétés cristallines .....	16
a La structure zinc-Blend.....	17

b	La structure wurtzite.....	17
1.8.3	Structure des bandes .....	18
1.8.4	L'absorption.....	19
1.9	Les cellules solaires multi-jonctions.....	19
1.9.1	Définitions d'une cellule solaire triple jonctions.....	19
1.9.2	Le modèle du circuit équivalent à une diode et à deux diodes .....	20
1.9.3	Cellule solaire triple-jonctions à base de GaInP/GaInAs/Ge .....	22
a	Le Phosphore de Gallium d'Indium (GaInP) .....	22
b	L'Arséniure de Gallium d'Indium (GaInAs) .....	22
c	Le Germanium (Ge) .....	22
1.9.4	Structure de la cellule triple-jonctions à base de GaInP/GaInAs/Ge .....	24
1.10	Concentrateurs de Fresnel .....	24
1.11	L'aberration chromatique .....	26
1.12	Conclusion .....	27
<b>Chapitre 2</b> Partie expérimentale et simulation des cellules solaires triples jonctions.....		<b>28</b>
2.1	Introduction .....	28
2.2	Etude théorique .....	28
2.2.1	L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.....	29
2.2.2	La déviation en fonction de la longueur d'onde.....	29
2.2.3	La distance focale en fonction de longueur d'onde .....	30
2.2.4	Coefficient Fresnel.....	30
a	Coefficient de transmission Air – PMMA .....	30
b	Coefficient de transmission PMMA – Air .....	30
2.3	Simulation .....	32
2.3.1	Structure de la cellule simulée.....	32
2.3.2	Paramètres utilisés dans la simulation.....	32
2.4	Partie expérimentale : .....	33
2.4.1	Le but de la manipulation .....	33
2.4.2	Procédure de la pratique.....	33
2.4.3	Matériels utilisés .....	34
a	Le pyranomètre.....	34
b	L'analyseur PV .....	35

c La cellule solaire a base GaInP/ GaInAs/ Ge .....	36
2.5 Conclusion .....	36
<b>Chapitre 3 Résultats et discussions .....</b>	<b>37</b>
3.1 Introduction .....	37
3.2 Résultats de l'étude théorique .....	37
3.2.1 Coefficient de Fresnel pour chaque milieu .....	37
a Coefficient de transmission Air – PMMA .....	37
b Coefficient de transmission PMMA – Air .....	38
3.2.2 La distribution spectrale sur la cellule solaire .....	38
3.3 Résultat de simulation .....	40
3.3.1 Caractéristique I-V de la cellule .....	40
3.3.2 Caractéristique P-V de la cellule.....	41
3.4 Résultat de la partie expérimentale.....	41
3.4.1 Variation de l'éclairement et la température.....	42
3.4.2 Variation de la distance de la cellule entre le point focale et le concentrateur.....	42
a Caractéristique I-V et P-V au-dessous du point focal .....	43
b Caractéristique I-V et P-V au-dessus du point focal.....	44
3.4.3 Variation de la puissance maximale $P_m$ en fonction de la distance focale.....	45
3.4.4 Variation du rendement de la cellule en fonction de distance.....	46
3.5 Conclusion .....	47
Conclusion générale.....	48
Bibliographie .....	49

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie selon le NREL.....	2
<b>Figure 1.1.</b> Différentes masses d'air AM.....	5
<b>Figure 1.2.</b> Absorption par les gaz atmosphériques.....	6
<b>Figure 1.3.</b> Fonctionnement d'une cellule solaire.....	7
<b>Figure 1.4.</b> Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.....	8
<b>Figure 1.5.</b> Caractéristique courant-tension (I-V) en obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.....	9
<b>Figure 1.6.</b> Caractéristique I-V et P-V.....	10
<b>Figure 1.7.</b> Influence de l'éclairage sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.....	12
<b>Figure 1.8.</b> Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.....	12
<b>Figure 1.9.</b> Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V.....	13
<b>Figure 1.10.</b> Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V.....	13
<b>Figure 1.11.</b> Table périodique partiel.....	16
<b>Figure 1.12.</b> La structure cristalline "zinc-blende".....	17
<b>Figure 1.13.</b> Structure cristalline "Wurtzite".....	18
<b>Figure 1.14.</b> Structure de bandes (a) Gap Direct ; (b) Gap Indirect.....	18
<b>Figure 1.15.</b> Principe de la cellule solaire multi-jonctions.....	20
<b>Figure 1.16.</b> Circuit équivalent d'une cellule PV (a) : modèle à une diode ; (b) modèle de deux diodes.....	21
<b>Figure 1.17.</b> Energie de gap d'InGaP.....	23
<b>Figure 1.18.</b> Absorption InGaAs.....	23
<b>Figure 1.19.</b> La structure de la cellule solaire triple jonction.....	24
<b>Figure 1.20.</b> Phare à base de lentille Fresnel.....	24
<b>Figure 1.21.</b> Représentation schématique du concentrateur Fresnel.....	25
<b>Figure 1.22.</b> Exemple d'aberration chromatique (arc en ciel).....	26
<b>Figure 2.1.</b> Démonstration de l'aberration chromatique.....	28
<b>Figure 2.2.</b> Prisme Air-PMMA-Air.....	29
<b>Figure 2.3.</b> Les différents paramètres qui influent sur la cellule.....	31
<b>Figure 2.4.</b> Structure de la cellule GaInP/GaAs/Ge.....	32

<b>Figure 2.5.</b> Photographie du dispositif expérimental.....	<b>33</b>
<b>Figure 2.6.</b> Pyranomètre.....	<b>34</b>
<b>Figure 2.7.</b> L'analyseur PV.....	<b>35</b>
<b>Figure 2.8.</b> Cellule GaInP/ GaInAs/ Ge.....	<b>36</b>
<b>Figure 3.1.</b> Coefficient de transmission d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent.....	<b>37</b>
<b>Figure 3.2.</b> Coefficient de transmission d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent.....	<b>38</b>
<b>Figure 3.3.</b> Déviation des couleurs du spectre sur la cellule.....	<b>39</b>
<b>Figure 3.4.</b> La distribution spectrale sur la CSTJ au point focal.....	<b>39</b>
<b>Figure 3.5.</b> Variation de la densité du courant en fonction de la tension de la cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge.....	<b>40</b>
<b>Figure 3.6.</b> Variation de la densité de puissance en fonction de la tension de le cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge.....	<b>41</b>
<b>Figure 3.7.</b> Variation de l'éclairement et la température pour plusieurs distances.....	<b>42</b>
<b>Figure 3.8.</b> Caractéristique I-V et P-V au point focal.....	<b>42</b>
<b>Figure 3.9.</b> La caractéristique I-V au-dessous du point focal.....	<b>43</b>
<b>Figure 3.10.</b> La caractéristique P-V au-dessous du point focal.....	<b>43</b>
<b>Figure 3.11.</b> La caractéristique I-V au-dessus du point focal.....	<b>44</b>
<b>Figure 3.12.</b> La caractéristique P-V au-dessus du point focal.....	<b>45</b>
<b>Figure 3.13.</b> La puissance maximale en fonction des distances.....	<b>46</b>
<b>Figure 3.14.</b> Variation du rendement en fonction de la distance focal.....	<b>46</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1.</b> Paramètres d'entrée de la CSTJ.....	<b>33</b>
<b>Tableau 3.1.</b> Variation de l'indice de réfraction et la déviation ainsi que la distance focale pour chaque longueur d'onde.....	<b>38</b>
<b>Tableau 3.2.</b> Les valeurs des caractéristiques I-V et P-V au-dessous du point focal.....	<b>44</b>
<b>Tableau 3.3.</b> Les valeurs des caractéristiques I-V et P-V au-dessus du point focal.....	<b>45</b>

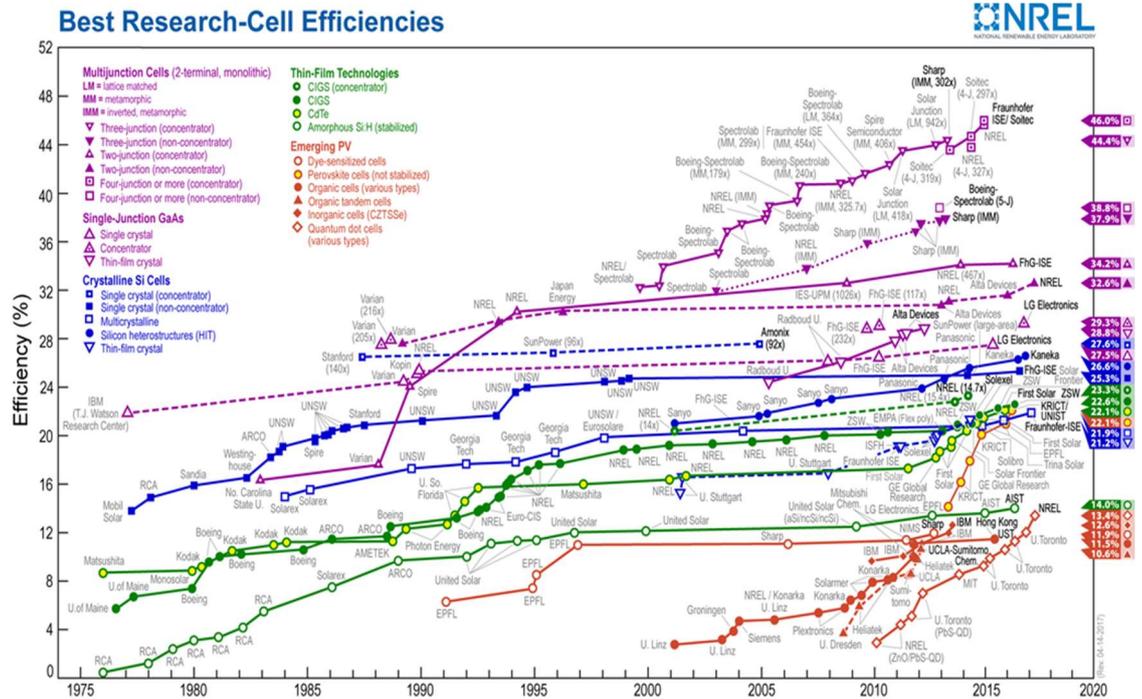
# Introduction générale

---

La technologie photovoltaïque est l'une des technologies qui est utilisée pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique, car le soleil est considéré comme une source non limitée à l'échelle humaine, non polluante et les matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïque sont réutilisables. Cependant le grand obstacle est le coût élevé de cette technologie et d'autre part son rendement limités, c'est pour cette raison qu'un grand effort est concentré sur la recherche d'autres solutions profitant des avancées technologiques, notamment de l'industrie de la micro-électronique à la fois augmenter les rendements énergétiques et aussi réduire les coûts de production.

Les cellules solaires à triples jonctions sous concentration à base de matériaux semi-conducteurs (III-V) connaissent un intérêt croissant dans le de développement des systèmes photovoltaïques, elles présentent les plus hauts rendements grâce à leur structure formée d'une superposition de trois sous-cellules, Elles doivent fonctionner à très haute concentration afin d'atteindre un maximum de rendement.

La figure (1) nous montre les rendements record des différentes filières photovoltaïques qui sont répertoriés par le NREL (National Renewable Energy Laboratory).



**Figure 1.** Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie selon le NREL [1].

En violet avec triangles les technologies multi-jonction, en bleu le silicium cristallin, en vert les couches minces, en rouge les technologies émergentes.

Les matériaux III-V composant nos cellules sont le Phosphore de Gallium-Indium (GaInP), l'Arséniure de Gallium-Indium (GaInAs) et le Germanium (Ge), ces semi-conducteurs présentent des largeurs de bandes interdites ( $E_g$ ) adaptées pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire.

Notre manuscrit se décompose en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les notions de bases relatives au fonctionnement des cellules, nous présentons par la suite une étude bibliographique sur les semi-conducteurs (III-V), incluant les différentes générations en précisant leurs rendements théoriques et pratiques obtenus par les chercheurs, nous définissons le concentrateur Fresnel et l'aberration chromatique.

Le second chapitre nous présentons notre étude théorique, les paramètres utilisés pour la simulation et les dispositifs de mesure expérimentale utilisée pour l'étude de

l'effet de l'aberration chromatique sur le rendement des cellules solaires triples jonctions sous concentrateur.

Les résultats de notre travail sont regroupés et discutés dans le troisième chapitre.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion dans laquelle nous présenterons les principaux résultats obtenus au cours de ce manuscrit.

# Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques triples jonctions sous concentration

---

## 1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque (PV) est une technologie qui consiste à convertir la lumière d'origine solaire en énergie électrique. Les générateurs PV sont basés sur l'utilisation des cellules PV fabriquées en Silicium. Ces dernières ont été rapidement et efficacement développées depuis leur découverte en 1839, en se basant sur la technologie mature développée dans le contexte de la micro-électronique [1].

La 1<sup>ère</sup> cellule PV fut fabriquée par Charles Fritts en 1883 [1] à partir de l'Or et du Sélénium. Cette cellule avait un rendement de 1 %.

En effet, grâce à son abondance dans la nature (sable et quartz) et grâce à son coût de traitement relativement faible, le Silicium (Si) reste le matériau le plus utilisé pour la fabrication des modules PV.

Par la suite, plusieurs technologies de cellules solaires ont été développées. L'enjeu été les coûts de fabrication de la cellule PV ou encore (le retour énergétique de la cellule ou du module) et aussi le rendement de conversion.

## 1.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est la principale source de l'énergie qui vient sur terre. Cette énergie se transporte par rayonnement, dont le spectre solaire s'étend de l'ultraviolet ( $0.2\mu\text{m} < 0.38\mu\text{m}$ ) vers l'infrarouge ( $0.78\mu\text{m} < 10\mu\text{m}$ ) en passant par le visible (entre  $0.38\mu\text{m}$  et  $0.78\mu\text{m}$ ) [1].

Le rayonnement solaire subit plusieurs atténuations avant d'atteindre la surface de la terre, en parcourant la couche atmosphérique. Le taux de cette atténuation dépend de la longueur d'onde du rayonnement et la position géographique sur terre, c'est à dire en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  du rayonnement par rapport au zénith. Cette distance appelée masse d'air.

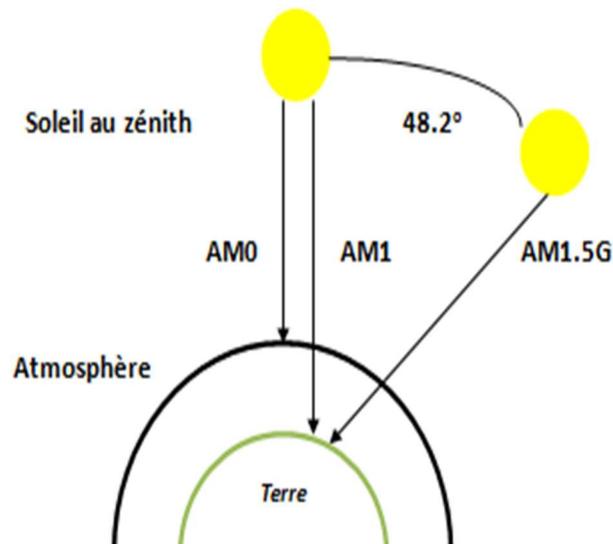
Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise le nombre d'air masse défini par :

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

$\theta$  : représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.

La figure (1.1) représente les différentes masses d'air AM :

- Le spectre AM0 représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère
- Le spectre AM1 correspond au soleil de la verticale  $\theta = 0$
- Le spectre AM1.5G est obtenu pour un angle de  $48,2^\circ$  par rapport au zénith et prend en compte l'intensité diffusée par les particules de l'atmosphère (G pour global car il tient en compte à la fois les radiations directes et diffuses), Il est utilisé pour mesurer les performances des cellules photovoltaïques développées pour des applications terrestres [2].



**Figure 1.1.** Différents masses d'air AM.

La traversé de la couche atmosphérique par le rayonnement solaire engendre une modification de son spectre. Une partie du spectre est absorbée par différents gaz. La couche d’ozone absorbe la majeure partie du rayonnement Ultraviolet et la vapeur d’eau absorbe le rayonnement Infrarouge représenté sur la figure (1.2)

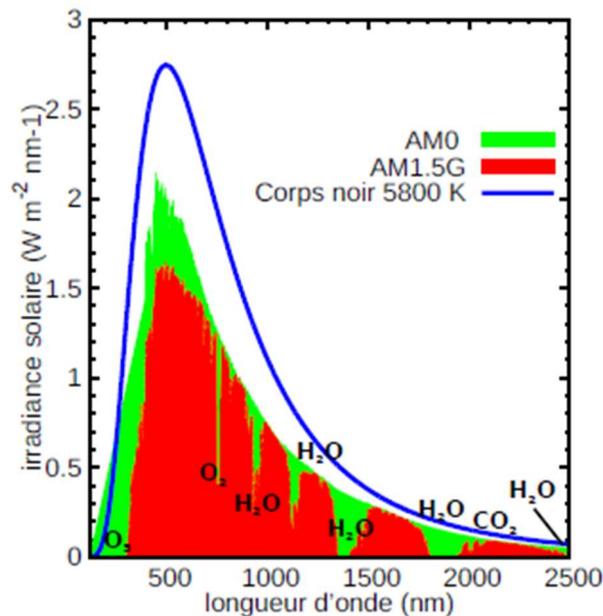


Figure 1.2. Absorption par les gaz atmosphériques [1].

### 1.3 L’effet photovoltaïque

Le scientifique français Edmond Becquerel fut le premier à découvrir, en 1839, l'effet photo-électrique, il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas seulement le caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des photons, et l'énergie d'un photon et donné par la relation suivante [1] :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Où h est la constante de Planck, c : la vitesse de la lumière et  $\lambda$  : sa longueur d’onde.

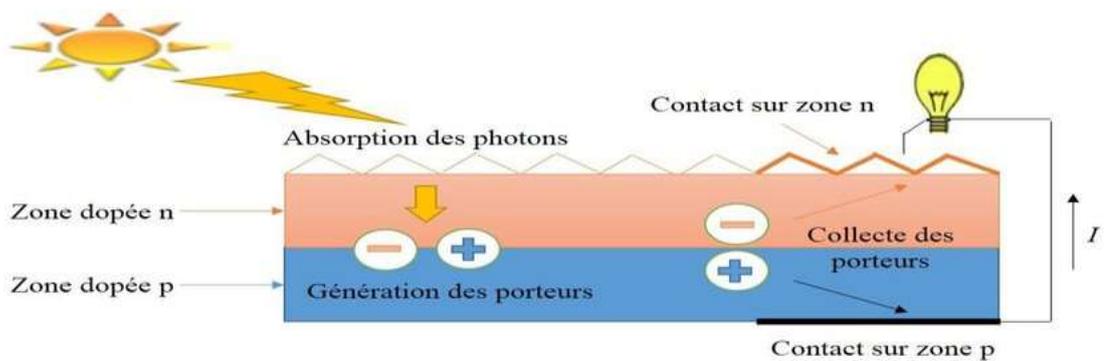
L'effet photovoltaïque est dû à la transformation de l'énergie lumineuse en électricité par la mise en œuvre des matériaux SC, il utilise les photons pour créer des

paires électron-trou dans les matériaux. Ainsi apparait une différence de potentiel entre les bornes de la cellule. En circuit fermé, la cellule génère un courant électrique continu.

## 1.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires

La cellule PV aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la chaîne de conversion PV. Il s'agit d'un dispositif SC tel que le Si qui transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique [4].

La figure (1.3) représente le principe d'une cellule PV qui est basé sur la juxtaposition d'un SC de type p à un SC de type n pour former une jonction P-N.



**Figure 1.3.** Fonctionnement d'une cellule solaire [3].

La conversion PV repose donc, sur trois étapes :

- L'absorption des photons incidents (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de pair électron – trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des porteurs générés dans le dispositif.

## 1.5 Le modèle électrique d'une cellule PV et ces caractéristiques

### 1.5.1 Le schéma électrique d'une cellule solaire

Le schéma électrique qui modélise la cellule solaire est représenté par la figure (1.4), ou le circuit électrique décrit le comportement de la cellule à l'aide des composants électroniques suivants :

- Source
- Diode (jonction P-N)
- La résistance série  $R_s$  correspond aux résistances entre les couches qui constituent la cellule photovoltaïque
- La résistance parallèle (ou shunt)  $R_{sh}$  caractérise les pertes au niveau de la cellule photovoltaïque.

Pour une cellule idéale sans perte les résistances  $R_s = 0$  et  $R_{sh} = \infty$ .

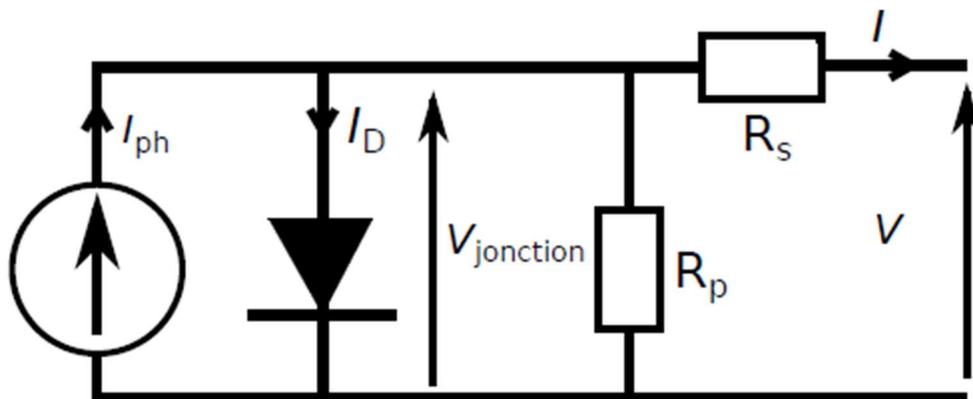


Figure 1.4. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque [1].

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire présenté dans la figure (1.4), le courant peut être décrit en fonction de la tension par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q(V + I.R_s)}{nKT} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

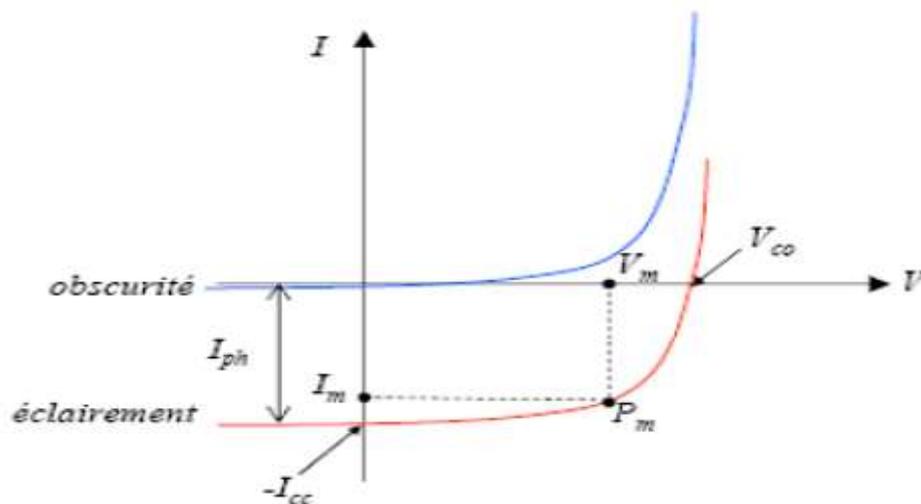
avec

- $I_{ph}$  : le courant photo-généré
- $I_s$  : le courant de saturation de la diode

- $n$  : facteur de qualité de la diode
- $k$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23}$  J/K =  $8.61400 \times 10^{-5}$  eV/K)
- $T$  : la température absolue en Kelvin (K)
- $q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19}$  C).

## 1.5.2 La caractéristique tension-courant (I-V)

La caractéristique (I-V) d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photo-généré (figure 1.5).



**Figure 1.5.** Caractéristique courant-tension (I-V) en obscurité et sous éclairage d'une cellule PV [5].

La figure (1.5) montre qu'à l'obscurité, la cellule solaire suit le comportement d'une diode classique. Lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil, d'où la caractéristique (I-V) passe par l'origine. Le produit  $V.I > 0$ , donc elle absorbe tout le temps de l'énergie.

Pour la cellule solaire sous éclairage, la caractéristique (I-V) ne passe pas par l'origine, le produit  $V.I < 0$  donc la cellule fournit de l'énergie [5].

### 1.5.3 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les grandeurs physiques qui définissent une cellule solaire sont :

#### a Tension de circuit-ouvert $V_{co}$

La tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) qui est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul ( $I = 0$ ).

#### b Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant traversant un conducteur parfait de résistance nulle mis entre les bornes de la cellule PV. Il est à noter qu' $I_{cc}$  est proportionnel à l'éclairement.

#### c La puissance maximale $P_m$

La puissance maximale  $P_m$  ou bien la puissance optimale fournie par la cellule à partir de la caractéristique I-V, c'est le produit de la tension maximale ( $V_{max}$ ) qui varie de 0 à  $V_{co}$  et du courant max ( $I_{max}$ ).

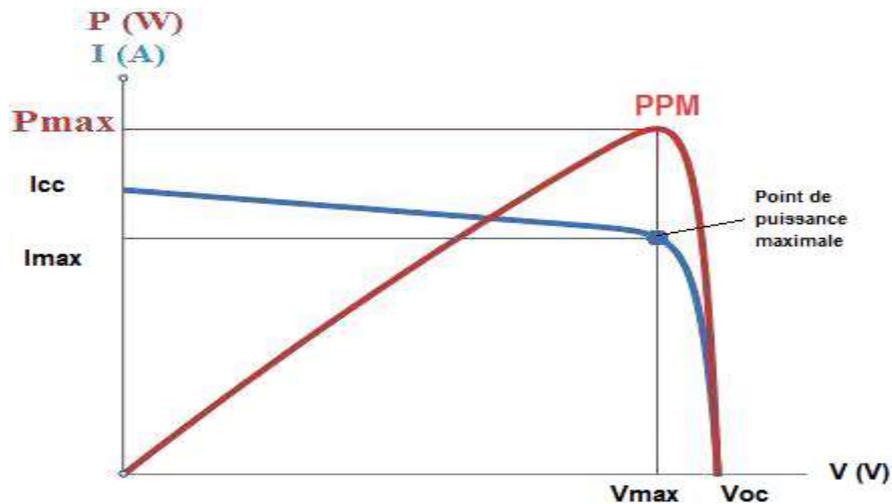


Figure 1.6. Caractéristique I-V et P-V [3].

#### **d Le rendement $\eta$**

C'est un paramètre qui mesure la performance de la cellule solaire. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale  $P_m$  délivrée par la cellule PV et la puissance lumineuse reçue sur la surface active  $P_{in}$  de cette cellule PV. Il est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{FF I_{cc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

#### **e Facteur de forme $FF$**

$FF$  est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule donnée par la relation suivante :

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{cc} V_{oc}} \quad (1.5)$$

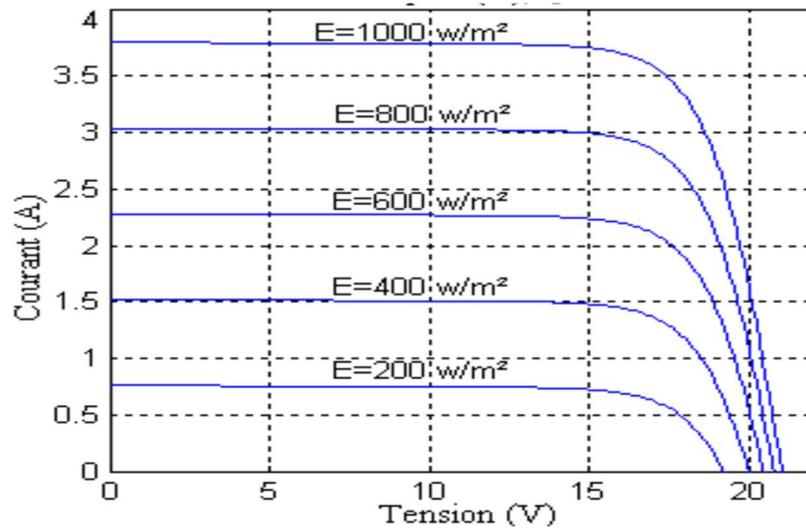
Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle ( $I_{cc} \times V_{oc}$ ). Plus le facteur de forme se rapproche de la valeur de 1, plus le rendement de la cellule est meilleur.

## **1.6 Influence de quelques paramètres sur le rendement PV**

### **1.6.1 Influence des paramètres externes**

#### **a Influence de l'éclairement solaire**

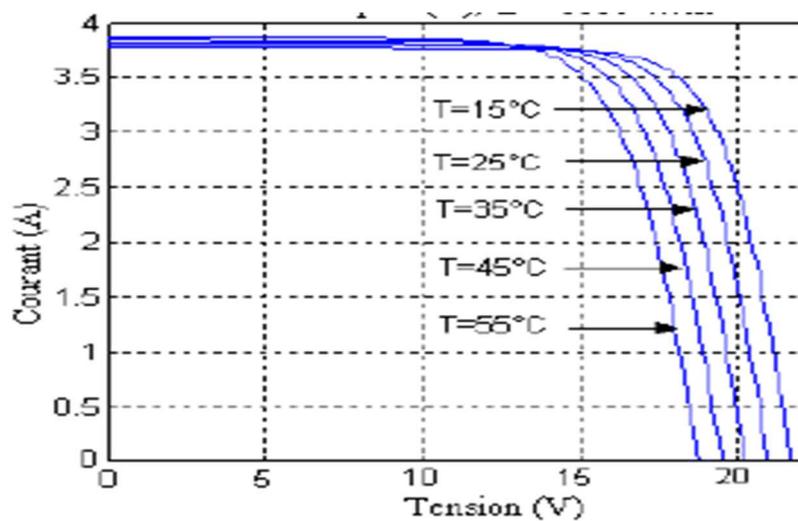
L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque mesurer en  $W/m^2$ , l'éclairement varie entre 0 (la nuit) jusqu'à 1000  $W/m^2$  (valeur maximale au cours de la journée), figure (1.7).



**Figure 1.7.** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [7].

### b Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique (I-V) du module PV. Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente et la tension décroît, elle est représentée sur la figure (1.8) sous un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ .



**Figure 1.8.** Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [7].

## 1.6.2 L'influence des paramètres internes

### a Influence des résistances shunt $R_{sh}$

La résistance shunt  $R_{sh}$  caractérise les fuites de courant, elle est provoquée par les défauts du cristal et les impuretés étrangères dans la région de la jonction PN. La figure (1.9) montre l'influence de  $R_{sh}$  sur la courbe I-V :

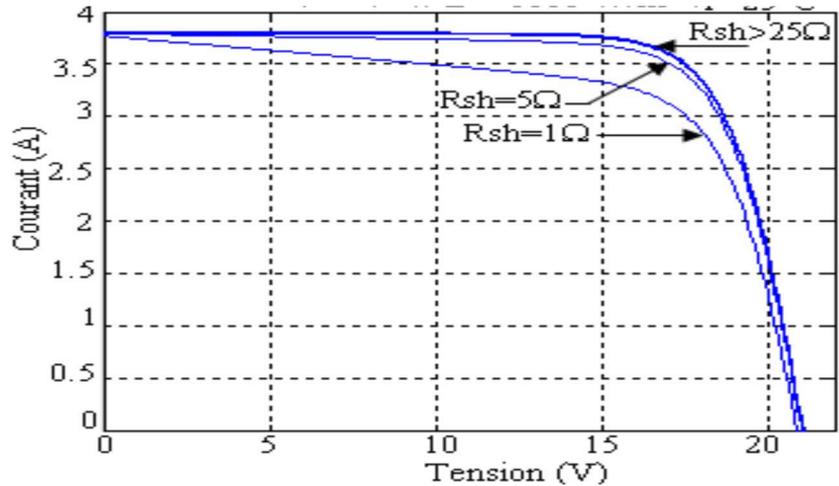


Figure 1.9. Influence de la résistance shunt sur caractéristique I-V du module [7].

### b Influence des résistances série $R_s$

$R_s$  est la résistance série interne de la cellule, elle caractérise les pertes de tension dans le SC. La figure (1.10) montre l'influence de  $R_s$  sur la courbe I-V :

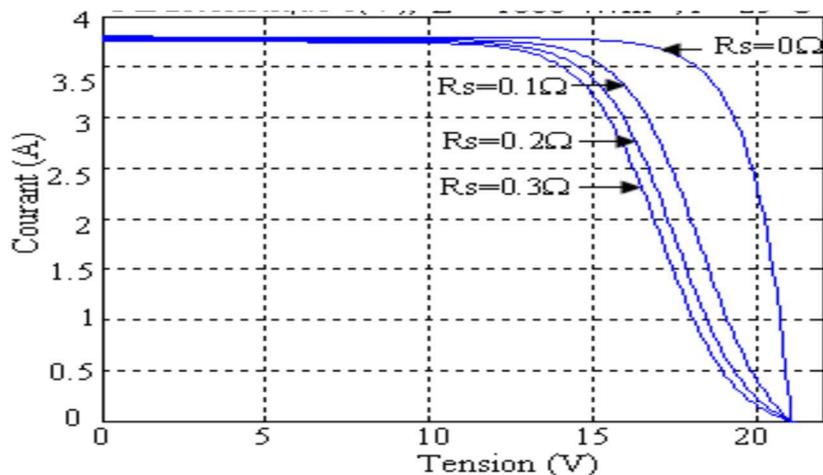


Figure 1.10. Influence de la résistance série sur caractéristique P-V du module [7].

## 1.7 Evolution de la technologie des cellules PV

La technologie des cellules PV est généralement classée en trois générations :

### 1.7.1 La 1<sup>ère</sup> génération

Cette génération est principalement basée sur la technologie du silicium cristallin, ou du moins à partir de cellules solaires formées d'un seul matériau semi-conducteur et donc d'efficacité maximum de 12% à 17% [8].

➤ Cellules monocristallines [9] :

- Le rendement vari de 12% à 19%
- Puissance max du dispositif varie de 120 à 190 Wc/m<sup>2</sup>

➤ Cellules polycristallines [9] :

- Le rendement vari de 10% à 15%
- Puissance max du dispositif varie de 110 à 150 Wc/m<sup>2</sup>

L'inconvénient de cette génération :

- Le coût élevé
- Rendement plus faible sous éclairément réduit
- Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles.

### 1.7.2 La 2<sup>ème</sup> génération

Correspond aux cellules solaires à base de couches minces (matériaux très absorbants) fabriquées à partir de silicium amorphe, CdTe (Tellure de Cadmium) et de CIGS (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium), pour fabriquer des modules flexibles avec une épaisseur de 1 à 4 µm, les efficacités de ces cellules sont plutôt faibles, avec un rendement 23 % [8].

➤ Les cellules au silicium amorphe

- Le rendement comprit entre 6% et 8%
- Fonctionnent avec un éclairément faible

- Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température
- Tellure de Cadmium (CdTe) [8] :
  - Rendement est de l'ordre de 7% à 9% en industrie
- Séléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium (CIGS) [8] :
  - Rendement plus élevé 13% pour certains modules et 21% en laboratoire
  - Cout plus élevé

### 1.7.3 La 3<sup>ème</sup> génération

Des cellules qui sont plus souples et ultra-fines, avec des rendements supérieurs aux précédentes générations, dont le but est de diminuer le cout de revient du KWh. Ce type de cellules solaires est fabriqué à base des matériaux semi-conducteurs de la famille III-V du tableau périodique.

- Les cellules multi-jonctions :

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs possédant chacun un spectre limité, si l'on choisit des matériaux qui possèdent des longueurs d'ondes très proches les unes des autres, cela permettra aux cellules d'absorber un spectre plus grand et complet qui permettrait d'obtenir un rendement jusqu'à 36% [10].

### 1.7.4 La 4<sup>ème</sup> génération

- Les cellules organiques [6] :
  - Rendement vari de 8 % à 10%
  - Plus fines, flexibles, faciles à fabriquer et moins chères à produire tout en étant résistantes
  - Une forte absorption optique
  - La longévité n'est toujours pas maîtrisée

## 1.8 Les matériaux semi-conducteurs III-V

### 1.8.1 Définitions

Les SC III-V sont des alliages de matériaux constitués par un ou plusieurs éléments de la 3<sup>ème</sup> colonne et la 5<sup>ème</sup> colonne de classification de la table périodique Mendeleïev (figure 1.11) [11].

<i>III<sub>b</sub></i>	<i>IV<sub>b</sub></i>	<i>V<sub>b</sub></i>
<i>Al<sub>13</sub></i>	<i>Si<sub>14</sub></i>	<i>P<sub>15</sub></i>
<i>Ga<sub>31</sub></i>	<i>Ge<sub>32</sub></i>	<i>As<sub>33</sub></i>
<i>In<sub>49</sub></i>	<i>Sn<sub>50</sub></i>	<i>Sb<sub>51</sub></i>

Figure 1.11 Table périodique partiel.

Il existe plusieurs types d'alliage binaire, ternaires du type  $A_x B_{1-x} C$ , ou quaternaires comme  $A_x B_{1-x} C_y D_{1-y}$

Dans le cas d'un alliage ternaire le gap est présenté par l'équation suivante :

$$E_g(x) = x E_{g(AC)} + (1 - x) E_{g(BC)} - x(1 - x) b_{ABC} \quad (1.6)$$

avec

- $x$  : La concentration de l'élément
- $b$  : Paramètres de Bowing
- $E_{g(AC)}$  : Energie de gap du binaire AC
- $E_{g(BC)}$  : Energie de gap du binaire BC

### 1.8.2 Les propriétés cristallines

La plupart des matériaux III-V, le cas de GaN, AlN et BN et InGaA. se présentent principalement sous deux phases cristallines :

### a La structure zinc-Blend

Les SC III-V sont représentés par la structure zinc-blende (cubique). Cette structure est constituée de deux sous-réseaux cubiques à face centrée CFC, l'un des éléments de la 3<sup>ème</sup> colonne et l'autre de la 5<sup>ème</sup> colonne, décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube d'une quantité  $(a_0/4 ; a_0/4 ; a_0/4)$  ou  $a_0$  est la distance entre les atomes dans les réseaux cristallins appelé La constante du réseau [4] figure (1.12).

La constante du réseau est déterminée par plusieurs équations tout dépend le type d'alliage [4] :

$$a_{(ABC)}(x) = x \cdot a_{(AC)} + (1 - x) \cdot a_{BC} \quad (1.7)$$

avec

- $x$  : La concentration de l'alliage ABC
- $a_{AC}$ : Paramètre de maille du binaire AC
- $a_{BC}$ : Paramètre de maille du binaire BC

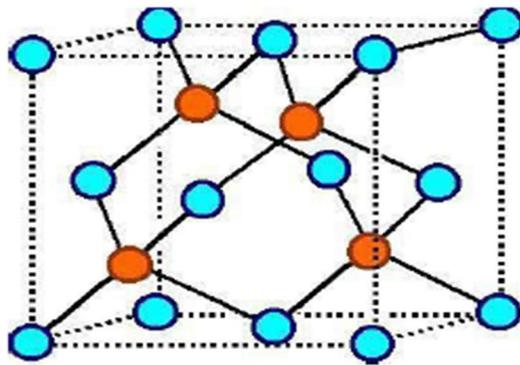


Figure 1.12. La structure cristallin "zinc-blende" [4].

### b La structure wurtzite

La structure wurtzite est constituée de deux réseaux hexagonaux. L'un contenant les atomes d'éléments du groupe III et l'autre contenant ceux d'éléments du groupe V. Interpénétrés et décalés suivant l'axe C de  $5/8^{\text{ème}}$  de la maille élémentaire. Ou "c" correspondant à la hauteur du réseau et un paramètre de maille "a" correspondant au

côté de l'hexagone de base et "l" est la longueur de liaison III-V [14] représenté sur la figure (1.13).

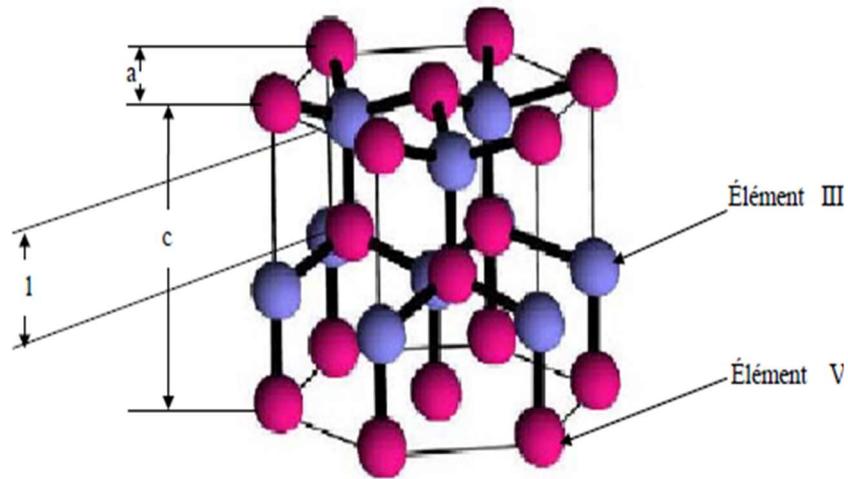


Figure 1.13. Structure cristalline "Wurtzite" [14].

### 1.8.3 Structure des bandes

Les bandes énergétiques se décomposent en bande de valence et bande de conduction où la bande de valence (BV) est la plus basse et la bande de conduction (BC) la plus haute. Chaque bande donne l'état d'énergies possibles pour les électrons en fonction de leur vecteur d'ondes.

Ces deux bandes sont séparées par la bande interdite (gap) avec une énergie de gap noté  $E_g$  [13], il existe deux types de gap fondamentaux (figure 1.14) :

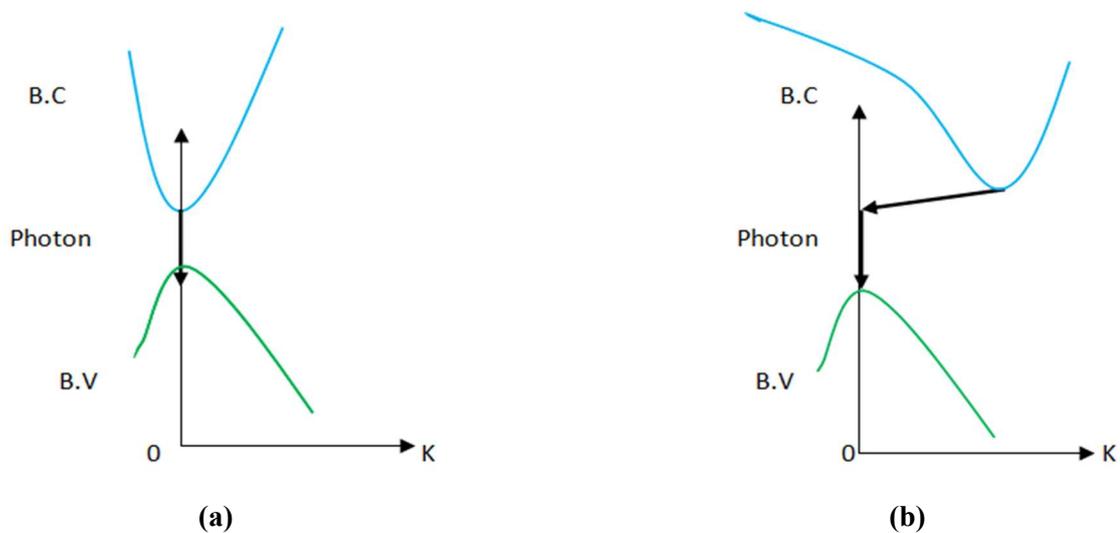


Figure 1.14. Structure de bandes (a) Gap Direct ; (b) Gap Indirect.

Lorsque le minimum de la bande de conduction possède le même vecteur d'onde que le maximum de la bande de valence, le gap est dit direct, et il est dit indirect dans le cas contraire. [13,14].

### 1.8.4 L'absorption

L'absorption des photons est la première étape nécessaire au processus de conversion photovoltaïque, où l'énergie dissipée du photon  $h\nu$  est supérieure ou égale à l'énergie de gap  $E_g$ , cette interaction permet le déplacement d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, et par conséquent il y a lieu à une création des paires électrons-trous. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) [4]. On peut exprimer l'absorption par la relation suivante [4] :

$$\alpha(x, \lambda) = \frac{4\pi k(x, \lambda)}{\lambda} \quad (1.8)$$

avec

- $x$  : la concentration d'un élément
- $\lambda$  : longueur d'onde
- $K$  : coefficient d'atténuation
- $\alpha_0$  : coefficient d'absorption du matériau

## 1.9 Les cellules solaires multi-jonctions

### 1.9.1 Définitions d'une cellule solaire triple jonctions

Les cellules solaires triples jonctions (CSTJ) sont composées de 3 sous-cellules à base d'un alliage de matériaux à une énergie de gap décroissante avec des épaisseurs faibles de l'ordre de quelque  $\mu\text{m}$  [15-16], figure (1.15).

Cette technologie permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements.

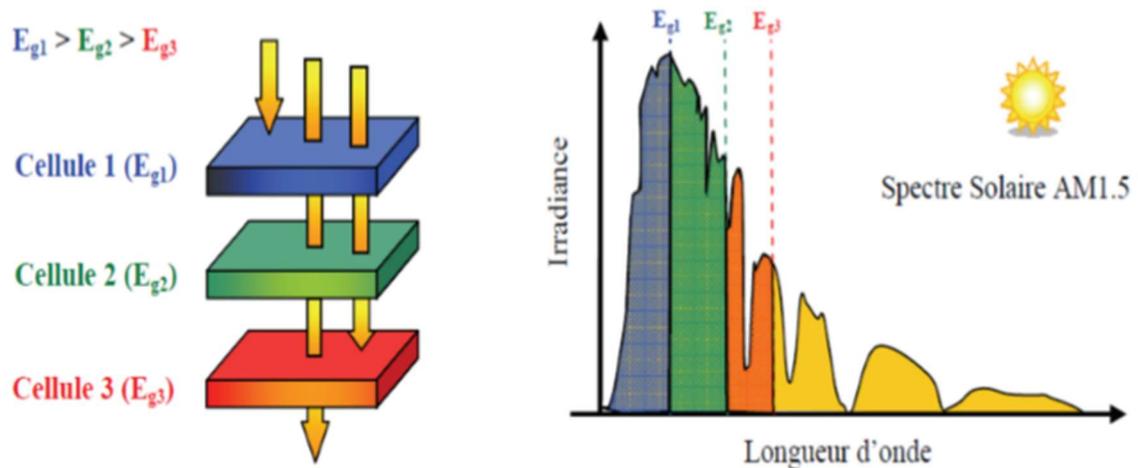


Figure 1.15. Principe de la cellule multi jonctions [8].

## 1.9.2 Le modèle du circuit équivalent à une diode et à deux diodes

Les modèles de circuit équivalent à deux bornes d'une cellule à triple-jonction avec une seule diode et deux diodes pour chaque jonction sont représentés sur la figure (1.16).

La relation I-V de chaque sous-cellule pour le modèle à une diode est donnée par [18] :

$$I_1 = I_{cc,1} - I_{s,1} \left( \text{Exp} \left( \frac{qV_1 + IRs_1}{n_1 kT} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IRs_1}{Rsh_1} \right) \quad (1.9)$$

$$I_2 = I_{cc,2} - I_{s,2} \left( \text{Exp} \left( \frac{qV_2 + IRs_2}{n_2 kT} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IRs_2}{Rsh_2} \right) \quad (1.10)$$

$$I_3 = I_{cc,3} - I_{s,3} \left( \text{Exp} \left( \frac{qV_3 + IRs_3}{n_3 kT} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IRs_3}{Rsh_3} \right) \quad (1.11)$$

où

- $I_{cc,i}$ : le courant du court-circuit
- $I_{s,i}$ : le courant de saturation inverse de la diode.
- $V$  : la tension.
- $n_i$  : le facteur d'idéalité de la diode.
- $q$  : la charge élémentaire.
- $k$ : la constante de Boltzmann.
- $T$  : la température absolue.
- $R_s, R_{sh}$  sont, respectivement, la résistance série et la résistance shunt.

- $i$  : le numéro de sous-cellule (1: supérieure, 2 : moyenne et 3: inférieure).

La relation I-V de chaque sous-cellule pour le modèle de deux diodes est donnée par [20] :

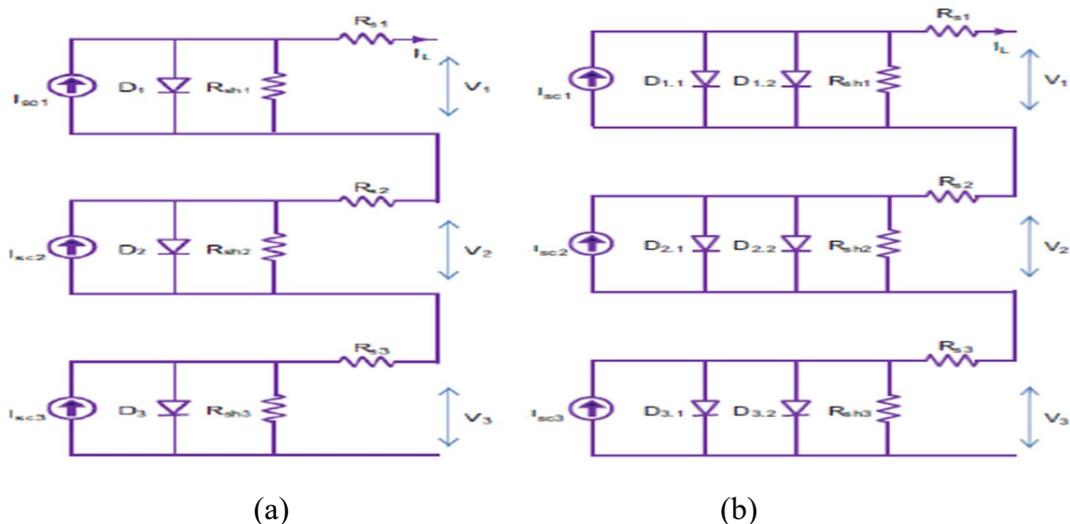
$$I_1 = I_{ph,1} - I_{s1,1} \left( \exp\left(\frac{qV_1}{n_1.k.T}(V_1 + I_1 R_{s1}) - 1\right) \right) - I_{s2,1} \left( \exp\left(\frac{qV_1}{n_2.k.T}(V_1 + I_1 R_{s,1}) - 1\right) \right) - \left(\frac{V + I.Rs1}{Rshi}\right) \quad (1.12)$$

$$I_2 = I_{ph,2} - I_{s1,2} \left( \exp\left(\frac{qV_2}{n_1.k.T}(V_2 + I_1 R_{s2}) - 1\right) \right) - I_{s2,2} \left( \exp\left(\frac{qV_2}{n_2.k.T}(V_2 + I_1 R_{s,2}) - 1\right) \right) - \left(\frac{V + I.R2i}{Rshi}\right) \quad (1.13)$$

$$I_3 = I_{ph,3} - I_{s1,3} \left( \exp\left(\frac{qV_2}{n_1.k.T}(V_3 + I_1 R_{s2}) - 1\right) \right) - I_{s2,3} \left( \exp\left(\frac{qV_2}{n_2.k.T}(V_3 + I_1 R_{s,3}) - 1\right) \right) - \left(\frac{V + I.Rs3}{Rshi}\right) \quad (1.14)$$

où

- $I_{ph,i}$ ,  $I_{s,i}$  et  $I_l$  sont le photo courant , courant de saturation de la diode et courant qui circule.
- $k$  est la constant de Boltzmann,
- $T$  est la température absolue,
- $V$  est la tension,
- $q$  est la charge élémentaire,
- $n$  est le facteur d'idéalité de la diode,
- $R_s$  et  $R_{sh}$  sont les résistances série et shunt, respectivement, et  $A$  est l'aire de la cellule.



**Figure 1.16.** Circuit équivalent d'une cellule PV (a) modèle à une diode ; (b) modèle de deux diodes [4].

### 1.9.3 Cellule solaire triple-jonctions à base de GaInP/GaInAs/Ge

Les matériaux III-V composant nos cellules sont le Phosphure de Gallium d'Indium (GaInP), L'Arséniure de Gallium d'Indium (GaInAs) et le Germanium (Ge), ces SC présentent des largeurs de bandes interdites adaptées pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire.

#### a Le Phosphure de Gallium d'Indium (GaInP)

Est un composé ternaire à partir des deux semi-conducteurs binaire InP et le GaP, il est devenu le matériau le plus dominant pour les sous-cellules supérieures des CSTJ pour couvrir la gamme du spectre solaire comprise entre 350 nm et 650 nm [18]. L'énergie de sa bande interdite est de 1.9eV. Dans le GaInP la mobilité électronique est plus importante que celle dans le GaInAs et 9 fois plus que le Si, d'où une résistance de base plus faible. Le GaInP présente aussi une conductivité thermique de substrat plus grande que le GaInAs [20].

#### b L'Arséniure de Gallium d'Indium (GaInAs)

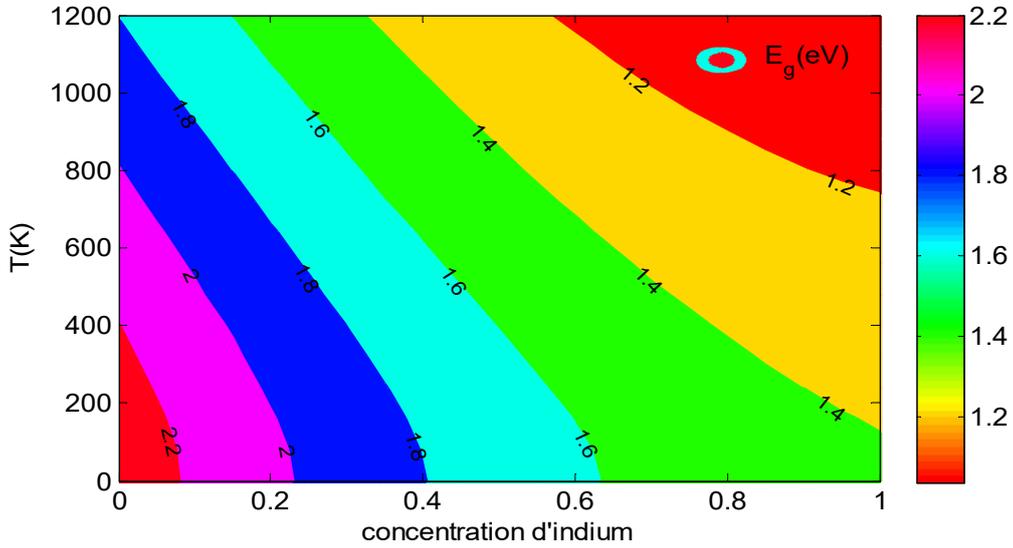
L'In et le Ga sont des éléments de la colonne III du tableau périodique, tandis qu'As est un élément de la colonne V. Le GaInAs est implanté comme sous cellule du milieu pour couvrir la partie du spectre entre 450-900 nm [18]. Il a des propriétés intermédiaires entre celles de GaAs et InAs. Il possède une énergie de bande interdite de 1.4 eV, une mobilité électronique de près de  $10\,000\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ . Toutes ces conditions étant plus favorables pour de nombreuses applications de dispositifs électroniques et photoniques [20].

#### c Le Germanium (Ge)

Avec une structure diamant, sa bande interdite est de 0.66eV à 300 K° [18]. Il est utilisé dans les CSTJ pour former la sous-cellule inférieure. Il reçoit les photons non absorbés ayant une énergie de gap supérieur à 0.6eV, ceci permet d'augmenter Voc de la cellule complète.

L'effet de la température sur l'énergie de gap en variant la concentration d'indium (In) est représenté par l'équation suivante [4] figure (1.17)

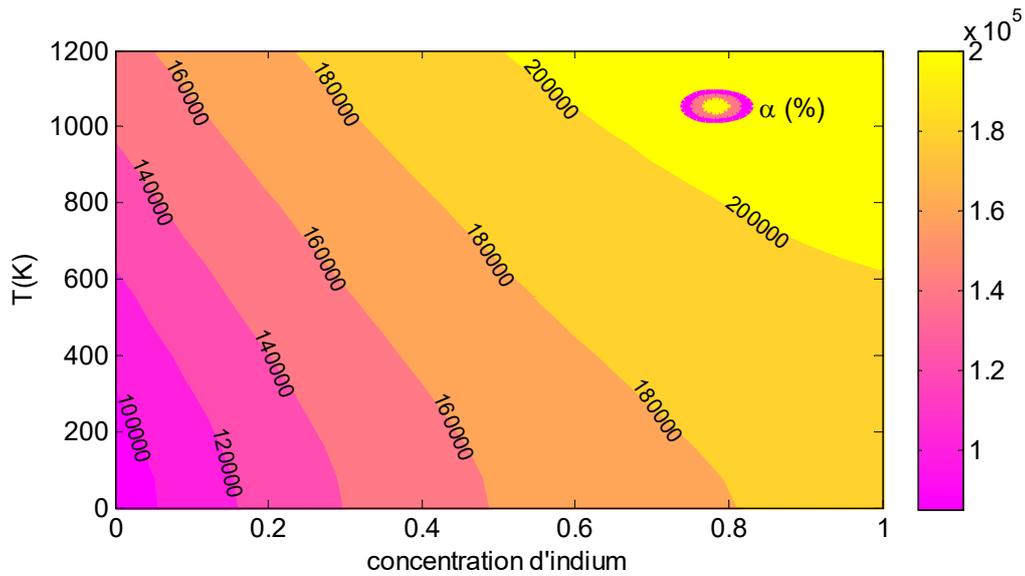
$$E_g(x, T) = E_g(x, 0) - \frac{\alpha(x)T^2}{\beta(x)+T} \quad (1.15)$$



**Figure 1.17.** Energie de gap d'InGaP.

L'effet de la température sur l'absorption en variant la concentration d'indium (In) est donnée par l'équation suivante [4] et représenté sur la figure (1.18)

$$\alpha(x, E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g(x)}}{E} \quad (1.16)$$



**Figure 1.18.** Absorption InGaP.

### 1.9.4 Structure de la cellule triple-jonctions à base de GaInP/GaInAs/Ge

La figure (1.19) représente la structure de la CSTJ à base GaInP/GaInAs/Ge.

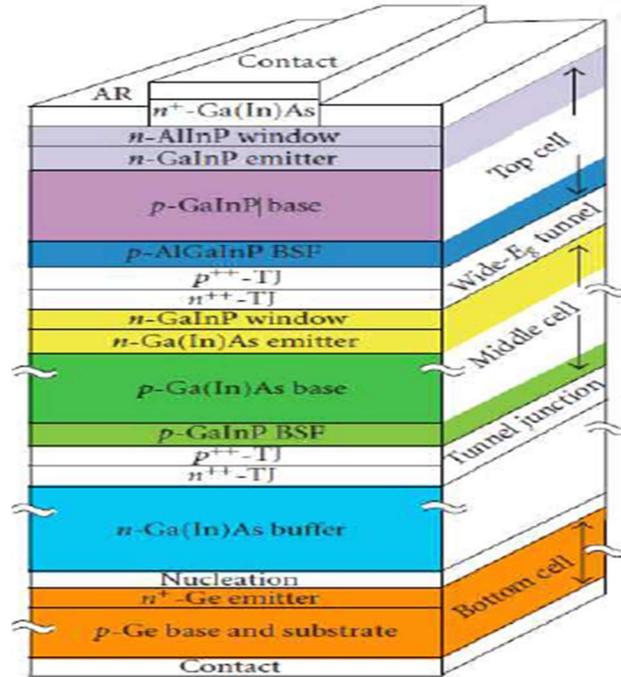


Figure 1.19. La structure d'une cellule solaire triple jonction [19].

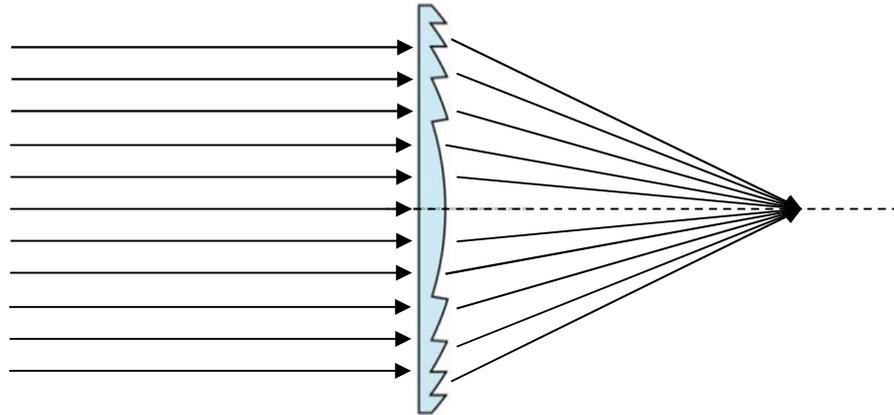
### 1.10 Concentrateurs de Fresnel

Le concentrateur Fresnel été découvert par Augustin Fresnel en 1823[21]. Sa première utilisation été dans le domaine de la navigation maritime (phares) représenté sur la figure (1.20).



Figure 1.20. Phare à base de lentille Fresnel [21].

Ce type de concentrateurs est conçu à partir d'un ensemble de prismes dimensionnés de manière à focaliser le flux lumineux incident perpendiculairement sur sa surface vers un point dit focal, figure (1.21)



**Figure 1.21.** Représentation schématique du concentrateur Fresnel [21].

L'avantage du concentrateur Fresnel réside dans la faible quantité de la matière utilisée pour sa fabrication, relativement aux lentilles convergentes classiques.

L'utilité de ce type de concentrateurs dans le domaine du PV est de minimiser la taille de la cellule PV, tout en amplifiant l'intensité du rayonnement. Les concentrateurs Photovoltaïques (CPV) ont vu le jour en 1967 au niveau du laboratoire national Sandia. Ils ont été utilisés pour les cellules au (Si) qui pouvaient atteindre un rendement de 40% [22].

Pour notre étude on a utilisé un concentrateur Fresnel fabriqué en PMMA (le Poly Méthacrylate de Méthyle), avec un indice de réfraction  $n = 1,491$  [19].

Le PMMA est un milieu transparent à la lumière visible (380 à 740nm), résistant aux chocs [19], avec un faible coût, ce qui en fait un matériau très utilisé dans le domaine optique.

## 1.11 L'aberration chromatique

Une aberration chromatique est la décomposition de la lumière blanche en plusieurs bandes de couleurs en fonction de leurs longueurs d'ondes. L'indice de réfractance souvent noté ( $n$ ) correspondant à chaque couleur est donné par la loi de Cauchy [23]:

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (1.17)$$

Ce phénomène a été constaté vers la fin des années 1750 [21] dès les premières lunettes astronomiques, comme il peut être observé lorsque la lumière traverse une lentille Fresnel, il se produit aussi naturellement lorsque les gouttes de pluies réfractent la lumière du soleil et forment un arc-en-ciel (figure 1.22).



**Figure 1.22.** Exemple d'aberration chromatique (arc en ciel).

A partir de la loi de Cauchy, L'indice bleu, donne une distance focale bleue plus courte, et l'indice rouge donne une distance focale plus grande.

L'aberration chromatique a été appliquée en PV à l'aide du concentrateur Fresnel. Où le principal effet de ce phénomène est de créer une différence de focalisation entre les rayons de longueurs d'onde différentes.

L'absorption de la lumière et l'aberration chromatique d'un concentrateur Fresnel peuvent affecter les performances des CSTJ ce que nous allons expliquer dans le chapitre II.

## **1.12 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions de base sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque. Ainsi qu'on a décrit le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres, Comme on a présenté les matériaux III-V et leurs propriétés, Puis nous avons évoqué les différentes générations de cellules solaires avant de développer plus spécifiquement les CSTJ à base des matériaux III-V sous concentrateurs Fresnel et ainsi que l'aberration chromatique.

# Chapitre 2 Partie expérimentale et simulation des cellules solaires triples jonctions

---

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons l'étude théorique et la simulation de notre CSTJ. Par la suite nous présentons les procédures expérimentales et les matériels utilisés durant notre travail.

## 2.2 Etude théorique

Lorsque les rayons quittent le matériau, ils convergent en différents points, ceci est principalement dû au changement d'indice de réfraction du matériau dont la longueur d'onde donne lieu à une aberration chromatique.

L'aberration chromatique peut se manifester par une aberration axiale, cela veut dire que chaque couleur de lumière est focalisée à une distance focale différente.

Pour détailler ce phénomène on a besoin prendre en compte plusieurs paramètres en fonction de la longueur d'onde :

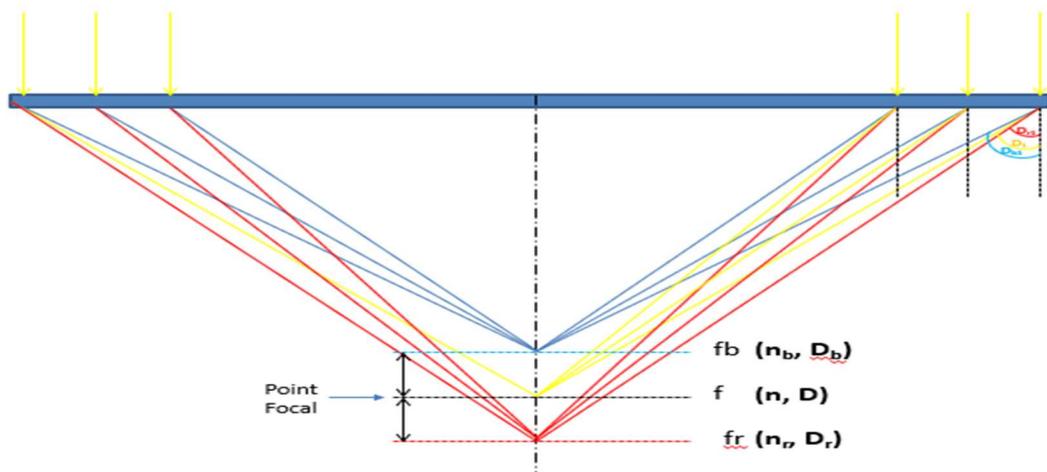


Figure2.1. Démonstration de l'aberration chromatique.

### 2.2.1 L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde

Le PMMA a un indice de réfraction qui est égal à 1.49 pour  $\lambda=587,6$  nm (le blanc). Cet indice varie dans ce milieu en fonction de chaque longueur d'onde, il peut être approché par la formule suivante de Cauchy [24] :

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

Où a, b sont des constantes du matériau avec,  $a = 1,468$  et  $b=5,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$

### 2.2.2 La déviation en fonction de la longueur d'onde

En tenant compte de la loi de Snell-Descartes qui est donnée par la formule (2.2)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

$n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction de chaque milieu qui sont représentés sur la figure (2.2)

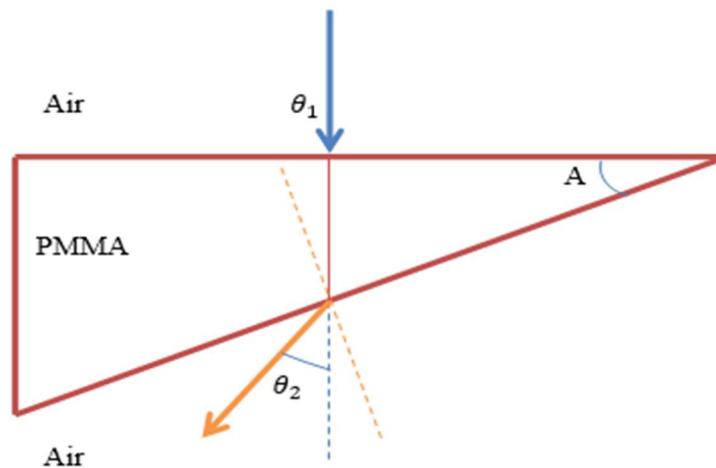


Figure 2.2. Prisme Air-PMMA-Air.

En appliquant les règles trigonométriques, on obtient la formule suivante de la déviation de chaque longueur d'onde :

$$D(\lambda) = \arcsin(n(\lambda)\sin A) - A \quad (2.3)$$

avec

- A : angle au sommet

### 2.2.3 La distance focale en fonction de longueur d'onde

En utilisant les règles trigonométriques, les différentes longueurs d'ondes ont une distance du point focal donnée par la formule suivante :

$$F(\lambda) = \text{Arctang} \frac{L/2}{D} \quad (2.4)$$

avec

- L : la longueur du concentrateur
- F : la distance focale de chaque longueur d'onde

### 2.2.4 Coefficient Fresnel

Ce coefficient décrit la réflexion et la réfraction d'une onde lorsqu'elle traverse un milieu, c'est le rapport entre l'onde incidente et l'onde transmise.

#### a Coefficient de transmission Air – PMMA

Avec  $n_1$  : l'indice de réfraction de l'air

Et  $n_2$  : l'indice de réfraction du PMMA

Pour une incidence normale  $\theta_1=0$ , le rapport de transmission du 1<sup>er</sup> milieu sera égale à :

$$T_1 = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2} \quad (2.5)$$

#### b Coefficient de transmission PMMA – Air

Avec  $n_1$  : l'indice de réfraction du PMMA

Et  $n_2$  : l'indice de réfraction de l'air

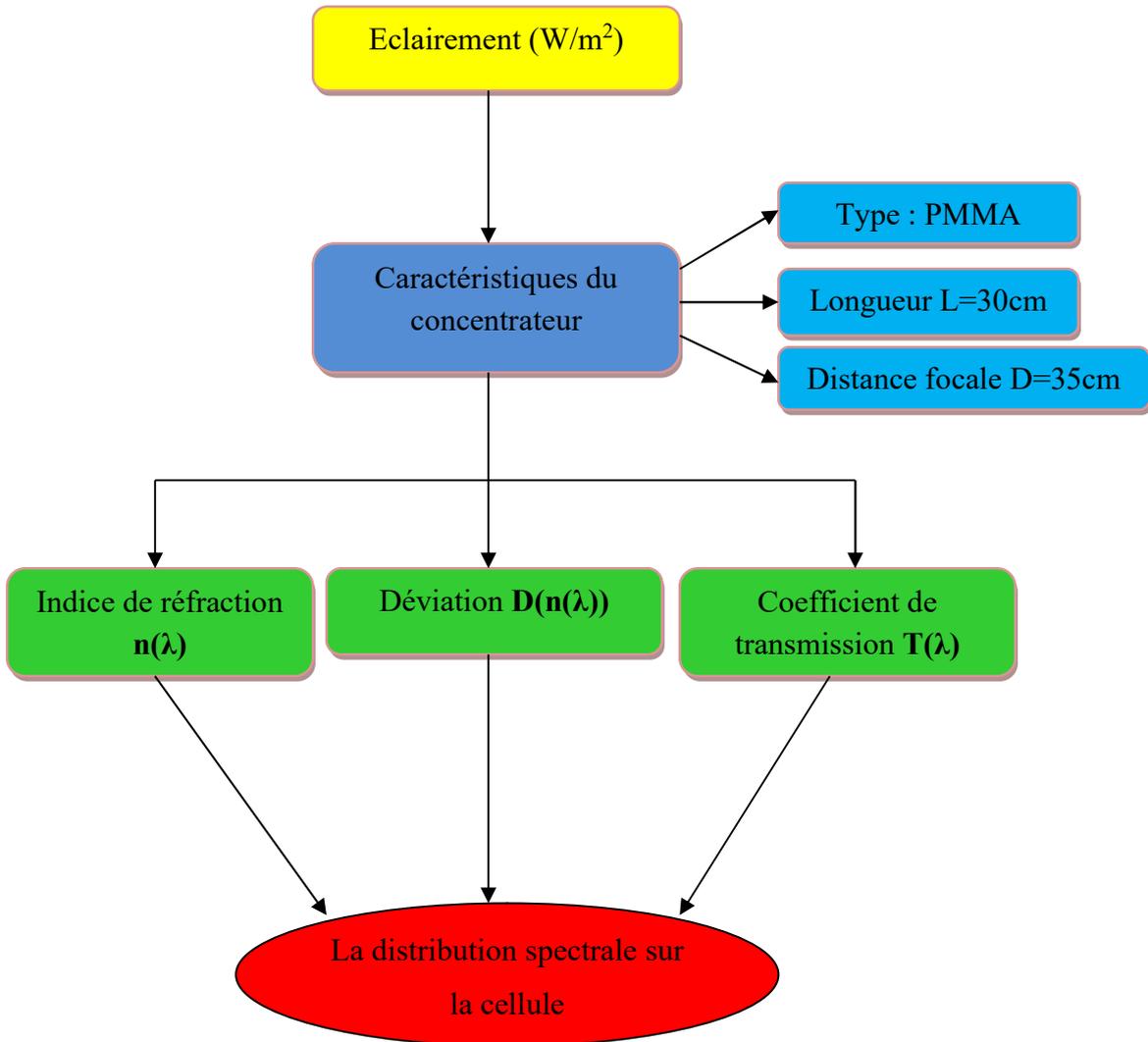
Le rapport de transmission de ce 2<sup>ème</sup> milieu est égal à :

$$T_2 = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.6)$$

Pour notre étude on s'intéresse au coefficient de transmission optique des deux milieux en appliquant la loi de Snell et Descart et les relations trigonométriques

En remplaçant ces équations dans le rapport de transmission du 2<sup>ème</sup> milieu dans l'équation (2.7) :

$$T = \frac{2 \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1) \cos(\theta_1)}{\left[ \sin(\theta_1) \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\sin \theta_1)^2} + \cos(\theta_1) \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1) \right] \left[ \cos(\theta_1) \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\sin \theta_1)^2} + \frac{n_1}{n_2} (\sin \theta_1)^2 \right]} \quad (2.7)$$



**Figure 2.3.** Les différents paramètres qui influent sur la cellule.

## 2.3 Simulation

À cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés vers la simulation pour déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires. Pour notre étude on a simulé la CSTJ suivante.

### 2.3.1 Structure de la cellule simulée

La structure de la CSTJ utilisée dans la simulation est InGaP/GaAs/Ge.

- La cellule supérieure à de base : InGaP
- La cellule médiane à de base : InGaAs
- La cellule inférieure à de base : Ge

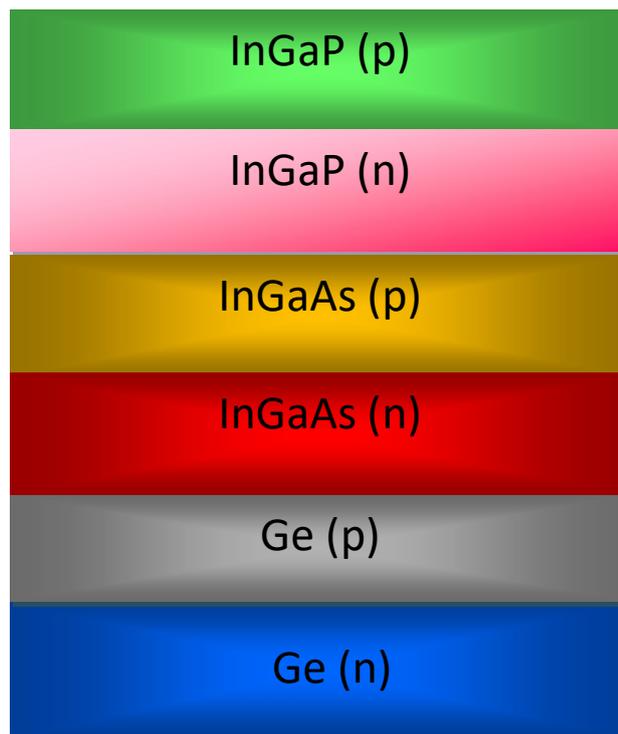


Figure 2.4. Structure de la cellule GaInP/InGaAs/Ge.

### 2.3.2 Paramètres utilisés dans la simulation

Les paramètres d'entrée de la cellule à triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sont donnés dans le tableau (2.1) à AM1.5G et à une température de 300K.

**Tableau 2.1.** Paramètres d'entrée de la CSTJ.

<b>Matériaux</b>	<b>InGaP (p)</b>	<b>InGaP (n)</b>	<b>InGaAs (p)</b>	<b>InGaAs (n)</b>	<b>Ge (p)</b>	<b>Ge (n)</b>
<b>Paramètres</b>						
<b>Épaisseur (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0.05	0.55	0.5	0.8	0.5	20
<b>Dopage (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	2e18	7e19	2e18	2e17	1e18	1e19

## **2.4 Partie expérimentale :**

### **2.4.1 Le but de la manipulation**

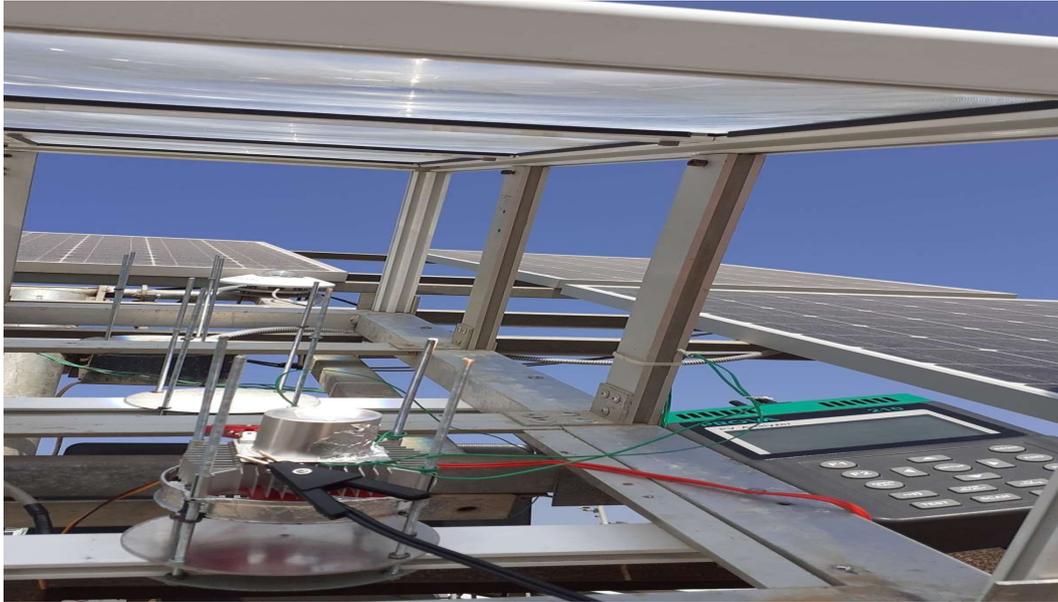
Le but de notre expérience est de déterminer les caractéristiques électriques d'une CSTJ à base de GaInP/GaInAs/Ge et ces performances sous un éclairciment variable ainsi qu'on variant la distance entre la cellule et le point focale.

### **2.4.2 Procédure de la pratique**

Pour notre expérience qui a été faite au sein de l'unité de développement des équipements solaires (UDES), On a eu l'opportunité de pouvoir faire cette application expérimentale.

En premier lieu nous avons pris notre cellule solaire à base de GaInP/ GaInAs/ Ge qu'on a mis sous le concentrateur de Fresnel a une distance focale de 35cm qui est représenté sur la figure (2.5).

Par la suite, on a varié la distance entre le point focale et la CSTJ avec un intervalle de  $[-0.5\text{mm} ; +0.5\text{mm}]$  et nous avons pris nos mesures avec l'analyseur PV ( $P_{\text{max}}, V_{\text{oc}}, I_{\text{cc}}$ ).



**Figure 2.5.** Photographie du dispositif expérimental.

### **2.4.3 Matériels utilisés**

#### **a Le pyranomètre**

Le pyranomètre est un instrument pour mesurer l'irradiance solaire (directe et diffuse) qui atteint la surface terrestre.



**Figure 2.6.** Pyranomètre.

## b L'analyseur PV

Analyseur d'installations solaires professionnelles pour l'essai, l'entretien, le dépannage et la vérification de l'efficacité des panneaux solaires. Il donne aussi une aide précieuse pour l'installation des panneaux solaires, il peut déterminer le calibre approprié des commutateurs et la position optimale des panneaux pour un meilleur rendement. Il permet aussi la détection des panneaux défectueux.



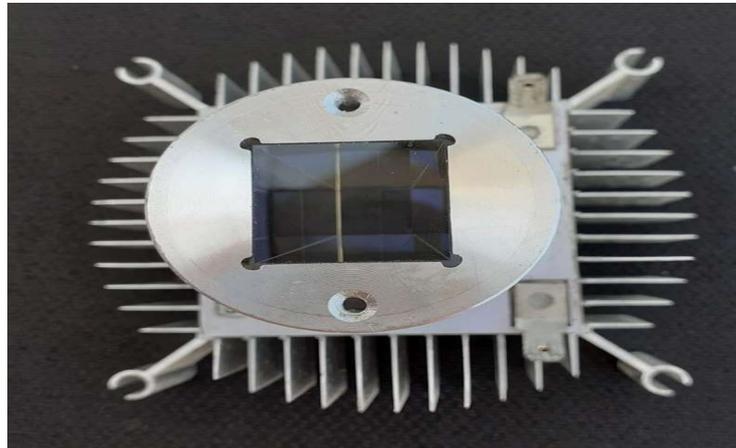
Figure 2.7. L'analyseur PV.

L'analyseur mesure et affiche :

- La recherche maximum d'énergie solaire ( $P_{\max}$ ) par fonction AUTO SCAN
- La tension maximum  $V_{\max}$  à  $P_{\max}$
- Le courant maximum  $I_{\max}$  à  $P_{\max}$
- La tension circuit ouvert  $V_{oc}$
- Le courant court-circuit  $I_{cc}$
- La courbe I/V d'un panneau ou d'un ensemble de panneaux solaires
- Le calcul de l'efficacité (%) d'une installation
- L'irradiation solaire en  $W/m^2$
- La température du panneau

Toutes ces fonctions sont accessibles depuis le logiciel de l'analyseur, tous les relevés effectués peuvent être sauvegardés sous forme de fichiers datés, facilement récupérables.

**c La cellule solaire a base GaInP/ GaInAs/ Ge**



**Figure 2.8.** Cellule GaInP/ GaInAs/ Ge.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié en premier lieu la partie théorique qui décrit le comportement de l'angle incident entre le concentrateur et la cellule. Puis dans la deuxième partie nous avons effectué une simulation de notre CSTJ pour obtenir ses propriétés optiques et électriques. A la fin nous avons donné le matériel utilisé pendant notre étude expérimentale et sa procédure.

# Chapitre 3 Résultats et discussions

---

## 3.1 Introduction

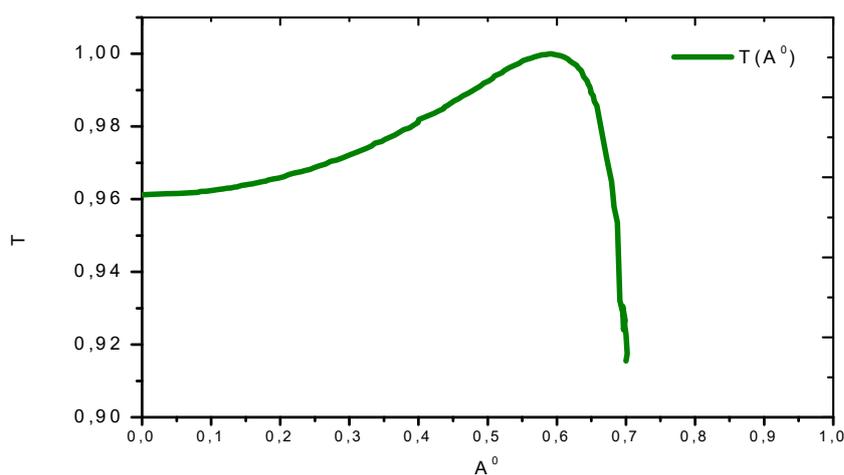
Dans ce chapitre, nous présentons tous les résultats de l'étude théorique et de simulation ainsi que les résultats expérimentaux détaillés que nous avons obtenus en caractérisant la CSTJ.

## 3.2 Résultats de l'étude théorique

### 3.2.1 Coefficient de Fresnel pour chaque milieu

#### a Coefficient de transmission Air – PMMA

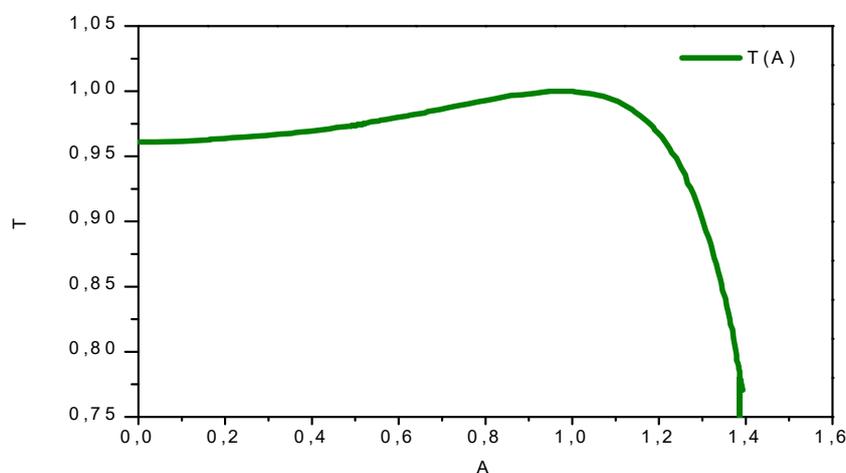
Le graphe de la figure (3.1) nous montre la variation du coefficient de transmission d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent. On remarque que le coefficient de transmission croît jusqu'à la valeur maximale de 1.



**Figure 3.1.** Coefficient de transmission d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent.

## b Coefficient de transmission PMMA – Air

Le graphe de la figure (3.2) nous montre la variation du coefficient de transmission d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent.



**Figure 3.2.** Coefficient de transmission d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent.

A partir de la figures (3.1) et la figure (3.2) pour un angle incident égale à  $90^\circ$  la lumière est totalement transmise, ou  $T=1$  et  $R=0$ . Cet angle particulier est appelé angle de Brewster.

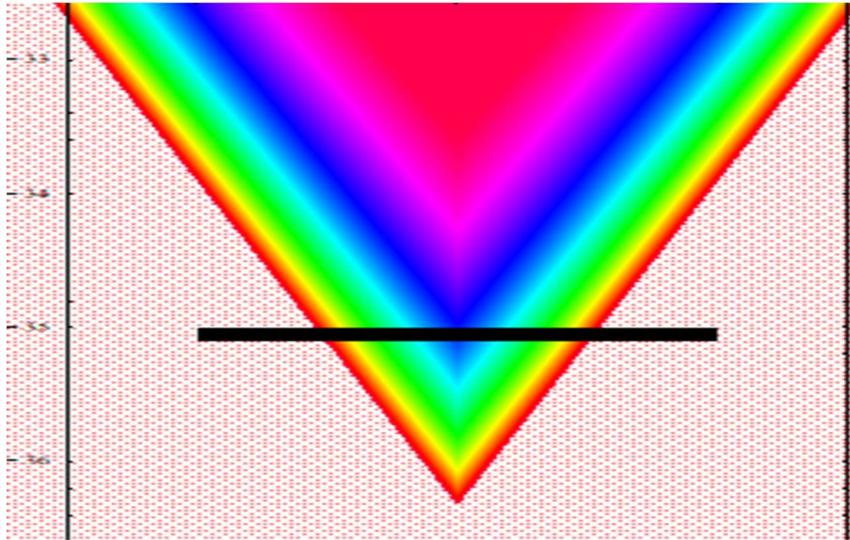
### 3.2.2 La distribution spectrale sur la cellule solaire

Le tableau (3.1) suivant nous donne les différentes valeurs de l'indice de réfraction et la déviation ainsi que la distance focale pour chaque longueur d'onde que nous avons calculée par les relations qui ont été cités dans le chapitre 02.

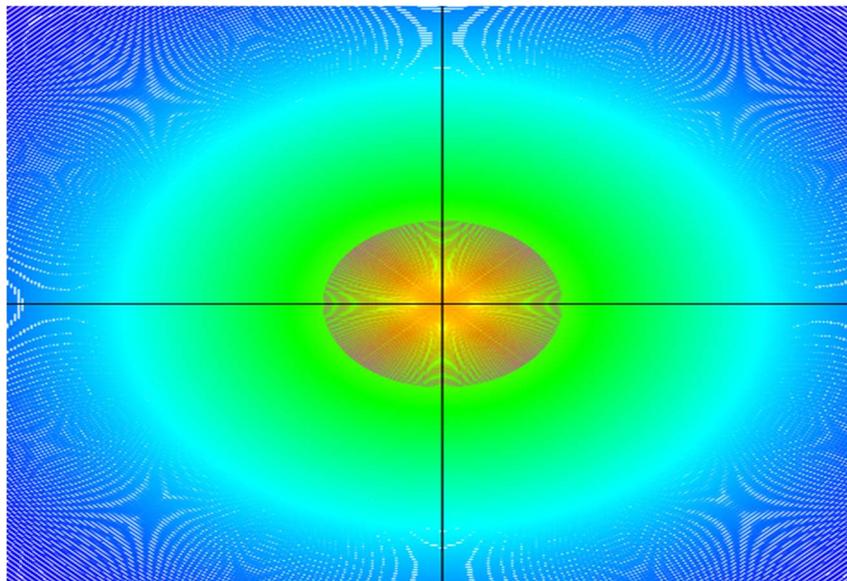
**Tableau 3.1.** Variation de l'indice de réfraction et la déviation ainsi que la distance focale pour chaque longueur d'onde.

	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
$n(\lambda)$	1.5040	1.4872	1.4829	1.4830	1.4813	1.4775
$D(\lambda)$	24.1967	23.0063	22.8038	22.7113	22.6006	22.3426
$F(\lambda)$	33.38	35.33	35.68	35.84	36.03	36.50

La figure (3.3) nous illustre les différentes déviations des couleurs du spectre et leurs distributions sur la cellule solaire GaInP/GaInAs/Ge, figure (3.4)



**Figure 3.3.** La déviation des couleurs du spectre solaire.



**Figure 3.4.** La distribution spectrale sur la CSTJ au point focal.

### 3.3 Résultat de simulation

La simulation des CSTJ à base des matériaux III-V étudiée dans ce travail (InGaP/ InGaAs /Ge), nous avons obtenu les résultats suivants.

#### 3.3.1 Caractéristique I-V de la cellule

La figure (3.5) montre les caractéristiques courant-tension d'une CSTJ InGaP/InGaAs/Ge, ainsi que celles de chaque sous-cellule. La cellule qui a le plus petit gap, ici Ge (cellule 3), possède la plus grande densité de courant. En effet, du fait de son faible gap, la plupart des photons arrivant sur la sous-cellule Ge ont une énergie égale ou supérieure à son gap produisant une forte densité de courant. Quand le gap augmente, la tension augmente également mais de moins en moins des photons ont une énergie suffisante pour être absorbés, réduisant la densité du courant de la cellule. Dans ce type de cellule InGaP/InGaAs/Ge, les deux premiers matériaux sont des alliages très proches produisant la même densité du courant. La courbe mauve de la figure (3.5) correspond à la CSTJ complète et la densité de courant est égale à  $15.7\text{mA/cm}^2$ . Puisque les cellules sont connectées en série, le courant du court-circuit  $J_{sc}$ , correspond au plus petit des courants sortant des sous-cellules, et la tension en circuit ouvert,  $V_{oc}$ , est la somme des  $J_{sc}$  des sous-cellules.

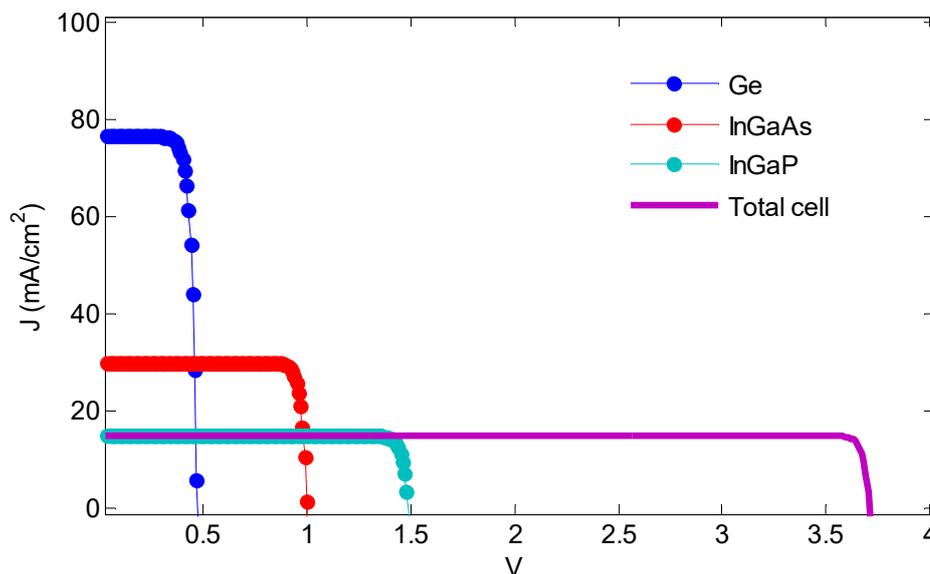
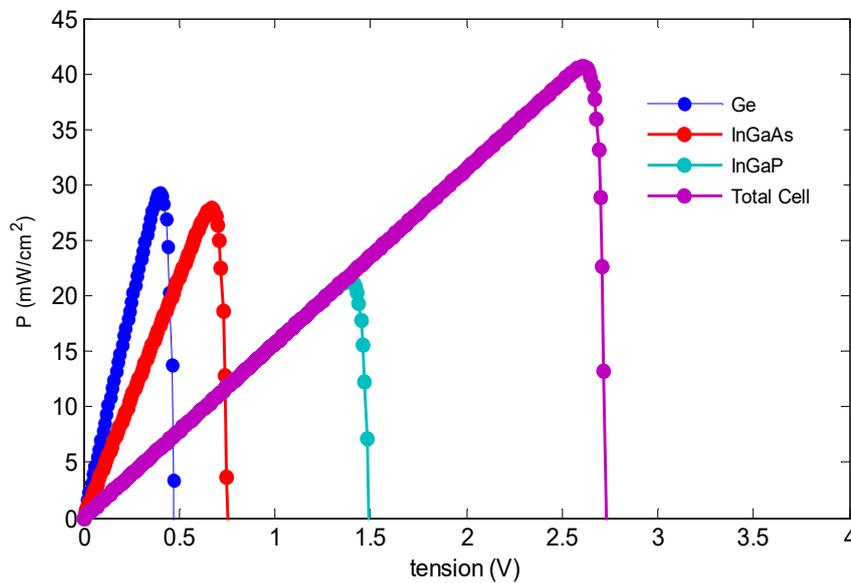


Figure 3.5. Variation de la densité du courant en fonction de la tension de la cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge.

### 3.3.2 Caractéristique P-V de la cellule

La figure (3.6) montre les caractéristiques puissance-tension d'une CSTJ InGaP/InGaAs/Ge. Ainsi que celles de chaque sous-cellule. La cellule qui a la plus grande puissance est la 3<sup>ème</sup> sous-cellule (Ge) et la cellule qui a la plus petite puissance est la 1<sup>er</sup> sous-cellule. Puisque les cellules sont connectées en série, La courbe mauve de la figure (3.7) correspond à la CSTJ complète. Ou la puissance maximale est la somme des puissances de chaque cellule qui atteint la valeur de 41.5Mw/cm<sup>2</sup> et la même chose pour la tension  $V_{co}$ .



**Figure 3.6.** Variation de la densité de puissance en fonction de la tension de le cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge

### 3.4 Résultat de la partie expérimentale

L'expérimentation de la CSTJ à base de S.C III-V utilisé est GaInP/GaInAs/Ge, est basée sur la variation de cette dernière pour différentes distances focales par rapport au concentrateur afin d'obtenir ces caractéristiques ci-dessous aux valeurs optimales.

### 3.4.1 Variation de l'éclairement et la température

La figure (3.7) montre que les conditions d'essai (l'éclairement et la température) sont variables d'une distance à autre durant notre manipulation. L'éclairement diminuait et la température n'est pas stable.

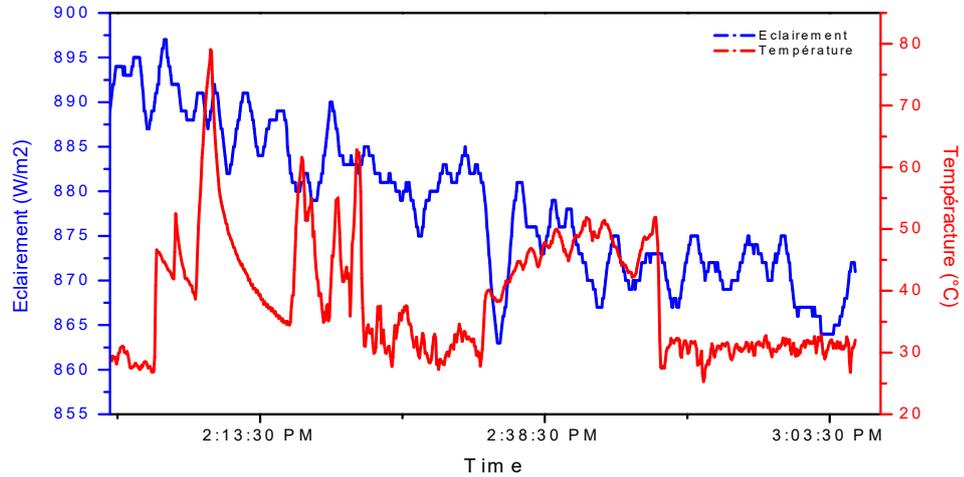


Figure 3.7. Variation de l'éclairement et la température pour plusieurs distances.

### 3.4.2 Variation de la distance de la cellule entre le point focale et le concentrateur

La figure (3.8) représente la caractéristique I-V et P-V au point focal qui est égale à 350mm (donné par le constructeur). La courbe a été mesurée selon les conditions de la manipulation donnée sur la figure (3.8).

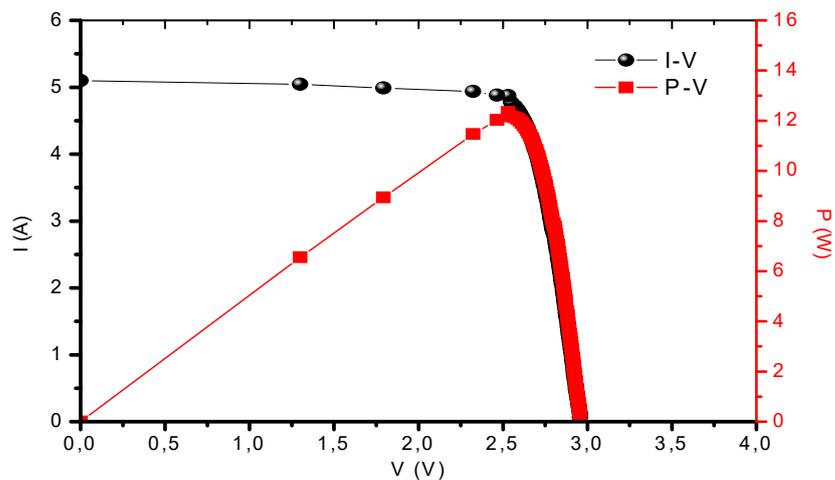


Figure 3.8. Caractéristique I-V et P-V au point focal

### a Caractéristique I-V et P-V au-dessous du point focal

Les figures (3.9, 3.10) représentent les caractéristiques I-V et P-V pour chaque 0.5mm au-dessous du point focal. En générale, on remarque qu'à chaque fois qu'on varie la distance, les différents paramètres varie aussi, Le tableau (3.2) donne les différentes valeurs de ces paramètres.

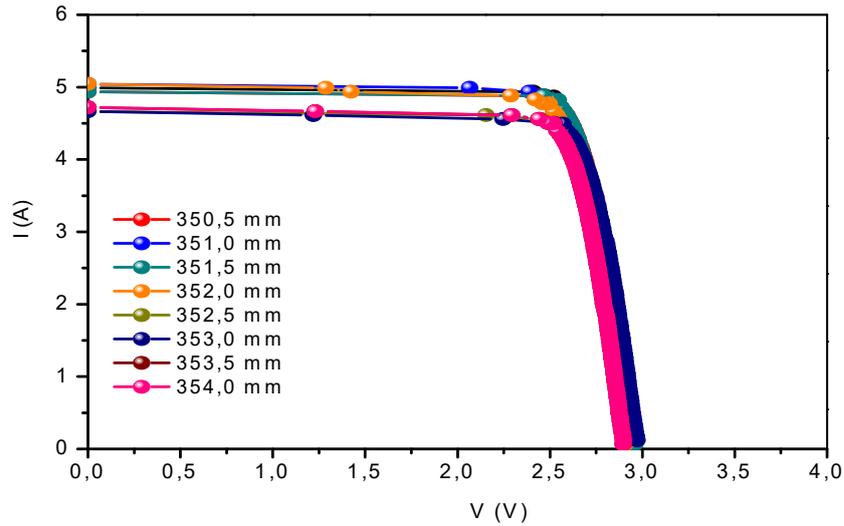


Figure 3.9. La caractéristique I-V au-dessous du point focal.

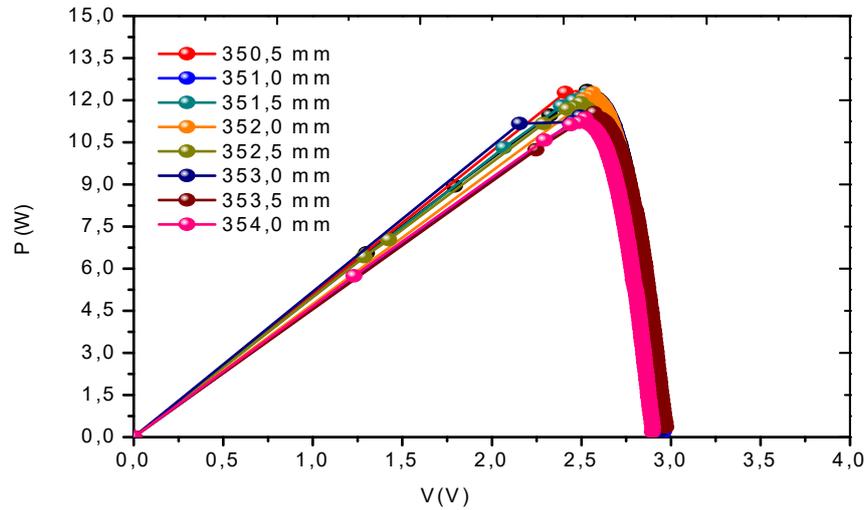


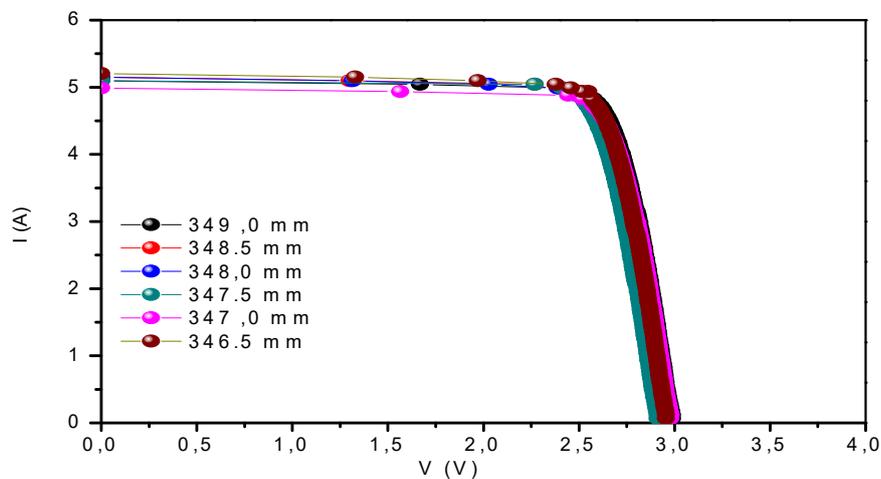
Figure 3.10. La caractéristique P-V au-dessous du point focal.

**Tableau 3.2.** Les valeurs des caractéristiques I-V et P-V au-dessous du point focal.

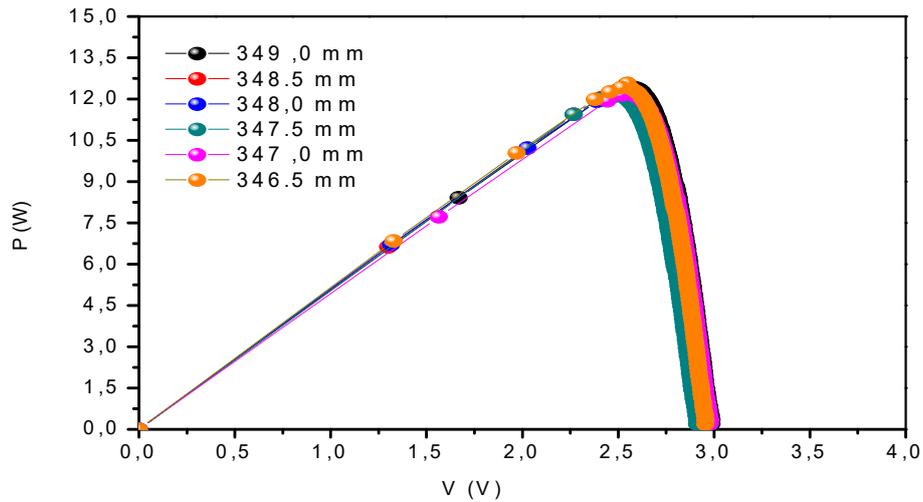
Paramètres Distance(mm)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	FF	η(%)
350 (0)	2.97	5.10	12.33	4.87	2.53	0.81	12.33
350.5 (+0.5)	2.95	4,99	12,26	4.87	2.52	0.83	12.21
351 (+1)	2.94	4,93	12,23	4.82	2.54	0.83	12.16
351.5 (+1.5)	2.94	5,04	12,19	4.83	2.53	0.82	12.20
352 (+2)	2,97	4,93	12,26	4.82	2.55	0.83	12.23
352.5 (+2.5)	2,92	5,04	11,91	4.77	2.50	0.79	11.71
353 (+3)	2,94	4,66	11,42	4.49	2.54	0.83	11.39
353.5 (+3.5)	2,98	4,66	11,55	4.49	2.57	0.82	11.50
354 (+4)	2,91	4,71	11,34	4.50	2.52	0.82	11.31

### b Caractéristique I-V et P-V au-dessus du point focal

La figure (3.11) représente les caractéristiques I-V et P-V pour chaque 0.5mm au-dessus du point focal. Les mêmes variations des paramètres que celle qu'on a obtenu pour les résultats précédent. Le tableau (3.3) donne les différentes valeurs de ces paramètres.



**Figure 3.11.** La caractéristique I-V au-dessus du point focal.



**Figure 3.12.** La caractéristique P-V au-dessus du point focal.

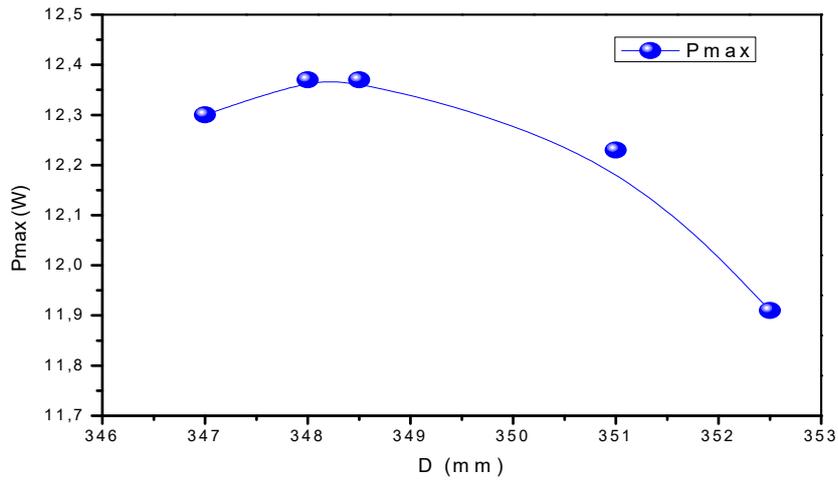
**Tableau 3.3.** Les valeurs des caractéristiques I-V et P-V au-dessus du point focal.

Paramètres Distance (mm)	$V_{oc}$ (V)	$I_{cc}$ (A)	$P_{max}$ (W)	$I_{max}$ (A)	$V_{max}$ (V)	FF	$\eta(\%)$
350 (0)	2.96	5.10	12.33	4.87	2.53	0.82	12.34
349 (-1)	2.99	5,10	12,54	4.29	2.55	0.72	10.92
348.5 (-1.5)	2.92	5,15	12,37	4.93	2.51	0.82	12.37
348 (-2)	2.98	5,15	12,37	4.90	2.52	0.81	12.37
347.5 (-2.5)	2.92	5,10	12,27	4.87	2.52	0.82	12.27
347 (-3)	2.99	4,99	12,30	4.83	2.55	0.82	12.31
346.5 (-3.5)	2.97	5,21	12,57	4.93	2.55	0.81	12.53
346 (-4)	3.02	4,83	12.11	4.66	2.60	0.83	12.12

### 3.4.3 Variation de la puissance maximale $P_m$ en fonction de la distance focale

Pour des valeurs de l'éclairement proche on a essayé d'extraire la puissance maximale que peut atteindre la cellule, lorsqu'on varie la distance focale à partir de 350mm du concentrateur.

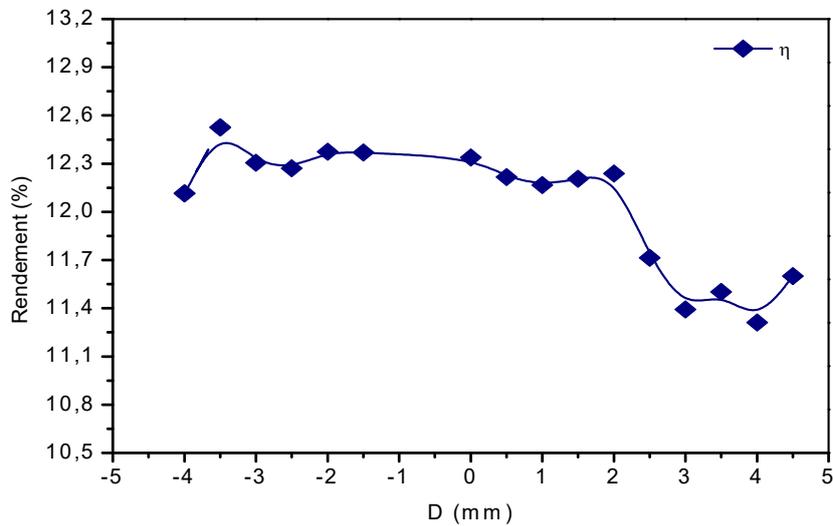
A partir de la figure (3.14), la cellule atteint une valeur maximale de la puissance de 12.57 (W) qui correspond à la distance 346.5mm au-dessous du point focal.



**Figure 3.13.** La puissance maximale en fonction des distances.

### 3.4.4 Variation du rendement de la cellule en fonction de distance

La figure (3.14) nous donne la variation du rendement pour chaque distance, ce dernier varie entre 11% et 12 % et atteint la valeur maximale de 12.52% correspondant à la distance de 346.5mm du point focal.



**Figure 3.14.** Variation du rendement en fonction de la distance focal.

### 3.5 Conclusion

Dans notre partie théorique, on a bien démontré l'aberration chromatique lorsque le faisceau lumineux heurte le concentrateur ainsi que sa distribution spectrale sur la CSTJ. Pour la 2<sup>ème</sup> partie. La simulation numérique de la CSTJ nous a permis d'extraire les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée. La CSTJ à base des matériaux III-V (InGaP/InGaAs/Ge) nous a donné un rendement élevé égal à 41.5%

Lorsqu'on varie la distance de la CSTJ au-dessus et au-dessous du point focal dans notre partie expérimentale. On a trouvé que la cellule atteint une valeur maximale de la puissance de 12.57 (W) qui correspond à la distance 346.5mm au-dessus du point focal avec un rendement de 12.53%. Et dans ce cas on peut dire que l'aberration chromatique a son impact sur le rendement de la CSTJ à base des matériaux III-V (GaInP/GaInAs/Ge) car au point focal on a obtenu un rendement de 12.34% qui est le but de notre étude est d'avoir le maximum de rendement que peut atteindre la cellule.

## Conclusion générale

---

Le travail présenté dans le cadre de ce sujet de master consiste en l'étude de simulation et caractérisation des cellules solaires triples jonctions sous concentrateur, l'objectif de cette étude est d'atteindre le maximum de rendement sous concentration en présence de l'aberration chromatique sur la CSTJ à base des matériaux III-V qui présente le plus grand rendement de conversion. Le principe de la CSTJ étant d'absorber plus de l'énergie dans une large gamme du spectre solaire.

Au début de notre travail on a décrit le comportement des rayons incidents entre le concentrateur et la cellule entre deux milieux différents Air – Concentrateur – Air. Il existe un angle appelé angle limite qui permet la transmission totale d'un faisceau lumineux. Lorsque le faisceau lumineux heurte le concentrateur ce dernier se focalise et elle se crée une aberration chromatique sur la cellule que nous avons donnés tous les paramètres qui la décrit ainsi que sa distribution spectrale sur la CSTJ.

En second lieu. La simulation de la CSTJ à base de GaInP/InGaAs/Ge étudiée dans ce travail est basée sur la variation de la température, compte tenu de l'épaisseur de chaque sous-cellule, la capacité d'absorption des alliages de la CSTJ en fonction de ces paramètres, la cellule photovoltaïque considérée, maintient leurs caractéristiques aux valeurs optimales et atteint un rendement d'élevé.

A partir de l'expérimentation de la CSTJ à base de GaInP/GaInAs/Ge nous avons obtenu une valeur maximale de la puissance de 12.57 (W) qui correspond à la distance 346.5mm au-dessus du point focal avec un rendement de 12.53%. Cette valeur de rendement est plus élevée que le rendement du point focal avec une valeur de 12.34%.

Dans ce cas on peut dire que l'utilisation des matériaux SC III-V dans les CSTJ sous concentration permettent une meilleure absorption du spectre solaire. L'aberration chromatique a influencée sur le rendement de la CSTJ car l'élargissement de la zone d'absorption du spectre conduit à l'augmentation du rendement.

# Bibliographie

---

- [1] J. Michallon, « Étude et optimisation de l'absorption optique et du transport électronique dans les cellules photovoltaïques », Université Grenoble Alpes, (2015).
- [2] M. Messaoud, « Etude et optimisation d'un Modèle de Conversion d'Energie Photovoltaïque Application au Pompage », Université Mentouri Constantine, (2006).
- [3] R. Bestam, « Modélisation et simulation d'une structure a base de semi-conducteur III-V pour le photovoltaïque », Université de Blida, (2011).
- [4] A. Skender, « Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V », Université Mouloud Maamri de Tizi-ouzou, (2016).
- [5] S. Bensalem , « Effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaire », Université Ferhat Abbas Sétif, (2011).
- [6] M. S. Petibou, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, (2009).
- [7] M. BOUSSAID, « Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules photovoltaïques », Université Abou-Bakr Belkaid- Tlemcen, (2011/2012).
- [8] T. Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Météorologie. Université Paris Sud – Paris XI, (2014).
- [9] Les différentes technologies et le processus de fabrication des cellules solaire, 2011.
- [10] R. Bou, « Les différentes générations de cellules photovoltaïques », énergie plus-lesite.be.

- [11] S. Laval, « Physique des Semi-conducteurs III-V », Ecole d'été d'optoélectronique, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS (URA 022), Université Paris Sud, F-91405 Orsay Cedex, France. 35-54 p
- [12] J. L. Pankove, Optical processes in semiconductors, Dover publications Inc. (1971).
- [13] N. Baghdadli, « Etude des propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs III-V à base de galium ».
- [14] M. Djoudi Lakhdar, « Étude des propriétés structurales, électroniques et optiques de l'alliage Semi-conducteur BAlGaN : Etude ab-initio », Université Djilali Liabes de Sidi Bel-abbas, (2013).
- [15] D. Lepage, mémoire de maîtrise.
- [16] H. Moler, « Semiconductors for solar cell applications», Progress in Materials Science, (1999), 205-418.
- [17] A. Diallo, « Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction, Sherbrooke », Québec, Canada, (2011).
- [18] M. Lasladji, « simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour les applications spatiales ».
- [19] F-Z. Benabid-Zouai, « Etude des mélanges PVDF/PMMA et de leurs nano composites PVDF/PMMA/Maghnite en vue d'application comme revêtement », Université Ferhat Abbas Sétif-1, (2015) 62-63p.
- [20] Chaire Développement durable Environnement, énergie et société, Chaire annuelle (le photovoltaïque : principe et filières inorganiques, organiques, hybrides) Jean-Marie Tarascon, (2010-2011).
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Optique\\_non\\_imageante](https://fr.wikipedia.org/wiki/Optique_non_imageante) .
- [22] A. Vauthelin, « Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires », Université Montpellier, (2018).

[23] D. Rio, « Optimisation des optiques bifocales destinées à la correction de la presbytie », Université Paris-Saclay, (2016).

[24] <https://www.ilephysique.net/sujet-variation-de-l-indice-en-fonction-de-la-longueur-d-onde-243631.html>