

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Réseaux et télécommunication

Présenté par

KAMAL Mohamed

&

BOUZAOUIA Abdel Aziz

Simulation et caractérisation d'une cellule solaire multijonction

Proposé par : Pr. AISSAT Abdelkader

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).

*Tout d'abord, nous tenons à remercier naturellement en premier lieu **ALLAH** Le Tout Puissant qui nous a donné la force, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre promoteur Mr. **AISSAT Abdelkader**, professeur à l'université Saad Dahleb Blida, pour sa patience, sa disponibilité, ses encouragements surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.*

*Nous tenons à remercier Monsieur Co-promoteur **KELLIL Nouamen**, qui fut le premier à nous faire découvrir le sujet qui a guidé notre mémoire, aussi qui nous avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser notre travail de terrain.*

*Nous n'oublions pas de remercier vivement Mr. **CHIKHI Lezhar** pour son aide dans le domaine d'électronique.*

Nous exprimons de même nos remerciements les plus sincères aux honorables membres de jury d'avoir accepté d'être examinateurs.

Enfin, nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Merci à vous tous.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le long de notre vie scolaire.

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour nous aider.

A nos Frères et sœurs pour leur appui et leur encouragement.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A mes amies et mes camarades.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

ملخص:

في هذا العمل، قدمنا دراسة ومحاكاة ونمذجة الخلايا الشمسية ثلاثية الوصلات. الهدف من ذلك هو تقديم دراسة حول المبدأ المادي لتشغيل خلية الخلايا الضوئية استنادًا إلى المواد (**InGaP / InGaAs / Ge**) تتميز هذه السبائك الثلاثية، التي هي أشباه نواقل من نوع **III-V** ، بخصائص مهمة ، بما في ذلك طاقة الفجوة التي هي في شكل مباشر . درسنا أيضًا المعلمات الخارجية من خلال نمذجة ومحاكاة وتوصيف الخلية الشمسية التي كان أداءها في الهياكل المختلفة . بعد قراءة خصائص التيار الكهربائي (**I-V**) ، قوة الجهد (**P-V**) تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها لتحديد أفضل مردود η

كلمات المفاتيح: الخلايا الشمسية; تقاطع ثلاثي; طاقة الفجوة ; المرود.

Résumé : Dans ce travail, nous avons présenté l'étude, la simulation et la caractérisation des cellules solaires triple jonction. Le sujet est de présenter une étude sur le principe physique de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque basé sur les matériaux (InGaP/InGaAs/Ge). Cet alliage ternaire qui est un semi-conducteur III-V présente des caractéristiques importantes notamment son énergie de gap qui est sous forme directe. Nous avons également étudié Les paramètres externes en modélisant, simulant et caractérisant la cellule solaire dont Les performances pour différentes structures. Après avoir relevé leurs caractéristiques courant – tension (I-V), puissance – tension (P-V). Les résultats obtenus ont été comparé afin de déterminer le meilleur rendement η .

Mots clé : Cellule solaire ; Triple jonction ; Energie de gap ; Rendement.

Abstract: In this work, we presented the study, simulation and modeling of triple-junction solar cells. The subject is to present a study on the physical principle of operation of a photovoltaic cell based on materials (InGaP/InGaAs/Ge). This ternary alloy, which is an III-V semiconductor, who has important characteristics including its gap energy, which is in direct form. We had also studied the external parameters by modeling, simulating and characterizing the solar cell whose performances for different structures. After reading their current - voltage (I - V), power - voltage (P - V) characteristics. The results obtained were compared to determine the best efficiency η .

Keywords: Solar cell; Triple junction; Gap energy; efficiency.

Listes des acronymes et abréviations

Acronymes	Signification	Unité
I_{cc}	Courant de Court-circuit	A
V_{co}	Tension de Circuit Ouvert	V
η	Rendement électrique	%
P_m	Puissance maximale fournie par une cellule	$W.m^{-2}$
λ	Longueur d'onde	Mm
h	Constante de Planck	J.s
C	Vitesse de la lumière	m/s
P_i	Puissance incidente	$W.m^{-2}$
T	Température	K
I	Courant de la cellule	A
I_m	Courant maximale	A
V_m	Tension maximale	V
Q	Charge élémentaire	C
I_{ph}	Photo-courant	A
I_0	Courant inverse de saturation	A
n	Facteur de qualité de diode	
K	Constante de Boltzmann	$eV.K^{-1}$
R_s	Résistance en série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
I_D	Courant de diode	A
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E_g	Energie de bande interdite d'un matériau	eV

ν	Fréquence	Hz
E_c	Energie du bas de la bande de conduction	J ou eV
E_v	Energie du haut de la bande de valence	J ou eV
V_t	Potentiel thermique	V
$\Phi(\lambda)$	Flux lumineux	
E	Energie d'irradiation	J ou eV
I_{tr}	Intensité de la lumière transmise	A
I_{in}	Intensité de la lumière incidente	A

Signe	Signification
PV	Photovoltaïque
FF	Facteur du Forme
EQE	Efficacité Quantique Externe
SC	Semi-Conducteur
CPV	Photovoltaïque concentrées
Si	Silicium
InGaAs	Arséniure d'Indium et du Galium
InGaP	Phosphure d'Indium et du Galium
Ge	Germanium
MOCVD	L'épithaxie en phase vapeur aux organométallique
CFC	Cubique a Faces Concentrées
CSTJ	Cellule Solaire Triple Jonction
ZnC	Structure Zinc Blende
Ksps	Kilo Samples per Second.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique de l'énergie photovoltaïque	3
1.3 Les cellules photovoltaïques	3
1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	4
1.4.1 L'absorption des photons.....	5
1.4.2 La transformation de l'énergie absorbée	5
1.4.3 Collecte des charges électriques (Jonction P-N)	6
1.5 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	6
1.6 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	8
1.6.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	8
1.6.2 Tension à circuit ouvert, V_{co}	9
1.6.3 La puissance maximum, P_m	9
1.6.4 Facteur de forme, FF	9
1.6.5 Le rendement, η	9
1.6.6 L'efficacité quantique externe (EQE).....	10
1.7 Influence de quelques paramètres sur le rendement photovoltaïque	10
1.7.1 Paramètres internes	10
1.7.2 Paramètres externes	12
1.8 Première génération (Silicium Cristallin).....	13
1.8.1 Cellule en Silicium Monocristallin	13
1.8.2 Cellule polycristallin.....	13
1.9 Cellule 2 ^{ème} génération (couches minces).....	14
1.10 Cellule 3 ^{ème} génération (multi jonctions)	14
1.10.1 Structure d'une cellule multi jonction.....	15
1.10.2 Principe de base	15
1.11 Les semiconducteurs III-V.....	16
1.12 L'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs).....	17
1.13 L'arséniure de Gallium (GaAs)	17
1.14 Arséniure d'indium (InAs).....	18
1.15 Le phosphore d'indium et de gallium (InGaP).....	19
1.16 Le phosphore d'indium (InP)	19
1.17 Le phosphore de gallium (GaP)	20

1.18	Germanium.....	21
1.19	Applications de l'énergie photovoltaïque	21
1.20	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	22
1.20.1	Avantages de l'énergie photovoltaïque.....	22
1.20.2	Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	22
1.21	Conclusion	22
Chapitre 2 Résultats et Simulation.....		23
2	23
2.1	Introduction.....	23
2.2	Energie de Gap	23
2.3	Epaisseur critique	24
2.4	Coefficient d'absorption.....	24
2.5	Variation de l'épaisseur critique	25
2.6	Variation du coefficient d'absorption	26
2.7	Variation de l'EQE en fonction de la longueur d'onde	27
2.8	Caractéristiques courant-tension sous illumination	27
2.9	Variation P(V) des différentes couches et InGaP/InGaAs/Ge	28
2.10	Résultats	29
2.11	Conclusion	30
3	31
Chapitre 3 Réalisation		31
3.1	Introduction.....	31
3.2	Architecture de la carte.....	31
3.3	Circuit imprimé.....	31
3.4	Arduino ATmega 2560.....	31
3.5	TLV246.....	32
3.6	MCP3202	32
3.7	Le Relais.....	32
3.8	Arduino	33
3.9	IV Swinger 2.....	33
3.10	Principe de fonctionnement de la carte.....	34
3.11	Schéma électrique de la carte sur Proteus.....	36
3.12	Conclusion	37
Conclusion générale		38
Bibliographie.....		39

Liste des figures

Figure 1. 1 : Comment fonctionnent les panneaux solaires	4
Figure 1. 2 : Schéma électrique réel de la cellule solaire	7
Figure 1. 3 : (a) Caractéristique I-V d'une cellule solaire, à l'obscurité et sous éclairage, (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V).....	8
Figure 1. 4 : Influence de la résistance série	11
Figure 1. 5 : Influence de la résistance parallèle R_{sh}	11
Figure 1. 6 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I(V)	12
Figure 1. 7 : Influence de la température sur la courbe I(V)	13
Figure 1. 8 : Conception des cellules à jonctions multiples et profondeur de pénétration du spectre solaire illustrée	15
Figure 1. 9 : Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge	16
Figure 1. 10 : Structure cristalline de GaAs	18
Figure 1. 11 : Structure cristalline d'InAs	19
Figure 1. 12 : Structure cristalline de l'InP	20
Figure 1. 13 : Structure cristalline de GaP.....	21
Figure 2. 1 : La structure des bandes d'un semi-conducteur.....	23
Figure 2. 2 : Variation de l'épaisseur critique de la structure en fonction de la concentration en indium de InGaAs /Ge.	25
Figure 2. 3 : Variation de l'épaisseur critique de la structure en fonction de la concentration en indium de InGaP / InGaAs.	25
Figure 2. 4 : variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde et de la concentration en indium.....	26
Figure 2. 5 : variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde et de la concentration en phosphore.....	26
Figure 2. 6 : Variation de l'EQE en fonction de la longueur d'onde des différentes couches.....	27
Figure 2. 7 : Caractéristiques courant-tension sous illumination de chaque sous-cellule et de la cellule à triple-jonction InGaAs/InGaP/Ge complète.	28
Figure 2. 8 : Variation P(V) de différentes couches et InGaP / InGaAs / Ge à base de cellules totales.	29
Figure 3. 1 : programme Arduino.....	33
Figure 3. 2 : interface du logiciel IV swinger 2.	34
Figure 3. 3 : schéma synoptique de traceur IV.....	35
Figure 3. 4 : Schéma Electrique de la carte Sur ISIS.	36
Figure 3. 5 : Circuit de la Carte sur ARES.....	36
Figure 3. 6 : Vue 3D de la Carte.....	37
Figure 3. 7 : L'analyseur I-V réaliser.	37

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : les semi-conducteurs III-V sur le tableau de Mendeleïev.	17
Tableau 1. 2 : Propriété physique de GaAs [24].....	18
Tableau 1. 3 : propriétés physiques de l'InP.	20
Tableau 1. 4 : propriétés essentielles de GaP	21
Tableau 2. 1 : les paramètres caractéristiques du Germanium.....	29
Tableau 2. 2 : les paramètres caractéristiques de InGaAs.....	29
Tableau 2. 3 : les paramètres caractéristiques de InGaP.....	29
Tableau 2. 4 : les paramètres caractéristiques de InGaP/InGaAs/Ge.....	29

Introduction générale

L'énergie dans nos jours est un facteur de développement et le pilier de l'économie moderne, elle est indispensable pour la majorité de nos activités quotidiennes, ces majeures raisons ont rendu ce sujet le domaine d'intérêt des grands décideurs des pays [1].

Actuellement plus de 85,2% de l'énergie mondiale provient des sources épuisables et non durables, tels que le pétrole, le gaz, l'uranium. En revanche, la demande du monde sur l'énergie ne cesse d'augmenter, à raison de la croissance économique et démographique cette balance énergétique, la grande demande de l'énergie et la raréfaction des sources des combustibles a rendu l'homme condamné à trouver d'autres alternatives pour produire l'énergie dont il s'est rendu dépendant [1].

Pour avoir une source durable en termes d'énergie et de diversifier les sources énergétiques, les énergies renouvelables, sont de plus en plus stratégiques [2]. Le recours à ce type d'énergie est motivé par la volonté des dirigeants des pays pour minimiser la dépendance aux énergies fossiles, ces énergies sont de plusieurs types comme, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque [3]. Ces sources d'énergies proviennent directement ou indirectement du soleil. Des études indiquent également que l'utilisation de seulement 0,1% de l'énergie solaire incidente sur la surface de la terre est suffisante pour satisfaire la demande actuelle de l'énergie dans le monde entier, le dispositif qui se base sur cette technologie de production de puissance se nomme cellule photovoltaïque ou pile solaire [4]. Le principal avantage de ces énergies renouvelables est qu'elles sont de sources illimitées, en plus elles n'ont pas d'effet polluant. C'est pourquoi actuellement la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques font l'objet de nombreuses recherches afin de nous permettre une meilleure exploitation de l'énergie solaire [1].

Dans le premier chapitre nous avons parlé des cellules PV en générales et leurs applications, et nous avons expliqué la structure de la cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge. Sur cette base dans le 2^{ème} chapitre nous avons étudié, simulé et caractérisé la cellule solaire multi-jonctions InGaP/InGaAs/Ge tels que les paramètres caractéristiques de cette cellule comme (l'énergie de gap, l'épaisseur critique, variation du coefficient d'absorption α , variation de l'EQE) la représentation des courbes

I(V) et P(V) nous a permis de calculé le facteur forme et le rendement ce qui nous a donné une idée de l'efficacité de chaque sous-cellule qui compose la cellule multi-jonction et le rendement totale aussi. Suivi par le 3^{eme} chapitre nous avons parlé de la conception de l'analyseur I(V) ainsi que les logiciels utilisés, et le principe de fonctionnement de cet analyseur.

Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont une source d'énergie durable non polluante et illimitées. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Nous allons nous intéresser sur l'énergie photovoltaïque, car c'est une technologie qui a été largement développée, depuis l'année 1839 (année de la découverte de l'effet PV). Et toutes ces recherches ont mené à développer les cellules multi-jonction que nous allons expliquer leurs principes dans ce chapitre.

1.2 Historique de l'énergie photovoltaïque

Le phénomène de l'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Après plusieurs recherches et des tentatives de développer ce domaine, cela a conduit à la découverte de l'effet photovoltaïque interne en 1873 par l'ingénieur britannique Willoughby Smith et son assistant Joseph May. Dix ans plus tard la réalisation du premier module de cellules en silicium a été établis, en 1949, la théorie de la jonction PN a été réalisée par William Shockley, les cellules de nos jours fonctionnent à la base de son principe. La première cellule solaire de silicium d'une superficie de 2 cm² et un rendement allant jusqu'à 6 % a été présentée au public réalisée par Bell Labs en 1954, cela a permis en 1958 d'utiliser l'énergie PV pour la première fois dans le domaine aérospatial. Depuis ce temps-là les chercheurs ont continué d'améliorer cette technologie, dans le but d'avoir le plus grand rendement possible en absorbant le plus possible des photons de la lumière incidente sur la cellule [5].

1.3 Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui permet de convertir la lumière incidente provenant généralement du soleil, en un courant électrique. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène [6]. L'électricité produite dépend de

l'éclairage, la cellule photovoltaïque produit un courant continu. Les cellules photovoltaïques qui sont constituées de semi-conducteurs sont plus communes essentiellement à base de silicium (Si). Elles se présentent sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre [6].

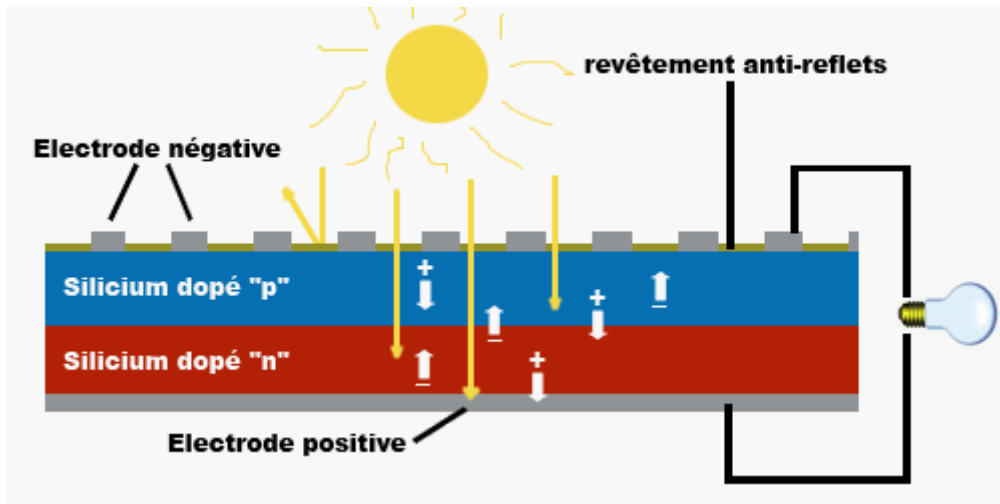


Figure 1. 1 : Comment fonctionnent les panneaux solaires [6].

1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques génèrent de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque, ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un "trou". Théoriquement, l'électron trouve rapidement un trou pour se remplacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et par conséquent une tension entre les deux faces, comme une pile [6].

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique basée sur 3 processus :

- L'absorption d'un maximum de photons possible

- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres
- La collecte des charges électriques (Jonction P-N) [7].

1.4.1 L'absorption des photons

La lumière c'est une onde électromagnétique elle est composée de plusieurs photons, le photon désigne les particules porteuses de la lumière et de l'énergie associée, il n'a pas de charge électrique, on admet généralement que le photon a une masse nulle et sa vitesse dans le vide c'est la vitesse de la lumière ($c=3.10^8$ m/s) et il a une énergie caractérisée par [7] :

$$E = h . \nu = h . \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

- E : énergie en [J]
- h : constante de Planck soit $6,63.10^{-34}$ [J.s]
- ν : fréquence en [Hz]
- c : célérité de la lumière dans le vide soit $3,00.10^8$ [m/s]
- λ : longueur d'onde en [m].

Donc généralement on dit que le photon qui arrive sur un objet peut subir trois phénomènes optiques :

- Réflexion : la lumière est réfléchiée par la surface de l'objet.
- Transmission : la lumière traverse l'objet.
- Absorption : la lumière sera absorbée par l'objet et n'en ressort pas.

1.4.2 La transformation de l'énergie absorbée

Les particules élémentaires qui vont produire le courant électrique à la lumière, sont les électrons de charge $Q_{e^-} = 1.6 \times 10^{-19}$ C. Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome [8].

L'énergie d'un photon d'un certain rayonnement est donnée par une relation simple puisqu'elle est proportionnelle à la fréquence du rayonnement utilisée. La constante universelle qui lie ces deux grandeurs est " h ", la constante de Planck [9].

La constante de Planck a pour unité la fraction de l'énergie sur un temps, c'est-à-dire le Joule-seconde (J.s). Sa valeur, dans le système international d'unités, est :

$$h = 6,6261.10^{-34} \text{ [J.s]}.$$

On a donc la formule :

$$E = h \times f \quad (1.2)$$

L'effet photoélectrique est donc l'émission d'électrons par un métal quand il est exposé à des radiations lumineuses, on doit son explication à Einstein, lui-même inspiré par Maxwell. Les électrons libérés sont ensuite susceptibles de produire un courant électrique [7].

1.4.3 Collecte des charges électriques (Jonction P-N)

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les « attirer » hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre. L'extraction des charges est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore, dite de type « n » accolée à une partie dopée au bore dite de type « p ». C'est à la frontière de ces deux parties, appelée jonction p-n, que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives. Le dopage d'un semi-conducteur va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau [10].

1.5 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent électrique de la Figure (1.2). On peut considérer le cas d'une cellule photovoltaïque idéale à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.) [11].

Pour envisager le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations
- Une résistance parallèle R_{sh} modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuite par les bords de la cellule est au niveau de la jonction) [11].

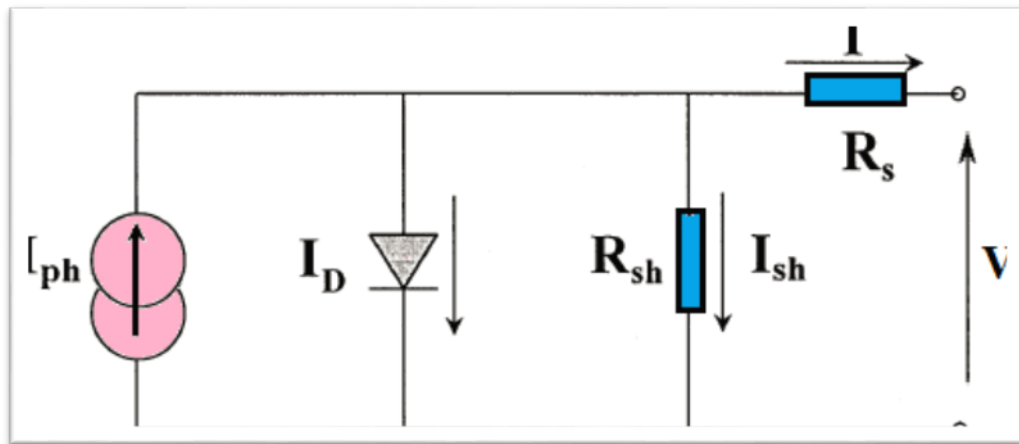


Figure 1. 2 : Schéma électrique réel de la cellule solaire [2].

D'après le schéma équivalent de la cellule solaire dans La figure 1.2 nous avons les 2 équation suivante [2] :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (1.3)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (1.4)$$

où :

I_{ph} : Le photo-courant.

I_d : Courant de la diode.

I_s : Courant inverse de saturation

n : le facteur de qualité de la diode, sans dimension.

V_T : Le potentiel thermique en [V] ; il est donné par :

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (1.5)$$

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K= 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C) [12].

1.6 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Les grandeurs caractéristiques de la cellule solaire peuvent être déterminées à partir de la variation du courant « I » en fonction de la tension « V » à l'obscurité et en particulier sous éclairement décrivant le fonctionnement de la cellule. La figure ci-dessous représente la caractéristique I(V) de cellule solaire sans et avec éclairement [13].

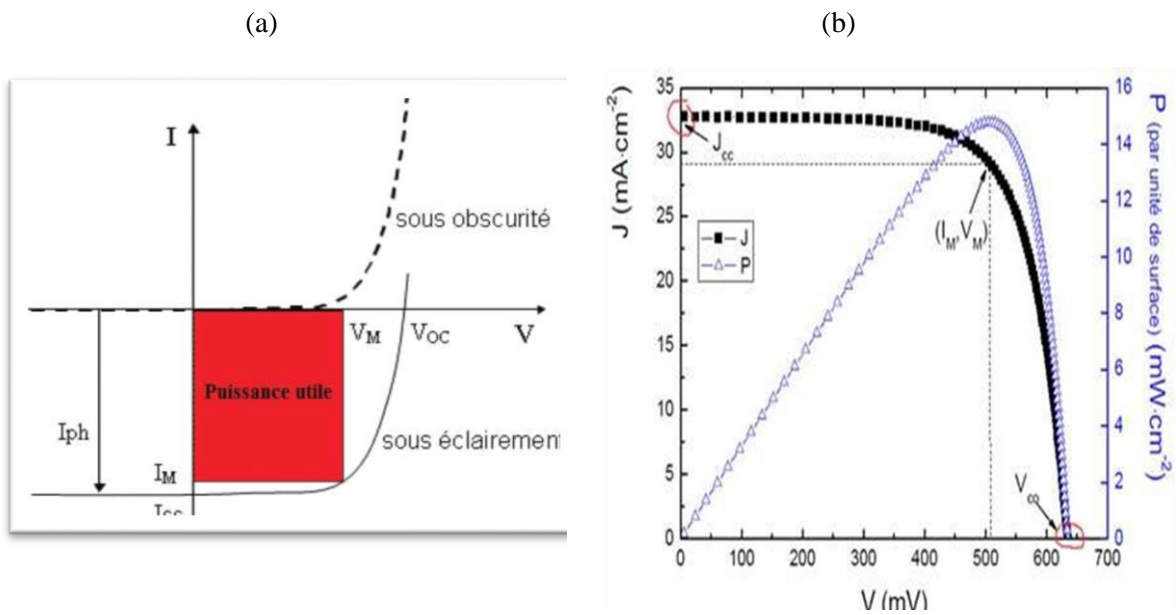


Figure 1. 3 : (a) Caractéristique I-V d'une cellule solaire, à l'obscurité et sous éclairement, (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V).

Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque (V_{co} , I_{cc} , FF, η , EQE), extraits de la caractéristique I(V), permettant de comparer les différentes cellules éclairées dans des conditions identiques [12].

1.6.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent. Il croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [12].

d'où

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

1.6.2 Tension à 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 (1.7) [11] :

$$V_{co} = V_T \log \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (1.7)$$

1.6.3 La puissance maximum, P_m

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (1.8)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement [14].

1.6.4 Facteur de forme, FF

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairage, la puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Donc le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale (I_m, V_m), et le produit (I_{cc}, V_{co}), d'où il est donné par la relation [11] :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension [2].

1.6.5 Le rendement, η

Le rendement η des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. 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 (puissance lumineuse incidente), Le rendement s'écrit [15] :

$$\eta = \frac{I_m \times V_m}{P_{\text{incidente}}} = \frac{I_{cc} \times V_{co} \times FF}{P_{\text{incidente}}} \quad (1.10)$$

1.6.6 L'efficacité quantique externe (EQE)

L'efficacité quantique externe (External quantum efficiency) EQE est un paramètre important qui caractérise un composant photosensible. C'est le rapport entre le nombre de charges électroniques collectées et le nombre de photons incidents sur une surface photo réactive.

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{h.c}{e.\lambda} \quad (1.11)$$

où

$I_{cc}(\lambda)$: est le courant de Court-circuit ($A.cm^{-2}$).

$\varphi(\lambda)$: est la puissance lumineuse incidente ($w.cm^{-2}$).

λ : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

h : est la constante de Planck (J.s).

c : est la vitesse de la lumière (Jms^{-1}).

e : la charge électronique.

$E(\lambda)$: L'énergie du photon.

1.7 Influence de quelques paramètres sur le rendement photovoltaïque

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont :

- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} .
- Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température T [22].

1.7.1 Paramètres internes

Les deux résistances parasites R_s et R_{sh} vont modifier la caractéristique I-V de la cellule solaire en particulier sous éclairnement :

1.7.1.1 Influence de la résistance série

L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclaircissement est illustré sur la figure ci-dessous. La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule [17].

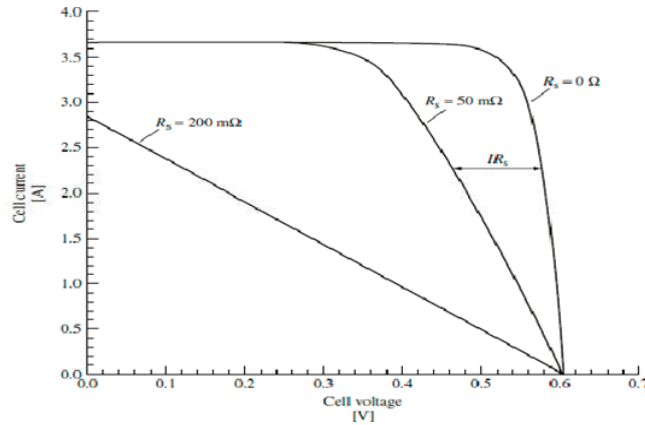


Figure 1. 4 : Influence de la résistance série [17].

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente [17].

1.7.1.2 Influence de la résistance shunt

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. La figure ci-dessous illustre l'effet de la résistance parallèle R_{sh} sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclaircissement.

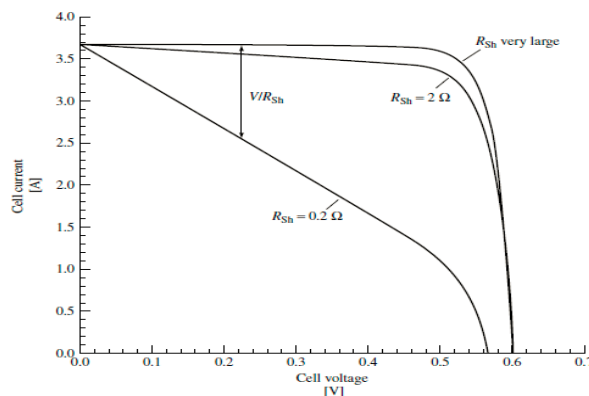


Figure 1. 5 : Influence de la résistance parallèle R_{sh} [17].

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant [17].

1.7.2 Paramètres externes

1.7.2.1 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). L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) de la cellule solaire est représentée sur la figure (1.6), pour une température fixe $T=25c^{\circ}$ [4].

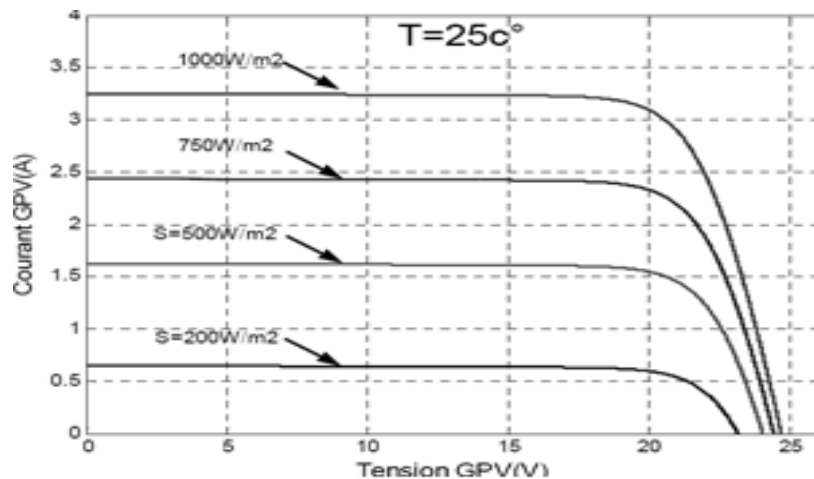


Figure 1. 6 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I(V) [18].

1.7.2.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La (Figure 1.7) montre l'influence de la température, sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire lorsque la température varie, pour un éclairement fixe $E = 1000W/m^2$ [18].

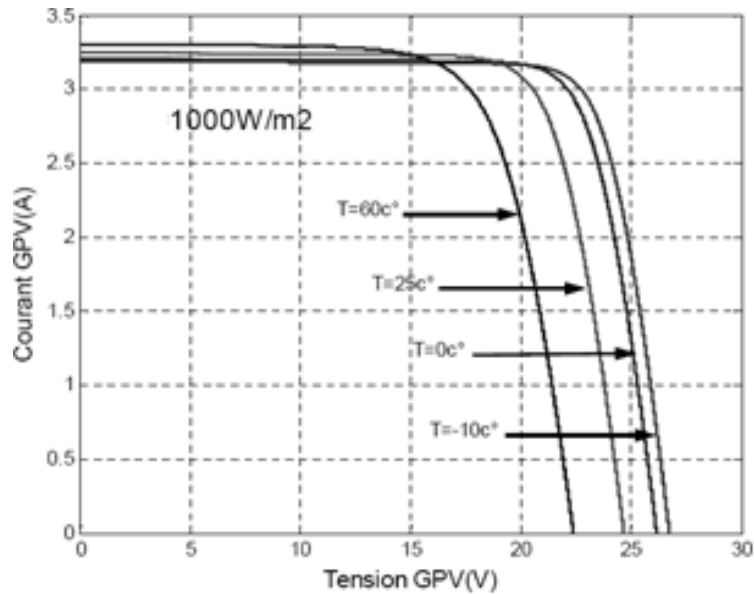


Figure 1. 7 : Influence de la température sur la courbe I(V) [18].

1.8 Première génération (Silicium Cristallin)

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. Dans le tableau périodique des éléments, il est situé dans la colonne IV. C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante. Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin.

1.8.1 Cellule en Silicium Monocristallin

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16%.

1.8.2 Cellule polycristallin

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule polycristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17%. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du

photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin [19].

1.9 Cellule 2^{ème} génération (couches minces)

Elle concerne les cellules solaires à couches minces d'épaisseur inférieure à 50 μm , Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité. Les matériaux généralement utilisés dans cette technologie sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 (CIS), le diséléniure de cuivre d'indium et de gallium Cu(InGa)Se_2 (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie de plus, elles sont flexibles et leur utilisation est plus variée. Ce profile fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération [2].

1.10 Cellule 3^{ème} génération (multi jonctions)

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération [20], connues sous le nom des cellules solaires multi jonctions. Actuellement elles connaissent un intérêt croissant dans le développement des systèmes photovoltaïques en raison de leurs multiples avantages. Les jonctions PN utilisées dans la plupart des cellules photovoltaïques ne permettent la conversion que des photons dont l'énergie est supérieure ou égale au gap du matériau absorbeur de cette jonction. La résolution de cet inconvénient est assurée par l'utilisation des systèmes à plusieurs niveaux, tout en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, ceci permet d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité. Ceci permet de convertir beaucoup plus efficacement le spectre solaire en électricité que des cellules de la 1^{ère} génération. En particulier, les triples jonctions à base de semi-conducteurs III-V, tels qu' InGaP/InGaAs/Ge permettent d'atteindre des rendements de conversion supérieurs à 40 %. Ces performances ont largement contribué à l'essor récent des technologies photovoltaïques concentrées (CPV) [2].

1.10.1 Structure d'une cellule multi jonction

Les cellules solaires à triple jonction III-V étudiées étaient composées de jonctions monolithiques InGaP / InGaAs / Ge en cascade connectées en série sans revêtement antireflet. En bref, le sommet en 0,51 Ga 0,49 P, milieu en 0,01 Ga 0,99 les sous-cellules As, et Ge inférieures ont toutes été appariées sur un réseau et cultivées sur un substrat de Ge de type p par dépôt en phase vapeur par un procédé organo-chimique (MOCVD). La sous-cellule InGaP a été connectée à la sous-cellule InGaAs par une jonction tunnel p-AlGaAs / n-InGaP. La sous-cellule InGaAs a ensuite été connectée à la sous-cellule Ge par une jonction tunnel p-GaAs / n-GaAs. La taille des cellules solaires à triple jonction InGaP / InGaAs / Ge est de 0,5 cm × 0,6 cm de forme rectangulaire avec une surface active d'environ 0,3 cm². Le schéma de la structure solaire à trois jonctions InGaP / InGaAs / Ge typique étudiée est représenté sur la (Figure 1.8).

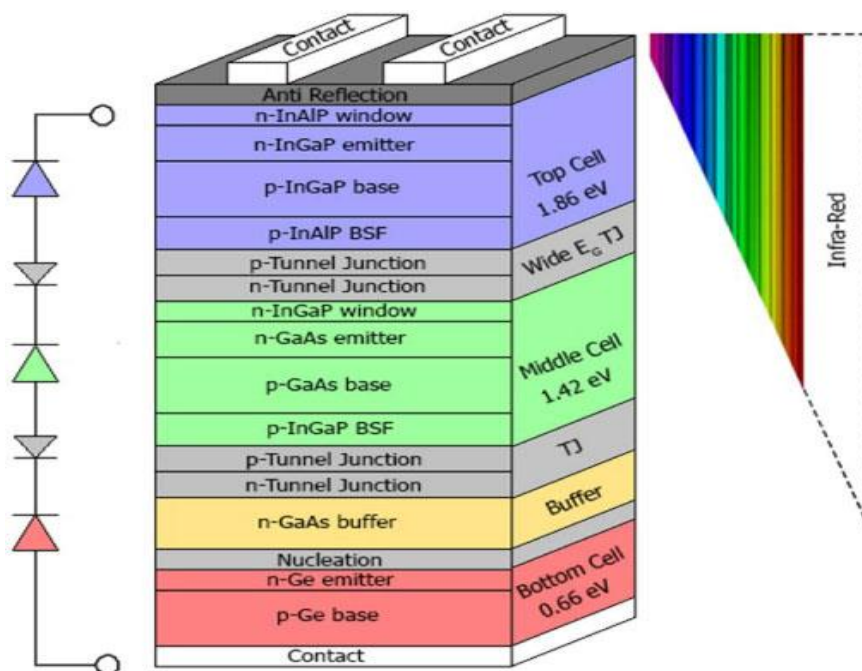


Figure 1. 8 : Conception des cellules à jonctions multiples et profondeur de pénétration du spectre solaire illustrée [21].

1.10.2 Principe de base

Les cellules solaires à haute efficacité utilisent plusieurs matériaux avec des bandes interdites traversant le spectre solaire. Les cellules solaires à jonctions multiples se composent de cellules solaires à mono jonction empilée l'une sur l'autre, de sorte que chaque couche allant du haut vers le bas a une bande interdite plus petite que la précédente, et donc elle

absorbe et convertit les photons qui ont des énergies supérieures à la bande interdite de cette couche [17].

Les cellules solaires multi-jonctions connaissent une limitation fondamentale liée à la disponibilité de matériaux avec bandes interdites optimales permettant simultanément une efficacité élevée grâce à un faible niveau de défaut densités. Les alliages des groupes III et V du tableau périodique sont de bons candidats pour fabriquer de tels cellules multijonctions leurs bandes interdites couvrent une large plage spectrale, et la plupart des bandes interdites ont une structure électronique directe, impliquant un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être cultivé avec une qualité cristalline et optoélectronique extrêmement élevée grâce à une croissance à volume élevé techniques [17-22]. (Figure 1.8) montre l'énergie solaire qui peuvent être utilisée théoriquement par les systèmes de cellules à triple jonction III-V.

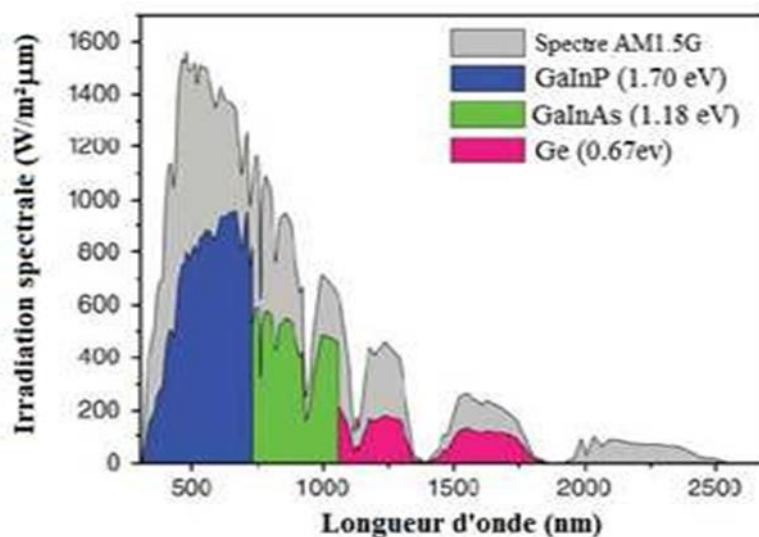


Figure 1. 9 : Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge [2].

1.11 Les semiconducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3^{ème} colonne et d'un élément de la 5^{ème} colonne de la classification périodique. Tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, phosphure de galium ou des alliages ternaires tels qu'In_xGa_{1-x}As. Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe.

III	IV	V
5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01
13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97
31 Ga 69.74	32 Ge 72.99	33 As 74.92
49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75

Tableau 1. 1 : les semi-conducteurs III-V sur le tableau de Mendeleïev.

1.12 L'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs)

Dans ces dernières décennies, vu que son gap et son paramètre cristallin peuvent être variés systématiquement l'arséniure d'indium et de gallium InGaAs a connu un intérêt croissant, cela peut être réalisé par le bon choix de composition de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, par exemple l'alliage ternaire $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ préparé par épitaxie, il présente des multiples applications car il a été employé comme couche active dans les lasers et des détecteurs photoélectrique, ainsi, il est utilisé comme détecteur de rayonnement dans les systèmes de télécommunications optique. Théoriquement, c'est un très bon candidat pour les transistors à grande vitesse [23]. Il est couramment, préparé sur des substrats d'InP (phosphore d'indium).

Pour les cellules solaires triple jonction, l'InGaAs est implanté comme la 1^{ère} sous cellule pour couvrir la partie du spectre entre 450-900 nm [2].

1.13 L'arséniure de Gallium (GaAs)

Le GaAs est un semi-conducteur III-V complexe composé de l'élément de gallium (Ga) de la colonne III et l'élément de l'arsenic (As) de la colonne V du tableau périodique des éléments. Il est utilisé pour réaliser des composants micro-ondes et des composants optoélectroniques et possède une structure cristalline de type blende, le cristal GaAs est composé de deux sous-réseaux, chacun cubique à faces centrées (CFC) cette configuration cristalline est connue sous le nom blende de zinc elle est représentée sur la (Figure 1.10) :

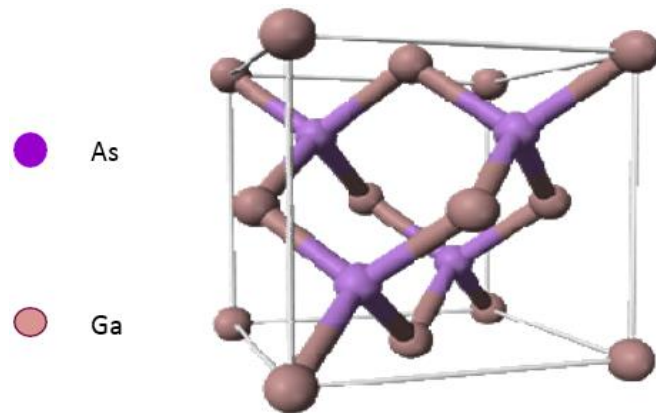


Figure 1. 10 : Structure cristalline de GaAs [2].

Les atomes d'arsenic occupent quant à eux 4 des 8 sites tétraédriques de cette maille. Ayant les propriétés physiques comme c'est montré sur le (Tableau 1.2) :

Propriétés du GaAs a 300k°	Valeur	
Structure cristalline	Zinc blinde	
Poids atomique	144,63	g/mole
Structure de la bande interdit	Directe	
Largeur de bande interdit	$E_g = 1,424$	eV
Permittivité	11,6	pF/cm
Conductivité thermique	0,45	w/cm.k
Mobilité des électrons	8500	$\text{Cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Mobilité des trous	400	$\text{Cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Vitesse maximale des électrons	$2 \cdot 10^7$	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Champ électrique de saturation	10	k.v /cm

Tableau 1. 2 : Propriété physique de GaAs [24].

1.14 Arséniure d'indium (InAs)

L'InAs, est un semi-conducteur composite binaire de type III-V, composé d'arsenic et d'indium. Il possède des propriétés proches de celles de l'arséniure de gallium (GaAs) en microélectronique. Il a l'apparence d'un cristal cubique, gris, avec un gap direct [2].

Les alliages avec l'arséniure de gallium (GaAs) forment un semi-conducteur ternaire, l'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs), dont le gap dépend du ratio In/Ga. Lors du dépôt d'une monocouche d'InAs sur un substrat d'InP ou de GaAs, des tensions se forment à cause de la différence de paramètre

de maille, et par conséquent l'arséniure d'indium se réorganise en « nano-îles » formant à la surface d'InP ou de GaAs des boîtes quantiques [22].

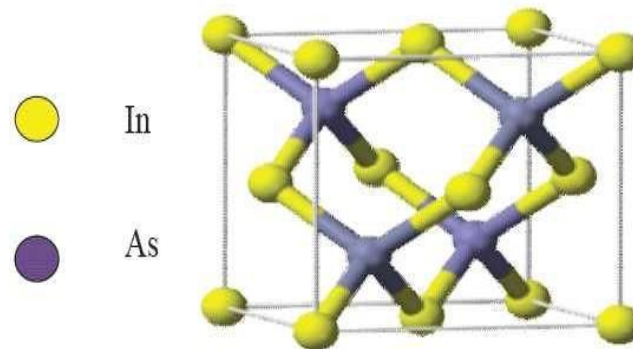


Figure 1. 11 : Structure cristalline d'InAs [22].

1.15 Le phosphure d'indium et de gallium (InGaP)

L'InGaP avec un gap E_g d'environ 1,9eV est le semiconducteur le plus promoteur pour les cellules supérieures des CSTJ pour couvrir la gamme du spectre solaire comprise entre 350 nm et 650 nm. C'est un alliage de deux semiconducteurs binaires. Il est composé de l'indium, du gallium et du phosphore, utilisé pour les hautes puissances et les hautes fréquences en électronique, en raison de la vitesse des électrons qui est supérieure par rapport au Si et au Ge. La croissance de l'InGaP par épitaxie peut être compliquée en raison de la tendance de celui-ci à croître en tant que matériau commandé, plutôt qu'un alliage vraiment aléatoire qui change sa structure de bande et les propriétés électriques et optiques du matériau [2].

1.16 Le phosphure d'indium (InP)

L'InP est un semi-conducteur composé qui contient deux éléments distincts, un élément indium (In) du groupe III et le phosphore (P) du groupe V. La liaison entre l'In et le P est covalente, l'InP se cristallise dans le système blende (ZnS) (structure Zinc blende) qui consiste à interpénétrer par une translation de vecteur $r = (a/4, a/4, a/4)$ du quart de la diagonale de cube de deux réseaux cubiques à faces centrées (CFC). Cette configuration est représentée sur la figure :

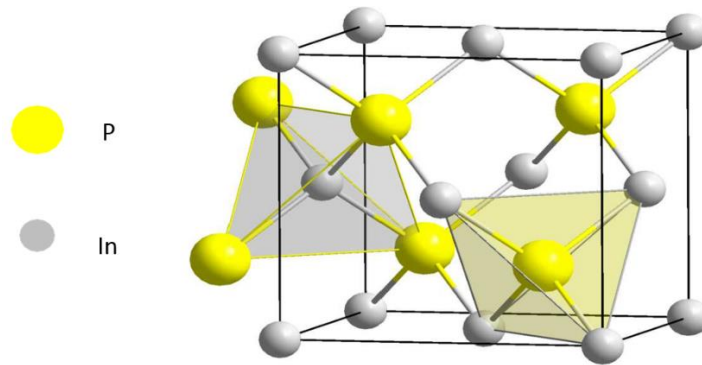


Figure 1. 12 : Structure cristalline de l'InP [7].

Les propriétés physiques de l'InP telles que :

L'énergie de gap	1.344 eV
La mobilité des électrons	5400 cm ² /V.s
La densité	4.81 g/cm ³
Le point de fusion	1062 °C
La conductivité thermique	0.68 W/cm.K
L'indice de réfraction	3.1 à 3.55

Tableau 1. 3 : propriétés physiques de l'InP.

Nous permettons de l'utiliser en optoélectronique, comme par exemple dans la fabrication des diodes laser. InP est, aussi, utilisé comme substrat pour la croissance par épitaxie de composés optoélectroniques à base d'arséniure d'indium-gallium (InGaAs) [25-2].

1.17 Le phosphore de gallium (GaP)

Le phosphore de gallium (GaP) est l'un des principaux semi-conducteurs III – V du fait de son application aux dispositifs électroluminescents. Est un semi-conducteur composé du phosphore et de gallium à bande interdite indirecte possédant la structure zinc-blende.

Les propriétés essentielles de GaP sont en générale :

L'énergie de gap	2,26 eV
La masse molaire	100,697 g/mol
Le point de fusion	1477 °C
La densité	1,138 g/cm ³
La mobilité des électrons	250 cm ² /V.s

La conductivité thermique	1,1 W/K.cm
L'indice de réfraction compris entre	3.02 et 3.45

Tableau 1. 4 : propriétés essentielles de GaP

Le tellure est utilisé comme matériau dopant pour produire du phosphure de gallium de type N et le Zinc comme dopant pour produire du phosphure de gallium de type P [2-26].

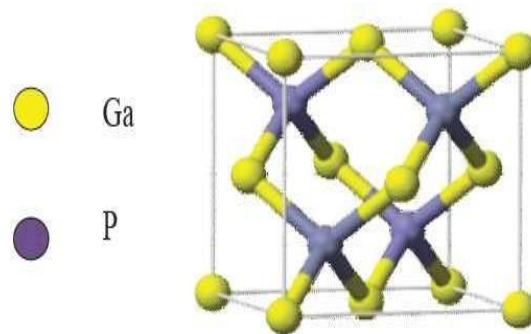


Figure 1. 13 : Structure cristalline de GaP [2].

1.18 Germanium

Le germanium (Ge) est le 32^e élément du tableau de Mendeleïev. C'est un semi-conducteur intrinsèque qui a un gap indirect d'environ 0.6eV, de multiples applications en microélectronique [2]. Il est utilisé dans les cellules multijonction pour former la cellule inférieure (bottom cell). Après avoir absorbé les photons du spectre ayant énergie supérieure à E_g des deux sous-cellules supérieures (InGaP et InGaAs), les photons non absorbés reçoivent par la sous-cellule inférieure de germanium et les absorbe. Ceci permet d'augmenter la tension du circuit ouvert de la cellule entière [22].

1.19 Applications de l'énergie photovoltaïque

Les applications de l'énergie obtenue à l'aide de générateurs photovoltaïques sont extrêmement variées elles peuvent être utilisées dans plusieurs domaines. De façon générale, elles peuvent être classées en deux grandes sections :

- Les systèmes isolés
- Les systèmes raccordés au réseau

On prend comme exemple le domaine des télécommunications qui se situe dans les systèmes isolés, ces exemples sont quelques applications du PV :

- Téléphonie mobile
- Répéteurs radio et télévision
- Radars

1.20 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.20.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

- Une haute fiabilité : les modules sont garantis pendant 30ans par la plupart des constructeurs.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt
- Peut être installé très rapidement à presque tous les points d'utilisation.

1.20.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- Le coût initial d'installation est élevé
- Manque de stockage d'énergie économiquement efficace
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.21 Conclusion

Ce présent chapitre introduit l'énergie photovoltaïque comme étant une source durable de l'énergie vue sa provenance solaire (le soleil), et traite les notions préliminaires nécessaires pour la compréhension de la photovoltaïque, ainsi nous avons cité les caractéristiques de la cellule solaire, comme le courant court-circuit, le rendement, facteur de forme, tension à circuit ouvert, la puissance maximum. Nous avons parlé des différentes générations des CS, ce qui nous permet d'introduire les cellules multi-jonction, et nous avons donné les différents matériaux qui composent notre cellule InGaP/InGaAs/Ge. Pour terminer ce chapitre avec des applications du PV.

2.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre nous allons présenter la simulation numérique qui va englober les différents paramètres d'une cellule photovoltaïque multijonction, tels que l'énergie de gap, l'épaisseur critique, variation du coefficient d'absorption α , variation de l'EQE, et la courbe $I(V)$, de la cellule à base de InGaAs/InGaP/Ge.

2.2 Energie de Gap

Les semi-conducteurs sont caractérisés par un écart en énergie entre la bande de conduction et la bande de valence appelée bande interdite ou gap. Plus cet écart est important, plus le matériau est isolant. En physique du solide, l'énergie de gap est la différence entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. La bande de valence est complètement remplie par les électrons, alors que la bande de conduction est vide. Néanmoins les électrons de la bande de valence peuvent atteindre la bande de conduction s'ils acquièrent suffisamment d'énergie (au moins autant que l'énergie de gap). La conductivité des semi-conducteurs est fortement liée à leur énergie de gap.

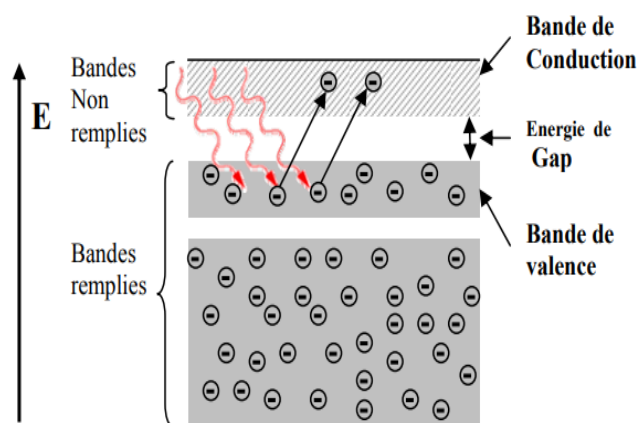


Figure 2. 1 : La structure des bandes d'un semi-conducteur.

2.3 Epaisseur critique

Lors de la croissance épitaxiale d'un matériau sur un substrat et ce pour un faible désaccord des paramètres de maille entre le matériau et le substrat, il existe une épaisseur dite "épaisseur critique" à partir de laquelle la contrainte contenue dans la couche devient trop importante et la couche se relaxe pour réduire l'énergie emmagasinée.

Pour une couche épitaxiée d'épaisseur inférieure à l'épaisseur critique, la couche se déforme élastiquement pour adapter son paramètre de maille à celui du substrat (épitaxie pseudomorphe). Inversement, pour une couche épitaxiée supérieure à l'épaisseur critique, la couche se relaxe. L'épaisseur critique dépend donc fortement du désaccord de maille entre la couche épitaxie et son substrat, du procédé de croissance, et des propriétés du matériau déposé [27,28].

2.4 Coefficient d'absorption

Pour les cellules solaires, le coefficient d'absorption est un paramètre très important car il déterminera la quantité de photons absorbé par le matériau et donc la quantité de supports pouvant être produits. L'absorption à travers une couche de semi-conducteur de l'épaisseur L est donnée par l'équation suivante :

$$I_{tr}(\lambda) = I_{in}(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot L} \quad (2.1)$$

I_{tr} : Intensité de la lumière transmise.

I_{in} : Intensité de la lumière incidente.

$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption.

λ : longueur d'onde.

Pour calculer le coefficient d'absorption, nous avons utilisé ce modèle.

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (2.2)$$

α_0 : paramètre d'ajustement.

E_g : énergie de bande interdite (gap).

E : énergie lumineuse.

2.5 Variation de l'épaisseur critique

Nous devons trouver une épaisseur critique optimale pour une concentration bien définie d'indium. Par exemple, pour une concentration en indium de 20%, l'épaisseur critique de la couche d'InGaP ne dépasse pas 110 Å. Contrairement aux deux autres couches InGaAs et Ge l'épaisseur critique ne dépasse pas 448 Å pour la même concentration d'indium. (Figure 2.2 et 2.3) représentent la variation de l'épaisseur critique entre les différentes couches de la cellule InGaP / InGaAs / Ge en fonction de la concentration en indium.

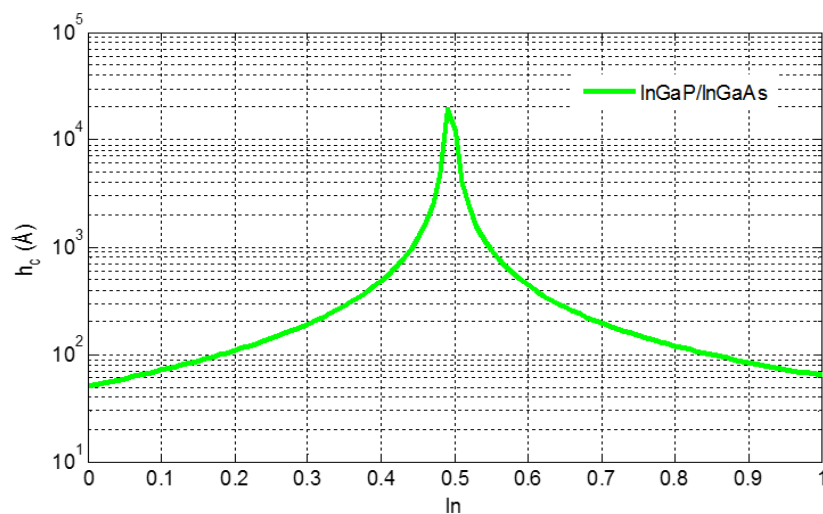


Figure 2. 2 : Variation de l'épaisseur critique de la structure en fonction de la concentration en indium de InGaP / InGaAs.

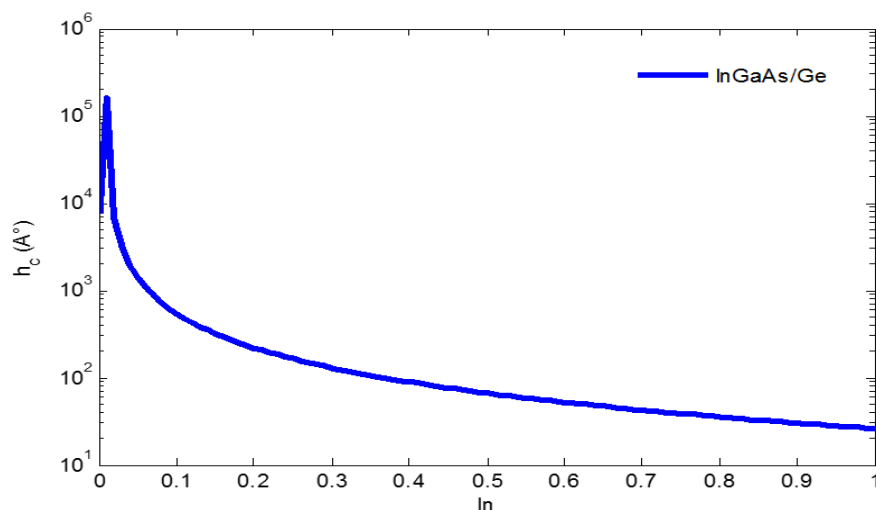


Figure 2. 3 : Variation de l'épaisseur critique de la structure en fonction de la concentration en indium de InGaAs / Ge.

2.6 Variation du coefficient d'absorption

Dans les (Figures 2.4 et 2.5) nous avons tracé la variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde et de la concentration d'indium et phosphore respectivement. Par exemple, pour une concentration d'Indium $x = 60\%$ et $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$, le coefficient d'absorption $\alpha = 1.6 \times 10^6 \text{cm}^{-1}$, si on augmente la concentration d'indium à 90% avec la même longueur d'onde, le coefficient d'absorption atteint la valeur $\alpha = 2.5 \times 10^6 \text{cm}^{-1}$. Nous avons donc une augmentation du coefficient d'absorption de $\Delta\alpha = 0.9 \times 10^6 \text{cm}^{-1}$, c'est-à-dire qu'il existe une augmentation de 56.25% . Cette étude nous a permis d'optimiser la structure multi-jonctions en utilisant des compositions variables des alliages pour des applications photovoltaïques.

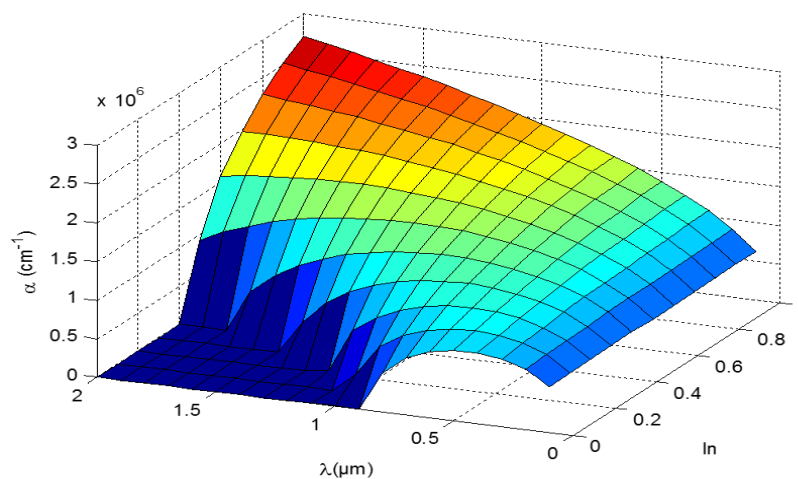


Figure 2. 4 : variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde et de la concentration en indium.

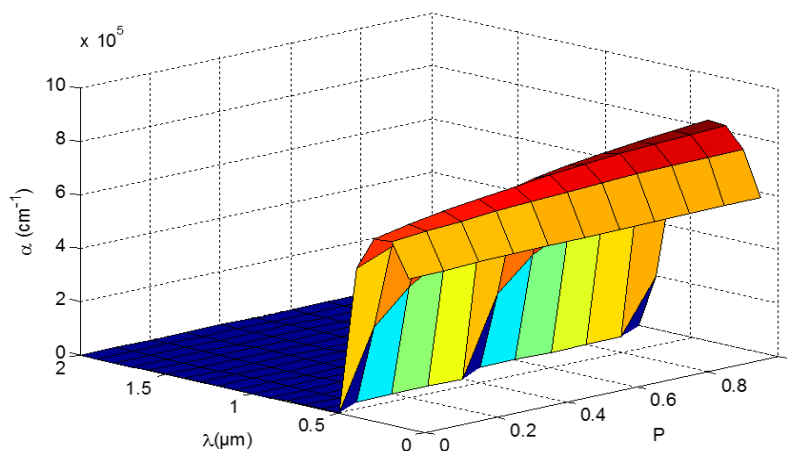


Figure 2. 5 : variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde et de la concentration en phosphore.

2.7 Variation de l'EQE en fonction de la longueur d'onde

La figure montre la variation de l'efficacité quantique externe (EQE) de la cellule solaire basée sur InGaP/InGaAs/Ge en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire λ (μm). Il est à noter que chaque couche absorbe une partie du spectre solaire. L'absorption des différentes couches des structures donne l'absorption totale. L'utilisation de ces couches nous a permis de couvrir une large gamme du spectre solaire de 0,330 à 1,83 μm avec une amplitude d'EQE variant de 70% à 81%.

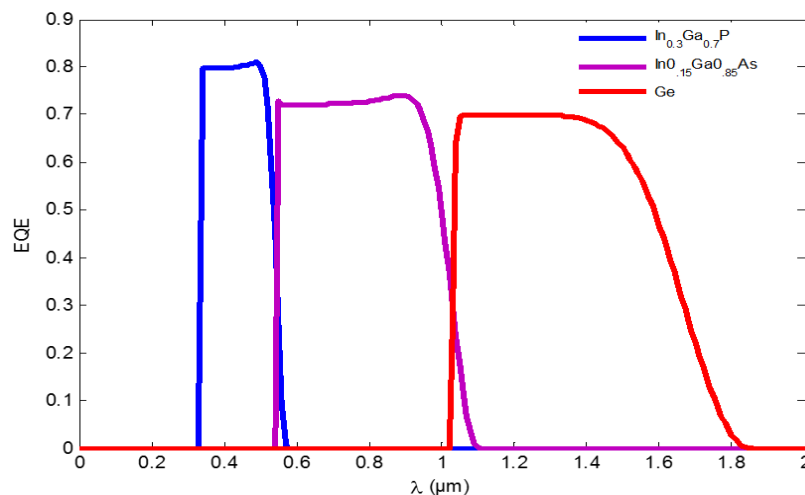


Figure 2. 6 : Variation de l'EQE en fonction de la longueur d'onde des différentes couches.

2.8 Caractéristiques courant-tension sous illumination

La (Figure 2.7) montre les caractéristiques courant-tension d'une cellule à triple-jonction InGaP/InGaAs/Ge, ainsi que celles de chaque sous-cellule. La cellule qui a le plus petit gap, ici Ge, possède la plus grande densité de courant. En effet, du fait qu'elle possède une faible énergie de 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.

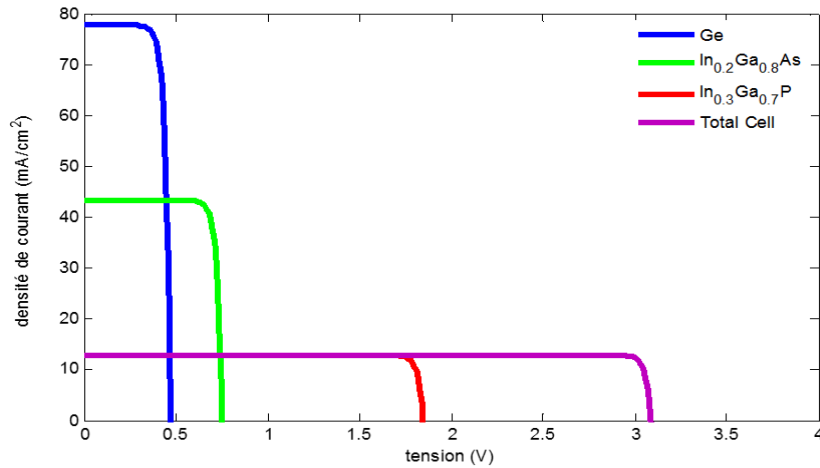


Figure 2. 7 : Caractéristiques courant-tension sous illumination de chaque sous-cellule et de la cellule à triple-jonction InGaP/InGaAs/Ge complète.

Dans ce type de cellule InGaP/InGaAs/Ge, La courbe violette de la figure correspond à la cellule à triple jonction complète. 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 V_{oc} des sous-cellules.

2.9 Variation P(V) des différentes couches et InGaP/InGaAs/Ge

La figure (2.7) illustre la variation de la Puissance délivrée par chaque cellule, et aussi pour la cellule a triple-jonction, en fonction de la tension de polarisation. Comme la puissance est calculée en fonction de la tension de la structure totale. La puissance maximale atteint la valeur de 35mW. Nous pouvons optimiser la puissance maximale de la cellule solaire à jonctions multiples en faisant varier les alliages des différents matériaux de couche.

Nous pouvant également comparer la puissance maximale des trois jonctions avec celle de la structure à triple jonction. Comme en pouvant le voir, la puissance des trois structures séparées est égale à 21, 28.5 et 29 mW/cm², respectivement, Par contre la puissance maximale de notre structure à triple jonction est égale à 37 mW/cm². On peut constater que la puissance maximale de notre structure est équivalente à : $P_{maxt} = 1,28 \times P_{max1}$ et $P_{max} = 1.3 \times P_{max3}$ et $P_{maxt} = 1,76 \times P_{max3}$

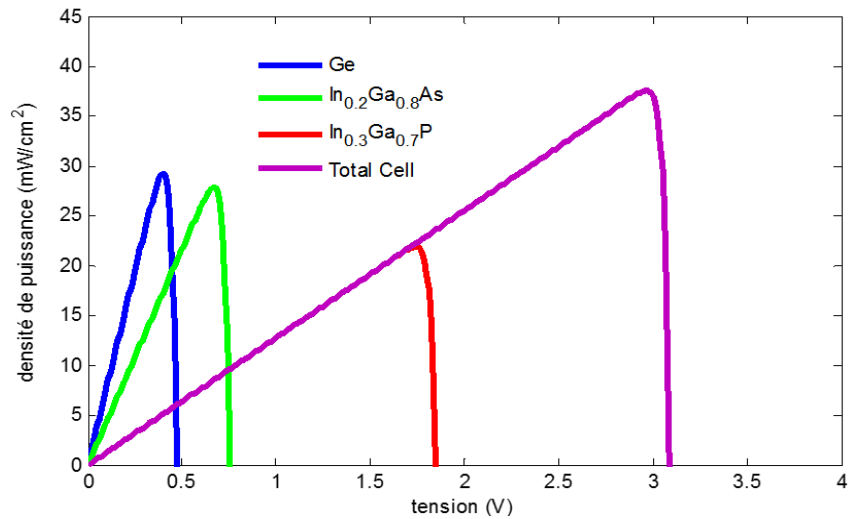


Figure 2. 8 : Variation P(V) de différentes couches et InGaP / InGaAs / Ge à base de cellules totales.

2.10 Résultats

Depuis les (Figures 2.6, 2.7) obtenues de la simulation de la cellule, nous avons pu calculer les différentes caractéristiques tels que (I_{cc} , V_{co} , P_m , FF et le rendement) les résultats sont représentés dans les (Tableaux 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4).

Résultat	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
Ge	79	0.45	29	81.57	29.29

Tableau 2. 1 : les paramètres caractéristiques du Germanium.

Résultat	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
InGaAs	42	0.75	28.5	90.47	31.5

Tableau 2. 2 : les paramètres caractéristiques de InGaAs.

Résultat	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
InGaP	12.5	1.8	21	93.33	21.21

Tableau 2. 3 : les paramètres caractéristiques de InGaP.

Résultat	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
InGaP/InGaAs/Ge	12.5	3.1	37	95.48	38.94

Tableau 2. 4 : les paramètres caractéristiques de InGaP/InGaAs/Ge.

On remarque que le rendement de la sous-cellule InGaAs est le plus élevé et que le rendement de la cellule InGaP est le plus faible. On remarque aussi que le rendement des de la cellule complète augmente et atteint la limite de 38.94%.

2.11 Conclusion

La conception des cellules solaires multijonction nécessite un ensemble de spécifications qui doivent être respectées afin de garantir que la fabrication finira par livrer un produit qui peut être déployé et exécuté comme prévu. La simulation de la cellule solaire triple jonction InGaP/InGaAs/Ge. Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ sont interprétées et aussi les paramètres caractéristiques.

3.1 Introduction

Les panneaux photovoltaïques sont classés en fonction de trois caractéristiques le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le point de puissance maximale (P_{max}) et le facteur de remplissage (FF). Tous ces paramètres peuvent être obtenus depuis la courbe IV qui caractérise le panneau solaire. Le moyen le plus simple d'extraire les caractéristiques IV du panneau PV est l'utilisation d'une résistance variable. Dans cette méthode la résistance de charge augmente successivement pour extraire les caractéristiques IV en démarrent d'une résistance égale à 0 (court-circuit) jusqu'à atteindre la résistance infinie (circuit ouvert) toute en enregistrant manuellement les valeurs de courant et de tension.

3.2 Architecture de la carte

Le IV curve tracer ce constitue de plusieurs composantes que nous allons définir ces derniers sont soudés sur un circuit imprimé, mais en premier lieu, définissant le circuit imprimé :

3.3 Circuit imprimé

Le circuit imprimé est un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d'époxy 1 ou de fibre de verre, il possède des pistes électriques disposées sur une ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées, ce système porte le nom de carte électronique [29]. Evidemment, tous les composants d'une carte électronique ne sont pas forcément reliés entre eux. Le câblage des composants suit un plan spécifique à chaque carte électronique, qui se nomme le schéma électronique.

3.4 Arduino ATmega 2560

L'Arduino Méga 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega2560. Il possède 54 broches d'entrée / sortie numériques (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à quartz de 16 MHz, une connexion USB,

une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur, il faut juste à programmer par un ordinateur qui possède le logiciel Arduino et téléverser ce programme vers la carte en utilisant un câble USB, on peut utiliser cette carte par l'alimentée avec un adaptateur ACto-DC ou une batterie.

3.5 TLV246

Le TLV246x est une famille d'amplificateurs opérationnels entrée / sortie rail à rail de faible puissance spécifiquement conçus pour applications portables. La plage de tension d'entrée en mode commun s'étend au-delà des rails d'alimentation pour un maximum de plage dynamique dans les systèmes à basse tension. La sortie de l'amplificateur offre des performances rail à rail avec un entraînement à haut rendement capacité, ce qui résout l'une des limitations des anciens amplificateurs opérationnels d'entrée / sortie rail à rail. Ce rail à rail la plage dynamique et le variateur de sortie élevé rendent le TLV246x idéal pour la mise en tampon des convertisseurs analogique-numérique.

3.6 MCP3202

Le MCP3202 est une approximation successive de 12 bits convertisseur analogique-numérique (A / N) avec échantillon intégré. Le MCP3202 est programmable pour fournir deux canaux d'entrée. La communication avec l'appareil se fait à l'aide d'un simple interface série compatible avec le protocole SPI. Le l'appareil est capable de taux d'échantillonnage allant jusqu'à 100 ksps à 5V et 50 ksps à 2,7V. Le MCP3202 fonctionne sur une large plage de tension de 2,7V à 5,5V. La conception à faible courant permet un fonctionnement avec courants de veille et actifs typiques de 500 nA et 375 μ A, respectivement.

3.7 Le Relais

Un relais est un appareil dans lequel un phénomène électrique (courant ou tension) contrôle la commutation On / Off d'un élément électronique (on a alors affaire à un relais statique). C'est en quelque sorte un interrupteur que l'on peut actionner à distance, et où la fonction de coupure est dissociée de la fonction de commande.

Donc le relais électronique est un interrupteur qui se commande avec une tension continue de faible puissance.

3.8 Arduino

Une plate-forme de développement et de prototypage Open Source. Le rôle de la carte Arduino est de stocker un programme et de le faire fonctionner. Shields (cartes d'extension) avec des fonctions diverses qui s'enfichent sur la carte Arduino :

Relais, commande de moteurs, lecteur carte SD, Ethernet, WIFI, GSM, GPS, Afficheurs LCD.

IDE (Environnement de Développement Intégré) multi OS : édition du programme, compilation du programme transfert du programme dans la carte via le port USB.

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino ATmega 2560.

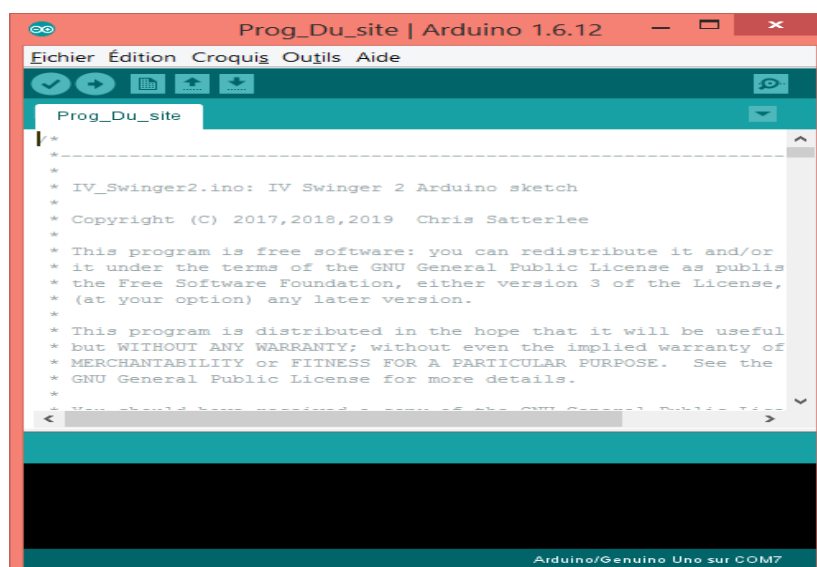


Figure 3. 1 : programme Arduino.

3.9 IV Swinger 2

IV swinger est un traceur de courbe IV pour panneaux solaires (modules) photovoltaïques (PV). Il existe également une version qui fonctionne avec les cellules PV. La principale exigence d'un traceur de courbe IV consiste à appliquer une charge, puis à mesurer le courant et la tension. Ces points peuvent être stockés et à partir des données, nous pouvons dessiner la courbe IV.

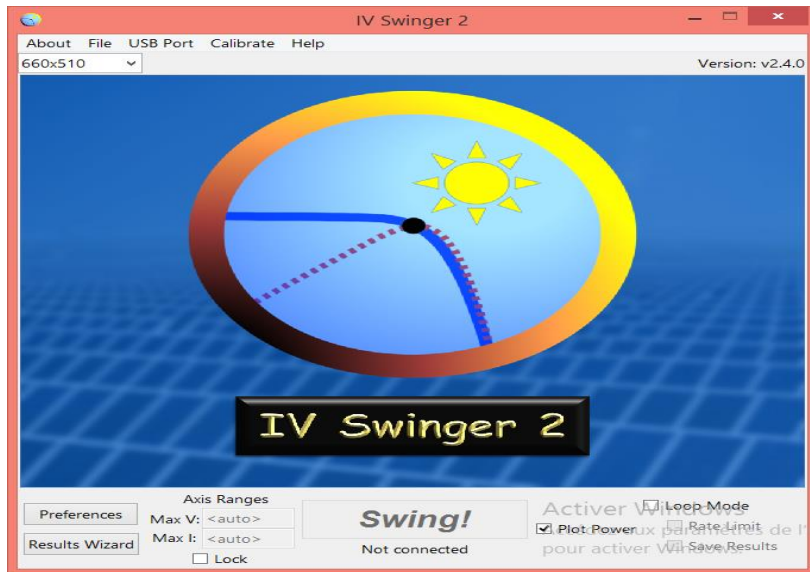


Figure 3. 2 : interface du logiciel IV swinger 2.

3.10 Principe de fonctionnement de la carte

Pour mesurer une courbe IV le relai est activé et déconnecte le module de puissance du circuit, les condensateurs C1 et C2 de 1 mF fournissent une charge au panneau ce qui permet au courant du panneau photovoltaïque de passer à travers les résistances R_b et R_{shunt} , ce qui implique que la tension aux bornes de la résistance shunt $R_{shunt} = 5m\Omega$ va représenter l'image du courant car :

$$V = R_{shunt} \times I \quad (3.1)$$

Donc V_{shunt} est envoyé vers l'amplificateur non inverseur dont le gain est de :

$$G_v = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (3.2)$$

Pour visualiser la courbe $I=f(v)$, on a besoin de mesurer le courant et la tension.

V_{mon} représente l'image de la tension du panneau solaire car :

$$V_{mon} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{panneau} \quad (3.3)$$

V_{mon} est envoyé vers un amplificateur suiveur, car $G_v = 1$, ensuite V_{mon} est envoyé vers le convertisseur analogique numérique pour son traitement numérique par la carte Arduino. Le schéma synoptique est sur la (Figure 3.3).

3.11 Schéma électrique de la carte sur Proteus

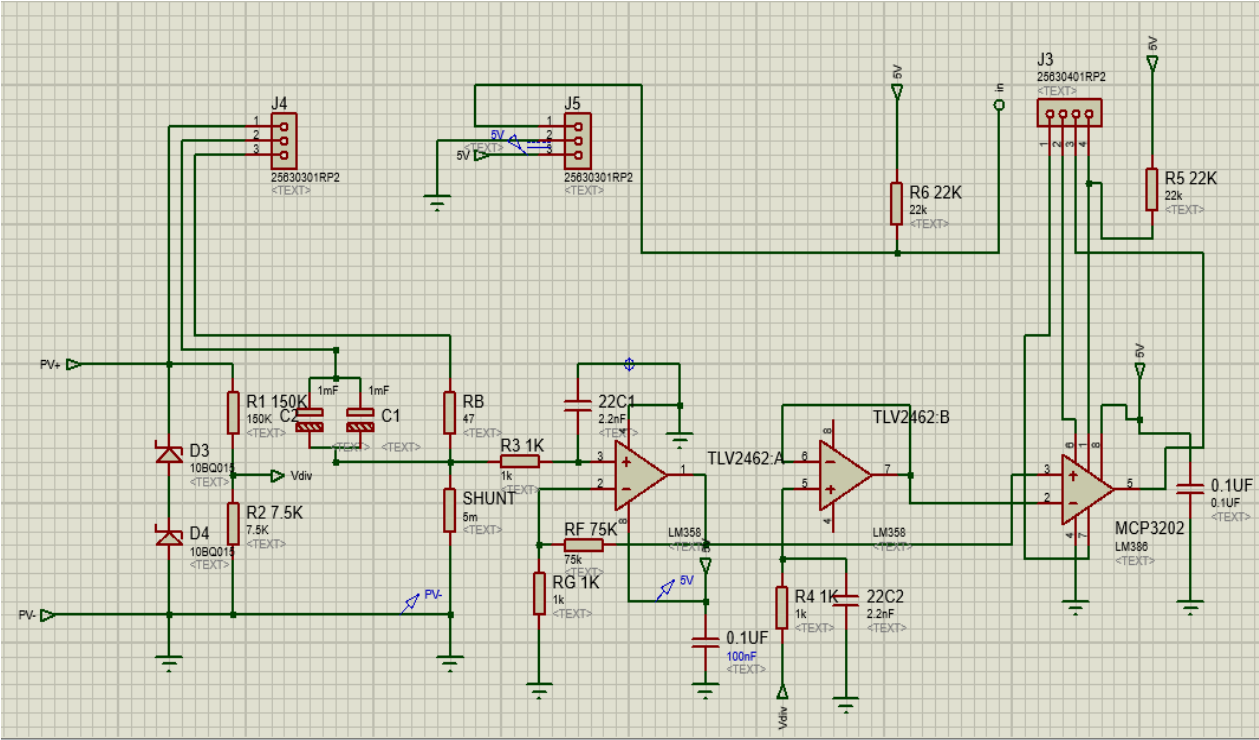


Figure 3. 4 : Schéma Electrique de la carte Sur ISIS.

Sur Proteus ARES :

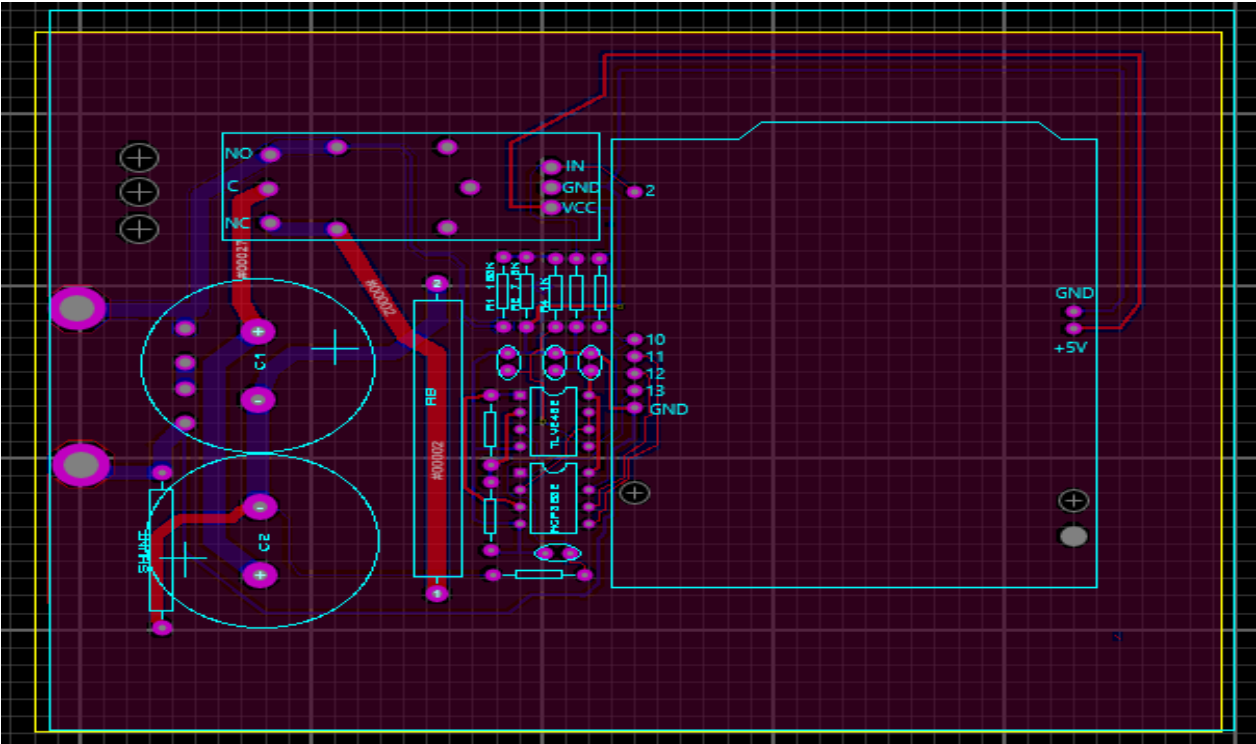


Figure 3. 5 : Circuit de la Carte sur ARES.

Vue 3D de la carte sur Proteus :

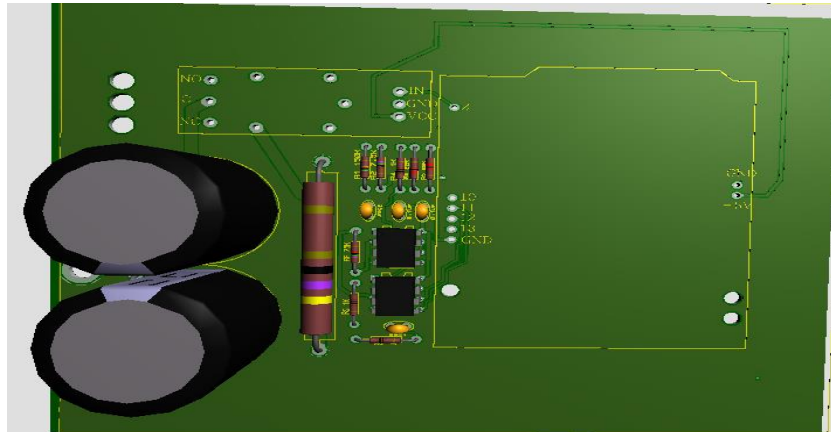


Figure 3. 6 : Vue 3D de la Carte.

Sur la (Figure 3.7) se trouve l'image de la carte après la réalisation, l'étape finale été de soudé toutes les composantes entre eux comme c'est montré dans le schéma du PCB et le schéma électronique de la carte.

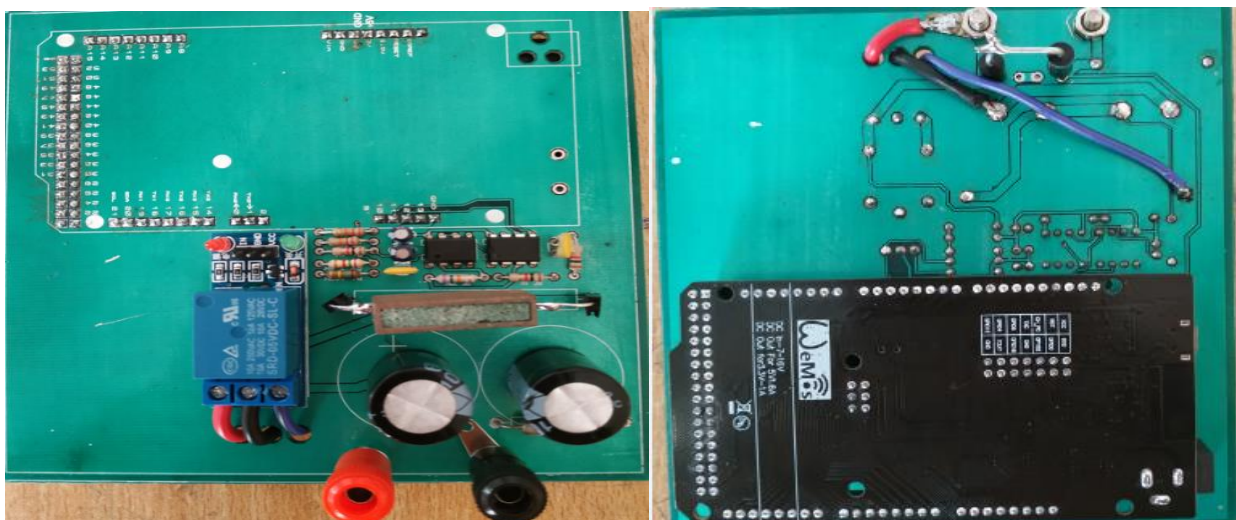


Figure 3. 7 : L'analyseur I-V réaliser.

3.12 Conclusion

Ce chapitre montre comment réaliser un analyseur I(V) et les principaux composants et logiciels qui le commandent, et aussi nous avons parlé du circuit imprimé comme étant l'élément qui regroupe les composants, en les soudant. Il montre aussi le coté software de la réalisation, nous avons parlé brièvement de la réalisation car nous avons eu de problème avec la carte ce qui nous empêché notre idée de base, car c'été de faire des tests les plus proche des vrais analyseurs I(V) et de l'améliorer.

Conclusion générale

Des nouvelles structures de cellules solaires de troisième génération destinées pour des plusieurs d'applications (spatial, téléphonies mobile, radars ...) ont été étudiées. Elles sont constituées de l'empilement de divers composés III-V, chacune optimisées pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement permet donc de capter une grande partie du spectre solaire et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série. Nous avons commencé dans ce travail par une étude de la cellule solaire à conversion photovoltaïque, on a expliqué le schéma de principe d'une cellule solaire avec son principe de fonctionnement, ainsi le schéma électrique équivalent ont donnés plus d'éclaircissement sur l'effet photovoltaïque. La détermination des paramètres et les caractéristiques d'une cellule solaire fessaient partie de l'enjeu de cette étude. Enfin Nous avons parlé de certains paramètres qui influence le rendement photovoltaïque. Après on a étudié les cellules solaires de troisième génération à base d'InGaP/InGaAs/Ge, le but fixé au cours de cet étude a été guidé par deux idées principales, d'une part la simulation des performances de chaque sous-cellule. Ce dernier nous fournit l'estimation des caractéristiques et des paramètres électriques ($I(V)$, $P(V)$, l'épaisseur critique, coefficient d'absorption, EQE) de chaque sous-cellule. D'autre part on a essayé de fabriquer un analyseur $I(V)$ pour caractériser la cellule multijonction. Dans la première partie, les résultats obtenus montrent que le rendement maximal atteint est de 31.5% pour la sous-cellule médiane à base de l'InGaAs. Par contre la valeur minimale de 21.21 % correspond à la sous-cellule à base du Ge, Ce résultat se traduit par diminution de la tension de circuit et la densité de courant de court-circuit, ce qui réduirait son rendement de conversion. D'après nos résultats pour les différents matériaux nous avons conclu que la cellule triple jonction a un rendement plus élevé que les autres cellules, on a essayé de confirmer sa avec la carte que nous avons réalisée mais malheureusement que nous n'avons pas pu identifier la panne ou se trouve après qu'elle nous a donnée quelques tests avec des batteries de 9V.

Bibliographie

- [1] Mohamed Mimoune “Étude Des Capteurs Photovoltaïques Basés Sur Les Nanotechnologies” These de Doctorat l’université du Québec à trois-rivières, 2016.
- [2] LASLADJ Meriem « Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales » Memoire En vue de l’obtention du Diplôme de magister, Université Abbas de Sétif, 2014/2015.
- [3] Melouki Dilmi « Étude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge Par Simulation » Mémoire De Master Universite Mohammed Boudhief De M’sila, 2016.
- [4] Z. Zakarya, "Etude des Propriétés Physiques et Optiques des Couches Minces et des Nanomatériaux pour les Matériaux IV-IV. Application aux Cellules Solaires de Troisième Génération", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [5] Mekemeche Abdelkader « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. » Thèse de Doctorat L’Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem 2016-2017.
- [6] Christian Ngo « L’Énergie, ressources, technologies et environnement » 3eme édition, Dunod CEA, 2002.
- [7] Intitule, L. (2011). République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Med Khider Biskra Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie Département des Sciences de la Mati.
- [8] Maifi Lyes : « Calcul Des Paramètres Internes D’un Module Photovoltaïque à partir Des Paramètres Externes Mesurés », Thèse de Magister, 2010, Université Mentouri de Constantine.
- [9] Bouchekouf Seloua : « Modelisation Numerique Des OPVC dans les Systemes EnR », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [10] M. Volle, A. Vernay, Les cellules photovoltaïques, (2005)1–5.
- [11] These de BERREZZOUG Hanane theme “Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d’une cellule photovoltaïque” Mémoire de: MASTER Université Dr Moulay Tahar de Saida 2015-2016.

- [12] These de Salaheddine Bensalem theme “Effect de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires “Memoire de Magister Universite Ferhat Abbas – Setif.
- [13] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [14] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d’une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.
- [15] Nichapour OleKsiy “simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités” Thèse de doctorat. L’institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [16] F. C. Boukhtouche, “Etude et réalisation d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT”, Mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique, Alger, 2004.
- [17] R. Maouedj, “Application de l’énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah”, Mémoire De Magistère, Décembre, 2005.
- [18] S. M. Ait-Cheikh, “Etude, Investigation et Conception d’algorithmes de Commande Appliqués aux Systèmes Photovoltaïques”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2007.
- [19] Halouane Assia « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d’un module photovoltaïque » mémoire de la fin d’études Universite M’hamed Bougara Boumerdes
- [20] M. A. Green, “3rd generation PVsolar cells for 2020 and beyond”, vol 14, 2010.
- [21] <https://epress.lib.uts.edu.au/studentjournals/index.php/PAMR/article/view/1413/150>
- [22] Ali Djafour « Les propriétés des semi-conducteurs : Si-Ge-SiC-GaN-GaAs » thèse master génie microélectronique, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [23] S. Bacha, A. Bechiri, F. Benmakhlof, N. Bouarissa, “Effects of substrate and compositional disorder upon optical and lattice vibration properties of quaternary semiconductor $GaxIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ”, Infrared Physics & Technology, Vol 63, 2014, p. 22.
- [24] GHACHAME Samah Caractéristiques électriques d’une diode à barrière de Schottky (SBD) avec et sans couche isolante SiO₂ à la température ambiante (300K) Mémoire de Fin d’Etudes Master, Université Mohamed Khider Biskra.
- [25] MOUET Toufik « Etude et caractérisation des structures MIS sur InP et des nanostructures à base de ZnO » thèse Doctorat Universite Mentouri – Constantine.
- [26] S. Adachi, Propriétés physiques des composés semiconducteurs III – V : InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs et In Ga As P, Wiley-Interscience, New York, 1992.

[27] These de EL Gmili Youssef theme « Etude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque » Mémoire de Doctorat l'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes 2013.

[28] These de Abdoulwahab Adaine thème « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN » Mémoire de : Doctorat Université de Lorraine et CentraleSupélec 2018.

[29] Ken Gilleo « The history of the printed circuit », Printed Circuit Fabrication, janvier 1999, vol. 22, no 1.