



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

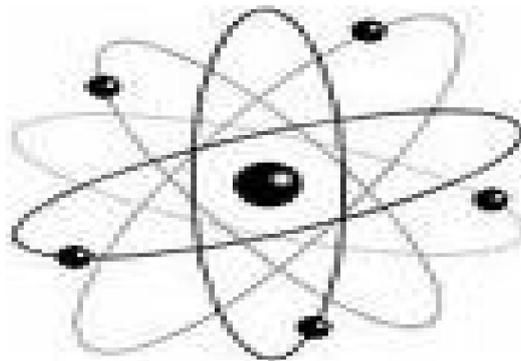


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique Photovoltaïque



Mémoire de fin d'étude en Master

Intitulé :

Mesure des Propriétés Externes d'une Cellule Photovoltaïque

Présenté par:

Lahreche Imen

Devant le Jury Composé par :

<i>N. Sengouga.</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université Med Khider- Biskra</i>	<i>Président</i>
<i>T. Tibermacine</i>	<i>M.C. « B »</i>	<i>Université Med Khider- Biskra</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Am. Meftah</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université Med Khider - Biskra</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire
2012-2013

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut.....

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour et
le respect.....*

Je dédie cette thèse à ...

A mes très chers parents

Maman - GHAMRI RYM -

Papa -LAHRECHE AZZOUZ-

A mes frères. Mes sœurs.

*A mes neveux et nièces. Meilleurs vœux de succès dans vos
études.*

*A mes amis et mes camarades et particulièrement mon amis
bennoui yacine pour son soutien spirituel et moral.*

Remerciement

Je remercie Dieu de patience et de force, qui me les a donnés pour effectuer ce travail.

Au terme de ce travail qui été réalisé au laboratoire LMSM (Laboratoire des Matériaux Semi-conducteurs et Métalliques) à l'université Biskra, il nous est particulièrement agréable d'exprimer notre reconnaissance et nos vifs remerciements à Dr *Tibermacine Tawfik* pour son grande disponibilité et ses conseils et pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder en proposant ce sujet et pour ces encouragements dont il a toujours.

Monsieur le professeur *Noureddine Sengouga*, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements.

Melle *Meftah Amjad*, professeur à l'université de Biskra, je remercie Mme *Meftah Afak* professeur à l'université de Biskra Pour leur soutien dans mon domaine d'études.

À toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Lahreche Imen

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	iii
Introduction générale	1

Chapitre I

Rayonnement solaire et La conversion photovoltaïque

I.1 Introduction	4
I.2 Rayonnement solaire	4
I.2.1 Caractéristiques de rayonnement solaire	5
I.2.2 Différents types de rayonnement	5
I.2.3 Masse d'air et spectre solaire	6
I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
I.3.1 Absorption optique	10
I.3.2 Génération optique	11
I.3.3 Mécanisme de recombinaison	12
I.3.4 Collecte des charges dans une cellule solaire à jonction P-N	16
I.4 Circuit équivalent d'une cellule solaire	19
I.4.1. Cellule solaire idéale	19
I.4.2. Cellule solaire réelle	20
I.5 Différents paramètres de la cellule photovoltaïque	22
I.5.1 Courant de court-circuit	22
I.5.2 Tension en circuit ouvert	23
I.5.3 Caractéristiques puissance – tension	23
I.5.4 Facteur de forme	24
I.5.5 Rendement de conversion	25
I.5.6 Réponse spectrale	25
I.6 Effet de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque	26
I.7 Effet de la température sur la cellule photovoltaïque	27

Chapitre II

Matériaux semiconducteurs pour cellules solaires

II.1 Introduction	30
II.2 cellules solaires à base de silicium	30

II.2.1 propriétés générales	30
II.2.2 Elaboration de la cellule	32
II.2.3. Avantages et inconvénients	35
II.3 Cellules solaires à base de silicium amorphe	35
II.3.1 Propriétés générales	35
II.3.2 Elaboration de la cellule	37
II.3.3 Avantages et inconvénients	38
II.4 Cellules solaires à base d'Arséniure de Gallium	38
II.4.1 Propriétés générales de l'Arséniure de Gallium	38
II.4.2 Elaboration de la cellule	40
II.4.3 Avantages et inconvénients	42
II.5 Etapes de Fabrication d'une cellule solaire	43
II.5.1 Passivation des faces avant et arrière	43
II.5.2 couche anti reflet	43
II.5.3 Texturation de la surface	44
II.5.4 Contacts face avant et arrière	44
II.5.5 Champ électrique arrière	45
II.5.6 Emetteur et Base	45

Chapitre III

Résultats expérimentaux

III.1 Introduction	47
III.2. Environnement LabVIEW	47
III.3 Etude expérimentale	48
III.4 Cellule en silicium cristallin	49
III.4.1 Montage expérimental	49
III.4.2 Instrumentations	50
III.4.3 Programme LabView	50
III.4.4 Résultats	53
III.5 Cellule en silicium amorphe	54
III.5.1 Montage expérimental	54
III.5.2 Instrumentations	54
III.5.3 Résultats	55
Conclusion générale	60

Bibliographie

Résumé

***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***

Introduction générale

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Selon les besoins plusieurs formes d'énergies sont apparues au fur et à mesure du développement de la civilisation humaine. Généralement ces formes proviennent des sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium. L'épuisement et la pollution provoquée par ces sources ainsi que la crise énergétique des années soixante-dix, amènent les pays qui ont de grands besoins d'énergie à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie.

Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée cellule solaire basé sur l'effet photovoltaïque.

Le soleil fournit une énergie importante malgré la distance considérable qui le sépare de la terre. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium.

L'objectif principal de ce travail est de développer un programme sous l'environnement LabView permettant d'acquérir la caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

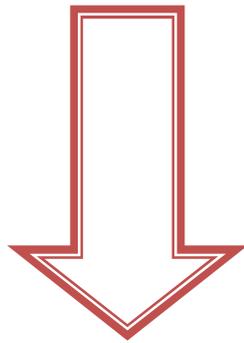
Cette étude se présente de la façon suivante :

Le premier chapitre constitue un rappel général de quelques données de base concernant le rayonnement solaire, le principe de la conversion photovoltaïque et les paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux de base dans la technologie photovoltaïque à savoir le silicium cristallin, amorphe et l'arséniure de gallium et les étapes de fabrication d'une cellule solaire.

Dans le dernier chapitre, nous présentons nos résultats expérimentaux obtenus en caractérisant deux cellules photovoltaïques différentes en utilisant l'environnement LabView. Nous présentons aussi dans ce dernier chapitre, l'influence du changement de l'intensité lumineuse sur les caractéristiques courant - tension ($I-V$), puissance-tension ($P-V$) et sur les paramètres externes à savoir le courant de court circuit (I_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF), le rendement de conversion photovoltaïque (η) de la cellule.

CHAPITRE I



***RAYONNEMENT SOLAIRE
ET LA CONVERSION
PHOTOVOLTAÏQUE***

I.1 Introduction

Le soleil fournit une énergie importante malgré la distance considérable qui le sépare de la terre. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semiconducteurs comme le silicium. Les performances des cellules photovoltaïques sont évaluées au travers de leur caractéristique courant-tension I(V) mesurée sous éclairement solaire standard. Ainsi, pour étudier les cellules photovoltaïques, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu au sol. Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le Soleil émet des radiations électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes décimétriques aux rayons gamma, en passant par la lumière visible [1].

Dans ce chapitre, on rappellera quelques données de base concernant le rayonnement solaire et le principe de la conversion photovoltaïque et les paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire.

I.2 Rayonnement solaire

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, à une distance de 150.000.000 km, d'un diamètre de 1.392.000 km (109 fois le diamètre de terre). Le soleil est la principale source d'énergie de lumière et de chaleur dans le système solaire. Ainsi la densité thermique à la surface de la Terre est en moyenne à 99,97 % d'origine solaire. Dans le noyau du soleil, où l'énergie solaire est créée, la pression est 220 millions de fois plus élevée que la pression terrestre au niveau de la mer qui est de 1033 hecto-Pascal, entraînant une température de 15000000 K, et plusieurs millions de degrés dans les couches de son atmosphère. L'énergie solaire nous est transmise sous la forme d'ondes électromagnétiques bien que ce soit sous son aspect corpusculaire (les photons) que la lumière intervient dans la conversion photovoltaïque [1].

I.2.1 Caractéristiques de rayonnement solaire

a. Constante solaire

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1m^2 située à une distance de 1 unité astronomique (distance moyenne terre-soleil) exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil si l'atmosphère terrestre n'existait pas. Elle est égale à $1,367\text{ kW/m}^2$ [2].

b. Composition de l'atmosphère

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle). La couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [3].

I.2.2 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs types de rayonnement solaire [3] :

a. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

b. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions.

c. Albédo

L'albédo est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalté (goudron) n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

d. Rayonnement global

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

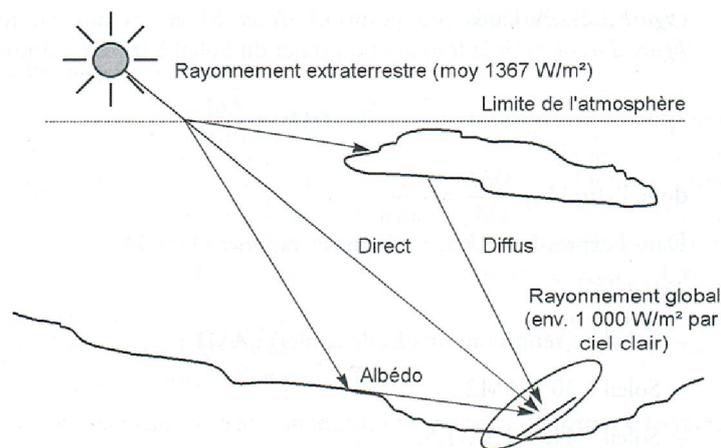


Figure I.1: Différents types de rayonnement [3].

1.2.3 Masse d'air et spectre solaire

a. Masse d'air

On appelle masse d'air, m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer (Figure I.2).

La masse d'aire dépend de la hauteur angulaire du soleil h .

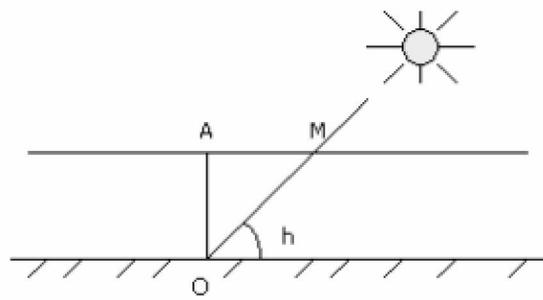


Figure I.2: Rayonnement solaire et le nombre de masse d'air.

La longueur du trajet OM du soleil à travers l'atmosphère est égal à :

$$OM = OA / \sin h \quad (I.1)$$

On déduit la masse d'air comme suit :

$$m = OM / OA = 1 / \sin h \quad (I.2)$$

Généralement, on désigne la masse d'air par l'expression AM_x où x représente le rapport OM/OA . La désignation AM_0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM_1 lorsque la lumière arrive à la surface de la terre. $AM_{1.5}$ lorsque la lumière arrive obliquement ($48,2^\circ$) sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande [1].

b. Spectre solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Sa décomposition en longueur d'onde ou en couleurs donne ce qu'on appelle le spectre solaire [4].

Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.3)$$

Où :

h : est la constante de Planck.

ν : est la fréquence.

c : est la vitesse de la lumière.

λ : est la longueur d'onde.

La figure I.3 montre la couche standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extra terrestre désignée sous le nom d'AM0. La figure I.3 montre aussi l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° au niveau de la mer. Ce spectre de ciel clair, noté AM1.5 sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de le reproduire aussi fidèlement que possible. On voit clairement sur le spectre AM1.5 les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO_2 et la vapeur d'eau. Le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5900 K, très proche du spectre solaire AM0 est représenté aussi sur la figure. Le soleil est souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement [5].

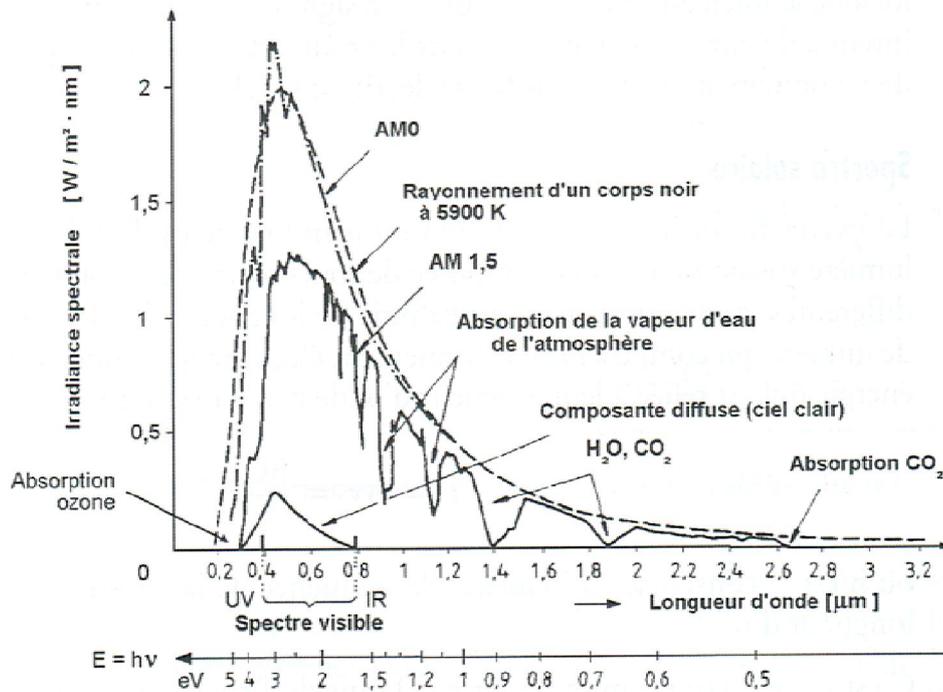


Figure 1.3: Spectres solaires hors atmosphère et au sol [5].

I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est un processus photo-électronique qui fait intervenir l'interaction entre un photon et un électron. On peut donc dire que le processus générique à cette conversion est l'effet photoélectrique décrit par Einstein en 1905 dans les annales de physique. En réponse, les solides peuvent réagir de différentes façons, en produisant par exemple une photoconduction c-à-d conduction du matériau sous irradiation ou un effet photovoltaïque c-à-d génération d'une tension sous illumination. Ce dernier phénomène ayant été initialement présenté à l'académie des sciences par Antoine Becquerel en 1839. C'est l'effet photovoltaïque que l'on utilise aujourd'hui dans le cas des semi-conducteurs pour la conversion de l'énergie solaire en électricité [1]. Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [6] :

- absorption des photons 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 paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif.

I.3.1 Absorption optique

La lumière se compose de photons chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde. Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois phénomènes optiques qui dépendent des propriétés optiques du matériau rencontré [5] :

- **Réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- **Transmission** : la lumière traverse l'objet.
- **Absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir. On prendra soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission. L'absorption d'un rayonnement dans un matériau s'explique en effet simplement par l'échange d'énergie entre les atomes du matériau et les corpuscules de la lumière. Le coefficient α (en m^{-1}) dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction k , selon la relation [4]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (I.4)$$

En générale les faibles longueurs d'ondes sont plus facilement absorbées car ils sont très énergiques. Cependant, le coefficient d'extinction d'un matériau varie également avec la longueur d'onde, ce qui peut faire varier cette tendance. Le phénomène d'absorption est décrit par la loi de Beer-Lambert [4] :

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (I.5)$$

Où :

I_0 : Intensité de la lumière incidente (W).

I : intensité de la lumière sortante (W).

x : longueur du trajet optique (m).

Les photons les plus énergétiques sont donc absorbés en quasi-totalité à proximité immédiate de la surface éclairée. En revanche, une partie des photons moins énergétiques peut traverser une partie du matériau, voire sa totalité, sans être absorbée [4].

A titre d'exemple, on donne Le coefficient d'absorption α à la longueur d'onde $\lambda = 0.59 \mu\text{m}$ de quelques matériaux dans le tableau suivant :

<i>Matériau</i>	$\alpha [cm^{-1}]$
<i>Silicium cristallin</i>	4.5×10^3
<i>Silicium amorphe</i>	2.5×10^4
<i>Arséniure de Gallium</i>	5.4×10^4

Tableau I.1 : Absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques [5].

I.3.2 Génération optique

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semiconducteur génèrent des paires électron-trou en supposant implicitement la création d'une seule paire par photon [7].

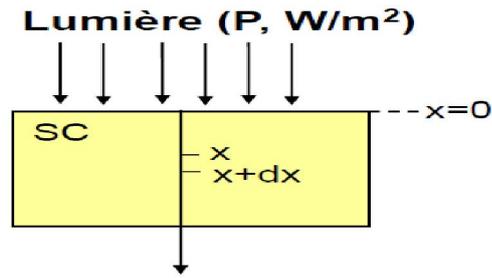


Figure I.4 : Photo-génération des porteurs de charges.

Le taux de génération des électron-trou dans un matériau semi-conducteur à une profondeur x de la surface, $G(x,\lambda)$ exprimé en $(1/m^3.s)$, dépend de flux lumineux $F(\lambda)$ et du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ [8].

Le taux de génération donc :

$$G(x,\lambda) = \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha(\lambda) x) \quad (I.6)$$

Où :

$F(\lambda)$ est le nombre des paires électron-trou photo-générés par unité de surface par seconde, $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion [8].

I.3.3 Mécanisme de recombinaison

Les porteurs minoritaires générés doivent diffuser jusqu'à la zone de charge d'espace de la jonction P-N pour pouvoir être collectés. C'est pourquoi la minimisation des phénomènes de recombinaison apparaît comme un enjeu technologique essentiel pour l'amélioration de la durée de vie des porteurs et donc du rendement de conversion [9].

a. Recombinaison en volume

Les électrons et les trous photo générés se recombinent principalement de trois manières : par l'intermédiaire de défauts de manière non-radiative (recombinaison Shockley-Read-Hall), de manière radiative par des transitions inter bandes, et par le phénomène de recombinaison Auger de manière non-radiative [10].

➤ **Recombinaison radiative**

La recombinaison radiative par transitions inter bandes, ou bande-à-bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence avec émission d'un photon, voir la figure I.5 L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap d'énergie interdite du matériau, ce type de recombinaison est fréquent dans les matériaux à gap direct [5].

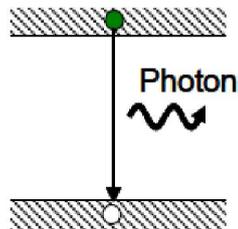


Figure I.5 : Recombinaison radiative.

Le taux net de recombinaison radiative R_r est donné par [10] :

$$R_r = B(p \cdot n - n_i^2) \quad (I.7)$$

Avec : B est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à $9.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$.

n_i sera la densité de porteurs intrinsèques, n la densité d'électrons et p la densité des trous.

➤ **Recombinaison Auger**

Lors d'une recombinaison Auger, un électron et un trou se recombinent en transférant leur énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). La figure I.6 explique ce mécanisme de recombinaison dans le cas d'un transfert à un électron [5].

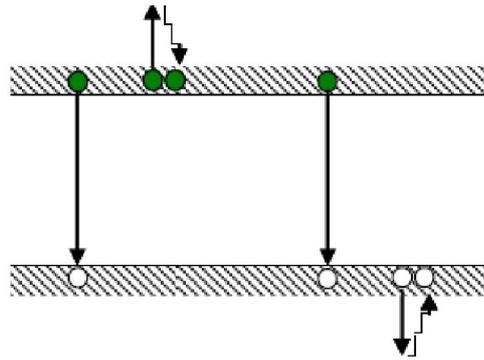


Figure I.6: Recombinaison Auger.

Le taux net de recombinaison Auger R_A est donné par [10]:

$$R_A = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (I.8)$$

Où :

C_n et C_p : sont des coefficients d'Auger des électrons et des trous respectivement.

Leurs valeurs sont [11]:

$$C_n = 2.2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$$

$$C_p = 9.9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$$

➤ Recombinaison Shockley-Read-Hall

La présence inévitable des impuretés et imperfections cristallines dans les semi-conducteurs causent l'apparition d'états électroniques permis dans le gap. Ces défauts peuvent jouer le rôle de pièges à électrons (ou à trous) qui piègent momentanément les électrons (les trous) avant de les renvoyer vers la bande de conduction (la bande de valence) ce qui influence la conductivité du semi-conducteur. Ils peuvent aussi jouer le rôle de centres de recombinaisons des paires électron-trous par la capture d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence et provoquant ensuite la recombinaison des deux. Les recombinaisons Shockley-Read-Hall s'effectuent par un mécanisme à deux étapes par (1) la relaxation d'un électron libre de la bande de conduction vers le niveau de défaut puis (2) vers la bande de valence où il s'annule avec un

trou (ou la relaxation de l'électron et du trou vers le défaut suivie par la recombinaison des deux) (3) et (4) [10].

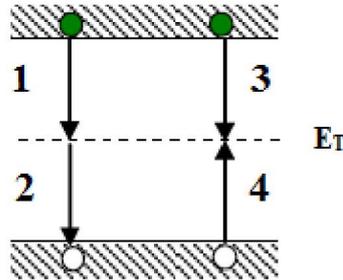


Figure I.7 : Recombinaison SRH.

Le taux de recombinaison net à travers un piège $E=E_T$ dans le gap d'énergie, appelé également la recombinaison Shockley-Read-Hall [5]:

$$R_{srh} = \frac{n.p - n_i^2}{\tau_{srh,n} \left(p + n_i e^{\frac{E_i - E_T}{kT}} \right) + \tau_{srh,p} \left(n + e^{\frac{E_T - E_i}{kT}} \right)} \quad (I.9)$$

Où la durée de vie des porteurs est donnée par :

$$\tau_{SRH\ n,p} = \frac{1}{\sigma_{n,p} v_{n,p} N_T} \quad (I.10)$$

σ : La section efficace de capture, v : La vitesse thermique des porteurs libre, N_T : La densité des pièges, E_T : L'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite et E_i : le niveau intrinsèque.

b. Recombinaisons en surface

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs sont influencées en grande part de l'état de leur surface qui constitue un dérangement évident de la régularité du réseau. Les liaisons chimiques des atomes de surface étant incomplètes. La structure énergétique qui se trouve juste à la surface est caractérisée par l'existence des états quantiques localisés près de la surface dont l'énergie se situe souvent dans la bande interdite. La présence d'impuretés à la surface contribue,

elle aussi, à la présence d'états de surface pouvant être des centres de recombinaison très efficaces[12].

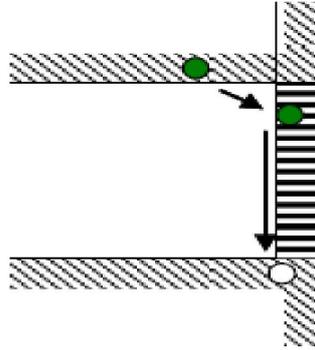


Figure I.8 : Recombinaison assistée par états de surface.

Le processus de recombinaison consiste en ce qu'un électron de la bande de conduction passe à un niveau de surface à la frontière du corps et ensuite dans la bande de valence en se recombinant avec un trou. La probabilité d'un tel processus est plus élevée que celle de passage direct de l'électron d'une bande à l'autre. Les pièges de surface donnent un taux de recombinaison R_S par unité de surface et par unité de temps qui est exprimé par la relation [5] :

$$R_S = S_0 \left(\frac{pn - n_i^2}{(n + n_i) + (p + n_i)} \right) \quad (\text{I.11})$$

S_0 : La vitesse de recombinaison surface.

I.3.4 Collecte des charges dans une cellule solaire à jonction P-N

Une fois les charges électriques libérées (électrons chargés négativement et trous chargés positivement), il faut les séparer et les extraire hors du matériau semi-conducteur dans le circuit électrique. La méthode utilisée pour créer ce champ électrique est celle du dopage au moyen d'impuretés ; le dopage d'un matériau pur permet d'amener des charges électriques excédentaires qui améliorent sa conductivité [13].

a. Dopage des semi-conducteurs

La formation des bandes interdites étant due à la régularité de la structure cristalline, toute perturbation de celle-ci tend à créer des états accessibles à l'intérieur de ces bandes interdites, rendant le gap plus perméable. Le dopage consiste à implanter des atomes correctement sélectionnés nommés impuretés à l'intérieur d'un semiconducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semiconducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semiconducteurs extrinsèques. Un semiconducteur *type P* est un semiconducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteur. Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur. Un semiconducteur *type N* est un semiconducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type donneur. Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur [6].

b. Jonction P-N

Parmi tous les dispositifs à semiconducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semiconducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec x pour passer d'une région de type P à une région de type N.

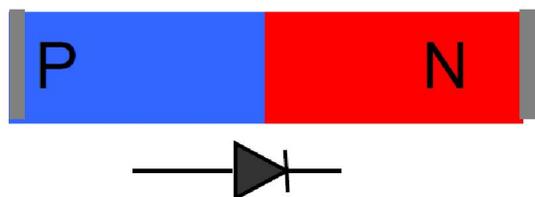


Figure I.9 : Jonction P-N.

A l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium de type P au type N apparaît une région appelée zone de charge d'espace qui provient de la diffusion des porteurs

majoritaires vers la région où ils sont minoritaires. Cet échange de porteurs dans la zone de charge crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange des charges et rétablir l'équilibre thermodynamique [7].

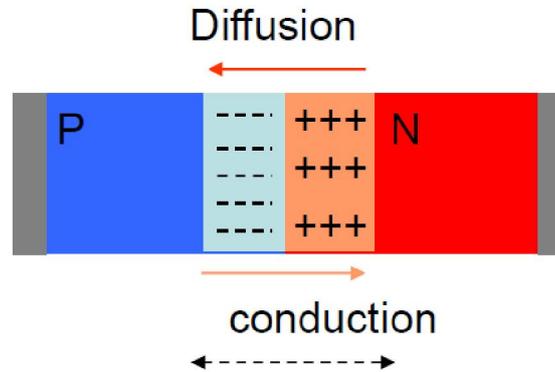


Figure I.10: jonction P-N avec zone de charge d'espace.

c. Collecte de charges

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les porteurs auront un comportement différent suivant la région [14]:

1. Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.

2. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [14]. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure suivante :

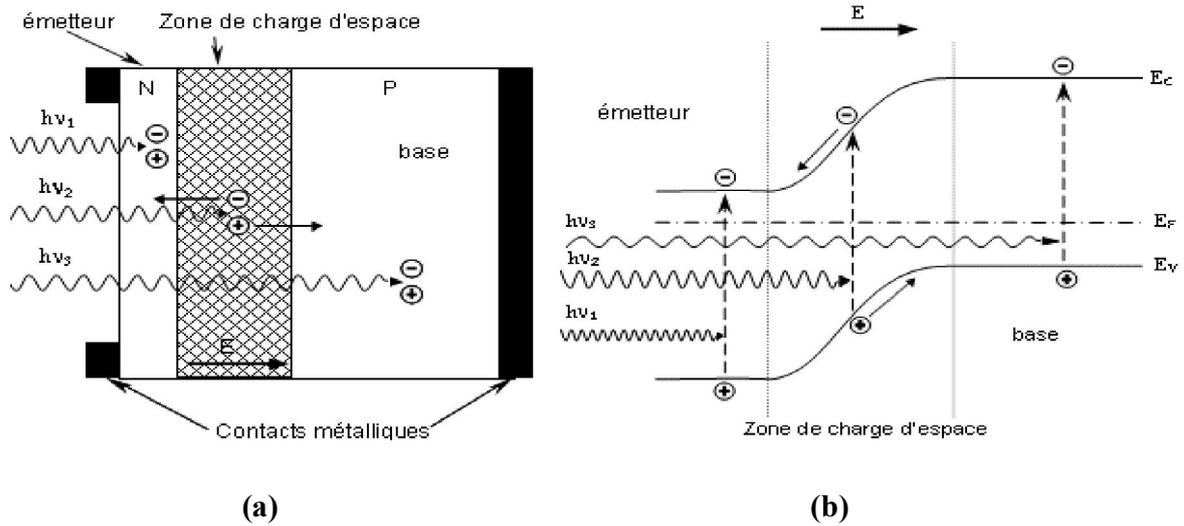


Figure I.11:(a). Structure, (b). Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

I.4 Circuit équivalent d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

I.4.1 Cellule solaire idéale

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque idéale est régie par l'équation I.12. Sous obscurité, la caractéristique I-V de la cellule est celle d'une diode. Sous éclairage, le courant photo-généré I_{ph} s'ajoute à ce courant d'obscurité I_{obsc} de la cellule [10].

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (I.12)$$

Avec :

I_{ph} : Courant photo-généré en Ampères.

I_{obsc} : Courant de la cellule à l'obscurité en Ampères.

V : tension aux bornes de la cellule en Volts.

I_s : Courant de saturation de la cellule en Ampères.

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C ; charge élémentaire d'un électron.

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV.K⁻¹; constante de Boltzmann.

T : température en Kelvin.

Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant :

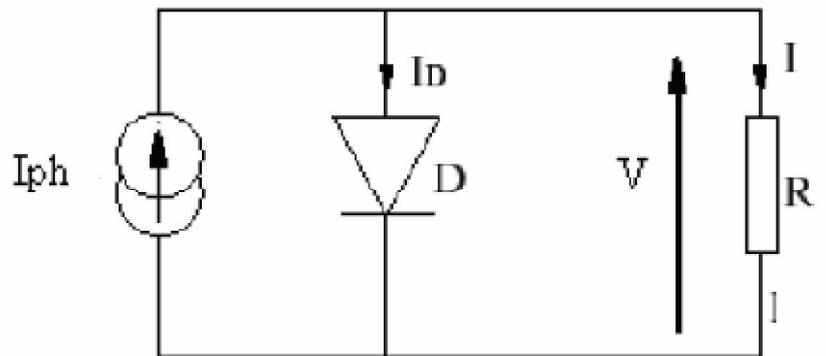


Figure I.12: Schéma électrique d'une cellule solaire idéale [6].

I.4.2. Cellule solaire réelle

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement et celui d'un générateur de courant, produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule.

Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle réel à deux diodes représenté sur la figure suivante [15] :

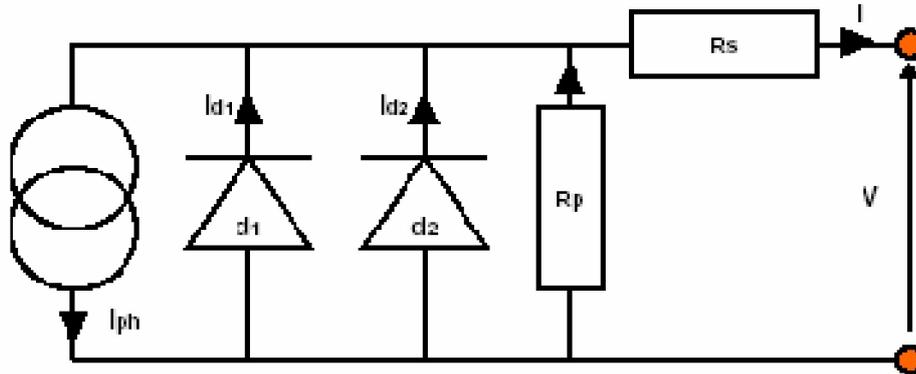


Figure I.13 :Schéma électrique d'une cellule solaire réel.

Les différents paramètres de ce modèle sont [15]:

- **Le générateur de courant** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo-généré.
- R_s : La résistance série, Elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- R_p : La résistance parallèle,également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.
- **La diode d_1** : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.
- **La diode d_2** : modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation :

$$I = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{n_1KT} \right) - 1 \right) + I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{n_2KT} \right) - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.13)$$

n_1 , relatif à la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur, doit être proche de 1.

n_2 , relatif à la génération/recombinaison des porteurs dans la ZCE, doit être proche de 2.

I.5 Différents paramètres de la cellule photovoltaïque

On a vu que la jonction servant de base à la cellule solaire est une diode. Lorsqu'elle est illuminée il apparaît dans cette diode un photo-courant qui dépend de la quantité de la lumière incidente [7]. On présente sur la figure les deux caractéristiques courant-tension de la cellule solaire dans l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein.

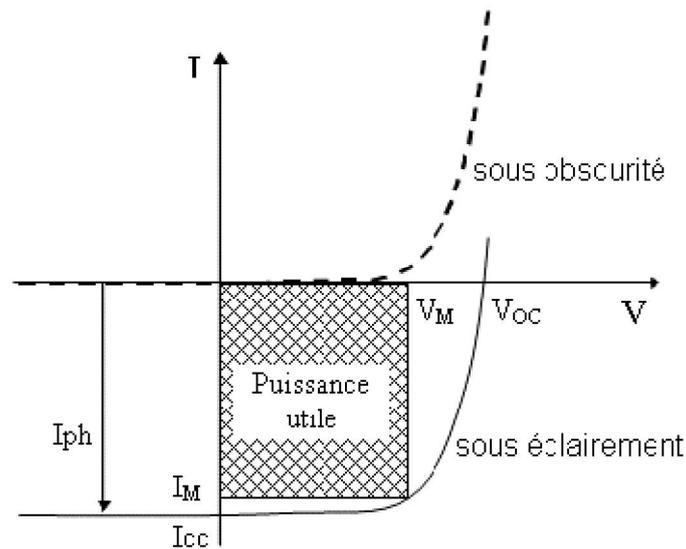


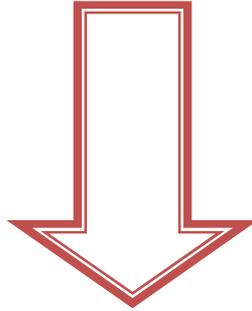
Figure I.14 : Caractéristiques I-V sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propre à la cellule qu'on va décrire dans les paragraphes suivants.

I.5.1 Courant de court-circuit

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule I_{cc} (obtenue pour $V=0$). Il croît 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.

CHAPITRE II



***MATERIAUX
SEMICONDUCTEURS POUR
CELLULES SOLAIRES***

II.1 Introduction

Les cellules solaires sont des dispositifs à base de semiconducteurs qui convertissent la lumière solaire en énergie électrique en utilisant l'effet photovoltaïque. Actuellement les matériaux utilisés se distinguent suivant quatre branches principales: le silicium cristallin, les couches minces, les composants III-V et les concepts innovants (cellules organiques, cellules à colorant...).

Dans ce chapitre nous allons présenter le silicium cristallin, amorphe et l'arséniure de gallium comme matériaux de base dans la technologie photovoltaïque et les étapes de fabrication d'une cellule solaire.

II.2 Cellules solaires à base de silicium

II.2.1 Propriétés générales

Le Silicium est un matériau monoatomique qui cristallise dans la structure diamant. Il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (CFC), imbriqués, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale principale. La maille élémentaire contient deux atomes de silicium, occupant les positions $(0, 0,0)$ et $(1/4,1/4,1/4)$. Chaque atome de silicium possède une coordination tétraédrique et établit des liaisons de valence avec ses quatre voisins [17].

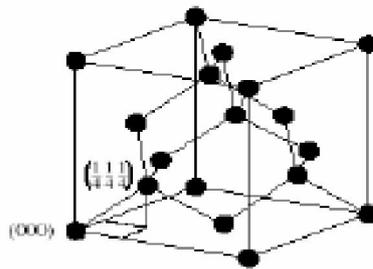


Figure II.1 : Structure de silicium cristallin.

Le silicium offre de nombreux avantages ; présent en abondance dans la croûte terrestre, c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel SiO_2 qui trouve de nombreuses applications en micro-électronique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N). D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside

dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, $E_g = 1.12$ eV à 300 K, correspondant à une longueur d'onde = 1107 nm [17].

Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

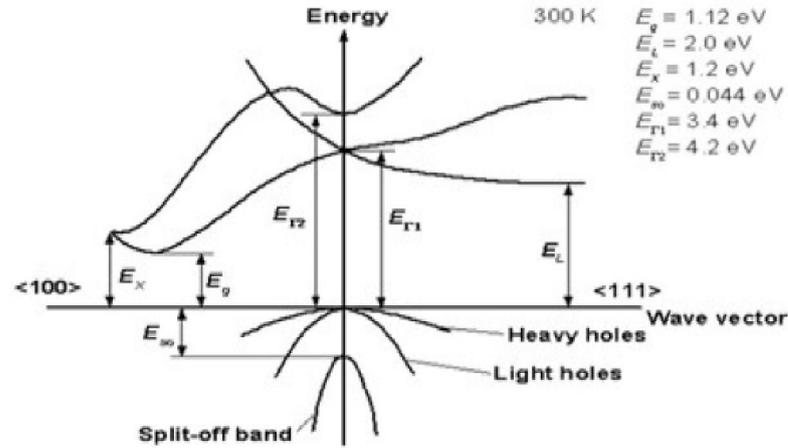


Figure II.2: Structure de bande du silicium [18].

Ainsi, si l'on considère les coefficients d'absorption des matériaux semi-conducteurs, l'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de 100 mm [19]. La longueur de diffusion des porteurs minoritaires au sein du silicium, et par conséquent la qualité cristalline du matériau, devra alors tenir compte de ces impératifs à savoir une longueur de diffusion au moins égale à deux fois l'épaisseur de la cellule photovoltaïque. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelle soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou polycristallin).

Le silicium est le deuxième élément de la croûte terrestre, on le trouve sous forme oxydée (sable, silice, quartz). Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.

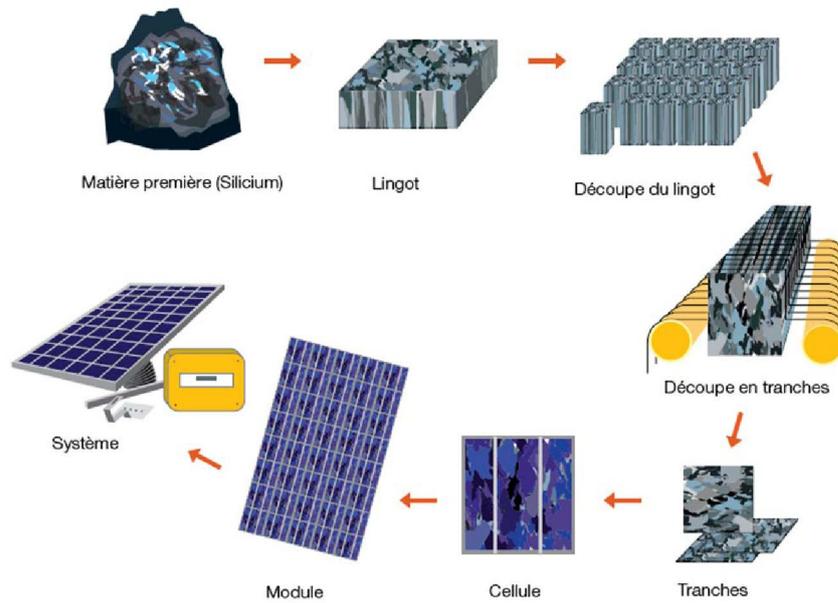


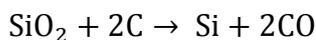
Figure II.3 : Chaîne de fabrication d'une cellule photovoltaïque.

II.2.2 Elaboration de la cellule

Le silicium n'existe pas à l'état natif, mais sous forme d'oxydes la silice ou de silicates, qui sont des composés extrêmement stable.

➤ Réduction de la silice :

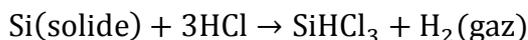
On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée avec du carbone [20].



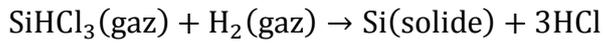
Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique.

➤ Purification du silicium :

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de SiHCl_3 (trichlorosilane) liquide à température ambiante. [20]



C'est une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Le SiHCl_3 (qui a une température d'ébullition faible: 31.8°C) est ensuite purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Puis, ce trichlorosilane purifié est réduit pour redonner du silicium.



Le silicium précédemment obtenu était polycristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Les rendements de conversion pour les modules commercialisés en silicium sont dans la gamme 15 – 20% pour le silicium monocristallin [20].

a. Silicium monocristallin

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semi-conducteurs, par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium [18].



Figure II.4 : Cellule solaire monocristallines [18].

Dans le cas du Silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm. On a des rendements photovoltaïques élevés, supérieurs à 15 %.

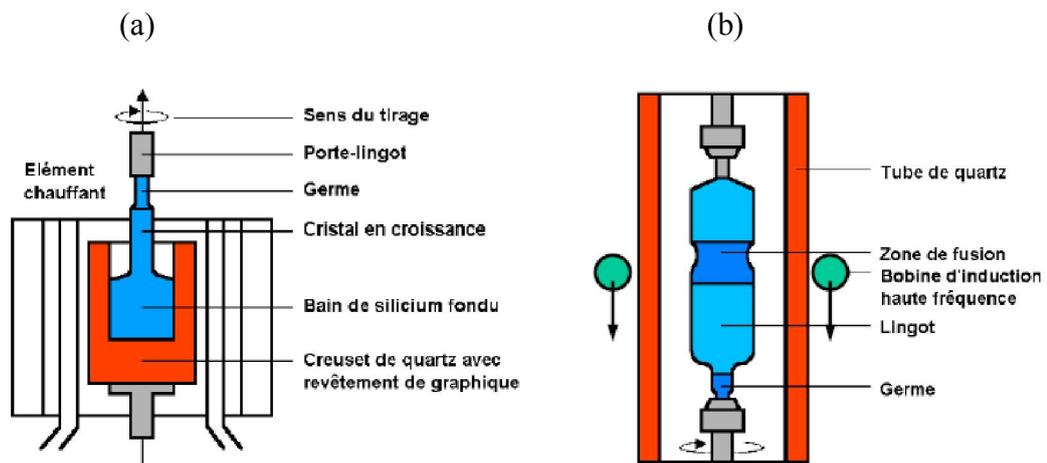


Figure II.5 : (a) Méthode de Czochralski, (b) Méthode de la fusion de zone [2].

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très coûteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques [18].

b.Silicium multi-cristallin

Le silicium multi-cristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 1970. Le silicium multi-cristallin quant à lui, est obtenu par refonte des chutes de silicium monocristallin issues des opérations d'équarrissages. Son rendement est légèrement inférieur mais il est beaucoup moins cher à l'achat. Les chutes sont placées dans un creuset porté à plus de 1430°C. Après la phase de fusion, le fond du creuset est refroidi. On oriente de bas en haut la solidification, pour lui donner une structure colonnaire multi-cristalline à gros grains. Le lingot obtenu est ensuite découpé, en briques de 101,5 x 101,5 mm ou 120 x 120 mm actuellement. Ces briques sont ensuite assemblées pour être transformées [19]. Il se présente sous forme de lingots de silicium constitués de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. Les techniques de production du silicium multi cristallin sont beaucoup plus simples à mettre en œuvre. Néanmoins, du fait de la méthode d'élaboration, la concentration en impuretés est supérieure à celle du silicium monocristallin et la structure granulaire induit des recombinaisons. En conséquence le rendement de conversion photovoltaïque est limité [21].

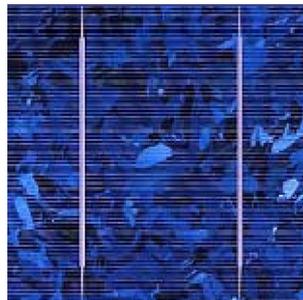


Figure II.6 : Cellule solaire multi-cristallines [18].

II.2.3. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Moins chers. -Moins de défaut par rapport l'arseniure de gallium et silicium amorphe. -Il n'est pas toxique comme certains semiconducteurs III-V. -Il peut se doper facilement avec le phosphore ou le bore. 	<ul style="list-style-type: none"> -Gap (1.1eV) inférieur au gap idéal (1.5eV). -Le rendement de cellule en silicium cristallin est limité à ~14%. -Nécessité d'une grande pureté du silicium. -Plus sensible à la température. -L'absorption du rayonnement solaire par le silicium est faible.

II.3 Cellules solaires à base de silicium amorphe

II.3.1 Propriétés générales

Ce type de cellules de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergie pour leur production que les cellules cristallines. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie et environ 11% en laboratoire. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à faible cout en utilisant peu dematière première. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semitransparentes qui laissent passer 10% à 20% du rayonnement solaire incident [21]. Le domaine des semiconducteurs amorphes a été un des secteurs les plus actifs et les plus passionnants dans la physique de la matière condensée. L'avantage économique de ces matériaux et les nombreuses propriétés uniques de l'état amorphe, sont les deux raisons principales derrière l'intérêt croissant des semiconducteurs amorphes pendant les deux dernières décennies. Bien qu'il y ait plusieurs inconvénients comme le manque de reproductibilité, les mobilités basses et les densités élevées de défauts, ces matériaux peuventêtre de bons candidats de remplacement rentables pour leurs contreparties cristallines. Parmi ce groupe de matériaux, le silicium amorphe véhicule un intérêt considérable. La figure suivant montre une comparaison entre la structure du silicium cristallin et le silicium amorphe.

II.3.2 Elaboration de la cellule

Depuis les années 70, la technique adoptée industriellement et dans les laboratoires pour la synthèse de couches de silicium amorphe hydrogéné est la méthode dite PECVD, de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radio fréquence (13,56 MHz). La figure II.8 présente un schéma de réacteur PECVD et quelques réactions se produisant à la surface du dépôt. Les gaz sources sont le silane SiH_4 , l'hydrogène H_2 et, pour les gaz dopants, le diborane (B_2H_6) et la phosphine (PH_3) [23].

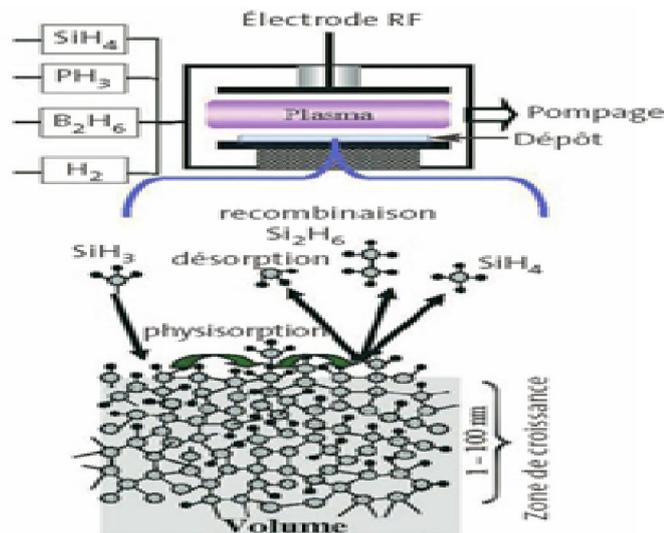


Figure II.8 : Dépôt de couches minces de silicium amorphe par PECVD.

Dans le plasma, les collisions inélastiques entre les électrons de haute énergie (accélérés par le champ électrique RF) et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées. Les espèces réactives produites dans le plasma vont se condenser sur le substrat pour former (atome après atome) une couche mince, en général désordonnée. On peut ainsi déposer des couches sur de grandes surfaces (pouvant atteindre 4 m^2), à relativement basse température (typiquement entre $100 \text{ }^\circ\text{C}$ et $300 \text{ }^\circ\text{C}$), donc sur des substrats peu chers [23].

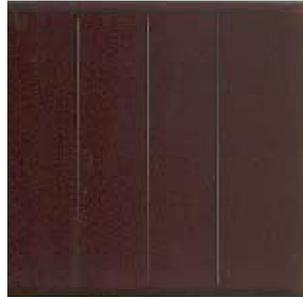


Figure II.9: Cellule solaire amorphe [18].

II.3.3 Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Facilité de fabrication par déposition -Technologie basse température (< 300°C) -Bande interdite plus élevée (1.7-1.9 eV) -Son coefficient d'absorption optique varie entre 10^6 et 10^2 cm^{-1} pour les longueurs d'onde entre 400 et 1100 nm. Son coefficient est plus élevé que celui du c-Si. 	<ul style="list-style-type: none"> -Taux de recombinaison élevé → faible mobilité des porteurs. -Effet Staebler-Wronski: diminution lente de la photoconductivité sous fort éclairement. -Beaucoup de défauts dans la structure. -Rendement de conversion des cellules commerciales 5-7%

II.4 Cellules solaires à base d'Arséniure de Gallium

L'arséniure de Gallium (GaAs) est un semi-conducteur III-V complexe composé de l'élément le gallium (Ga) de la colonne III et l'élément de l'arsenic (As) de la colonne V du tableau périodique des éléments. La structure des bandes des III-V est similaire car la structure des liaisons tétraédriques est la même que pour le Si ou le Ge [24].

II.4.1 Propriétés générales de l'Arséniure de Gallium

Le cristal GaAs est composé de deux sous-réseaux, chacun cubique à faces centrées (FCC) et décalé par rapport à l'autre par la moitié de la diagonale du cube. Cette configuration cristalline est connue sous le nom de blende de zinc et est représentée sur la figure.

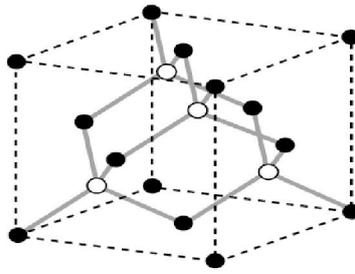


Figure II.10 : Réseau cristallin du GaAs.

Pour du GaAs non dopé, l'énergie de gap à température ambiante est de 1,42 eV. L'affinité électronique du GaAs, χ (énergie nécessaire pour arracher un électron du bas de la bande de conduction jusqu'au niveau du vide) est d'environ 4.07 eV. Le GaAs est un semiconducteur à gap direct, ce qui signifie que le minimum de la bande de conduction est directement au-dessus du maximum de la bande de valence. Les transitions entre la bande de valence et la bande de conduction nécessitent seulement un changement d'énergie, et non un changement de moment. Comme nous l'avons vu, cette propriété en fait un matériau très utile pour la fabrication de diodes électroluminescentes et de lasers à semi-conducteurs, car un photon est émis quand un électron change de niveau d'énergie en passant de la bande de conduction à la bande valence. À l'inverse, un photon incident peut exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui permet d'utiliser le GaAs dans les détecteurs [24].

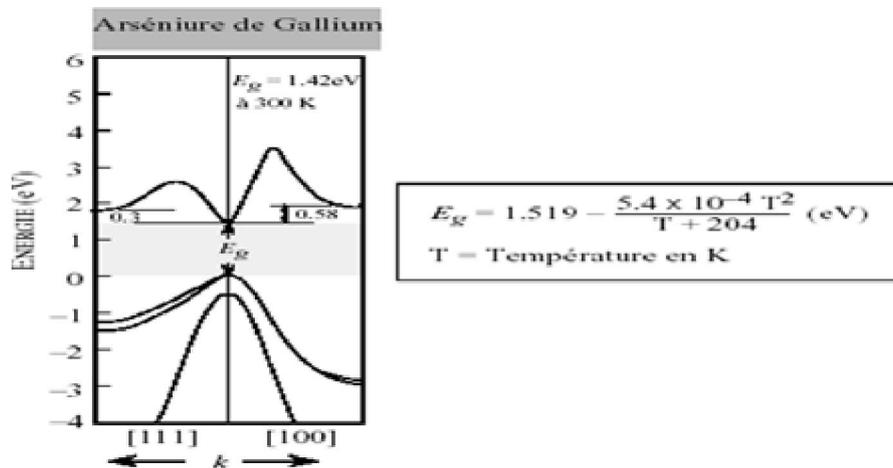


Figure II.11: Structure de bande du GaAs.

II.4.2 Elaboration de la cellule

a. Préparation de l'Arséniure de Gallium monocristallin

Le problème de GaAs est que c'est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes. En plus l'As est un élément toxique. Les techniques de Czochralski et de Bridgman permettent d'obtenir des lingots massifs de GaAs

➤ Méthode de Czochralski

La méthode de Czochralski doit être modifiée pour la croissance des monocristaux GaAs à cause de la volatilité de l'As au point de fusion du Ga (1238 °C), qui va s'échapper du fondu. Par conséquent, le fondu est couvert par une couche de 1 cm d'épaisseur du trioxyde de Bore B_2O_3 , en conjonction avec des gaz inertes de haute pression dans la chambre de croissance, pour éviter l'évaporation de l'As. Cette méthode est connue par le nom "méthode Czochralski liquide encapsulée". Les éléments dopants ou autres éléments III-V nécessaires pour la croissance des composés ternaires ou quaternaires peuvent être ajoutés au fondu dans l'ordre d'obtenir la proportion voulue des éléments dans le composé [24].

➤ Méthode Bridgman

La méthode Bridgman est une technique de deux zones, où un creuset de graphite est tiré d'un côté d'un tube scellé en quartz, à une température de 1242-1460 °C au-dessus du point de fusion du Ga, vers un autre côté avec une température de 610-620 °C, pour maintenir la surpression de l'As. Un germe de GaAs est fixé au bord refroidi du creuset pour établir l'orientation du cristal [24].

➤ Epitaxie

L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. Étymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", "arrangement". On utilise le substrat comme germe cristallin de croissance et on fait croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche. La couche épitaxiale peut être dopée ou nondopée [25]. On distingue trois différentes techniques d'épitaxie :

- Epitaxie par jet moléculaire (MBE pour Molecular Beam Epitaxy)
- Epitaxie en phase vapeur (VPE ou CVD pour Chemical Vapor Deposition)
- Epitaxie en phase liquide (LPE pour Liquid Phase Epitaxy)

Épitaxie par jet moléculaire

L'épitaxie par jet moléculaire consiste à envoyer sous ultravide des flux contrôlés d'atomes ou de molécules sur la surface d'un substrat convenablement chauffé. Les éléments à déposer, contenus dans des creusets à haute température, sont évaporés et vont se déposer par transport thermique sur la surface du substrat, plus froide mais de température quand même assez élevée pour permettre le déplacement et le réarrangement des atomes. Industriellement, cette technique très coûteuse ne concerne donc que des dispositifs à forte valeur ajoutée, mais elle est concurrente de l'épitaxie en phase vapeur dans le cas des semiconducteurs III-V [26].

Épitaxie en phase vapeur

L'épitaxie en phase vapeur consiste à faire croître un cristal à partir de sources gazeuses décomposées au contact d'un substrat monocristallin chauffé. La multiplicité des sources gazeuses assure une grande diversité tant dans la nature du matériau épitaxié que dans ses possibilités de dopage [26]. La pression à laquelle se déroule la croissance cristalline permet de différencier plusieurs méthodes d'épitaxie en phase vapeur :

- Réacteur opérant sous pression atmosphérique : APCVD, acronyme d'Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition.
- Réacteur opérant sous pression réduite : LPCVD, acronyme de Low Pressure Chemical Vapor Deposition.
- Réacteur opérant sous ultravide : UHVCVD, acronyme d'Ultra High Vacuum Chemical

Vapor Deposition. Le mode de chauffage du substrat détermine également le type d'épitaxie qui peut être chauffage par résistances, par induction radio fréquence, par lampes (RTCVD pour Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition), ou par plasma PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Le réacteur d'épitaxie devra alors tenir compte des caractéristiques de la technique choisie. La figure II.12 représente différents types de réacteurs CVD. La diversité des techniques existantes, associée à des vitesses de croissance cristalline pouvant atteindre plus de 10 $\mu\text{m}/\text{min}$, explique pourquoi l'épitaxie en phase vapeur est à l'heure actuelle la technique la plus répandue au sein de l'industrie des semi-conducteurs. Dans le cas des semi-conducteurs III-V ou II-VI, l'épitaxie en phase vapeur est de venue une méthode très utilisée du fait du grand nombre de dérivés organométalliques (EPVOM) [26].

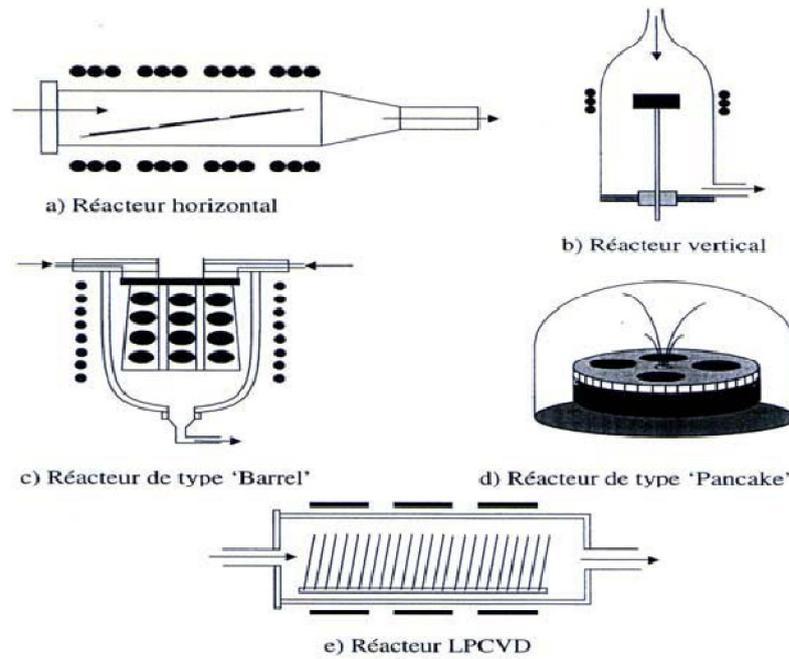


Figure II.12 : Différents types de réacteurs d'épitaxie en phase gazeuse [27].

Epitaxie en phase liquide

La croissance par épitaxie en phase liquide s'appuie sur l'équilibre thermodynamique entre une phase liquide et un substrat solide la croissance à lieu en quasi-équilibre thermodynamique ce qui permet l'obtention de films de très bonne qualité. La vitesse de dépôt, autour de $1\mu\text{m}/\text{min}$ dépend de la rampe de décroissance en température (entre $0,5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ et $2\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) [26].

II.5.4. Avantages et inconvénients

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Les cellules en GaAs sont utilisées principalement en espace à cause de leurs couts élevés. - Bande interdite élevée (1.42 eV). -Le GaAs est plus résistant aux irradiations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le problème de GaAs est que c'est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes. - Plus chère. - Plus de défaut par rapport au c-Si.

II.5 Etapes de Fabrication d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction P-N qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentées dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque standard industrielle est présentée sur la figure II.13 :

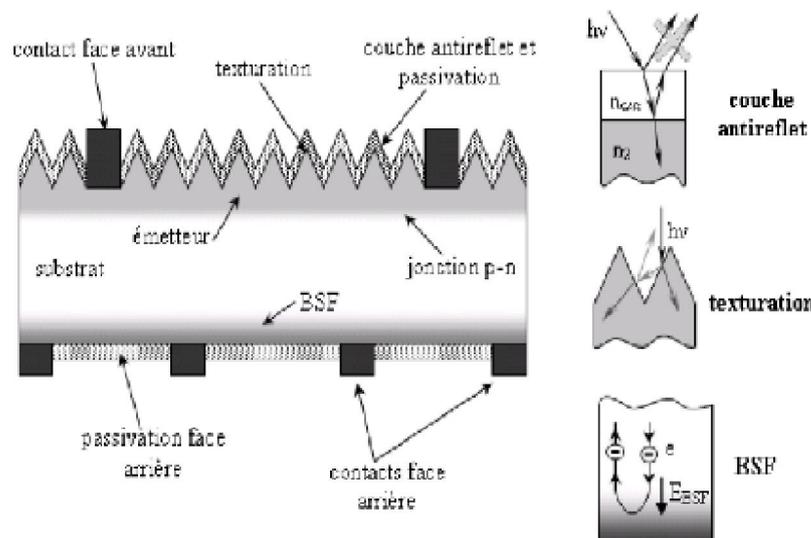


Figure II.13 : Elément d'une cellule photovoltaïque [22].

II.5.1 Passivation des faces avant et arrière

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$) [28].

II.5.2 Couche anti-reflet

La qualité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante. Le rôle de la couche anti reflet est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti-réfléchissantes, la cellule

solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques. Différentes couches anti réfléchives sont utilisées en photovoltaïque. Elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident [20].

II.5.3 Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief crée permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39% à moins de 10% [20].

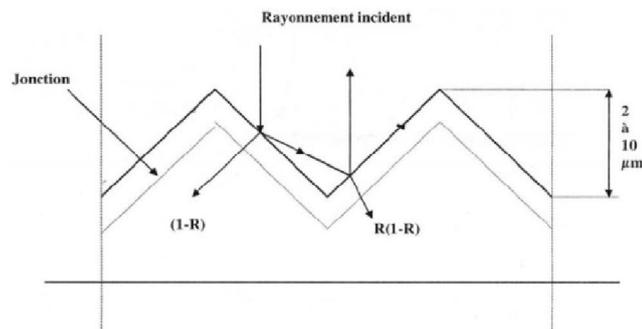


Figure II.14 : Diffusion de la lumière sur une surface texturée augmentant le piégeage.

II.5.4 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de $100\mu\text{m}$ et une épaisseur de $10\mu\text{m}$ à $30\mu\text{m}$ permettant de

conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. La qualité de contact sur la surface avant dépend fortement du niveau de dopage en surface et du type de texturisation. Les contacts avant sont déposés avec une pâte contenant essentiellement de l'argent à travers d'une grille. Puis, la pâte est séchée dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. Ensuite, de même pour la métallisation arrière une pâte en aluminium est déposée sur la quasi-totalité de cette face [21].

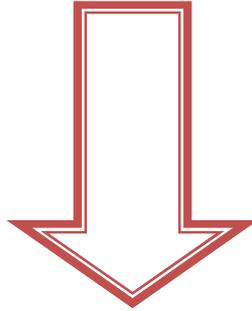
II.5.5 Champ électrique arrière

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure p-p+. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison [20]. Le BSF le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque consiste en une couche d'aluminium déposée sur la face arrière, suivie d'un traitement thermique conduisant à un alliage de silicium et d'aluminium. La largeur du BSF va de quelques micromètres à plus de 10µm. L'effet d'un BSF est souvent modélisé par l'utilisation d'une vitesse de recombinaison de surface effective, qui est définie à la frontière de la région quasi-neutre de la base. Les valeurs typiques de ces vitesses obtenues avec un BSF en aluminium vont de 200 à 1000 cm/s, avec des variations selon le profil de dopage et la profondeur du BSF [21].

II.5.6 Emetteur et Base

L'émetteur de type N est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction P-N qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200 µm. Les trous photogénérés ayant une longueur de diffusion plus faible que celle des électrons. En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur (0,2 - 0,3 µm) mais fortement dopé $\approx 10^{20}$ cm⁻³ et une base de plus grande épaisseur faiblement dopée $\approx 10^{15}$ à 10^{16} cm⁻³. Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal/semiconducteur et créer un champ électrique suffisant au niveau de la zone de charge d'espace [18].

CHAPITRE III



RÉSULTATS
EXPIRIMENTAUX

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus durant ce travail concernant la caractérisation électrique en termes de caractéristiques courant-tension et puissance-tension de deux cellule photovoltaïques différents ; une en silicium cristallin et l'autre en silicium amorphe. Nous parlerons aussi dans ce chapitre, de l'influence de l'intensité lumineuse sur les paramètres externes de la cellule tels que le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion photovoltaïque.

III.2 Environnement LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un langage de programmation graphique qui utilise des icônes au lieu de lignes de texte pour créer des applications. Contrairement aux langages de programmation textuels où ce sont les instructions qui déterminent l'ordre d'exécution du programme, LabVIEW utilise la programmation par flux de données ; c'est le flux des données qui détermine l'ordre d'exécution des fonctions. Les VIs, ou instruments virtuels, sont des programmes LabVIEW qui contrôle les instruments physiques [29].

Dans LabVIEW, vous construisez une interface utilisateur à l'aide d'un ensemble d'outils et d'objets. L'interface utilisateur d'un VI est appelée la face-avant. Ensuite, vous créez le code en utilisant des représentations graphiques de fonctions pour commander les objets de la face-avant.

Un VI contient les deux composantes suivantes :

- **Face-avant** — Sert d'interface utilisateur.
- **Diagramme** — Contient le code source graphique qui définit les fonctionnalités du VI.

➤ **Face-avant**

La face-avant est l'interface utilisateur du VI. Vous construisez la face-avant avec des commandes et des indicateurs qui sont respectivement les terminaux d'entrée et de sortie interactifs du VI. Les commandes sont des boutons rotatifs, des boutons-poussoirs, des cadrans et autres mécanismes d'entrée. Les indicateurs sont des graphes, des LED et d'autres afficheurs de sortie. Les commandes simulent les mécanismes d'entrée des instruments et fournissent des données au diagramme du VI. Les indicateurs simulent les mécanismes de sortie d'instruments et affichent les données que le diagramme acquiert ou génère [29].

➤ **Diagramme**

Après avoir construit la face-avant, vous devez ajouter le code en utilisant les représentations graphiques des fonctions pour commander les objets de la face-avant. Le diagramme contient ce code source graphique. Les objets de la face-avant apparaissent en tant que terminaux sur le diagramme [29].

La figure suivante montre un exemple de face-avant et le diagramme.

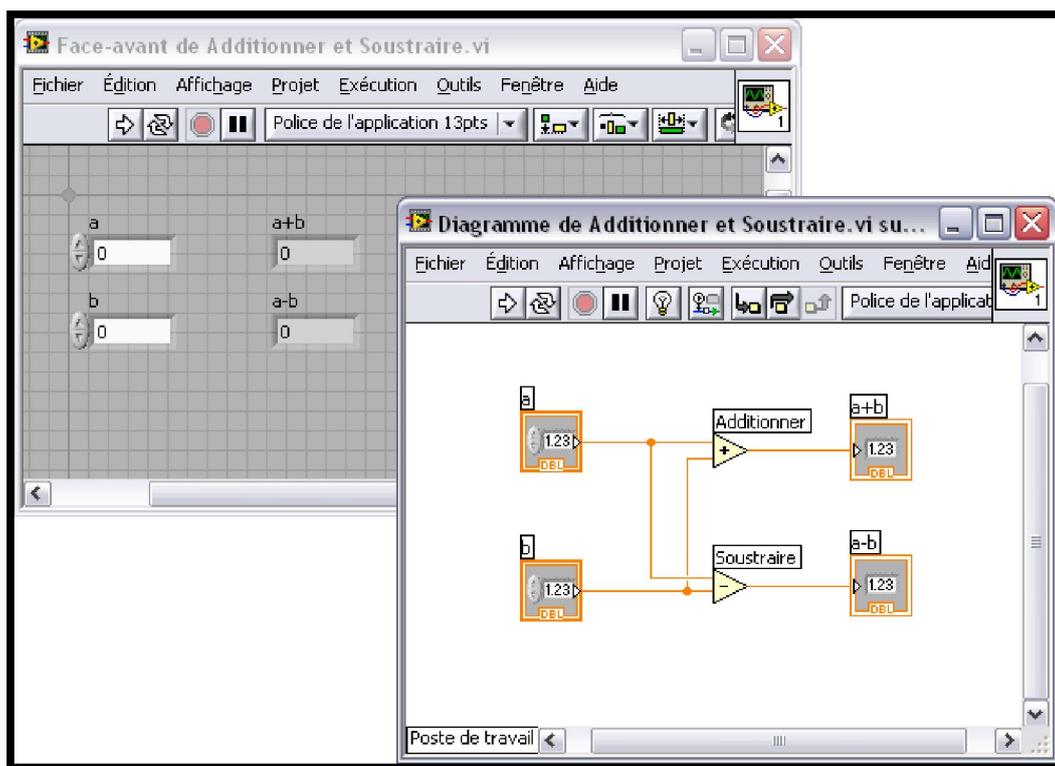
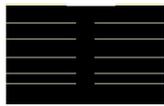
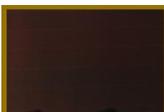


Figure III.1: Face avant et le diagramme de LabVIEW [29].

III.3 Etude expérimentale

Notre objectif principal est d'extraire les caractéristiques I-V et P-V de deux cellules solaires en utilisant deux techniques différents et étudier ensuite l'influence du changement de l'intensité lumineuse sur la cellule. Pour cette raison, on a choisi les deux cellules solaires suivantes :

La cellule	Dimensions
Silicium cristallin 	2.5 cm x 5 cm
Silicium amorphe 	9.8 cm x 5.8 cm

III.4 Cellule en silicium cristallin

III.4.1 Montage expérimental

Le montage expérimental qu'on a utilisé est représenté sur la figure ci-dessous :

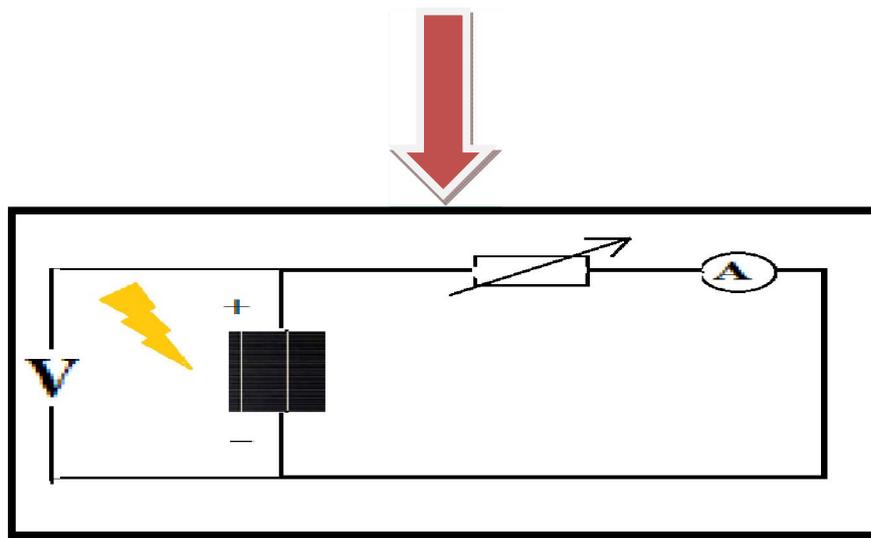
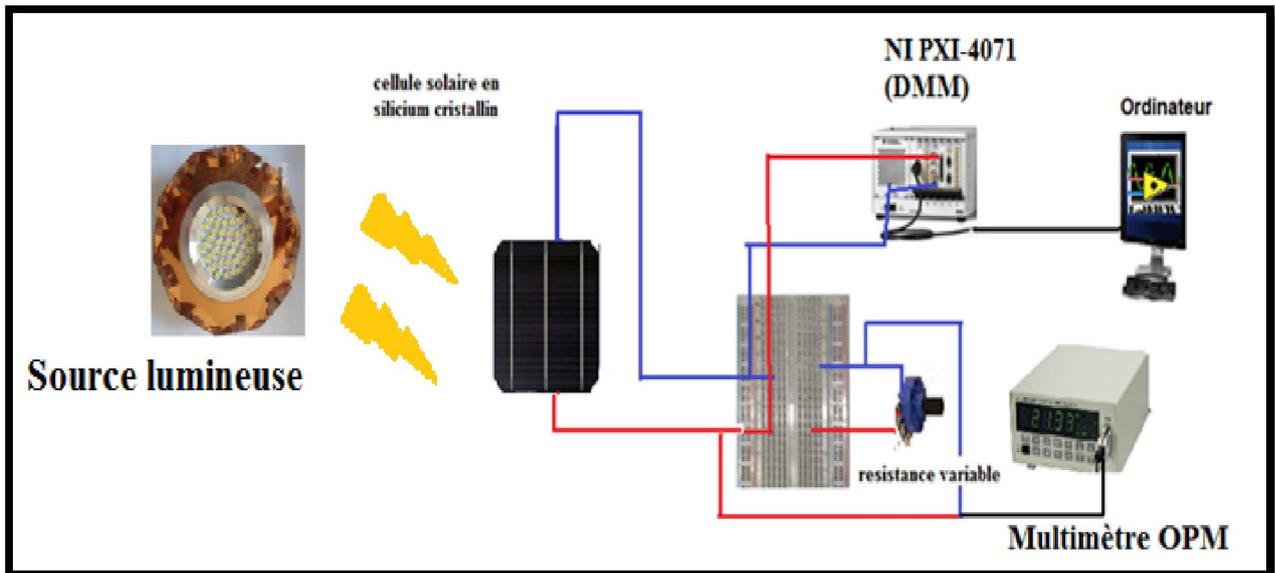


Figure III.2 : Montage expérimental

Pour obtenir la caractéristique I-V de la cellule, on illumine celle-ci par une source lumineuse (lampe LED spotlight) puis on fait varier la résistance connecté en série avec la cellule. Pour chaque valeur de la résistance, la tension correspondante est mesurée avec le multimètre numérique NIPXI-4071 et le courant correspondant est relevé à l'aide du puissance-mètre multifonction OPM 70310.

L'objectif de l'utilisation d'une résistance variable est de balayer toute la caractéristique I-V. Nous déduisons en suite la caractéristique P-V par l'utilisation de la formule $P=VI$.

III.4.2 Instrumentations

Les instruments utilisés pour caractériser notre cellule solaire en silicium cristallin sont :

➤ *Multimètre numérique NI PXI-4071 (DMM)*

Le multimètre numérique NI PXI-4071 permet d'effectuer des mesures de tension de $\pm 10\text{nV}$ à 1000V , des mesures de courant de $\pm 1\text{ pA}$ à 3 A et des mesures de résistance de $10\ \mu\Omega$ à $5\ \text{G}\Omega$, ainsi que des mesures de fréquence/période et de diodes rapides et précises [29].

➤ *Puissance-mètre multifonction OPM 70310*

Le puissance-mètre multifonction OPM 70310 (Multi function Optical Power Meter) permet de mesurer des tensions de 2mV à 2V , des courants de 2nA à 2mA et la puissance optique

➤ *Source lumineuse*

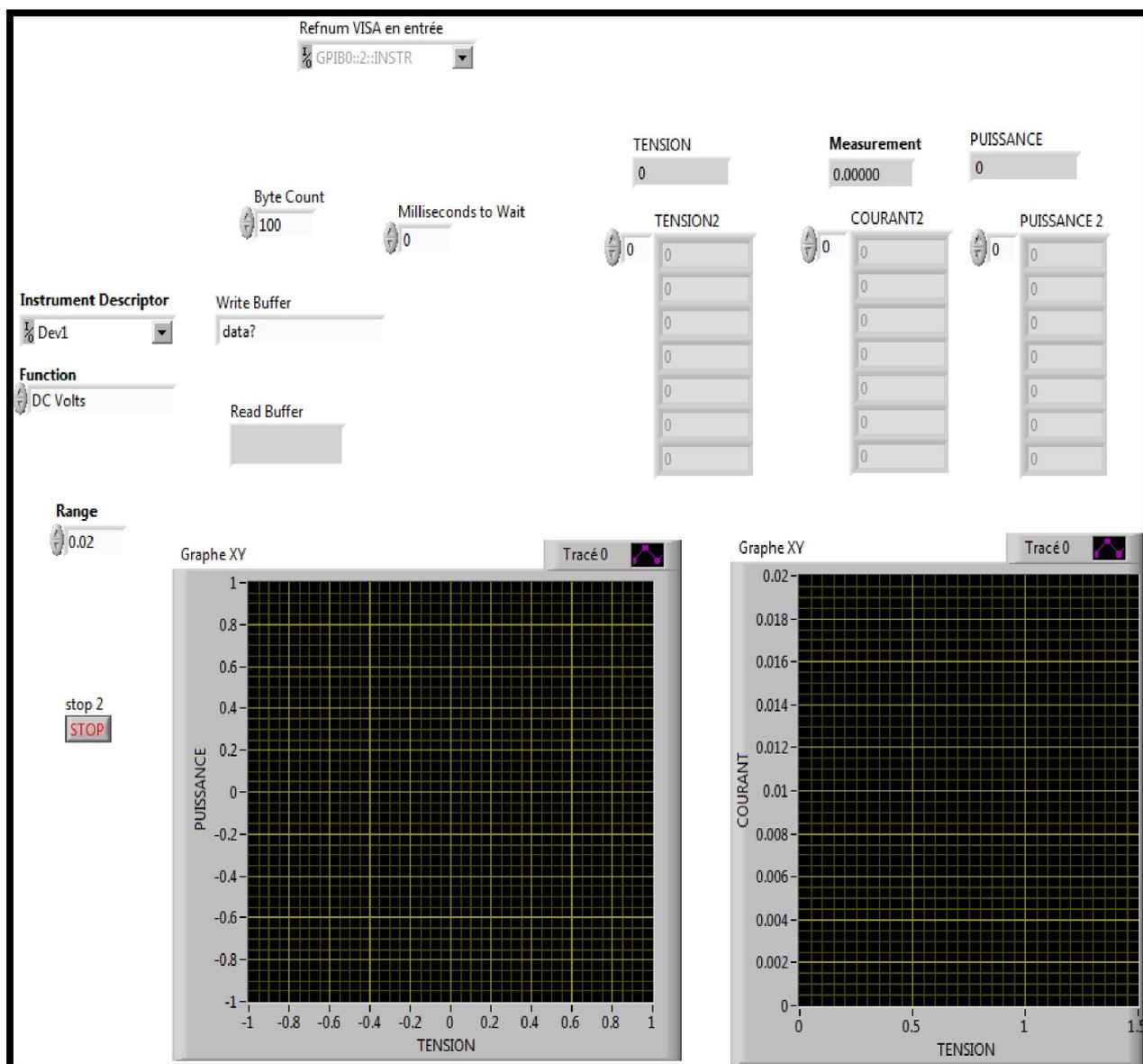
La lampe qu'on a utilisée est une lampe LED Spotlight constituée de plusieurs diodes électroluminescentes distribuées sur sa surface. Elle nécessite une tension d'alimentation de 220V et qui nous donne une puissance de 100 Watts .

III.4.3 Programme LabView

Nous avons utilisé l'environnement LabView pour contrôler les instruments NI-PXI 4071 et l'OPM 70310. En effet, chaque fois on varie la résistance, notre programme nous permet de relever la tension et le courant correspondants en temps réel. On obtient ainsi les deux courbes caractéristiques I-V et P-V de notre cellule solaire par simple balayage de la résistance variable.

Le programme qu'on a développé pour mesurer la caractéristique I-V et P-V est montré dans la figure suivante :

➤ *Face avant*



➤ *Diagramme*

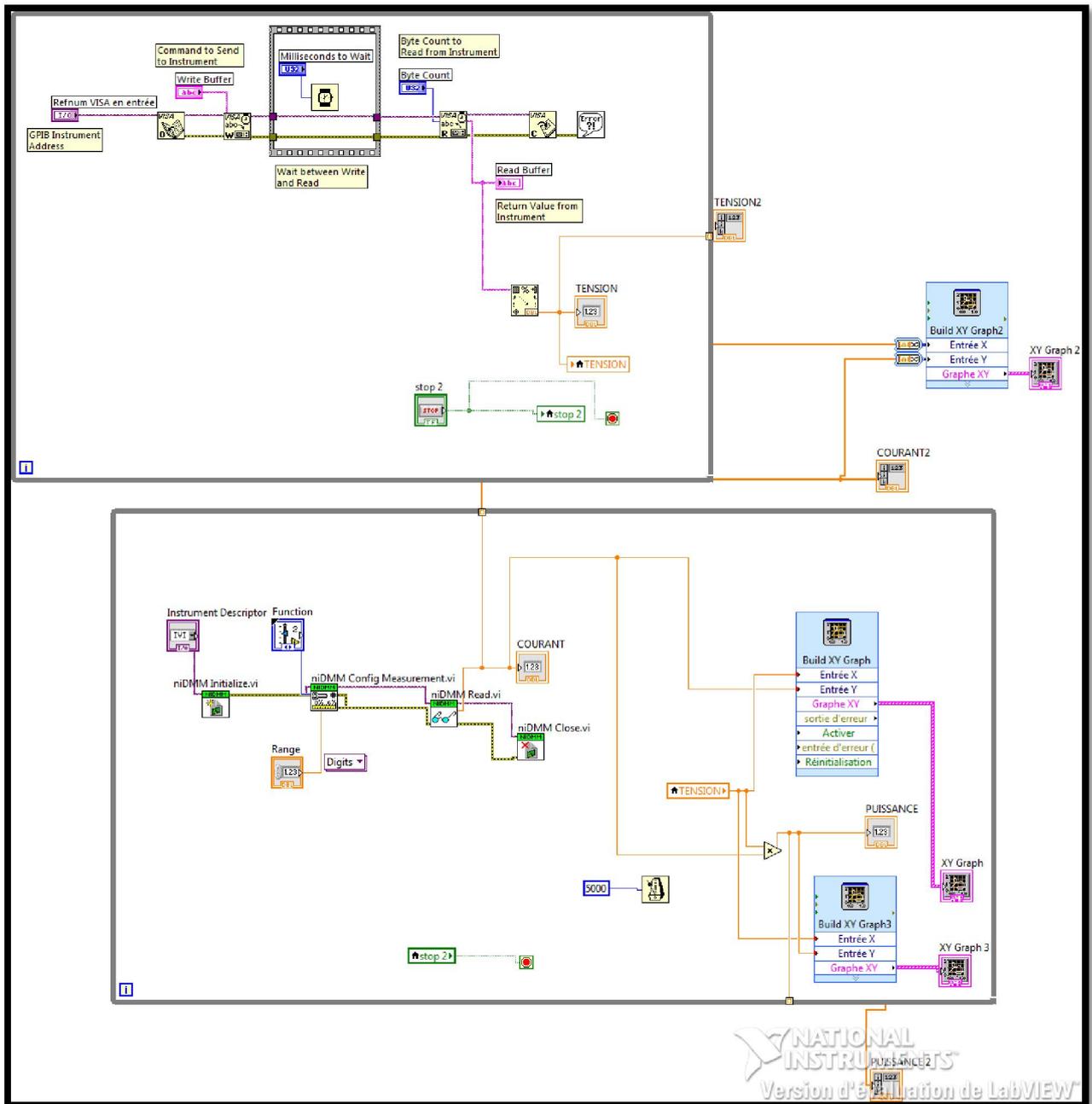


Figure III.3 : Face-avant et diagramme de notre programme.

III.4.4 Résultats

On a fait varier la résistance de 0 à 1000 Ω et à l'aide de notre programme, nous avons obtenus les caractéristiques I-V et P-V représentés respectivement sur les figures ci-dessous :

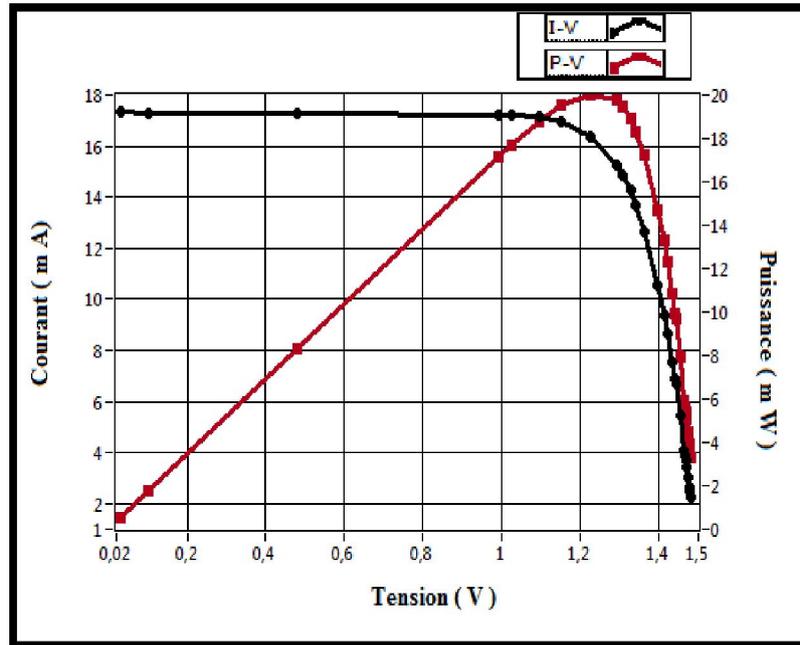


Figure III.4 : Caractéristiques I-V et P-V.

Les courbes obtenues I-V et P-V ont des allures standards caractérisant les cellules photovoltaïques. Pour des tensions inférieures à 1,2 V le courant est presque ne change pas, la courbe à une pente très faible. Contrairement, la courbe chute brusquement pour des tensions supérieures à 1,2 V et le courant diminue d'une façon considérable. Pour la courbe de puissance, elle croît avec la tension pour passer ensuite par une valeur maximale autour de 1,2V puis on constate une décroissance rapide de la puissance.

En exploitant les courbes précédentes, on a pu déterminer les propriétés externes de la cellule étudiée à savoir I_{CC} , V_{CO} , I_M , V_M , P_{Max} , FF et η . Ils sont résumés dans le tableau suivant:

I_{CC} (mA)	V_{CO} (V)	I_M (mA)	V_M (V)	P_{Max} (mW)	FF	P_{in} (mW)	η %
17.32	1.4814	16.337	1.224	19.9965	0.779401	125	15.2

Tableau III.1: Les paramètres électriques externes d'une cellule solaire en silicium cristallin.

III.5 Cellule en silicium amorphe

III.5.1 Montage expérimental

Pour caractériser notre cellule photovoltaïque en silicium amorphe, on a utilisé comme source lumineuse une lampe à Halogène de puissance de 250W alimentée par une source d'alimentation DC variable afin de contrôler l'intensité lumineuse issue de la lampe. Les caractéristiques I-V ainsi que P-V sont obtenues à l'aide de l'instrument Keithley 2400 qui nous permet de varier la tension appliquée à la cellule et mesurer le courant correspondant. Le montage est représenté sur la figure ci-dessous :

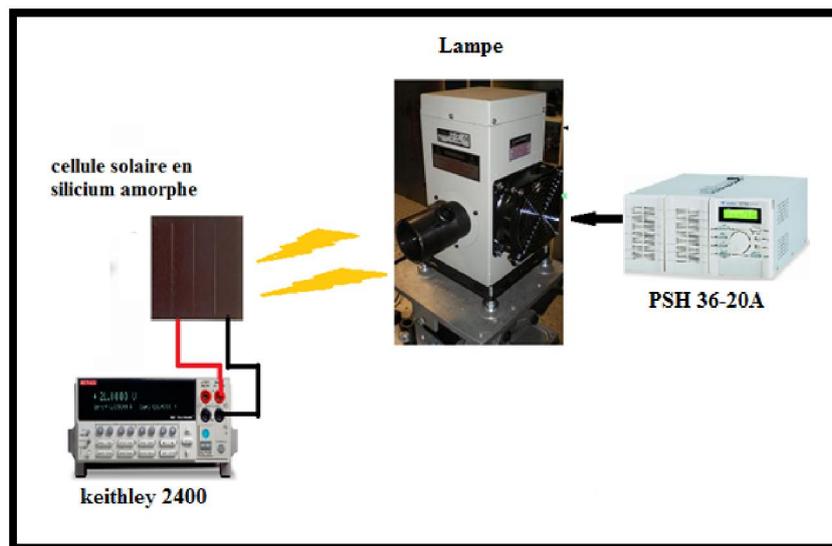


Figure III.5: Montage expérimental.

III.5.2 Instrumentations

Les instruments utilisés pour caractériser notre cellule solaire en silicium amorphe sont :

➤ **PSH36-20A**

Le PSH36-20A est une alimentation DC variable qui nous permet de varier la tension appliquée de 0 à 36 Volts et le courant de 0 à 20 Ampères donc une puissance de 720 Watts.

➤ **Keithley 2400**

L'instrument Keithley 2400 est une source d'alimentation de tension entre $5\mu\text{V}$ et 210V et de courant entre 50 pA et 1,05A et en même temps un appareil de mesure de tension entre $1\mu\text{V}$ et 211V et de courant entre 10 pA et 1,055A.

➤ **Source lumineuse**

Lampe d'Hélium qui nécessite une tension d'alimentation de 24V et qui nous donne une puissance de 250 Watts.

III.5.3 Résultats

Pour obtenir les courbes I-V et P-V de notre cellule solaire en silicium amorphe, on a illuminé la cellule ensuite on a programmé l'instrument Keithley 2400 de tel façon à faire varier la tension appliquée de 0 V à la valeur finale avec un pas de 100 mV et mesurer le courant correspondant pour chaque tension.

Pour voir l'influence de la variation de l'intensité lumineuse sur notre cellule photovoltaïque étudiée, on a utilisé la source d'alimentation variable PSH36-20 de tel façon à faire varier la tension appliquée à la lampe de 0 à 24V afin d'obtenir des illuminations variables selon la tension appliquée. Pour chaque illumination, on mesure les caractéristiques I-V et P-V de notre cellule solaire à l'aide de l'instrument Keithley 2400 comme on a expliqué précédemment. On obtient alors les résultats représentés sur les figures suivantes :

- Pour $P_{inc} = 0$ Watt : dans l'obscurité

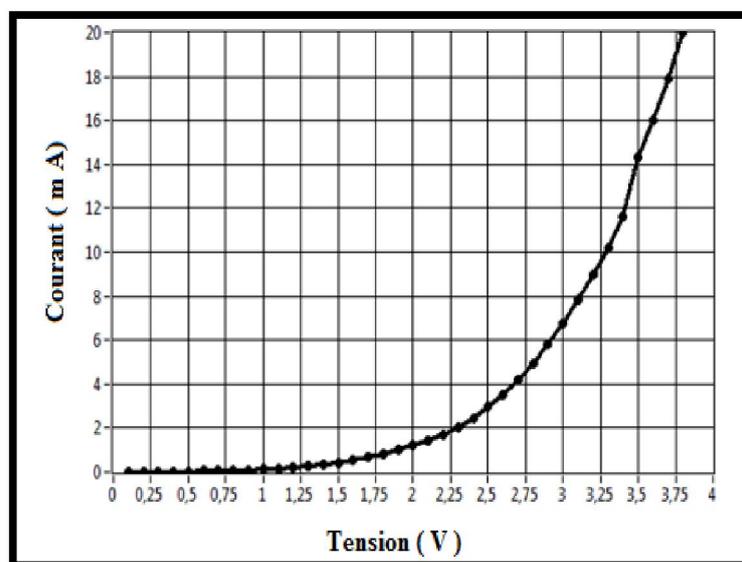
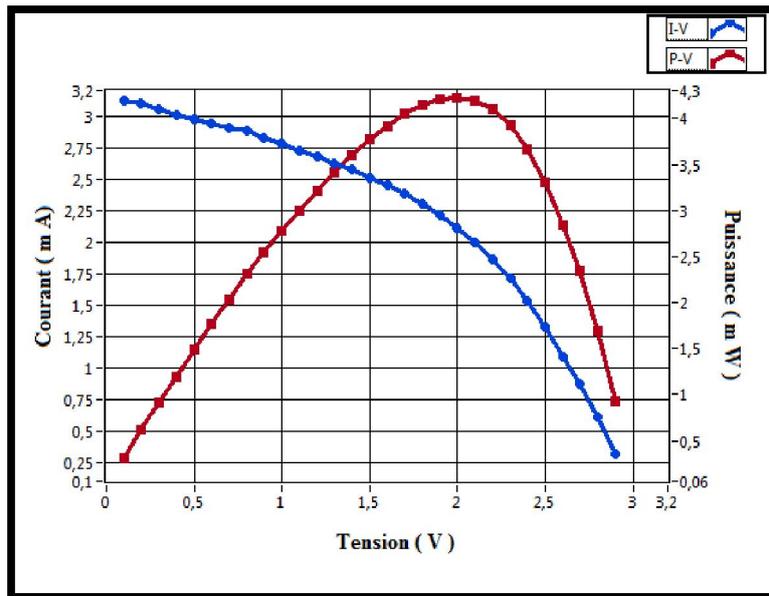


Figure III.6: Caractéristique courant – tension à l'obscurité.

➤ Pour $P_{inc}=340$ mWatts



➤ Pour P_{inc} :

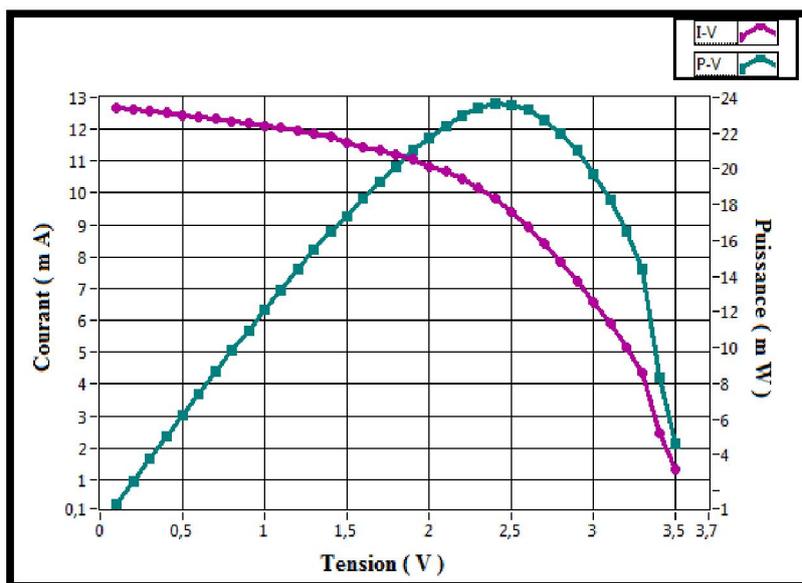


Figure III.8: Caractéristique I-V et P-V à $P_{inc}=680$ mWatts.

➤ Pour $P_{inc}=1200\text{mWatts}$

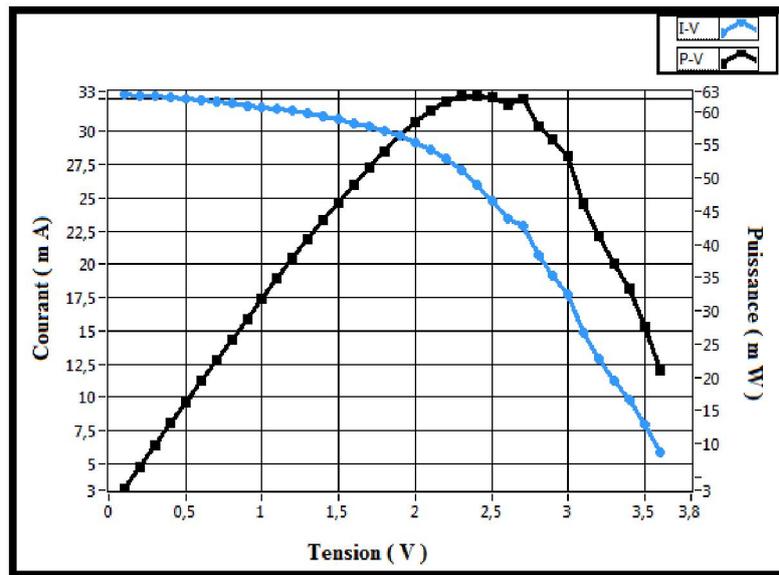


Figure III.9: Caractéristique I-V et P-V à $P_{inc}=1200$ mWatts.

En exploitant les courbes précédentes, on a pu déterminer les propriétés externes de la cellule étudiée à savoir I_{CC} , V_{CO} , I_M , V_M , P_{Max} , FF et η . Ils sont résumés dans le tableau suivant:

	I_{CC} (mA)	V_{CO} (V)	I_M (mA)	V_M (V)	P_{Max} (mW)	FF	$\eta\%$
$P_{inc}=340\text{mW}$	3.1247	2.9	2.11	2	4.22	0.4659	1.23739
$P_{inc}=680\text{mW}$	12.68	3.5	9.8431	2.4	23.6234	0.53213	3.46344
$P_{inc}=1200\text{mW}$	32.815	3.6	26.02	2.4	62.448	0.52862	5.49331

Tableau III.2 : Les paramètres électriques externes d'une cellule solaire en silicium amorphe en fonction de l'éclairement.

Les figures suivantes montrent les courbes IV et PV en fonction de l'intensité lumineuse pour les trois cas différents.

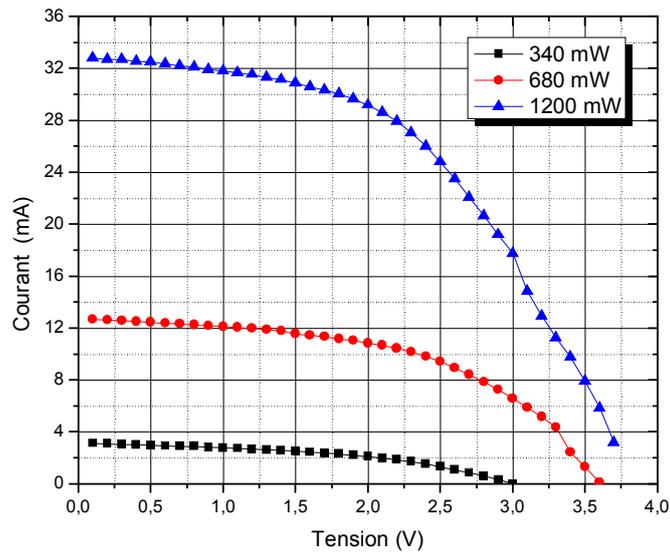


Figure III.10: Caractéristique I-V d'une cellule solaire en silicium amorphe en fonction de l'éclairement.

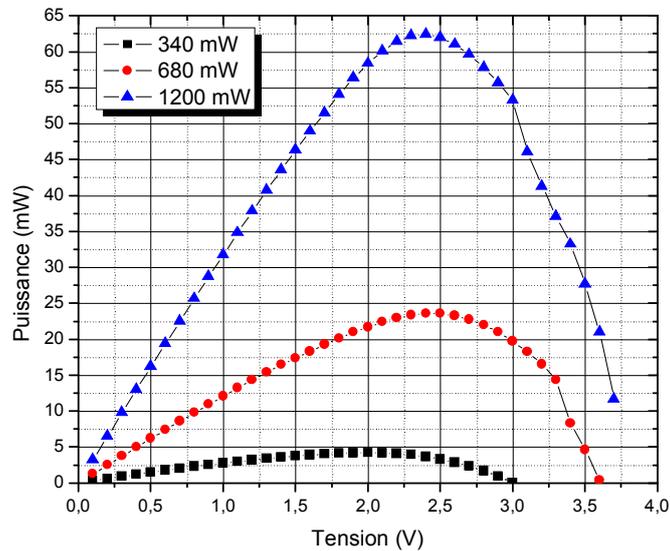


Figure III.11: Caractéristique P-V d'une cellule solaire en silicium amorphe en fonction de l'éclairement.

L'influence de la variation de l'intensité lumineuse incidente sur les caractéristiques I-V et P-V de notre cellule solaire est très claire en regardant les allures des courbes des figures III.10 et III.11. On distingue qu'au fur et à mesure qu'on augmente l'intensité lumineuse, le courant résultant et la puissance obtenue augmente aussi ce qui entraîne l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque.

***CONCLUSION
GÉNÉRALE***

Conclusion

La conversion photovoltaïque est un processus photo-électronique qui fait intervenir l'interaction entre un photon et un électron.

L'objectif principal de ce travail est de développer un programme sous l'environnement LabView permettant d'acquérir la caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

Au cours de ce travail, nous avons préparé un programme qui mesure les caractéristiques externes des cellules solaires et le travail expérimental a été effectué au sein de laboratoire de matériaux semiconducteurs et métalliques LMSM à l'université de Biskra.

Les paramètres externes que nous avons déterminé de nos cellules photovoltaïques sont le courant de court circuit (I_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque (η) après avoir relever leurs caractéristiques courant - tension ($I-V$), puissance – tension ($P-V$).

Des expériences ont été menées sur deux types de cellules solaires :

- Silicium cristallin :

Après avoir réalisé le montage expérimental pour caractériser la cellule solaire, on a développé un programme pour commander les instruments à l'aide de l'environnement LabView. Nous avons obtenu les courbes caractéristiques ($I-V$), ($P-V$), et déterminer le rendement de conversion photovoltaïque qu'on a trouvé égal à 15.2 % Taux raisonnable considéré pour ce type de cellules.

- Silicium amorphe :

Pour ce type de cellules, en outre la détermination des courbes caractéristiques, nous avons aussi changé l'intensité lumineuse incidente. Nous avons remarqué que chaque fois l'intensité lumineuse croît le courant augmente. Il y a donc une augmentation du rendement de conversion et les valeurs obtenus comme suit 1.24% pour l'intensité la plus faible, 3.46% pour l'intensité intermédiaire et 5.49% pour l'intensité la plus forte.

En conclusion, nous nous pouvons dire que nous sommes arrivés à caractériser nos cellules solaires, piloter nos instruments, traiter les données issues et tracer les caractéristiques I-V et P-V, extraire les différentes paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Enfin, nous souhaitons que les futures étudiants (es) peuvent exploiter nos résultats expérimentaux pour la caractérisation d'autres dispositifs à semiconducteurs.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] M. Chakaroun, “ Évaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leur durée de vie”, Thèse Doctorat, Université de Limoges, 2010.
- [2] [http:// www.techno-science.net/](http://www.techno-science.net/).
- [3] H. BENIS, “ Contribution à la modélisation du problème de « Hot Spot » dans les modules solaire Photovoltaïque occultés”, mémoire Magister, UNIVERSITE DE MENTOURI CONSTANTINE, 2008.
- [4] T.Desrues, “ développement de cellules photovoltaïques a hétérojonction silicium et contacts en face arrière”, thèse doctorat, Lyon : Insa de Lyon, 2009.
- [5] A. Labouret, M. Viloz, “ Energie solaire photovoltaïque”, livre 3e édition, 2006, Dunod, Paris.
- [6] A. Bahloul, R. Lakehale, “ Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres”, mémoire de mastère, université Abou bekr belkaid-Tlemcen, 2010/2011.
- [7] Y.Sayad, “Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l'étude de la technique LBIC - application au silicium photovoltaïque”, Thèse Doctorat, Université Constantine, 2009.
- [8] A.Outzourhit, “ Cellules Solaires: Principes technologies et matériaux”, Ecole ECOMAT, Bouznika.
- [9] C.Boulord, “ Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement”, Thèse Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [10] G.Vanessa, “ Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V”, thèse de doctorat, université Paris-sud 11, 2012.
- [11] M.Adaika, “ étude par simulation numérique de l'effet des couches sur dopées contacts avant et arrière sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire N-P”, mémoire de mastère, Université Mohamed khider Biskra, 2011-2012.
- [12] F. Z. Souici, “ Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe₂) ”, mémoire Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.

- [13] www.editionsdumonde.com , Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque, COMPLÉMENT TECHNIQUE, Mars/Avril 2008.
- [14] N. Oleksiy, "Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques à contacts arrières interdigités", Thèse Doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 2005.
- [15] M. MADANI, "Réalisation des couches antireflets dans des cellules solaires à couches minces", Thèse de magistère en physique, université de Tlemcen, 2006.
- [16] P. G. Bernal, "Study and Development of a Photovoltaic Panel Simulator", mémoire master, Universidad do Porto, 2012.
- [17] Jean-François LELIEVRE. "Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques". Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007.
- [18] W. DIB, "Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués", Thèse Doctorat, Université Abou bekr belkaid de Tlemcen, 2010.
- [19] N. Benhmed Benabdllah, "Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe", mémoire Magister, Université Abou bekr Belkaid -Tlemcen, 2006.
- [20] P. papet, "nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin", Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [21] I.F. Bouguenna, "Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe, mémoire magister", Université Mohamed Boudiaf Oran, 2009.
- [22] J.É. Bourée, P.R. Cabarrocas, "Cellules solaires en couches minces à base de silicium", Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.
- [23] M. Mancér, "Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)", mémoire Magister, université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [24] J.M. Román, "State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications", Advanced Photovoltaic Cell Design, 2004.
- [25] K. DJERIOUAT, "Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions :GaInP/GaAs", mémoire Magister, université Abou bekr belkaid-Tlemcen, 2010-2011.

- [26] F. ABDO, “ Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à base température pour application photovoltaïque”, Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [27] S. Khelifi . A. Belghachi, “ Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d’une Cellule Solaire GaAs”, Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semiconducteurs, Centre Universitaire de Béchar, 2004.
- [28] A.Yazid, “ Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base de silicium de type N”, mémoire Magister, université Abou bekr belkaid-Tlemcen, 2010-2011.
- [29] ni.arabia@ni.com.

ملخص

هذه المذكرة هي عبارة عن عمل تجريبي يهدف للوصول إلى كيفية استخراج الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية تجريبياً.

و أساس هذا العمل هو إيجاد برنامج يقوم باستخراج كل هذه الخصائص وذلك باستعمال LabView نوعين من الخلايا تمت تجربتهم في هذا العمل حيث أن الأولى من نوع c-Si والثانية من نوع a-Si . الخصائص الكهربائية متمثلة في الخاصية جهد- تيار وجهد – استطاعة واستخراج كل المتغيرات الأساسية وبالأخص المردود.

بالنسبة للخلية الأولى وجدنا الخاصية جهد – تيار و قيمة المردود كانت عادية بالنسبة لهذا النوع من الخلايا 15%.

أما في الخلية الثانية قمنا بدراسة تأثير الشدة الضوئية على الخاصية جهد – تيار فوجدنا انه كلما زادت الشدة زاد التيار و بالتالي تحصلنا على زيادة في المردود .

الكلمات المفتاحية :

خلية شمسية , LabView , c-Si, a-Si .

Résumé

Ce travail a comme objectif de savoir extraire les caractéristiques électriques externes des cellules solaires expérimentalement. Pour cette raison, on a développé un programme écrit sous l'environnement LabView qui nous permet de commander les instruments utilisés et d'extraire toutes les caractéristiques de nos cellules photovoltaïques.

Les caractéristiques électriques qu'on a déterminé sont les courbes courant – tension et puissance – tension. Ces deux courbes nous ont permis de déterminer les paramètres externes de nos cellules solaires à savoir le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme, la puissance maximale et le rendement.

Les cellules qu'on a caractérisées sont deux ; la première est en c-Si et la deuxième est type de a-Si.

Pour la première cellule, les résultats obtenus sont raisonnables avec un rendement de l'ordre de 15%. Pour la deuxième cellule, nous avons étudié l'effet de l'intensité lumineuse sur les caractéristiques courant – tension et puissance – tension, nous avons constaté que le courant croît en fonction de l'augmentation de l'intensité lumineuses et le rendement de la cellule augmente d'une façon proportionnel.

Mots clés :

Cellule solaire, LabView, c-Si, a-Si.