

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : **Énergies Renouvelables en Électrotechnique**

Intitulé :

PROCÉDÉS DE FABRICATION ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES TECHNOLOGIES DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Présenté par :

- Cheriet Fatima
- Moussaoui Fadila
- Saci Hadjer

Soutenu le : 12/07/2020 devant le Jury :

M. BADAOUI Abdelhamid	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BRAHIMI Mohamed	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. LAHCEN REDA	MAB	Centre Universitaire Naâma	Examineur
Mme. MEDJADJI Nassira	MAB	Centre Universitaire Naâma	Examinatrice

Naama – Algérie - 2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. BRAHIMI Mohammed, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A nos chers parents, pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études,

A nos chères sœurs et frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A tous les autres membres de nos familles pour leur soutien tout au long de nos parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour nous.

Cheriet Fatima

Moussaoui Fadila

Saci Hadjer

Résumé

Nous avons traités dans ce travail un sujet très intéressant et très touchant, actuellement utilisé dans le domaine électrotechnique. C'est l'énergie verte ou renouvelable, d'après notre recherche sur les différents types de production de l'énergie électrique par des ressources terrestre comme : le pétrole, Gaz, Uranium, etc...., nous avons trouvé que ce ressources sont de plus en plus éphémères et épuisables et il n y a pas de remplacement sauf par l'énergie renouvelable.

Les panneaux solaires sont considérés dans l'avenir parmi les meilleures solutions pour le consommateur de l'électricité et pour sécuriser la planète des produits toxique qui résulte d'avoir la pollution.

Dans notre travail on a expliqué les étapes de fabrication des panneaux solaire et étudier les semi-conducteurs et leurs propriétés physiques, électriques et comment ce passe le phénomène de la conversion lumineuse.

Mots-Clés: cellule photovoltaïque –polymère – couche mince – organique– multi-jonction– technologie.

Abstract

We treated in this work a very interesting and very touching subject, new in the electrotechnical field. It is green or renewable energy, according to our research and our discovery of the different types of production of electric energy by terrestrial resources such as: oil, gas, uranium, etc., we have found that resources are more and more ephemeral and exhaustible and there is no replacement except by renewable energy.

Solar panels are considered in the future as the best solution for the consumer of electricity and to secure the planet from the toxic products that result from having pollution.

In our work we explained the stages of manufacturing solar panels and studying semiconductors and their physical, electrical properties and how the phenomenon of light conversion happens.

Keywords: photovoltaic cell - polymer - thin layer - organic - multi-junction - technology.

ملخص

لقد عالجتنا في هذا العمل موضوعاً مثيراً للاهتمام ومؤثراً للغاية ، جديداً في المجال الكهروتقني. إنها الطاقة الخضراء أو المتجددة ، وفقاً لبحثنا حول الأنواع المختلفة لإنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة الموارد الأرضية مثل: النفط والغاز واليورانيوم ، وما إلى ذلك ، وجدنا أن هذه الموارد أصبحت سريعة الزوال وقابلة للاستنفاد ولا يوجد بديل سوى الطاقة المتجددة.

تعتبر الألواح الشمسية في المستقبل أفضل حل لمستهلك الكهرباء وتأمين الكوكب من المنتجات السامة التي تنتج عن التلوث.

في عملنا شرحنا مراحل تصنيع الألواح الشمسية ودراسة أشباه الموصلات وخصائصها الفيزيائية والكهربائية وكيف تحدث ظاهرة تحويل الضوء.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية- بوليمر - طبقة رقيقة - عضوي - متعدد الوصلات – تكنولوجيا.

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicaces	iv
Résumé	iv
Introduction générale.....	1
Chapitre I :Généralités sur les systèmes PV	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Physiques des semi-conducteurs.....	5
I.3.1 Les matériaux semi-conducteurs.....	5
I.3.2 Les semi-conducteurs intrinsèques	6
I.3.3 Les semi-conducteurs extrinsèques.....	6
I.3.4 Dopage et silicium	6
I.3.5 Dopage de type N.....	6
I.3.6 Dopage de type P	7
I.3.7 La jonction PN	7
I.3.8 Bandes d'énergie.....	8
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.5 Paramètres électriques	9
I.5.1 Le model électrique :	9
I.5.1.1 Cas d'une cellule solaire idéale.....	9
I.5.1.2 Cas d'une cellule solaire réelle	10
I.6 La fiche technique.....	12
I.7 Gisement solaire.....	13
I.7.1 Le spectre solaire	13
I.7.2 Le rayonnement solaire.....	14
I.7.3 Dualité de la lumière.....	14
I.7.4 Le gisement solaire en Algérie :	15
I.7.5 Le gisement solaire de NAAMA :	16
I.8 Différents configurations système PV	17
I.8.1 Système autonome sans batterie :	17
I.8.2 Système autonome avec batterie :.....	18
I.8.3 Système fonctionnant au fil du soleil :.....	18
I.8.4 Système avec appoint électrique :.....	18
I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	18
I.9.1 Avantages	18

Table des matières

I.9.2 Inconvénients	19
I.10 Domaine d'application du système photovoltaïque	19
I.11. Conclusion	19
Références	20
Chapitre II :La première génération des cellules PV	24
II.1 Introduction	25
II.2 traitement du silicium	25
II.2.1 Raffinage du silicium.....	25
II.2.2 De la silice au silicium.....	25
II.2.3 Extraction du silicium à partir de la silice	26
II.2.4 Purification du silicium	27
II.2.5 Obtention des lingots de silicium	27
II.2.5.1 Cellules au silicium poly cristallin	28
II.2.5.1.1 Techniques de fabrication.....	28
II.2.5.1.1.1 technique de Siemens	28
II.2.5.1.1.2 Technique de chlore.....	29
II.2.5.2 Silicium monocristallin (SC-Si)	29
II.2.5.2.1 Techniques de fabrication.....	30
II.2.5.2.2 Technique de « Czochralski » (Cz)	30
II.2.5.2.3 Le procédé de Fusion de Zone (FZ)	31
II.2.6 Obtention des wafers photovoltaïques	32
II.2.7 Le dopage et jonction P-N	33
II.2.7.1 Dopage type N	33
II.2.7.2 Dopage type P.....	33
II.2.8 Montage d'une cellule photovoltaïque	33
II.3 Etude comparative	34
II.4 Conclusion	35
Références	36
Chapitre III : La deuxième génération des cellules PV	ii
III.1 Introduction	38
III.2 Technologie couches minces (2 ^{ème} génération).....	38
Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe).....	39
Les cellules GaAs.....	39
III.3 La technologie de silicium amorphe hydrogéné a-Si:H	39
III.3.1 Rôle de l'hydrogène	39
III.3.2 Les avantages de silicium amorphe hydrogéné.....	39
III.3.3 Les inconvénients de silicium amorphe hydrogéné	40

Table des matières

III.3.4 Applications de l'a-Si:H.....	40
III.3.5 Le semi-conducteur amorphe	40
III.3.6 Structure de cellules solaires en a-Si:H.....	40
III.4 Fabrication de cellules solaires à base du silicium amorphe (a-Si).....	42
III.5 Propriétés électriques du (a-Si:H)	43
III.5.1 Bandes d'énergie	43
III.5.2 Conductivité électrique	44
III.6 Configuration du module à base de Silicium amorphe	44
III.7 La technologie CIGS	46
III.7.1 La filière chalcopyrite	46
III.7.2 Matériau semi-conducteur CIS/CIGS	47
III.7.3 Structure d'une cellule CIGS	48
III.8 Fabrication de cellules solaires à base du CIGS	50
III.9 Propriétés électriques CIGS	50
III.10 Avantages et inconvénients de Cellules CdTe/CIS/CIGS.....	51
III.11 La technologie des cellules CZTS.....	52
III.11.1 Composition et fabrication des cellules CZTS.....	53
III.11.2 Propriétés électriques CZTS.....	53
III.11.3 Avantages de CZTS	53
III.11.4 Inconvénient de CZTS	54
III.12 La technologie CdTe	54
III.12.1 Matériau semi-conducteur CdTe	54
III.12.2 Structure d'une cellule CdTe.....	54
III.12.2.1 La Structure cristalline du CdTe	54
III.13 Fabrication de cellules solaires à base du CdTe.....	55
III.14 Propriétés électriques	56
III.15 Toxicité.....	56
III.16 La technologie GaAs.....	57
III.16.1 le matériau GaAs	57
III.16.2 Fabrication de GaAs.....	57
III.16.3 Avantages de GaAs	58
III.16.4 Application de GaAs	58
III.17 Etude comparative.....	58
III.18 Conclusion.....	58
Références	59
Chapitre IV : La troisième génération cellules PV	64
IV.1 Introduction	65

Table des matières

IV.2 Les semi-conducteurs organiques	65
IV.2.1 Origines de la conductivité	65
IV.2.2 Matériaux organiques.....	65
IV.2.2.1 Les polymères conjugués	66
IV.2.2.2 Petites molécules.....	66
IV.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique.....	67
IV.3.1 Absorption des photons et génération d'excitons	67
IV.3.2 Diffusion des excitons.....	67
IV.3.3 La dissociation de l'exciton	67
IV.3.4 Transport des charges et collecte aux électrodes	68
IV.4 Architecture d'une cellule solaire organique	68
IV.4.1 Structure monocouche (Schottky)	68
IV.4.2 Structures bicouche	69
IV.4.3 Structure p-i-n	70
IV.4.4 Structure laminée	71
IV.5 Types des cellules organiques.....	71
IV.5.1 Cellules de type Graetzel	71
IV.5.2 La pérovskite.....	72
IV.5.3 Les cellules tandem.....	73
IV.5.4 Cellule czts.....	73
IV.5.5 Cellules solaires à base de points quantiques.....	74
IV.6 Etude comparative entre les différents types	75
IV.7 Applications des semi-conducteurs organiques	76
IV.8 Fabrication des cellules photovoltaïques organiques.....	77
IV.8.1 Les étapes de fabrication	77
IV.8.1.1 Produits utilisés	77
IV.8.1.2 Les semi-conducteurs organiques utilisés.....	77
IV.8.1.3 Préparation de la cathode à partir d'oxyde d'étain (ITO)	77
IV.8.1.4 Gravure de l'anode d'ITO :	77
IV.8.1.5 Nettoyage des lamelles d'ITO	78
IV.8.1.6 Dépôt de la couche de PEDOT : PSS	78
IV.8.1.7 Caractérisation de l'anode	79
IV.8.1.8 Mise en forme de la couche active organique.....	79
IV.9 Paramètres électriques et mécaniques d'un module PV à base d'organique	80
IV.10 Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques organiques	80
IV.9.1 Avantages.....	80
IV.9.2 Inconvénients	81

Table des matières

IV.10 Conclusion	81
Références	82
Chapitre V : La quatrième génération des cellules PV.....	84
V.1 Introduction	85
V.2 Principe des multi-jonctions (MJ)	85
V.3 Description des cellules multi-jonctions	85
V.3.1 Structure des sous-cellules	85
V.3.2 cellules à jonctions multiples	87
V.4 Performances des cellules multi-jonctions III-V	88
V.5 Types des cellules MJ.....	89
V.6 Fabrication des cellules solaire à base de matériaux antimoniure.....	90
V.6.1 Structure des cellules.....	90
V.6.2 Processus de fabrication	90
V.7 Avantages et inconvénients de technologie III-V	93
V.7.1 Cellules photovoltaïques multi jonctions	93
V.7.2. Panneau solaire de technologie III-V	94
V.8. Conclusion.....	94
Références	95
Conclusion générale	97

Liste des figures

Figure (I.1) :Forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.....	05
Figure (I.2) : Diagramme de bande.....	06
Figure (I.3) : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur.....	07
Figure (I.4) : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur.....	07
Figure (I.5) :Formation d'une jonction PN.....	08
Figure (I.6) :Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	08
Figure (I.7) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	09
Figure (I.8) : Le schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.....	10
Figure (I.9) : Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.....	11
Figure (I.10) : Eclairage solaire.....	14
Figure (I.11) : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	15
Figure (I.12) :Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.....	17
Figure (II.1) : La silice.....	26
Figure (II.2) : Four à arc.....	26
Figure (II.3) : Silicium métal en fusion.....	27
Figure (II.4) : Purification du silicium	27
Figure (II.5) : Procédé de siemens.....	29
Figure (II.6) : Cellule Silicium monocristallin.....	30
Figure(II.7) : Principe de la méthode de Czochralski.....	31
Figure(II.8) : Méthode de la zone flottante pour l'élaboration du silicium monocristallin....	32
Figure (II.9) : Constitution d'un wafer.....	33
Figure (III.1) : Cellule solaire de structure P-I-N en a-Si: H.....	41
Figure (III.2) :Cellule solaire tandem en a-Si: H.....	42
Figure (III.3) : Représentation des bandes d'énergie.....	44
Figure (III.4) : Configuration P-I-N d'une cellule solaire à base de Silicium amorphe ou nano cristallin.....	45
Figure (III.5) : Schémas des configurations p-i-n (à gauche) et n-i-p (à droite), d'une cellule solaire.....	46
Figure (III.6) : Chalcopyrite.....	47
Figure (III.7) : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule.....	48
Figure (III.8) : Structure d'une cellule photovoltaïque à CIGS.....	50
Figure (III.9) : Diagramme de bande d'une cellule solaire en couches minces à base de CIGSe.....	51
Figure (III.10) : Structure d'une cellule photovoltaïque à CZTS.....	52
Figure (III.11) : Maille élémentaire de la structure cubique de CdTe. Les sphères claires représentent les atomes de cadmium et les sphères foncées ceux de tellure.....	54
Figure (IV.1) : Formes d'un système conjugué.....	65
Figure (IV.2) : Les polymères conjugués et leurs dérivées utilisée dans les cellules photovoltaïques organiques	66
Figure (IV.3) : les petites molécules les plus utilisées dans PVO.....	67
Figure (IV.4) : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique.....	68
Figure(IV.5) : structure monocouche.....	69
Figure(IV.6) : Trois types d'hétérojonctions rencontrées dans les cellules solaires organiques.....	69
Figure(IV.7) : structure laminée.....	71
Figure (IV.8) : Photo final de la cellule.....	72
Figure (IV.9) : Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites.....	72
Figure(IV.10) : Structure d'une cellule tandem.....	73
Figure(IV.12) : Cellules solaires à base de points quantiques.....	75
Figure(IV.13) : Schéma d'une lamelle verre/ITO avant et après gravure.....	78

Figure(IV.14) : Dépôt de 60 nm de PEDOT : PSS par spin coating et image de l'appareil utilisé pour la mise en forme des films minces en solution.....	79
Figure(IV.15): Schéma de la structure complète des cellules solaires organiques fabriqué Verre/ITO/PEDOT:PSS (60 nm)/TTB-ZnPc : PCBM (50 nm)/AI (100 nm), et image d'une lamelle comportant quatre cellules solaires de surface active 30 mm ²	79
Figure (V.1): Structure classique d'une sous-cellule réalisée avec des matériaux semi-conducteurs III-V.....	86
Figure (V.2): Diagramme de bandes d'une sous-cellule.....	87
Figure (V.3): Une cellule typique à triple jonction III-V.....	88
Figure (V.4) : Structures P-sur-N crues en GaSb (a) sans et (b) avec couche fenêtre et BSF, et (c) en Al _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y}	90
Figure (V.5): Principales étapes technologiques de la fabrication d'une cellule Solaire.....	91
Figure (V.6): (a) Support TO8. (b) Embase cuivre fabriquée au laboratoire.....	92
Figure (V.7): Architecture des cellules étudiées en GaSb.....	93

Liste des tableaux

Tableau (I.1): Fiche technique d'un module.....	12
Tableau (I.2): Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.....	15
Tableau (I.3): Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	16
Tableau (I.4): Le gisement solaire en Naama.....	16
Tableau (II.1): Etude comparative entre les différents types de silicium, le monocristallin et poly- cristalline.....	34
Tableau (III.1) : les propriétés électriques du CdTe.....	56
Tableau (III.2) : comparaison entre les matériaux de couches minces.....	58
Tableau(IV.1) : Etude comparative entre les types de SCO.....	75
Tableau(IV.2) : les paramètres électriques et mécaniques d'un module organique.....	80
Tableau (V.1): Les performances des cellules à base de matériaux III-V.....	89

Nomenclatures

h: constante de planck (1/j.s)

C: vitesse de la lumière dans le vide (1/m.s)

V: fréquence (1/s)

TSV: est le temps solaire vrai

h: varie entre -90° à $+90^\circ$.

I: rayonnement direct normal

i : (Angle d'incidence) : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan.

Alb : albédo (coefficient de réflexion du sol)

h: hauteur de soleil [degré]

Dh: diffus sur plan horizontal

HOMO : (Highest Occupied Molecular Orbital),

LUMO : (Lowest Unoccupied Molecular Orbital).

P3HT :PCBM : (le poly (3-hexylthiophène) et (1-(3 méthoxycarbonyl)-propyl-1-1-phényl-(6,6) C61)

ZnPc :Zinc phthalocyanine

TTB-ZnPc : tétra-tert-butyl-phthalocyanine de zinc

Le PEDOT : poly(3,4-éthylènedioxythiophène)

a-Si : Le silicium amorphe

CIS : di séléniure de cuivre et d'indium

CIGS : di séléniure de cuivre et d'indium et gallium

CdTe : tellure de cadmium

GaAs : l'arséniure de gallium

PECVD : Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)

MG-Si : *magnésium* et de silicium.

S : les vitesses de recombinaison aux interfaces.

W : les épaisseurs des différentes couches.

ZCE : la zone de charge d'espace.

E_F : Le niveau de Fermi.

MJ : cellules multi-jonctions

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie présente une source indispensable dans la vie ainsi une référence utilisée pour le développement des pays. Actuellement, la production mondiale de l'énergie est assurée à partir de sources: fossiles, charbon, pétrole, gaz naturel. Sur le long terme, les prix de ces sources d'énergies augmentent avec leurs épuisements. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc un accroissement de la pollution [1].

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure des sociétés. De nombreux axes de recherches ont donc été orientés vers l'utilisation des énergies propres dites renouvelables. Il y a cinq énergies renouvelables principales: les énergies solaires, éolienne, hydraulique, géothermique et l'énergie provenant de la biomasse. Parmi ces énergies, celle qui nous intéresse dans ce travail est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de la production de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques. Ces panneaux sont fabriqués à partir des matériaux semi-conducteurs [2].

Cette énergie a évolué sur plusieurs générations: la première génération s'est basée sur les cellules à base de silicium, les rendements maximum sont de 12 à 15 % pour les cellules à base de silicium poly-cristallin et 12 à 18 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, La seconde génération développe des cellules en couches minces, au pouvoir d'absorption important, et un rendement de 6 à 8%, La troisième génération à base des matériaux organiques, qui possède un rendement de 4 à 5%, la quatrième génération c'est une nouvelle technologie « les cellules multi-jonction», il est toujours testé dans des laboratoires, le rendement actuel est à l'environ de 50%.

Le but de ce travail consiste à les procédés de fabrication et propriétés électriques des technologies des modules photovoltaïques.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, on va présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques, les caractéristiques électriques d'une cellule solaire, et la physique de semi-conducteur,

Dans le deuxième chapitre, les techniques de fabrication des cellules de la première génération, mono-cristallin et poly-cristallin sont présentés.

Le troisième chapitre illustre la fabrication des cellules de la deuxième génération «les cellules couches minces»,

Introduction générale

Le quatrième chapitre : la fabrication des cellules de la troisième génération «cellules organiques», le principe de fonctionnement, les structures, les types et leurs domaines d'application.

Le but du cinquième chapitre, Il s'agit d'une introduction sur la nouvelle technologie et son champ d'application «les cellules multi jonction».

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des références bibliographiques

Chapitre I

Généralités sur les systèmes PV

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [3].

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu à la physique de semi-conducteur, le principe de fonctionnement d'une cellule PV et leur paramètres électrique et mécanique, ensuite on a parlé sur le gisement solaire et les coordonnées terrestre ainsi les coordonnées du soleil, les différents types de rayonnement, la configuration des systèmes. Et on termine par les avantages et les inconvénients ainsi que le domaine d'application.

I.2 Historique

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque :

- En **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque [4].
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs [5].
- En **1905**, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- En **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- En **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- En **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

- En **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- En **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
- En **1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis **2001**. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".
- En **2012**, la capacité mondiale en énergie solaire, dépassant ainsi la barrière magique des centaines de gigawatts La puissance installée est cent fois supérieure à la puissance installée treize ans plus tôt en **1999**.
- "Lem" et "Heweliusz", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITe, décolleront en **2013**.

I.3 Physiques des semi-conducteurs

I.3.1 Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [6].

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. La largeur de la bande interdite est faible, elle varie entre 1 et 2 eV [7].

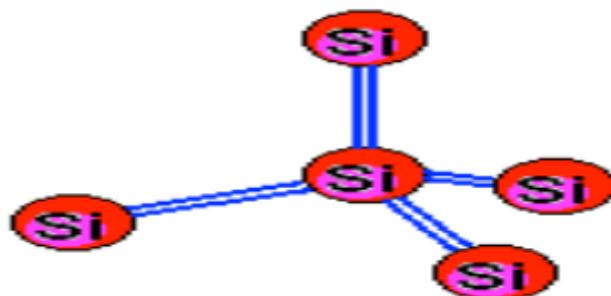


Figure (I.1) : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin [6].

I.3.2 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal [6]

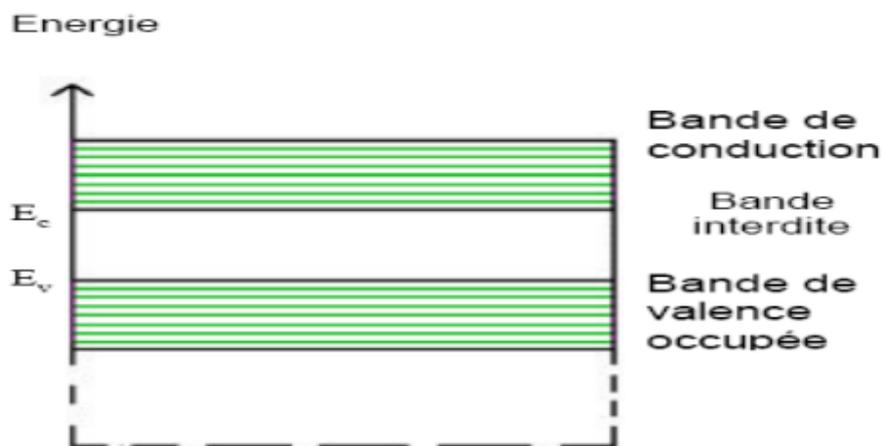


Figure (I. 2) :Diagramme de bande [6].

I.3.3 Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

I.3.4 Dopage et silicium

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre.

Pourquoi le silicium ?

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique [6].

I.3.5 Dopage de type N

Introduire volontairement des impuretés dans un semi-conducteur ultra purifié. Il est nécessaire que la concentration des atomes étrangers non éliminés soit nettement inférieure à celle des atomes introduits. Les atomes introduits viennent se placer en position de

substitution dans le réseau. Dans un semi-conducteur de la colonne IV (Si), on introduit une impureté de la V colonne (Phosphore : P), le cinquième électron se retrouve avec une énergie de liaison très faible (5 à 25 meV). Il est localisé sur l'atome pentavalent uniquement aux très basses températures [8].

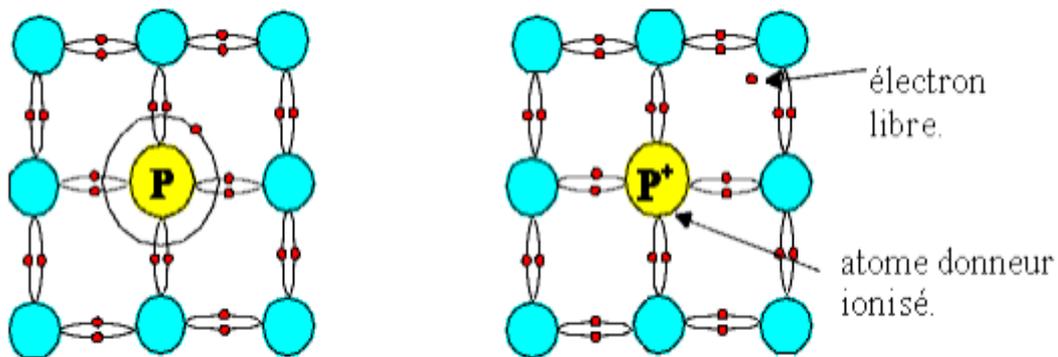
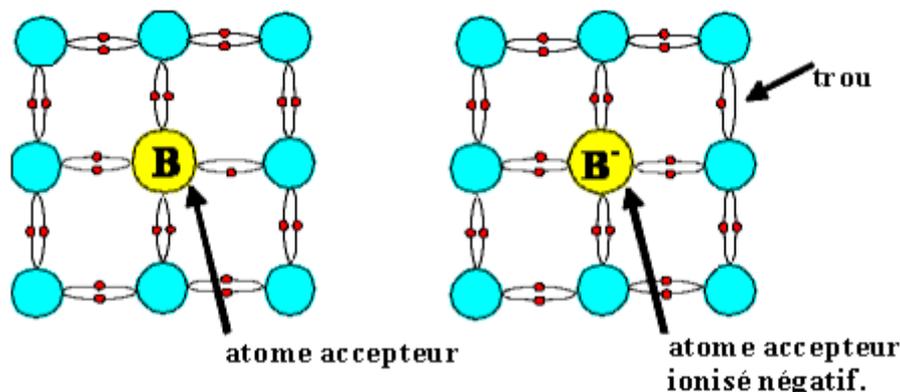


Figure (I.3) : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur [8].

I.3.6 Dopage de type P

Dans un semi-conducteur de la colonne IV (Si), on introduit une impureté de la III colonne (Bore : B). Cet atome trivalent ne possède que 3 électrons périphériques [8]

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore [6].



Figure(I.4) : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur [6].

I.3.7 La jonction PN

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur. Seuls le taux et la nature des impuretés varient d'un point à un autre. Il est possible d'obtenir des jonctions constituées de corps semi-

conducteurs différents qu'on appelle des "Hétérojonctions". La jonction PN joue un rôle important dans la physique des composants électroniques, ses propriétés sont exploitées dans les diodes à jonction. La diode est un composant électronique, non-linéaire et polarisé qui ne laisse passer le courant électrique que dans un sens [9].

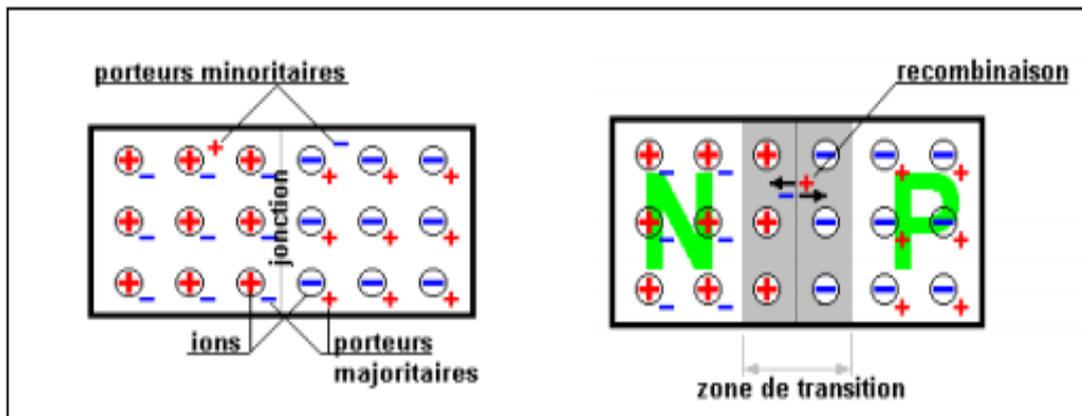


Figure (I.5) : Formation d'une jonction PN [7].

I.3.8 Bandes d'énergie

Pour la jonction et à l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi coté dopé P et coté dopé N est identique. Le diagramme d'énergie de la jonction PN comporte donc une courbure des bandes de conduction et de valence (figure I.6) [7].

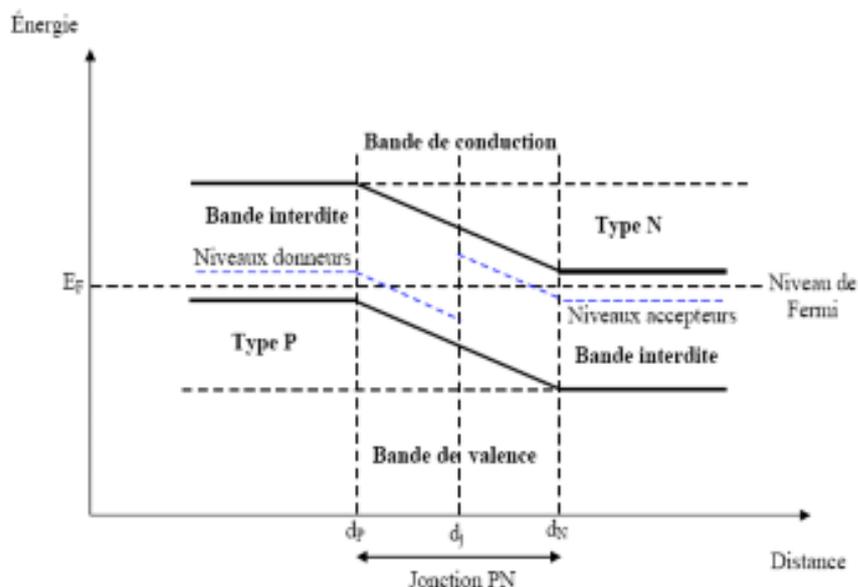


Figure (I.6) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [10].

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo sensible. Elle permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La figure I.7 représente

schématiquement le principe de fonctionnement de ces cellules. Celui-ci comporte différents processus [11-12].

- Absorption de photons par les semi-conducteurs.
- Séparation des électrons et des trous dans les semi-conducteurs par agitation thermique.
- Circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre par le champ électrique à l'interface.

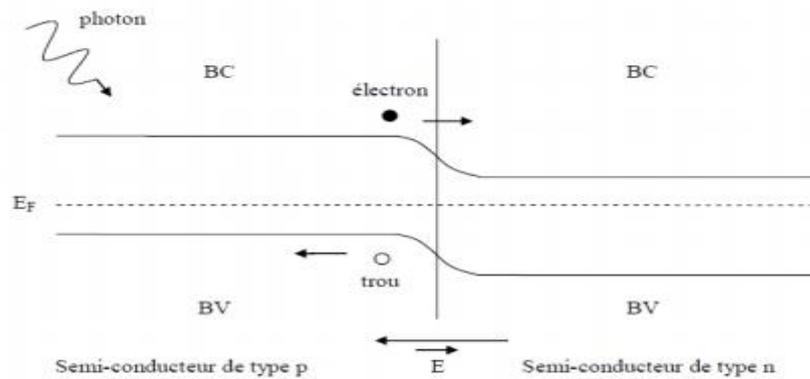


Figure (I.7): Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [11-12].

I.5 Paramètres électriques

I.5.1 Le model électrique :

I.5.1.1 Cas d'une cellule solaire idéale

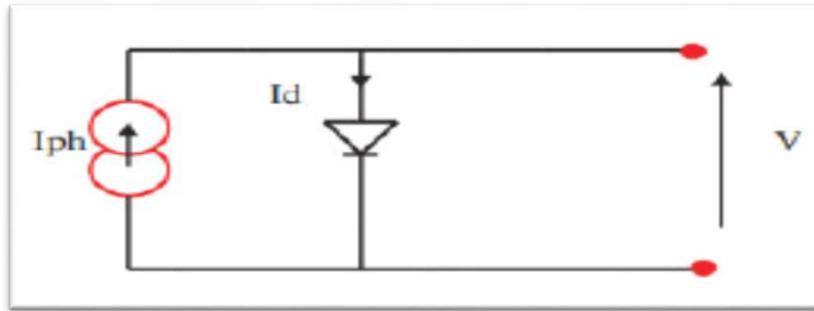
La cellule solaire est dite idéale si la relation courant-tension est donnée par l'expression suivante [13].

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qv}{nKT}} - 1 \right] \tag{I-1}$$

La cellule solaire sous éclaircissement peut-être schématisé par un générateur de courant I_{ph} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant.

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qv}{nKT}} - 1 \right] \tag{I-2}$$

Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale, présenté sur la figure suivante :



Figure(I.8) : Le schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

I.5.1.2 Cas d'une cellule solaire réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte de deux résistances ; une résistance série R_s présentant les diverses résistances de contacts et de connexions, et une résistance R_{sh} (shunt) en parallèle avec le générateur de courant qui caractérise les divers courant de fuite dus à la diode. Si V est la tension aux bornes de la diode, l'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par [13].

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q(v+IR_s)}{nKT}} - 1 \right] \tag{I-3}$$

$$I_{ph} = I + I_d + I_{sh} \tag{I-4}$$

$$I_{sh} = (V + IR_s) / R_{sh} \tag{I-5}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(v+IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{I-6}$$

On pose :

$$R_s = 1 / G_p \tag{I-7}$$

R_s : résistance en série.

R_{sh} : résistance shunt.

V : tension.

I : courant.

Donc l'équation devient :

$$I = I_p - \left[e^{\frac{q(v+IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - G_p (V - IR_s) \tag{I-8}$$

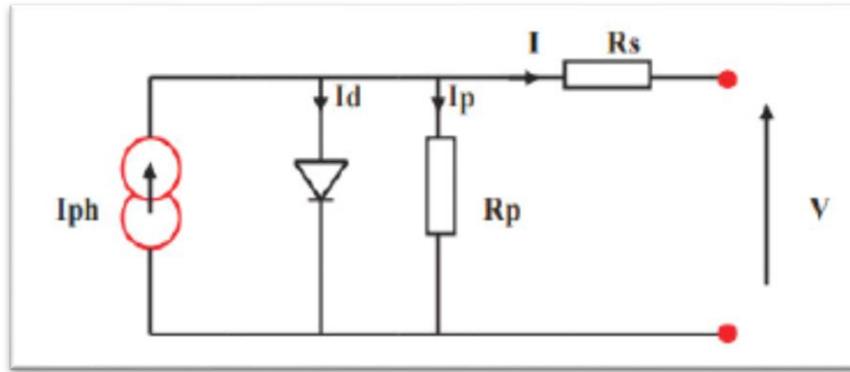


Figure (I.9) : Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.

- **Courant de court-circuit**

Le courant de court circuit I_{cc} est la valeur de courant lorsque la tension est nul ($V=0$), dans le cas idéal R_s nulle et R_{sh} infinie ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.6), on obtient [14] :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(R_s I_{cc})}{nKT}} - 1 \right] - \frac{R_s}{R_{sh}} I_{cc} \quad (I-9)$$

Pour la plupart des cellules solaires (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $\left[e^{\frac{q(R_s I_{cc})}{nKT}} - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (I-10)$$

- **Tension de circuit ouvert**

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (la tension maximale d'une cellule solaire ou du générateur photovoltaïque) [4].

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \log\left[\frac{I_{ph}}{I_s} - 1\right] \quad (I-11)$$

- **Facteur de forme FF**

Il s'agit de la relation entre la puissance maximale fournie par le panneau et le produit $I_{sc} \times V_{oc}$. Il présente une notion sur la qualité du panneau et sa valeur se trouve normalement entre 0,7 et 0,8 [4].

- **Efficacité ou rendement η :**

C'est la relation entre la puissance électrique maximale que le panneau peut transmettre à la charge et la puissance du rayonnement solaire (P_i) frappant le panneau. Il se trouve normalement autour de 10 % [4].

- **Tension MPP**

La tension MPP délivrée par la chaîne photovoltaïque, à une température des modules de -10 °C doit être inférieure à la valeur maximale de la plage de tension MPPT [15].

- **Courant MPP**

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température [15].

La fonction $I_{MPP}=I_{CC}$ est pratiquement linéaire et elle est de forme $I_{MPP}= K \times I_{CC}$ Mais généralement cette méthode à tension de référence fixe n'est pas applicable dans le cas de la contre réaction de courant à cause de la grande déviation du courant optimal pour différents ensoleillements et températures.

I.6 La fiche technique

MODULE

JW-G1950/JW5672

Valeur Conditions Standards de test (STC) :1000

Spectre AM 1,5 G, température des cellules 25°C. Câblage de raccordement :

Cuivre exclusivement 4mm² min, isolation résistant à 90°C min

Tableau(I.2) : Fiche technique d'un module [16].

Puissance max (P_{max})	195 W
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	44,90 V
Courant en court-circuit (I_{sc})	5,82 A
Fusible	9A
Tension à puissance max (V_{mp})	36,40V
Courant à puissance max (I_{mp})	5,38A
Tension max pour un assemblage	1000V
3 Diode by-pass	11A

Longueur	2076 mm
Largeur	1046,0 mm
La surface	2,16 M ²
Nombre de cellules	72

- **Supervision**

La supervision d'une installation photovoltaïque, ou (monitoring), permet d'évaluer la qualité de fonctionnement du système et à contrario de détecter les éventuelles anomalies. Elle est en général composée d'un système d'acquisition et de stockage des données, d'un logiciel de traitement du signal ou d'analyse, et d'un afficheur. Dans certains cas, le système est couplé à des sondes d'ensoleillement et de température [17].

I.7 Gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, le gisement solaire est nécessaire pour l'étude des systèmes photovoltaïques.

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée.

On rappellera quelques données de base au spectre du rayonnement solaire [18].

I.7.1 Le spectre solaire

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire contient une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On remarque généralement le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil [18].

La figure(I.17) présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000K, éclairement solaire hors atmosphère et l'éclairement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.

D'après la figure (I-10), on remarque que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents [19,20].

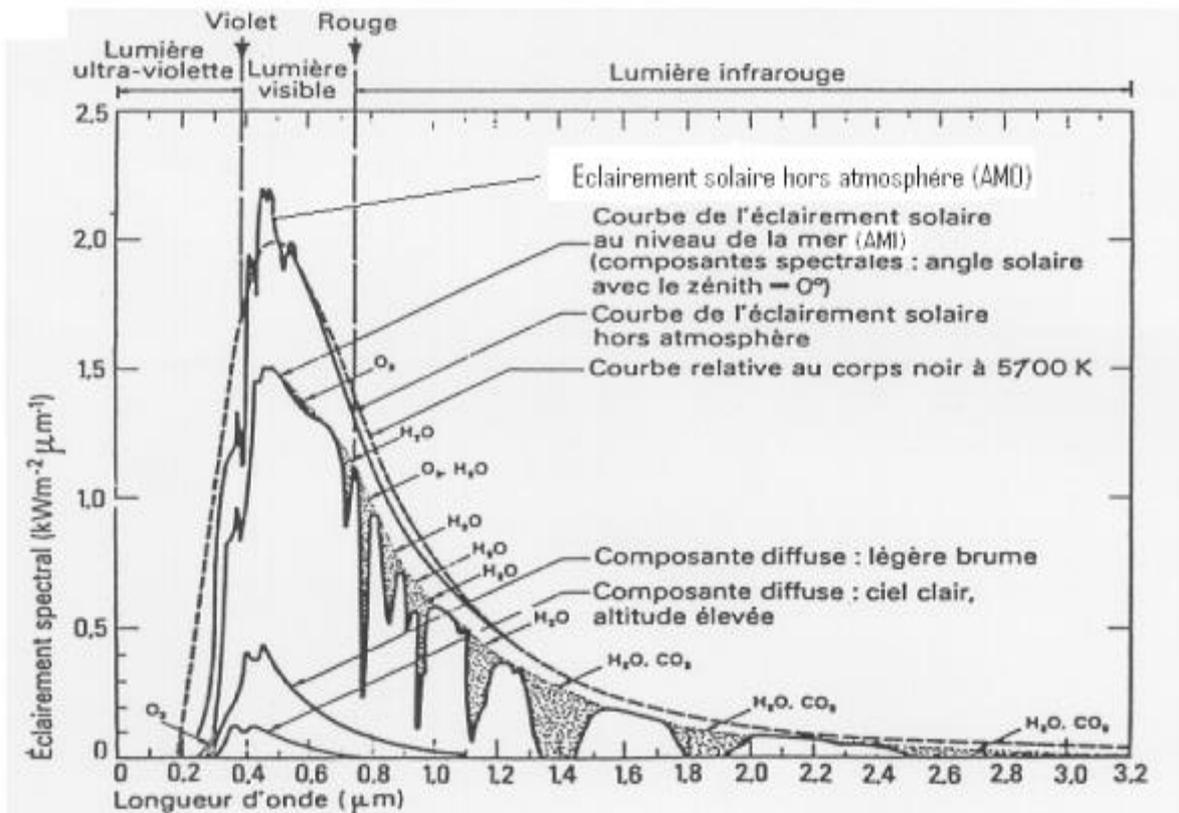


Figure (I.10) : Eclairage solaire [21].

I.7.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (de 0,75 jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyenne dans une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un rayonnement de 340 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ [19,22].

I.7.3 Dualité de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante [23] :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.12})$$

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Les longueurs d’ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2µm (ultra-violet) et 4µm (infrarouge) avec un maximum d’énergie pour 0,5µm. 97,5% de l’énergie solaire est comprise entre 0,2µm et 2,5µm. De 0,4µm à 0,78µm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d’énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d’ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d’électrons.

Le tableau suivant donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d’ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [24].

Tableau (I.2) : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire [24].

$\lambda(\mu m)$	$E(ev)$	ZONE
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

I.7.4 Le gisement solaire en Algérie :

L’Algérie dispose d’un gisement solaire énorme De par sa situation géographique comme le montre la figure suivante :

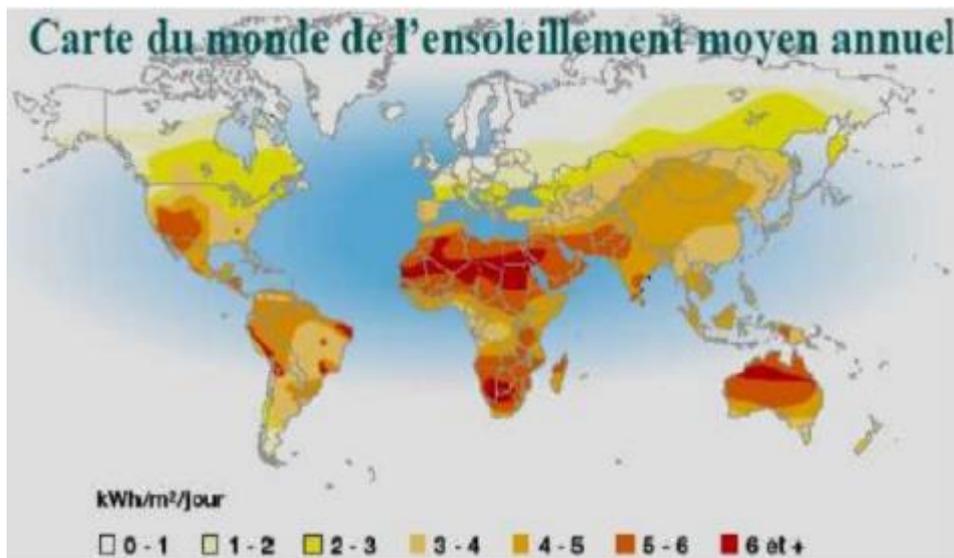


Figure (I.11) : Carte du monde de l’ensoleillement moyen annuel. [25]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169 .000 TWh /an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau de territoire algérien est représenté dans le tableau I.5 selon l'enseillement reçu annuellement :

Tableau (I.3) : Enseillement reçu en Algérie par régions climatiques[25].

Régions	Régions côtières	Hautes plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [25].

I.7.5 Le gisement solaire de NAAMA :

Les données météorologiques du site d'installation du système PV[26] :

- Latitude : 33.27°33'04''17 Nord.
- Longitude : -0.32° 0''19 Est.
- Altitude : 1174 mètres.

Tableau (I.4) : le gisement solaire en Naama.

Mois	Le rayonnement solaire (kW)
Janvier	2.64
Février	3.25
Mars	4.2
Avril	5.11
Mai	5.93
Juin	6.43
Juillet	6.34
Aout	5.8
Séptembre	4.53

Octobre	3.67
Novembre	2.8
Décembre	2.34
Moyenne Annuelle	4.42

I.8 Différents configurations système PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants [27,28] :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- Une source auxiliaire d'appoints.

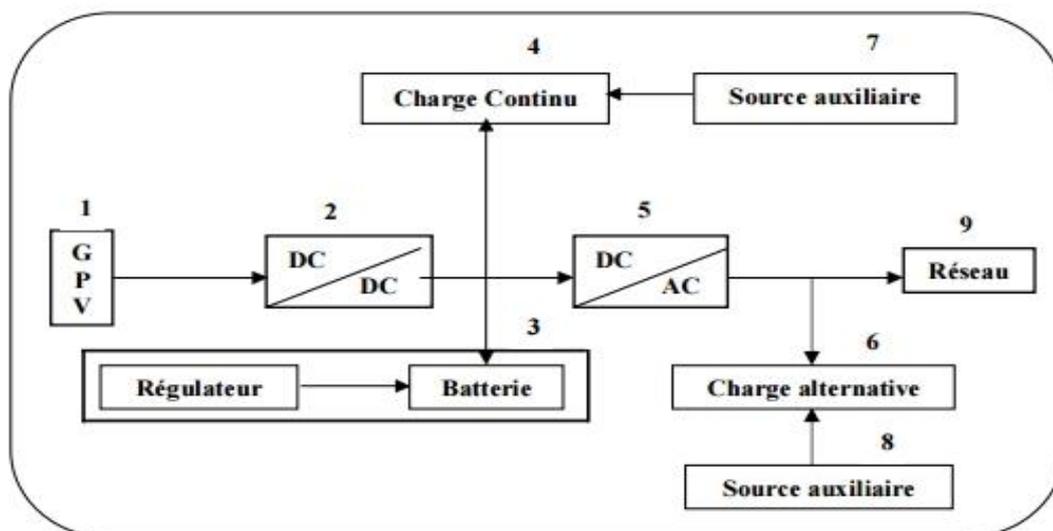


Figure (I.12) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque [27,28].

I.8.1 Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

I.8.2 Système autonome avec batterie :

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

I.8.3 Système fonctionnant au fil du soleil :

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

I.8.4 Système avec appoint électrique :

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et [(1),(2),(3),(4),(7),(9)] ; ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**I.9.1 Avantages [29]**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite 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.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le

produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.9.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et exigé des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [29] .

I.10 Domaine d'application du système photovoltaïque

Domaine spatial : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante [29].

Télécommunications : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

Sites isolés : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

Acquisition de données : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

Domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes PV. Nous avons brièvement décrit les paramètres des cellules solaires, les Différents configurations système PV, le domaine d'application ainsi que les avantages et les inconvénients.

Références

- [1]. D. Fatiha, Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques, thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2017.
- [2]. S. Moulay Ahmed, Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems, Mémoire de master, université du Québec, 2019.
- [3]. La fabrication des cellules photovoltaïques'', <http://www.arer.org/HALLOU-SOLAIRE.html>
- [4]. Y. Pankow, "Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque," École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Thèse de Doctorat, 2004.
- [5]. Le photovoltaïque–Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3,4,5,6/10.
- [6]. H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème Édition, Masson, 1990.
- [7]. Henry Mathieu et Hervé Fanet, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 6e édition, Dunod, Paris, 2009.
- [8]. [Http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/](http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/).
- [9]. Nichapour Oleksiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières inter-digités) Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [10]. M. Capderou, "Atlas Solaire de L'Algérie", Tomel,2, OPU 1983.
- [11]. Gang Li, Vishal Shrotriya, Jinsong Huang, Yan Yao, Tom Moriarty, Keith Emery and Yang Yang, Nature Materials. Vol 4, November, 2005.
- [12]. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 41)", Prog. Photovolt: Res. Appl, 21: 1-11 (2013).
- [13]. H. Chenoufi, Optimisation des procédés technologiques de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion, Mémoire de Magister, Dépt. Électronique, Univ Batna, 2005.
- [14]. J. Royar, and all, Le pompage photovoltaïque, Direction de Eric Schiller.
- [15]. M. Coréen, and all, « Analogie circuit design optimisation through the particle swarm optimisation technique » ; Analog integrated circuit and signal processing ; Vol .63. PP.71-82 ; 2010.
- [16]. Laboratoire des énergies renouvelables centre universitaire Naama.
- [17]. M. Aissou « Étude technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome » .

- [18]. RoshanakRadbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [19]. José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [20]. Marcelo GradellaVillalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto RuppertFilho « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ».IEEE Transaction on powelectronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.
- [21]. Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [22]. AkassewaTchapoSingo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [23]. Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [24]. Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [25] Wahiba BELAID. Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2014.
- [26] <http://data.cder.dz:81/#>
- [27]. B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [28]. Y. Bakelli « Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque » mémoire de magister , Université de Boumerdes 2005.
- [29]. M.Salma, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique .mémoire de magister, Université Ferhat Abbas -Setif-UFAS(Algerie),2012.

Chapitre II

La première génération des cellules PV

II.1 Introduction

La fabrication des cellules photovoltaïques est en pleine croissance. De nombreuses recherches sont faites dans le domaine pour les procédés de fabrication moins chers et plus efficaces dans la production ainsi des cellules à faible coût [1].

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant sur la terre après l'oxygène donc il est inépuisable [2]. Parmi les différents types de silicium, le monocristallin et poly- cristalline.

Dans ce chapitre on a basé sur les techniques de fabrication du silicium cristallin.

II.2 Traitement du silicium

II.2.1 Raffinage du silicium

L'obtention de matériau silicium arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes [3].

La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si est réalisée dans un four à arc, outil typique de l'industrie métallurgique.

La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99%.

La deuxième transformation est une purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si, d'une pureté de 99,9999%.

La voie conventionnelle, héritée de l'électronique, utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser du silicium poly-cristallin.

Il s'agit de l'étape la plus économe en énergie de toute la chaîne de production des modules PV. Compte tenu du coût de cette étape et du fait qu'elle peut résister à une pureté plus faible, des technologies sont à l'étude pour produire du silicium solaire à partir d'un nouveau produit chimique mais aussi métallurgiques sont explorées.

II.2.2 De la silice au silicium

La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique SiO_2 contenu dans le quartz ou le sable, dont les réserves planétaires sont abondantes. La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène [4]. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès).
- Les roches magmatiques



Figure (II.1) : La silice [7]

II.2.3 Extraction du silicium à partir de la silice

Le silicium métallurgique (MG-Si) est provoqué par la transformation de la silice d'où l'oxygène est extrait. Cette réaction, appelée réduction carbo thermique, consiste à amener un mélange de types quartz et carbonate (réducteurs du type coke, houille et bois) à une température très élevée, qui se combine avec l'oxygène du quartz pour donner monoxyde puis du dioxyde de carbone. Le bois offre également un espace pour les matériaux.

Réduction de la silice par le carbone à 1700°C. L'énergie nécessaire à la réaction est apportée sous forme d'arc électrique par des électrodes en graphite, à l'intérieur de fours métallurgiques dits fours à arc.

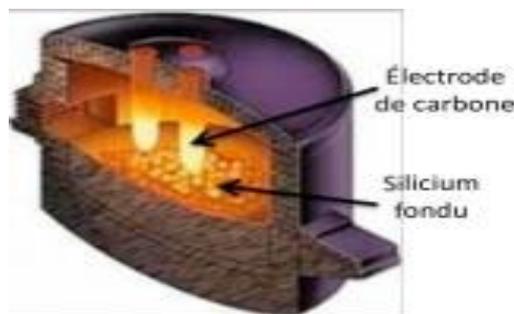


Figure (II.2) : Four à arc

Le silicium en fusion ainsi obtenu est récupéré dans des « poches », oxygéné par soufflage d'air pour former des oxydes de calcium et d'aluminium qui vont être extraits par séparation du laitier (phase contenant des oxydes métalliques, silicates, aluminates et chaux, formés lors de la fusion). Le silicium est ensuite mis en forme par refroidissement et moulage en lingotières. Plusieurs étapes de concassage et de broyage permettent ensuite d'obtenir des billes de MG-Si de 2- 3 mm de diamètre.



Figure (II.3) : Silicium métal en fusion

II.2.4 Purification du silicium

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 % [5].



Figure (II.4): Purification du silicium [7]

II.2.5 Obtention des lingots de silicium

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est des lingots de silicium à l'état solide dans lesquels seront découpées les plaques de silicium.

Ces plaques subiront quant à elles des transformations qui leur permettront de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Puis elles seront reliées entre elles et protégées des intempéries dans un module photovoltaïque.

Il existe deux grandes méthodes de cristallisation, La première permet d'obtenir du silicium poly-cristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal) [6].

II.2.5.1 Cellules au silicium poly cristallin

Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergivore. Le silicium poly-cristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots cubique.

Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

Le silicium poly-cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes.[8]

II.2.5.1.1 Techniques de fabrication

Parmi les techniques de fabrication, nous avons choisi deux méthodes: la technologie Siemens et la technologie du chlore.

II.2.5.1.1.1 technique de Siemens

Cette famille de procédés est basée sur la forte attraction de l'atome de silicium Si pour les ions chlorures Cl⁻.

Ils consistent à synthétiser des composés gazeux contenant du silicium, généralement des chlorosilanes, à les purifier par distillation puis à déposer le silicium poly cristallin par décomposition thermique.

Les principales variantes sont les routes trichlorosilane, monosilane et tétrachlorosilane [8] Cette voie génère d'importants volumes de déchets chlorés et nécessite d'opérer sur des sites à grande capacité industrielle soumis à des exigences réglementaires sévères. Plusieurs types de recyclage peuvent être mis en place, ils concernent les produits chimiques chlorés, l'hydrogène et la chaleur.

- Détail du procédé Siemens

Le procédé Siemens s'opère en trois étapes et génère un dégagement gazeux de trichlorosilane SiHCl₃.

Son rendement est de 25%, pour une consommation énergétique d'environ 150 KWh . C'est le procédé utilisé historiquement pour l'industrie électronique.

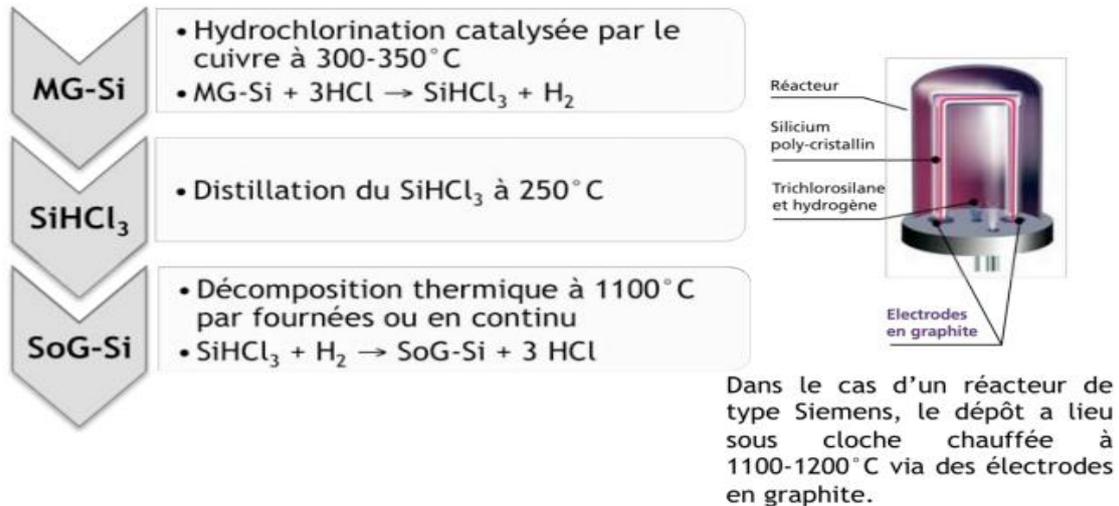


Figure (II.5) : Procédé de siemens. [8]

Dans La technique de Siemens modifié, le dépôt est réalisé en continu dans un réacteur à lit fluidisé.

Les grains de silicium sont formés sur des particules de silicium précurseur en suspension dans un mélange gazeux silane/hydrogène à 600-800°C, et sont récupérés par gravité en bas du réacteur. Cette dernière option présente l'avantage d'une consommation énergétique et d'un temps de dépôt réduits.

II.2.5.1.1.2 Technique de chlore

Il existe une autre procédés de purification par voie chimique utilisant le chlore et qui diffèrent par quelques variantes [9]. Dans tous les cas, la première étape consiste à séparer le Si des impuretés métalliques en faisant réagir le MG-Si broyé avec du chlore Cl₂ ou du chlorure d'hydrogène HCl. A partir de cette interaction se forment des chlorosilanes de type SiHCl₃ ou SiCl₄ et des complexes chloro-métalliques comme FeCl₃, AlCl₃, BCl₃ faciles à éliminer. Les étapes suivantes permettent d'obtenir du Si pur à partir des silanes chlorés par des méthodes de distillation, d'échange d'ions en sels fondus ou de pyrolyse selon les procédés.

La route silane, la deuxième la plus répandue, met en œuvre la distillation triple du trichlorosilane pour synthétiser du monosilane SiH₄ dont le silicium est ensuite déposé par décomposition thermique. le réacteur à filament modifié de Tokuyama.

II.2.5.2 Silicium monocristallin (SC-Si) [10]

La cellule de silicium monocristallin est la plus largement utilisée et commercialisée. Ce type de cellule est le meilleur dans la filière silicium. Il a un rendement et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.



Figure (II.6) : Cellule Silicium monocristallin

II.2.5.2.1 Techniques de fabrication

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, la technique « Czochralski » (Cz) et la technique Zone de Fusion « Float Zone » (FZ) qui produisent du silicium monocristallin.

II.2.5.2.2 Technique de « Czochralski » (Cz) [10]

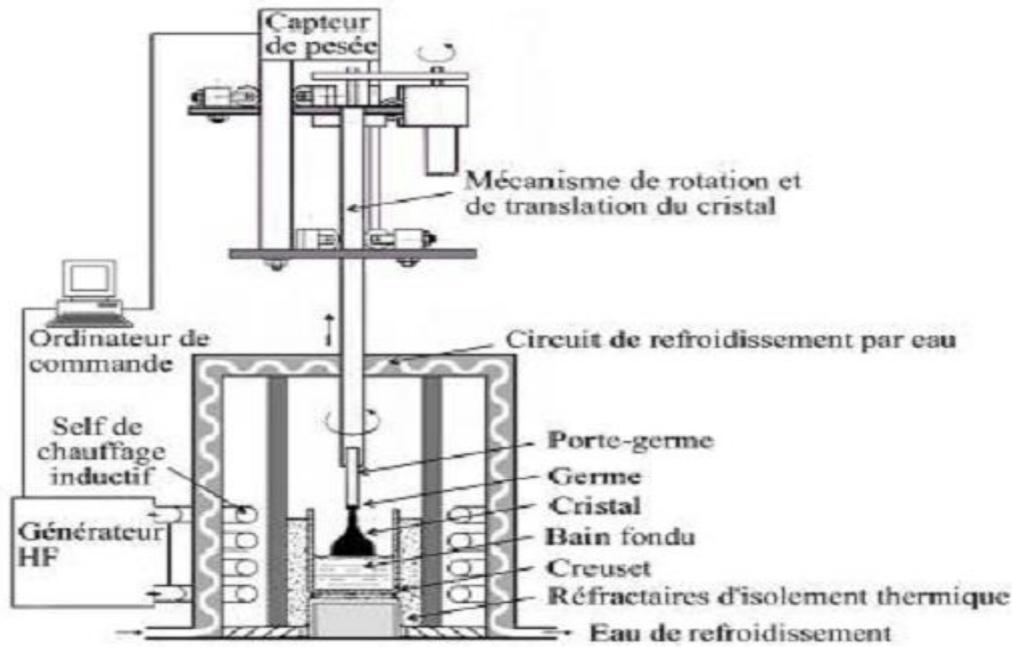
Cette méthode qui a été inventée par Jan Czochralski (1916), consiste à faire fondre le silicium poly cristallin dans un creuset à 1450 °C, des dopants (bore et phosphore) peuvent alors être ajoutés pour doper le silicium de type p ou de type n.

Un germe de silicium monocristallin avec une orientation cristallographique précise (100 par exemple) est placé en contact avec la surface du bain en fusion.

Le silicium solidifié et tiré lentement vers le haut, prend l'orientation cristallographique du germe. Figure(II.7).

Ensuite la vitesse de tirage est augmentée jusqu'à atteindre la vitesse spécifique à laquelle le cristal croît avec le diamètre désiré.

Le lingot obtenu peut atteindre 30 cm de diamètre et 2 m de longueur. Pour le photovoltaïque, les diamètres finaux des cellules actuelles, obtenues à partir des lingots, se situent généralement entre 12.5 et 15.6 cm.



Figure(II.7): Principe de la méthode de Czochralski

Un appareillage Czochralski est généralement composé de 2 parties : une partie supérieure supportant la tête de tirage et une partie inférieure où se trouve le creuset calorifugé, chauffé par induction haute fréquence. Pour certains cristaux (silicium par exemple) un chauffage résistif peut être utilisé. L'ensemble doit pouvoir travailler aussi bien à l'air ambiant que sous gaz inerte ou sous vide. La perfection du cristal est souvent liée à la précision mécanique du dispositif de tirage, à la sensibilité de la pesée et au dispositif thermique entourant le creuset.

II.2.5.2.3 Le procédé de Fusion de Zone (FZ) [11]

Cette technique consiste à passer plusieurs fois un barreau de silicium polycristallin dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium **Figure (II.8)**.

Un germe monocristallin est placé à l'extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot.

Le silicium monocristallin se forme du bas vers le haut, de sorte que toutes les impuretés existantes sont entraînées par ségrégation vers le haut avec la zone fondue.

Le silicium monocristallin obtenu est plus purifié que celle du procédé (Cz). Le procédé (FZ) est significativement plus cher que celui de (Cz), il n'est utilisé pour le photovoltaïque que dans des cas exceptionnels.

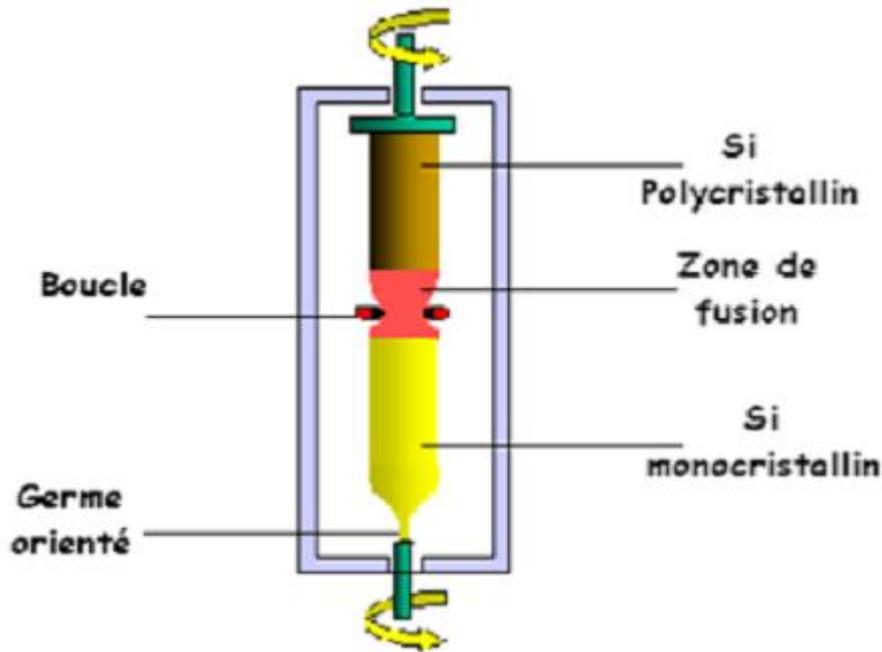


Figure (II.8) : Méthode de la zone flottante pour l'élaboration du silicium monocristallin [11]

II.2.6 Obtention des wafers photovoltaïques [6]

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium poly-cristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette").

La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil. Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300 μm), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil.

En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310 μm à 350 μm).

Avec une scie à fil, il faut donc 570 μm de silicium pour produire une tranche de 350 μm . L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques.

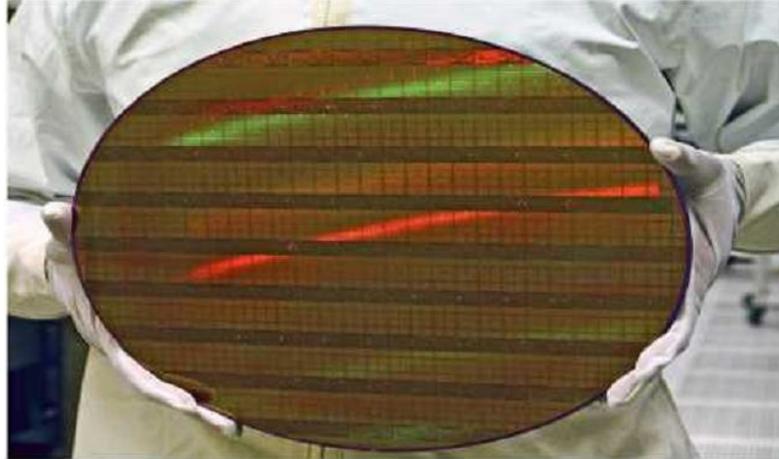


Figure (II.9): Constitution d'un wafer [7]

II.2.7 Le dopage et jonction P-N

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

II.2.7.1 Dopage type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

II.2.7.2 Dopage type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

II.2.8 Montage d'une cellule photovoltaïque [7]

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction PN 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.

II.3 Etude comparative [12]

Le tableau montre une étude comparative entre les différents types de silicium, le monocristallin et poly- cristalline.

Tableau (II.1) : Etude comparative entre les différents types de silicium, le monocristallin et

	Poly cristallin	Monocristallin
Cellule		
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement : 11 à 15 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins • Puissance : 100 Wc/m². 8 m²/kwc. • Rendement faible sous un faible éclairement. • Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. • Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement : 14 à 20 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : élevé. • Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kwc. • Rendement faible sous un faible éclairement. • Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal • Couleur bleue uniforme
Application	<ul style="list-style-type: none"> • Modules pour toits, façades, générateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Aérospatiale, modules pour toits, façades,

poly- cristalline.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents types de silicium et les techniques de fabrications de ces cellules, ainsi que une étude comparative entre le poly cristallin et le monocristallin

Références

- [1]. A. Luque and S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley & Sons Ltd, England, (2003).
- [2]. Harold Kintz « Réalisation de couches minces nano composites par un procédé original couplant la pyrolyse laser et la pulvérisation magnétron : application aux cellules solaires tout silicium de troisième génération », thèse de doctorat, université paris sud,2013.
- [3]. Jacques Amouroux, Daniel Morvan, “Le silicium photovoltaïque: enjeux techniques et financiers”, Colloque National Electricité Solaire Photovoltaïque, Aix-les-Bains, 20-22 mars 2007.
- [4]. Photon International, “A highly coveted raw material”, Jan. 2009, pp.136-141.
- [5]. A. Braga, S. Moreira, P. Zampieri, J. Bacchin, et P. Mei, “New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 92, Apr. 2008, pp. 418-424.
- [6]. André Claverie, “Electricité solaire photovoltaïque - Etat de l’art - Principes, applications, développements et programmes de promotion”, Ademe, Session Photon Réseau, Novembre2007.
- [7].<http://www.photovoltaique.guidenr.fr> consulter le 05/06/2020.
- [8]. A. Braga, S. Moreira, P. Zampieri, J. Bacchin, et P. Mei, “New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 92, Apr. 2008, pp. 418-424
- [9]. J. Odden, G. Halvorsen, H. Rong, R. Glockner, “Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon”, Silicon for the Chemical and Solar Industry IX, Oslo, Norway, June 23-26, 2008
- [10]. A. Méroian, H. Omar, Etude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques, Mémoire de fin d’études de master, l’Université Oum El Bouaghi, juin 2012.
- [11]. B. Djamaia, Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d’une Cellule solaire HIT, Mémoire de fin d’étude Master , Université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem,2018.
- [12]. J.Cailloud,” Lycée des métiers de l’énergie de la métallurgie et de la vente, 2010.

Chapitre III

La deuxième génération des cellules PV

III.1 Introduction

Les cellules PV dites couche mince ou qui appellent les cellules de seconde génération, car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin. L'intérêt de cette technologie vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale [1].

Généralement cette filière est utilisé trois matériaux qui permettent d'avoir les meilleurs rendements qui soient, et qui sont le silicium amorphe, le tellure de cadmium ou bien le di séléniure de cuivre indium [2].

Malheureusement le rendement de cette technologie est seulement 6 à 8% n'empêche qu'elle représente encore 5% de la production photovoltaïque actuelle. Elle assez souvent utilisée dans des petites applications comme les calculatrices [3].

Dans ce chapitre on a basé sur la fabrication et propriété électriques des matériaux technologiques de couche mince.

III.2 Technologie couches minces (2^{ème} génération)

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm". Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes [4].

Les principales filières couches minces sont :

- **Le silicium amorphe**

Le silicium amorphe a-Si présente une faible variation de longueur et d'angle de liaison qui a pour conséquence d'éliminer l'ordre après quelques distances atomiques. A cause de ce désordre, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques, ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite en haut

de la bande de valence et en bas de la bande de conduction. Ils forment ce qu'on appelle les queues de bande [5].

- **Les cellules CIS ou CIGS**

Les premières sont composées de diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2) et les deuxièmes font intervenir en plus du gallium. Ces matériaux sont stables sous rayonnement et ont de très bonnes propriétés d'absorption. Ce type de cellules présente un faible coût de fabrication.

Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe)

L'avantage de ces cellules est la forte d'absorption du tellure de cadmium, cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie. Les meilleures cellules à base de CdTe présentent des rendements de photo conversion de l'ordre de 17% [6].

Les cellules GaAs

Le problème de GaAs est que c'est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes (température de fusion (T_f) et température de vaporisation(T_V)). La température de fusion T_f de Gallium est supérieure à celle de l'arsenic donc ; quand le Ga se fusionne, l'arsenic s'évapore [7]. En plus l'As est un élément toxique. Donc des préparations très particulières sont nécessaires lors de la préparation du GaAs massif [8].

III.3 La technologie de silicium amorphe hydrogéné a-Si:H

III.3.1 Rôle de l'hydrogène

C'est l'hydrogène qui, en saturant les liaisons pendantes, rend le silicium amorphe utilisable. Sans hydrogène, la densité des liaisons pendantes serait de l'ordre de $10^{19}/\text{cm}^3$ le gap optique de 1,2 eV environ et il est impossible de le doper. En effet, le niveau de Fermi reste inchangé lors du dopage et les atomes dopants sont inactifs. L'hydrogène permet de réduire les liaisons pendantes de 99,99% [9].

La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe a une influence sur les discontinuités de bande. Elle peut nettement les modifier et celles-ci ont une grande influence sur les caractéristiques de la cellule [10,11].

III.3.2 Les avantages de silicium amorphe hydrogéné

- Possibilité de dépôt sur de grandes surfaces.
- Possibilité de dépôt sur des surfaces non planes ou souples.

- Facilité de fabrication et technologie à basse température, inférieure à 300°C.
- Forte absorption de la lumière visible.
- Faible dégradation sous rayons X.
- Energie de bande interdite plus élevée par rapport au silicium cristallin, ce qui permet l'obtention de courants inverses d'obscurité plus faibles.

III.3.3 Les inconvénients de silicium amorphe hydrogéné

- Beaucoup de défauts dans la structure.
- Faible mobilité des porteurs libres.

III.3.4 Applications de l'a-Si:H

Parmi les applications d'a-Si:H, on peut citer la cellule photovoltaïque utilisée dans des alimentations qui nécessitent de faibles puissances. Ce type de cellule se retrouve dans les machines à calculer de poche, les montres ou les chargeurs de batterie [12].

III.3.5 Le semi-conducteur amorphe

Dans les structures amorphes, l'arrangement de base n'est pas préservé, les atomes sont disposés de façon non périodique. L'ordre atomique à grande distance passe avec une distorsion des longueurs et des angles des liaisons. La présence de liaisons pendantes dans une telle structure crée des états de défauts profonds dans la bande interdite, qui seront à l'origine de l'apparition des queues de bande de conduction et de valence [13-14].

Dans les matériaux amorphes, le désordre de structure rend le dopage difficile. Dans les matériaux amorphes hydrogénés, la présence d'hydrogène dans la matrice de silicium a pour conséquence de réduire notablement le nombre de liaisons pendantes en se liant de façon covalente aux atomes de silicium [15].

III.3.6 Structure de cellules solaires en a-Si:H

Les cellules solaires de silicium cristallin sont généralement composées d'une couche de type P avec N. Les paires électron-trou sont séparées entre la région P et N. Les porteurs de charge minoritaires photo générés diffusent à partir des régions dopées vers la jonction P-N. Dans l'a-Si: H, la longueur de diffusion des porteurs de charges (électrons-trous) est beaucoup plus faible que dans le silicium cristallin, cette longueur dans l'intrinsèque est typiquement de l'ordre de 100 nm, pour le matériau en a-Si: H dopé la longueur de diffusion est encore plus faible. Les cellules solaires en a-Si: H se composent de jonctions P-I-N, dans cette jonction la couche intrinsèque est insérée entre une couche dopée P et une autre N. De cette façon la zone de déplétion est rendue plus épaisse et en raison de la faible densité de défaut dans l'a-Si: H

intrinsèque, les porteurs de charge dans la région de déplétion ont relativement une longue durée de vie. La couche intrinsèque de cellules solaires en a-Si: H simple jonction est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres d'épaisseur. L'épaisseur totale de la jonction P-I-N peut être maintenue faible comme l'a-Si: H est un bon absorbeur de la lumière. Une cellule solaire simple jonction P-I-N en a-Si:H est représenté sur la figure (III-1). Une cellule solaire en a-Si:H est déposé sur un substrat en verre transparent revêtu d'un oxyde conducteur (TCO). Le TCO forme l'électrode supérieure et le contact arrière est en aluminium ou en argent. Comme matériaux TCO SnOx: F et ZnO:Al sont couramment utilisés [16].

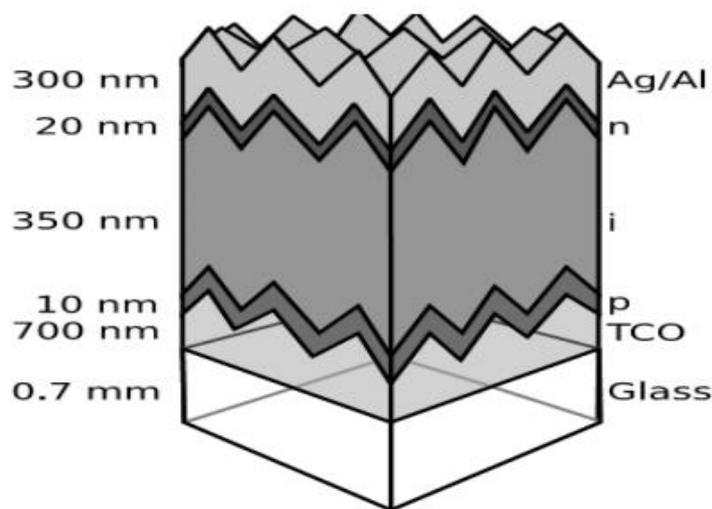


Figure (III.1) : Cellule solaire de structure P-I-N en a-Si:H.

La couche TCO est souvent texturée pour diffuser la lumière entrant et ainsi augmenter la longueur moyenne du trajet optique à travers la cellule solaire. La longueur moyenne du chemin optique à travers la cellule solaire est encore accrue par l'utilisation d'un contact de la face arrière très réfléchissant. La couche dopée où la lumière pénètre dans la jonction P-I-N est souvent fabriquée à partir d'a-SiC: H, qui a l'avantage que la largeur de sa bande interdite est élevée. La dégradation d'a-Si:H induite par la lumière affecte également le rendement de cellules solaires en a-Si:H, La réduction de la durée de vie des porteurs et la réduction du champ électrique dégradent le rendement de la cellule solaire. Il existe deux façons d'améliorer la stabilité des cellules solaires à l'égard de SWE (l'effet de Staebler-Wronski). Une façon est de rechercher un matériau plus stable, l'autre est de réduire l'épaisseur de la couche intrinsèque. Lorsque l'épaisseur de la couche intrinsèque est réduite, le champ électrique dans la couche intrinsèque augmente, ce qui rend la cellule solaire moins sensible à la lumière qui induit des changements dans la distribution de charge d'espace. Cependant, lorsque la couche intrinsèque est trop mince, l'efficacité de la cellule solaire est

limitée par la quantité de lumière absorbée. Une façon de surmonter ce problème consiste à utiliser des cellules multi-jonctions formée par un empilement de deux ou plus de jonctions P-I-N. Les performances peuvent être améliorées en superposant plusieurs cellules P-I-N fabriquées avec des matériaux de gaps différents. Elles sont empilées dans le sens décroissant des gaps en partant de la face qui est exposée à l'éclairement. Ces cellules sont appelées cellules à multi jonctions (cellules tandem dans le cas de deux cellules P-I-N). La figure (III-2) représente une cellule solaire tandem (formée par deux jonctions).

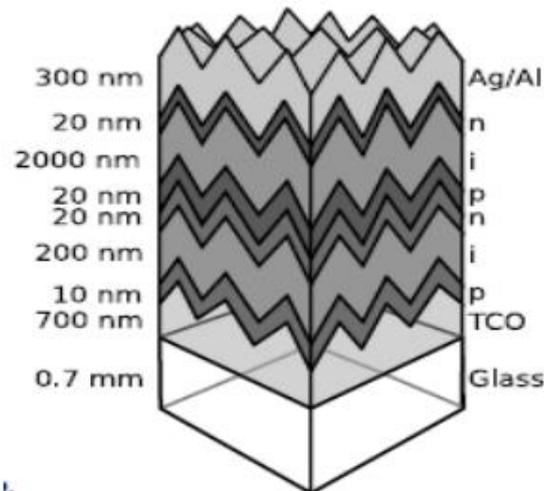


Figure (III.2) : Cellule solaire tandem en a-Si:H.

Cette structure est composée par des cellules solaires ayant des épaisseurs réduites qui entraînent d'une part une diminution de la dégradation et d'autre part d'avoir une épaisseur totale suffisamment épaisse de la structure afin d'assurer une grande absorption de la lumière. Le but de cette réalisation est d'optimiser l'absorption du spectre solaire : la partie du spectre solaire qui n'est pas absorbée par la cellule avant le sera par la cellule arrière [17].

III.4 Fabrication de cellules solaires à base du silicium amorphe (a-Si)

Dans un matériau fabriqué à base du silicium amorphe, les atomes sont fixés les uns aux autres de façon désordonnée, il ne possède pas de largeur de bande interdite. Le réseau comporte un grand nombre de liaisons pendantes, c'est-à-dire d'atomes de Si qui ne sont reliés qu'à trois voisins seulement, et qui présentent donc un électron libre sur la couche extérieure. La solution dans ce cas consiste à obtenir un silicium contenant beaucoup d'hydrogène. Les atomes d'hydrogène vont en effet passiver les liaisons pendantes, et, en faisant ainsi disparaître les niveaux locaux de valeur intermédiaires.

La constitution de la jonction peut se faire par dépôt de trois couches de silicium amorphe, une couche de type p, une couche de type i (non dopée, afin d'obtenir un volume de jonction plus grand) et une couche de type N. Cette fabrication peut s'effectuer en continu, donc avec peu de main d'œuvre [18].

En plus, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est fabriqué par PECVD à partir du silane à des températures entre 200 et 300°C, et même inférieures [19, 20].

La méthode usuelle de dépôt de silicium amorphe hydrogéné est celle de la décomposition par plasma du silane, SiH₄, avec d'autres gaz ajoutés pour le dopage. Le dépôt se fait à des pressions de gaz de [0.1-1 Torr], qui est le domaine de pression optimum d'entretien du plasma. La morphologie des films obtenus est tributaire de la chimie de dépôt ainsi que de la mobilité de surface des molécules qui se déposent.

La pulvérisation réactive est aussi une méthode de dépôt de films amorphes a-Si:H dans laquelle une cible en silicium est pulvérisée, généralement avec des ions d'argon, mais aussi en présence d'hydrogène. Le silicium pulvérisé réagit avec les atomes d'hydrogène dans le plasma formant des radicaux SiH_x à partir desquels le dépôt prend place. Les films déposés ont essentiellement les mêmes propriétés que les matériaux déposés par PECVD, avec l'inconvénient du bombardement des ions d'énergie plus élevées qui atteignent la surface de ces films et l'endommagent [22].

III.5 Propriétés électriques du (a-Si:H)

III.5.1 Bandes d'énergie

Dans un atome, l'énergie quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs déterminées appelées niveaux d'énergie. Dans un solide, les niveaux d'énergie relatifs à chacun des atomes qui le constituent, sont proches les uns des autres et forment des bandes d'énergie. A l'intérieur des bandes d'énergie, la différence entre des niveaux successifs est si faible que l'on peut considérer que l'énergie varie de façon continue [23]. Les propriétés électriques d'un matériau sont fonction des populations électroniques des différentes bandes permises. La conduction électrique résulte du déplacement des électrons à l'intérieur de chaque bande. Sous l'action du champ électrique appliqué au matériau l'électron acquiert une énergie cinétique dans le sens opposé au champ électrique. Considérons à présent une bande d'énergie vide, il est évident de par le fait qu'elle ne contient pas d'électrons, elle ne participe pas à la formation d'un courant électrique. Il en est de même pour une bande pleine. En plus, un électron ne peut se déplacer que s'il existe une place libre (un trou) dans sa bande d'énergie. Ainsi, un matériau

dont les bandes d'énergie sont vides ou pleines est un isolant. Une telle configuration est obtenue pour des énergies de gap supérieures à 9eV, car pour de telles énergies, l'agitation thermique à 300K, ne peut pas faire passer les électrons de la bande de valence à celle de conduction par cassure de liaisons électronique. Les bandes d'énergie sont ainsi toutes vides ou toutes pleines [24].

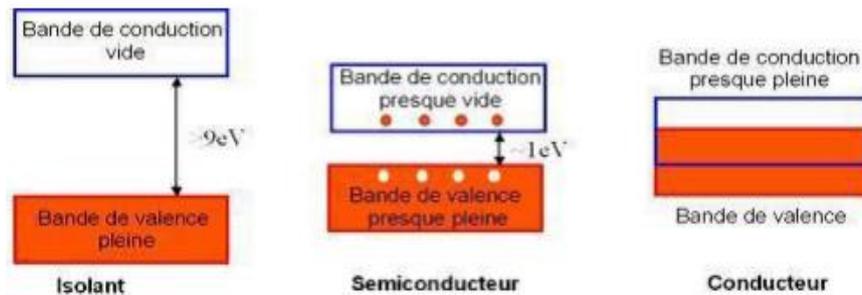


Figure (III.3) : Représentation des bandes d'énergie

III.5.2 Conductivité électrique

La conduction électrique est due au mouvement des porteurs de charges. Dans un matériau homogène, ceux-ci sont contraints, sous l'action d'un champ électrique E, à se déplacer selon les lignes de champ. La densité de courant I traversant le matériau est définie par la loi d'Ohm qui introduit la notion de conductivité (σ) quantifiant la propension du matériau à conduire le courant :

$$I = \sigma E$$

La conductivité (σ) est définie de façon générale par l'équation :

$$\sigma = q \int u(E)N(E)de$$

Où q est la charge, m(E) est la mobilité d'un porteur à une énergie donnée E. N(E) est la densité de porteurs disponibles pour la conduction et s'obtient en multipliant la densité d'états D(E) par la fonction probabilité d'occupation électronique décrite par la statistique de Fermi F(E) [25].

III.6 Configuration du module à base de Silicium amorphe

Pour le silicium amorphe hydrogéné, un dessin de type P-I-N (figure (III-4)) est le plus adéquat.

Dans ce cas, la région active est une couche intrinsèque a-Si:H, avec une faible densité de défauts, comprise entre deux couche a-Si: H (type N) et a-Si:H (type P). Généralement, l'épaisseur moyenne de cette couche est de l'ordre de 300 nm. Cette épaisseur assure le

compromis entre la collecte des porteurs et l'absorption des photons [26]. La même configuration P-I-N peut être utilisée, dans le cas du silicium microcristallin ($\mu\text{-Si:H}$), ou nano cristallin (nc-Si:H) [27].

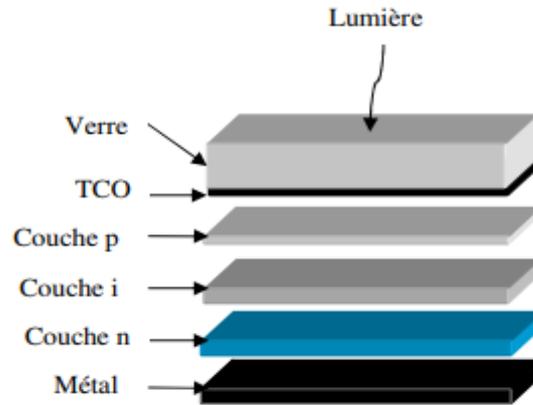


Figure (III.4) : Configuration P-I-N d'une cellule solaire à base de Silicium amorphe ou nanocristallin.

- **Configurations: P-I-N et N-I-P**

P-I-N (superstrat) et N-I-P (substrat) sont deux configurations différentes pour les cellules solaires, à base d'a-Si:H. l'ordre des couches (P et N) fait uniquement référence à l'ordre du dépôt des couches (figure (III-5)). La mobilité des trous dans a-Si:H et nc-Si:H étant plus faible que celle des électrons, il est préférable d'éclairer la cellule du côté P. De cette façon les trous photogénérés auront à parcourir une faible distance pour être collectés au niveau du contact avant. La différence dans les deux configurations réside dans la différence de croissance des couches. La meilleure efficacité est obtenue pour une cellule N-I-P à triple jonction a-Si:H/a-SiGe:H/a-SiGe:H. Elle est de l'ordre de 13 % [28,29].

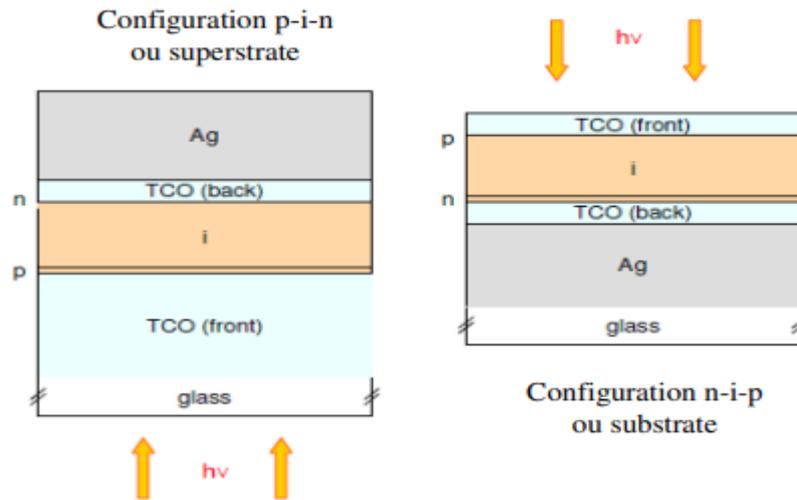


Figure (III.5). Schémas des configurations p-i-n (à gauche) et n-i-p (à droite), d'une cellule solaire.

III.7 La technologie CIGS

III.7.1 La filière chalcopyrite

La filière chalcopyrite engendre deux avantages essentiels pour la conversion photovoltaïque terrestre car elle répond exactement aux critères définis par cette dernière, à savoir son application en couches minces, sa tenue aux impuretés et sa stabilité à l'éclairement et même à l'effet des rayonnements cosmiques. Cette filière regroupe deux aspects : la possibilité de faire croître des couches minces poly cristallines moins coûteuses et la stabilité des propriétés de conversion. Les points clés de cette filière se résument comme suit :

- Haute efficacité.
- Meilleure stabilité.
- Faible coût.
- Adaptation aux différents procédés de dépôt.

La technologie chalcopyrite est considérée comme étant le marché d'avenir le plus prometteur pour la fabrication de modules photovoltaïques. Les rendements enregistrés en laboratoire ont atteint les 20 % alors qu'en module ils affichent 13 % [30].

Pour la matière première, l'équivalent de 0,5 à 1 kg par m² de silicium est nécessaire pour réaliser un module photovoltaïque conventionnel, alors que pour le CuInSe₂, la somme de 1,5 à 4 g de cuivre, 3 à 9 g d'indium et 7 à 20 g de sélénium est suffisante pour réaliser l'équivalent du silicium. Cette quantité est inférieure à la quantité de matière nécessaire pour

la métallisation dans le cas des modules de silicium. Les principaux matériaux de cette filière sont le CuInSe_2 et CuGaSe_2 d'énergies de gap respectives 1, 1.5 et 1.7 eV. Contrairement au silicium amorphe, les cellules à base de CIGS ne montrent aucune dégradation sous l'effet de l'exposition continue à la lumière. Pour augmenter la valeur de l'énergie du gap du CuInSe_2 , qui reste un peu éloignée de la partie la plus intense du spectre solaire, le gallium a été substitué à l'indium pour modifier l'énergie pour se situer à une énergie de gap entre celle du CuInSe_2 et du CuGaSe_2 . On parle ainsi de composés Cu(In, Ga)Se_2 qui sont devenus, de nos jours, les matériaux les plus prometteurs de cette filière [31].



Figure (III.6) : Chalcopyrite [32].

III.7.2 Matériau semi-conducteur CIS/CIGS

Le semi-conducteur CuInSe_2 est un matériau composé de structure chalcopyrite et qui présente un grand intérêt pour la conversion photovoltaïque [33,34]. C'est un semi-conducteur assez particulier. Il est composé d'atomes de sélénium gros et immobiles, d'indium plus petits, et surtout de cuivre baladeur. Ce dernier bouge au hasard dans le solide. Lorsqu'il rencontre un endroit endommagé, il va s'associer aux atomes déplacés ou manquants de manière à restaurer la fonctionnalité du matériau. De cette façon, les défauts qui apparaissent régulièrement dans la structure cristalline du semi-conducteur seront régulièrement réparés. Ce qui rend ce matériau moins sensible aux impuretés.

Le CuInSe_2 préserve ses propriétés électroniques quelles que soient les contraintes extérieures, voire les améliore. Son gap direct avec une valeur de 1,02 eV [35] lui permet d'absorber une large gamme du spectre solaire, son coefficient d'absorption qui est très élevé dans le domaine du visible et du proche infrarouge; permet à une couche de CuInSe_2 avec une épaisseur de 1 à 2 μm d'absorber 99 % des photons qui arrivent à la surface de la cellule [36,37].

III.7.3 Structure d'une cellule CIGS

Dans sa structure la plus répandue, la cellule CIGS est formée des plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La figure (III-7) présente la structure standard d'une cellule à base de $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{Se})_2$.

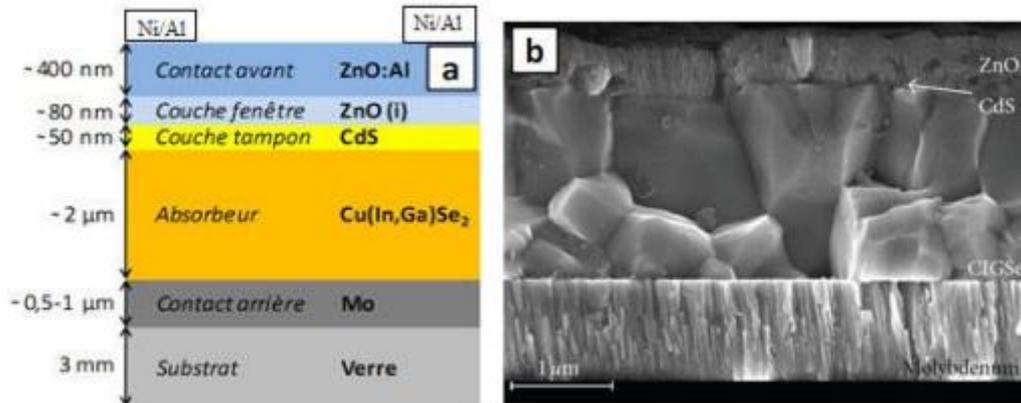


Figure (III.7) : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule [38].

Les principaux éléments dans la cellule sont:

- **Le substrat**

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises.

- **Le contact arrière**

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

- **L'absorbeur**

La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P qui forme la première partie de

l'hétérojonction P-N. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1 μm à 2 μm . Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la Co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.

- **La couche tampon**

L'hétérojonction P-N avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée «couche tampon». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes [39].

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (Cds). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn (O,S), (Zn,Mg)O, $\text{In}_2(\text{S,Se})_3$, etc.). L'épaisseur typique d'une couche tampon en Cds est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du Cds est le bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD).

- **La couche fenêtre**

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [40]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO : Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm.

- **La grille**

Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt [41].

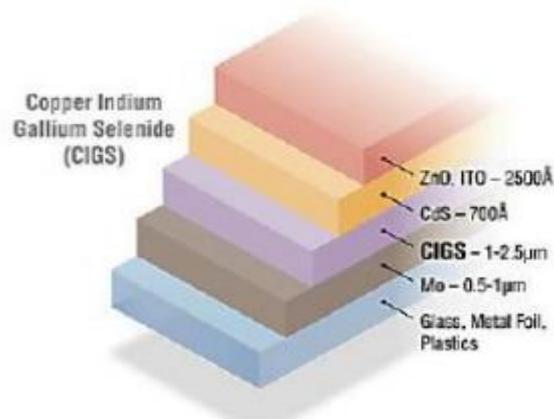


Figure (III.8) : Structure d'une cellule photovoltaïque à CIGS [42].

III.8 Fabrication de cellules solaires à base du CIGS

Les cellules CIGS peuvent également être fabriquées par impression. Dans ce cas, les éléments requis sont immergés sous forme de nanoparticules dans une encre. Une imprimante spécifique est alors employée pour déposer les différentes couches composant les cellules, à température ambiante et dans un environnement classique (pas de vide, d'atmosphère inerte, etc.). Les structures produites par impression affichent donc un rendement inférieur aux autres. Néanmoins, ce procédé de fabrication a l'avantage d'accélérer la production et de rentabiliser au mieux l'utilisation des matériaux.

Enfin, les différentes couches peuvent être déposées par frittage. Des nanoparticules sont étendues par un système d'électro-pulvérisation sur des précurseurs puis chauffées, mais sans que leur température de fusion soit atteinte. Elles vont alors se souder entre elles, et ainsi assurer une cohésion dans les couches déposées.

La meilleure cellule CIGS a été fabriquée par évaporation. La plupart de ces procédés impliquent l'utilisation répétée de hautes températures ou l'obligation de travailler sous une atmosphère protectrice à de faibles pressions (environ 10^{-8} mbar). Ces quelques points font rapidement grimper les coûts de fabrication. Des alternatives moins coûteuses existent, mais les cellules produites présentent des rendements moindres [42].

III.9 Propriétés électriques CIGS

- **Diagramme de bandes des différentes couches du CIGS**

L'empilement des composants constituant une cellule solaire présentée par la figure (III-9), peut être représenté par un diagramme de bande comme celui de la figure (III-9). Dans le

cas des cellules solaires en couches minces à base de Cu(In, Ga)Se_2 , lorsque l'hétérojonction PN est réalisée pour former la cellule solaire, il y'a une présence de discontinuités au niveau des bandes de conduction et de valence. En effet, les différences d'affinité électronique (écart en énergie séparant le niveau de Fermi du niveau du vide) et de bande interdite entre les différents matériaux entraînent la formation de barrières ou de marches énergétiques [43, 44]. Dans le cas où la différence est négative, des électrons de la couche fenêtre sont injectés vers l'absorbeur. En raison de la position de la bande de conduction de l'absorbeur, qui est au-dessus de celle de la fenêtre optique, les électrons vont avoir une probabilité relativement élevée de se recombiner avec les défauts présents à l'interface. Cette probabilité est élevée, d'une part, à cause de la discontinuité énergétique favorable, et d'autre part, parce que l'interface est l'endroit où la concentration de défauts est la plus importante. Dans le cas contraire, quand la différence est positive, les électrons doivent parcourir une plus grande distance afin de se recombiner avec les défauts d'interface. La probabilité de recombinaison devient alors beaucoup plus faible et les électrons vont alors diffuser vers l'absorbeur. Dans le cas de l'hétérojonction CIGSe/Cds, la différence d'affinité électronique des deux semi-conducteurs entraîne la formation d'une barrière énergétique de l'ordre de 0.3 eV [45].

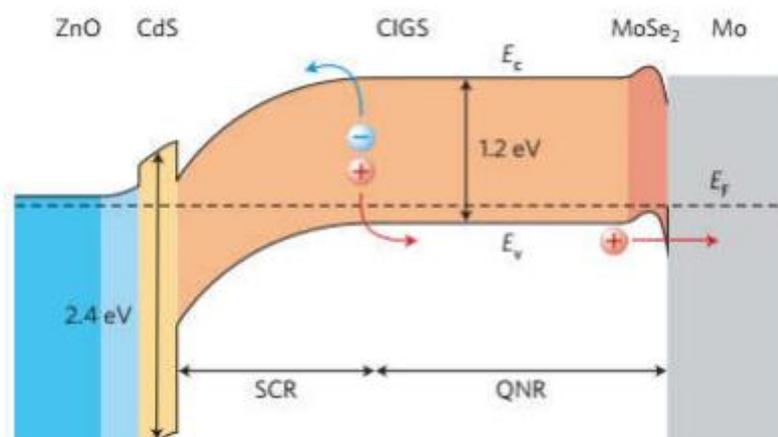


Figure (III.9): Diagramme de bande d'une cellule solaire en couches minces à base de CIGSe [46]

III.10 Avantages et inconvénients de Cellules CdTe/CIS/CIGS

- **Avantages**

Moins de matériau de base pour la fabrication.

Moins sensible à l'ombrage dû à la forme longitudinale des cellules.

Efficacité moyenne de 9,8%.

Très peu sensible à la température.

Bonne efficacité du rayon diffus.

- **Inconvénients**

Certains éléments très polluants lors de la fabrication.

Performance diminuant dans le temps.

Rendement moindre que les cellules de la première génération [47].

- **Application dans les Cellules Photovoltaïques à Base de CIGS**

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type N, par exemple du sulfure de cadmium (Cds). Avec une épaisseur de seulement 0,04 à 0,07 μm , autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont à elles aussi hétérojonction [48].

III.11 La technologie des cellules CZTS

S'il n'y a ni terre rare ni élément toxique, qu'y a-t-il à la place ? Les cellules CZTS renferment en réalité un absorbant fait de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et de sélénium, de formule $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$. L'ajout d'un autre semi-conducteur dopé n'est requis pour former une hétérojonction, comme pour les cellules CIGS. Selon un article paru en 2009.

Nous pourrions produire suffisamment d'énergie pour subvenir aux besoins de la population mondiale en n'exploitant que 0,1 % des réserves des principaux éléments concernés [42].

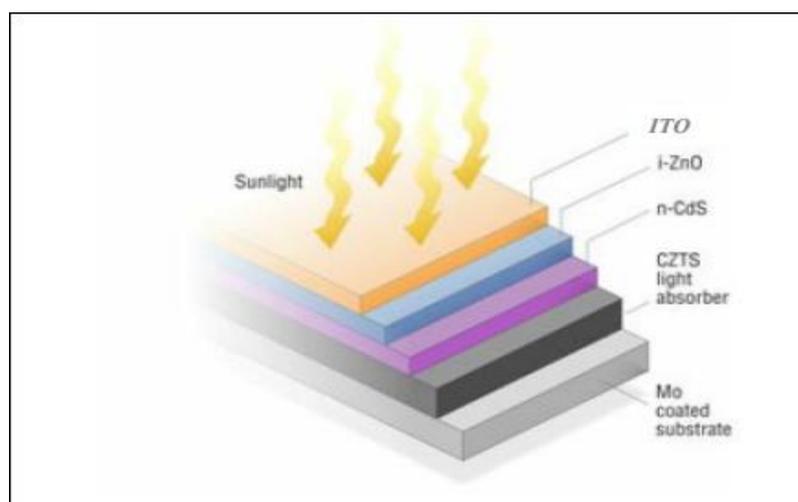


Figure (III.10) : Structure d'une cellule photovoltaïque à CZTS.

III.11.1 Composition et fabrication des cellules CZTS

La structure et la fabrication des cellules CZTS et CIGS sont similaires. Seules les conditions optimales d'assemblage varient d'une filière à l'autre. Les substrats peuvent eux aussi être rigides ou souples. Du haut en bas, une cellule CZTS se compose :

- d'un verre de protection.
- d'une couche conductrice transparente d'oxyde de zinc intrinsèque (elle est parfois précédée d'une couche de ZnO dopée à l'aluminium, de 400 nm d'épaisseur).
- d'une couche de sulfure de cadmium (Cds) ou d'un composé mixte comprenant du zinc, de l'oxygène, du soufre et des hydroxydes Zn(S,O,OH).
- D'une épaisseur de 70 nm, ils sont naturellement dopés N.
- de la couche de CZTS (épaisseur d'environ 1,5 μm).
- du conducteur inférieur, généralement du molybdène (épaisseur de 300 nm).
- du substrat [49].

III.11.2 Propriétés électriques CZTS

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin. Le libre parcours moyen, qui caractérise la distance moyenne parcouru par un électron entre deux chocs successifs, est un paramètre important spécifique de l'état structural du matériau. Le système CZTSSe a l'avantage de permettre le réglage de la bande interdite directe, en faisant varier le rapport S: Se, de près de 1 eV pour le composé : séléniure pure à environ 1.5 eV pour le matériau : sulfure pur (gamme très utile pour l'énergie solaire terrestre) [50].

III.11.3 Avantages de CZTS

- Un gap de 1.5 eV.
- L'indice de réfraction est de 2.07.
- Le coefficient d'absorption est de l'ordre de 10^4cm^{-1} .
- Des éléments constitutifs de CIGS sont chers (In et Ga) et d'autres toxiques (Se). En revanche, CZTS est un matériau semi-conducteur comprenant à base d'éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques. .
- Une efficacité de conversion énergétique plus de 6.77 %.

III.11.4 Inconvénient de CZTS

Faible rendement des cellules CZTS pose actuellement le seul problème [42].

III.12 La technologie CdTe

III.12.1 Matériau semi-conducteur CdTe

Le CdTe est un semi-conducteur défini binaire, de masse molaire 240 g /mole, formé d'un élément métallique, le cadmium ($Z = 48, 4d^{10}5s^2$) et d'un élément semi-métallique, le tellure ($Z = 52, 4d^{10}5s^2 5p^6$). Ce composé possède un numéro atomique élevé qui lui confère un coefficient d'absorption important pour les photons, et une bande interdite de 1,44 eV bien adaptée au spectre solaire. Ces propriétés font de ce matériau un bon candidat non seulement dans le domaine du photovoltaïque, mais aussi pour l'absorption de rayonnements plus énergétiques tels que les rayons X [51].

III.12.2 Structure d'une cellule CdTe

III.12.2.1 La Structure cristalline du CdTe

Deux structures cristallines sont possibles dans le cas d'un composé binaire : la structure de type hexagonale compacte (wurtzite) et celle de type cubique (blende de zinc). La structure cristallographique du CdTe est du type zinc-blende. Les atomes de cadmium et de tellure sont disposés selon deux réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube du réseau. Les nœuds d'un des réseaux cubiques à faces centrées sont occupés par les atomes de cadmium (Cd) tandis que ceux de l'autre réseau sont occupés par les atomes de tellure (Te) (figure III-11). Ainsi, autour de chaque atome d'une espèce, quatre atomes de l'autre espèce sont disposés aux sommets d'un tétraèdre régulier [51].

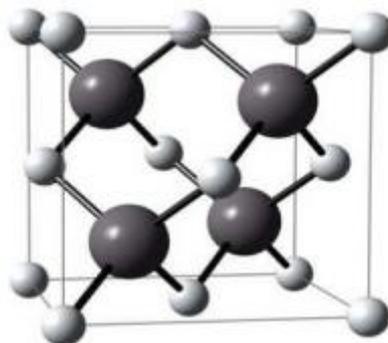


Figure (III.11) : Maille élémentaire de la structure cubique de CdTe. Les sphères claires représentent les atomes de cadmium et les sphères foncées ceux de tellure.

III.13 Fabrication de cellules solaires à base de CdTe

Les cellules solaires CdTe sont traitées sur le verre avant, donc la première couche est un TCO pour l'avant contact. Elle est suivie par la couche de fenêtre CdS et la couche d'absorbeur CdTe, Un contact arrière.

Après utilise la technique de dépôt de l'absorbeur CdTe, ensuite la sublimation rapprochée (CSS) pour déposer environ 0,1 - 0,2 μm de CdS et environ 5 - 10 μm de CdTe séquentiellement [52].

Dans la technique CSS, la source et le substrat sont placés à courte distance l'un de l'autre (1mm à quelques cm, selon la taille) sous vide grossier (0,1 à 1 Pa). La source et le substrat sont chauffés à une température élevée (dans la plage de 500 ° C), la source étant légèrement supérieur température plus élevée que le substrat [53].

Après le dépôt, la jonction CdS-CdTe doit être «activée» pour atteindre un haut photovoltaïque gains d'efficacité.

Le processus implique un recuit à des températures comprises entre 400 ° C et 500 ° C la présence d'espèces contenant du Cl, généralement du CdCl₂ [54].

La cellule solaire à base de CdTe la plus efficace produite à ce jour est celle fabriquée par Wu et Collègues à NREL [55].

Un avantage essentiel des cellules solaires en couches minces est la possibilité de connexion série automatisée de cellules dans un module. Toutes les couches sont déposées à la taille du module complet. Après dépôt, la ou les couches TCO sont modelées par laser ou mécanique tracé sur toute la largeur du substrat. Après le dépôt du CdS et la couche CdTe et le traitement d'activation, un deuxième scribe est donné qui laisse la couche TCO. Cela est possible car la couche de TCO est généralement beaucoup plus dure et adhérente que les couches semi-conductrices. Dans cette seconde coupe, la ou les couches de métallisation forment une interconnexion entre la cellule gauche et la cellule droite. Un troisième scribe isole ensuite le contact arrière des deux cellules l'une de l'autre. Cette technologie de connexion série intégrée peut être automatisé pour gérer un module complet de 60 x 120 cm² à haut débit (par exemple 2 minutes) [53].

La nouvelle fabrication de dispositif CdTe processus développé au NREL. Comparé au conventionnel processus de fabrication, il existe plusieurs nouveaux aspects ce processus de périphérique CdTe. Tout d'abord, une nouvelle structure de dispositif Cd₂ SnO₄ / Zn₂ SnO₄ / CdS / CdTe développé au NREL a été utilisé dans le nouveau processus. Dans la structure du dispositif modifiée, le film Cd₂ SnO₄ (CTO) remplace le film SnO₂ TCO conventionnel comme couche de contact avant, et un film Zn₂ SnO₄ (ZTO) est intégré dans l'appareil en tant

que couche tampon. Nous avons démontré que les performances et la reproductibilité de l'appareil peuvent être considérablement améliorées en utilisant cet appareil modifié structure [56-60].

Par exemple, les films CTO TCO ont une conductivité plus élevée, une transmission plus élevée et une plus douce surface par rapport aux films conventionnels SnO₂. Les trois premières couches (y compris la couche CTO TCO, le tampon ZTO et couche de fenêtre CdS) sont préparés par la même technique de dépôt - pulvérisation magnétron RF dans la pièce Température. La pulvérisation RF est une technologie mature avec évolutivité de la production démontrée. Ensuite, le nouveau processus n'a qu'un seul segment de chauffe dans tout l'appareil Processus de fabrication. La recristallisation du premier trois couches et l'inter diffusion aux trois interfaces (y compris les CTO / ZTO, ZTO / CdS et CdS / CdTe interfaces) sont achevés lors du dépôt de CdTe par la technique CSS [61].

III.14 Propriétés électriques

La structure de bande du CdTe présente une bande d'énergie interdite de largeur E_g séparant la bande de valence quasiment remplie d'électrons de la bande de conduction quasiment vide. Le niveau de Fermi noté E_f est défini comme l'énergie à laquelle la probabilité théorique d'occupation par les électrons est de 0,5. Pour un matériau intrinsèque, le niveau de Fermi est situé au milieu de la bande interdite, un dopage de type n le rapproche de la bande de conduction tandis qu'un dopage P le rapproche de la bande de valence [51].

Le tableau suivant résume quelques propriétés électriques du CdTe

Tableau (III.1): les propriétés électriques du CdTe [51].

Le gap (E_g)	1.44 eV
La mobilité des trous	60 à 90 cm ² /v.s
La mobilité des électrons	800 à 1100 cm ² /v.s
Conductivité	P

III.15 Toxicité

Le cadmium est toxique. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2g de Cd [62].

III.16 La technologie GaAs

III.16.1 le matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un matériau à gap direct. Composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. en comparaison avec le Si, il possède un fort coefficient d'absorption (90% des photons sont absorbés dans une épaisseur de 3 μ m) [63], une forte mobilité des électrons [64] [65], une forte résistance à la radiation solaire. Ainsi qu'une forte stabilité à température élevée et peut être facilement transformé en semi-conducteur ternaire. D'un autre côté, le Si a quelques avantages par rapport au GaAs. Il est moins cher, il se fabrique sur des grandes plaquettes (jusqu'à 12 pouces) et la durée de vie des porteurs minoritaires est plus longue qu'avec le GaAs [65]. Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite direct, de valeurs 1.42eV [66].

III.16.2 Fabrication de GaAs

L'arséniure de gallium cristallin est un peu plus difficile à obtenir que le silicium, car le gallium et l'arsenic réagissent de manière exothermique lorsqu'ils sont combinés. Le moyen le plus courant de faire croître des cristaux de GaAs est la méthode Czochralski (LEC) encapsulée dans un liquide. Dans cette méthode, le cristal GaAs est tiré de la masse fondue. Le GaAs fondu doit être confiné par une couche d'oxyde borique liquide. L'astuce consiste à créer la fonte GaAs en premier lieu. Plusieurs moyens ont été développés, tels que la fusion du Ga puis l'ajout d'oxyde borique, puis l'injection du As à travers un tube de quartz [67].

Cependant, la plupart des cellules GaAs modernes sont préparées par croissance d'un film de GaAs sur un substrat approprié. La structure de cellule GaAs commence par la croissance d'une couche de GaAs de type n sur un substrat, typiquement Ge. Puis une couche de p-GaAs est développée à partir de la région de jonction et de collecte. La couche supérieure de GaAlAs de type P a une bande interdite d'environ 1,8 eV. Cette structure réduit la recombinaison minoritaire de la surface porteuse et transmet les photons sous le niveau de 1,8 eV à la jonction pour une absorption plus efficace [68].

Le processus de croissance épitaxie implique le passage de gaz appropriés contenant les constituants cellulaires souhaités sur la surface du substrat chauffé. Lorsque les gaz entrent en contact avec le substrat, le H ou le CH₃ attaché à l'In ou au P ou au Ga sont libérés et l'In, le P ou le Ga se fixe au substrat. Par conséquent, pour faire croître une couche d'InP de type p, une combinaison de triméthyl indium, de phosphine (pour P) et de diéthyl zinc (pour les impuretés accepteurs) est mélangée dans les proportions souhaitées et passée sur le substrat chauffé

pendant un temps prédéterminé jusqu'à ce que l'épaisseur de la couche est obtenue. Le processus est répété avec différents mélanges de gaz provenant des autres couches à l'épaisseur souhaitée [69].

III.16.3 Avantages de GaAs

- Une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
- Leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par leur augmentation de température que les sondes peuvent rencontrer [70].

III.16.4 Application de GaAs

Domaine d'application en électronique (LED infrarouge, laser, fibre optique et cellules solaires) [71].

III.17 Etude comparative

Tableau (III.2) : comparaison entre les matériaux de couches minces [71].

Cellule solaire	Surface (cm ²)	Rendement (%)
GaAs	0.9927	28.8
CIGS	0.9927	21
CdTe	1.0623	21
Silicium amorphe	1.001	10.2

III.18 Conclusion

Les cellules solaires à couche mince en a-Si, le CIGS, le CdTe et le GaAs sont dans un état de développement avancé et trouveront sans aucun doute une utilisation future dans l'espace et applications terrestres. Ils montrent la promesse de faible coût, poids léger et grande surface. Dans ce chapitre on a étudié les procédés de fabrication de chaque matériau et leurs propriétés électriques ainsi que les structures, avantages, inconvénients, et matériau semi-conducteur.

Références

- [1]. Stephan, U.; Kuske, J.; Frammelsberger, W.; Lechner, P.; Psyk, W.; Schade, H.; « Large area deposition technique for PECVD of amorphous silicon [solar cells] », Photovoltaic Specialists Conference, 1997, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 29 Sept.-3 Oct. 1997 Page(s):647 – 650, Digital Object Identifier 10.1109/PVSC.1997.654172.
- [2]. R. H. Michel Israël, Christophe Lerouge, Raphaël Allegre, Rémi Delville. (2006) Mission pour la Science et la Technologie. Nanosciences, Microelectronique, Materiaux.
- [3]. D. Lincot. (2008) appel international de scientifiques pour l'accélération du développement de l'énergie photovoltaïque. Les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat.
- [4].Sana HARIECH, « Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) ». Mémoire de Magistère de l'université Mentouri– Constantine, 2009.
- [5]. Benabdallah Nadia : «PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SEMI-CONDUCTEURS (Si monocristallin et Ge) ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE Si et SiGe», Thèse de Magister, 2006, Université Abou BekrBelkid de Tlemcen.
- [6]. S. Berreh, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbes,(2006).
- [7]. J.M.Romàn, “State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications”, Advanced Photovoltaic Cell Design, EN548, 2004.
- [8].HfayedMassika « Simulation numérique d'une Cellule solaire (p/n) en GaAs », Mémoire de fin d'étude en Master, Univ-Biskra, 2014.
- [9].Y.Veschitti, thèse doctorat, «Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université Louis Pasteur Strasbourg I, (2005).
- [10].S.Fay, thèse doctorat, « l'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (2003).
- [11].R. Valaski et al « Polythiophène thin films electrochemically deposited on sol-gel based TiO₂ for photovoltaic application», Thin Solid Film, (2010). 1514-1515.
- [12].P. Chabloz Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (1996) p.5.
- [13].H. Schmidt, E.R. Fotsing, G. Borchardt, R. Chassagnon, S. Chevalier, M. Bruns, Appl. Surf. Sci. 252 (2005) 1460.
- [14].H. Petersson, M. Holmberg, Sens. and Actuators Chem.: B 111–112 (2005) 487.
- [15].R. Saleh, L. Munis, W. Beyer, Thin Solid Films 426 (2003) 117.

- [16].B. E. Pieters, "Characterization of Thin-Film Silicon Materials and Solar Cells through Numerical Modeling", these Ph.D. Université de Technologie de Delf, 2008.
- [17].Y. Sayade, "Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière", thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [18].Article issu d'Internet: <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P14.HTM>.
- [19].J. B. Choi, D. C. Yun, Y. I. Park and J. H. Kim, "Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon Thin-Film Transistors Fabricated at 150°C", J. Non-Cryst. Solids, Vols. 266-269, p. 1315, 2000.
- [20].G. N. Parsons, "Surface Reactions in Very Low Temperature (<150°C) Hydrogenated Amorphous Silicon Deposition, and Applications to Thin Film Transistors", J. Non-Cryst. Solids, Vols. 266-269, p. 23, 2000.
- [22]. R. A. Street, "Hydrogenated Amorphous Silicon", Cambridge University Press, Cambridge, p. 372, 1991.
- [23]. H. Mathieu. H. Fanet. Physique des semiconducteurset des composants Electroniques, Edition Dunode, Paris, 2009.
- [24].L.Francis .Physique et technologie des semi-conducteur, presses Polytechnique et universitaire Romandes (PPUR), Paris, 1994.
- [25].G.K.Reeves. H. B.Harrison: Obtaining the specific contact résistance from transmission line model measurements. Electron DeviceLetters, 3(5):m-ii3.
- [26]. S. Amtablian Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique. Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées LYON, 11 déc. (2008) p.27.
- [27]. T. Brammer, H. Stiebig Journal of Applied Physics, vol. 94 (2003) pp.1035-1042.
- [28]. B. Rech and H. Wagner Applied Physics A, vol. 69 (1999) pp.155-167.
- [29]. J. Yang, A. Banerjee, S. Guha Applied Physics Letters, vol. 70 (1997) pp.2975-2977.
- [30]. B. von Roedern, H.S. Ullal, in: Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic SpecialistsConference, 161 (2008).
- [31]. K. Djessas, S. Yapi, G. Massé, M. Ibannain, J. L.Gauffier ; J. Appl. Phys. 95 (2004) 4111.
- [32]. geology.com/minerals/chalcopyrite.shtml, consulter le 27/06/2020.
- [33]. J. H. Schön, E. Arushanov, Ch. Kloc and E. Bucher, « Electrical and photoluminescence properties of CuInSe₂ single crystals", Appl. Phys., Vol. 81, 1997, pp. 6205.

- [34]. M. V. Yakushev, A. V. Mudryi, V. F. Gremenok, E. P. Zaretskaya, V. B. Zalesski, Y. Feofanov and R. W. Martin, « Influence of growth conditions on the structural quality of Cu(InGa)Se₂ and CuInSe thin films », *Thin Solid Films*, Vol. 451-452, 2004, pp. 133.
- [35]. L. Ribeaucourt, G. Savidand, D. Lincot and E. Chassaing. « Electrochemical study of onestep electro deposition of copper-indium-gallium alloys in acidic conditions as precursor layers for Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells », *ElectrochimicaActa*. Vol. 56, 2011, pp. 6628.
- [36]. H. Sakata and H. Ogawa, « Optical and electrical properties of flash-evaporated amorphous CuInSe₂ films », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 63, 2000, pp. 259.
- [37]. H. Neff, P. Lange, M. L. Fearheiley and J. Bachmann, « Optical and electrochemical properties of CuInSe₂ and CuIn₂-CuInSe₂ alloys », *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 47, 1985, pp. 1089.
- [38]. W. Shockley, « *Electrons and Holes in Semiconductors* », D. Van Nostrand Co.,Princeton, NJ, 1956, pp. 254.
- [39]. M. Bouafia&L.Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [40]. Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «*Applied Photovoltaic*», Bridge Printer,Sidney, (1994).
- [41]. M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, "Solar Annual 2012: The Next Wave." Photon Consulting, 2012.
- [42]. Les cellules photovoltaïques, coeur des panneaux solaires 30/09/2013 – Par Quentin Manguit, Futura-Sciences (page 19-23).
<http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/dossiers/d/developpement-durable-cellules>.
- [43]. S. H. Wei and A. Zunger, "Band offsets at the CdS/CuInSe₂ heterojunction", *Appl.Phys. Lett.*, 63 (1993) 2549-2551.
- [44]. T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura, Y. Hamakawa, T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama and M. Kitagawa, "Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation". *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 67 (2001) 83-88.
- [45]. A. J. Nelson, D. W. Niles, D. Rioux, R. Patel and H. Hochst, "Soft x-ray photoemission investigation on the effect of indium doping in CdS/CuInSe₂ heterojunction formation", *J. Appl. Phys.*, 72 (1992) 5888.

- [46]. T. Maeda, W. Gong, and T. Wada “Crystallographic and optical properties and bandstructures of CuInSe_2 , CuIn_3Se_5 , and CuIn_5Se_8 phases in Cu-poor $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ pseudo-binary system” Japanese Journal of Applied Physics 55, 04ES15 (2016).
- [47]. R. Guillo, «les différents types de cellules photovoltaïques» (2014).
- [48]. NREL, «Cost Analysis of Solar Photovoltaics » IRENA, Abu Dhabi, (2012).
- [49]. Rachel Hoffman, 2009, “Materials for CZTS Photovoltaic Devices”, Chemical Engineering, Cornell University.
- [50]. Mme. D Ouarda . Thème de Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$. thèse de doctorat. Université Mentouri de CONSTANTINE 1.2013.
- [51]. Characterization of the Energy Band Diagram of Fabricated $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ Thin Film Solar Cells, Rasha A. Abdullah, Mohammed. A. Razooqi, and Adwan N. H. Al-Ajili
- [52]. “Cadmium Telluride Solar Cells”, D. Bonnet, Clean Electricity from Photovoltaics, (ed. M. Archer, R. Hill), Imperial College Press, London, 2001.
- [53]. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications, (ed. J. Poortmans, V. Arkhipov), “Chapter 7: Cadmium Telluride Thin Film Solar Cells: Characterization, Fabrication and Modeling”, M. Burgelman, (John Wiley, Chichester, England) 277-314.
- [54]. “Thin-Film Solar Cells Based on the Polycrystalline Compound Semiconductors CIS and CdTe”, M. Powalla, D. Bonnet, Adv. In OptoElectronics, Vol. 2007, 97545.
- [55]. “16.5 %-efficient CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cell”, X. Wu, J.C. Keane, R.G. Dhere, C. DeHart, A. Duda, T.A. Gessert, S. Asher, D.H. Levi, P. Sheldon, Conf. Proceedings 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, 22-26 October 2001, 995-1000.
- [56]. X. Wu, T.J. Coutts, P. Sheldon, and D.H. Rose, U.S. Patent 5922142, (1999).
- [57]. X. Wu, P. Sheldon, T.J. Coutts, D.H. Rose, W.P. Mulligan, and H.R. Moutinho, Proc. 14th NREL/SNL PV Program Review Meeting, pp. 693-702 (1996).
- [58]. X. Wu, P. Sheldon, T.J. Coutts, D.H. Rose, and H.R. Moutinho, Proc. 26th IEEE PVSC, pp. 347-350 (1997).
- [59]. X. Wu, P. Sheldon, Y. Mahathongdy, R. Ribelin, A. Mason, H.R. Moutinho, and T.J. Coutts, Proc. 15th NREL/SNL PV Program Review Meeting, pp. 37-41, (1998).
- [60]. X. Wu, R. Ribelin, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, S. Asher, D.H. Levi, A. Mason, H.R. Moutinho, and P. Sheldon, “High-Efficiency $\text{Cd}_2\text{SnO}_4/\text{Zn}_2\text{SnO}_4/\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}/\text{CdS}/\text{CdTe}$ Polycrystalline Thin-Film Solar Cells”, to be published.

- [61].X. Wu, S. Asher, D.H. Levi, D.E. King, Y. Yan, T.A. Gessert, and P. Sheldon, Interdiffusion of CdS and Zn₂SnO₄ Layers and its Application in CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells, to be published.
- [62].Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, école doctorale : STITS,2014.
- [63].M. Green, "Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications", University of New South Wales, 1998.
- [64].Brozel MR, Stillman GE, "Properties of Gallium Arsenides", 3rd edition, Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [65]. A. R. Jha, "Solar cell Technology and applications", Taylor & Francis Group, p.26,2010, ISBN 978-1-4200-8177-0.
- [66].M. Green, "Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications", Chap.1 Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982.
- [67].Williams, R., Modern GaAs Processing Methods, Artech House, Norwood, MA, 1990.
- [68].Lammasniemi, J., et al., Proc. 26th IEEE PV Spec. Conf., 1997, 823-826.
- [69].Kazmerski, L.L., Proc. 29th IEEE PV Spec. Conf, 2002, 21-27.
- [70].Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse magister, université FERHAT ABBAS – SETIF,2011.
- [71]. A. Mekemeche, « 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, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem,2017.

Chapitre IV

La troisième génération cellules PV

IV.1 Introduction

Un semi-conducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique, ou électronique des plastiques. Par organique, on entend que les molécules utilisées sont à base de carbone [1].

Et lorsque nous posons la question de savoir pourquoi les cellules solaires organiques ont attiré une grande attention ?, nous trouvons ses multiples caractéristiques, qui sont: Facilité de traitement, Souplesse mécanique, ce qui leur permettra de s'intégrer facilement dans les appareils nomades tel que les téléphones portables, les ordinateurs portables..., Disponibilité illimitée, Moins cher que les matériaux inorganiques [2].

IV.2 Les semi-conducteurs organiques

IV.2.1 Origines de la conductivité

Lorsque deux orbitales atomiques s'associent, elles donnent naissance à une orbitale moléculaire. Celle-ci peut avoir deux niveaux d'énergie. Dans le cas de la liaison π , la plus basse énergie δ est dite liante, formant la bande de valence : HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), alors que la plus haute δ^* est dite anti-liante, formant la bande de conduction : LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Ce band gap confère le caractère semi-conducteur.

Le caractère semi-conducteur d'un matériau organique est dû aussi à la présence d'un système conjugué, c'est-à-dire à l'alternance de liaison carbone simple (δ) et double ($\delta+\pi$). La différence de longueur des liaisons permet d'envisager les deux formes suivantes qui sont énergétiquement équivalentes [3].

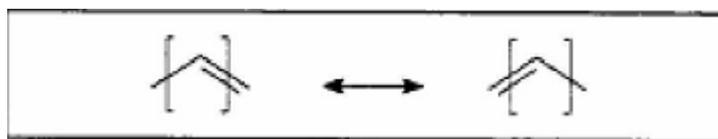


Figure (IV.1) : Formes d'un système conjugué.

IV.2.2 Matériaux organiques

Les matériaux organiques semi-conducteurs se classent en deux catégories : les polymères conjugués et les petites molécules.

IV.2.2.1 Les polymères conjugués

La majorité des polymères conjugués sont des donneurs d'électrons. Dans la famille des polymères conjugués (polymères donneurs d'électrons de type n), [4] on distingue trois familles principales :

- Les poly (p-phenylene vinylene) (PPV)
- Les polythiophènes (PT)
- Les polyfluorènes (PF)

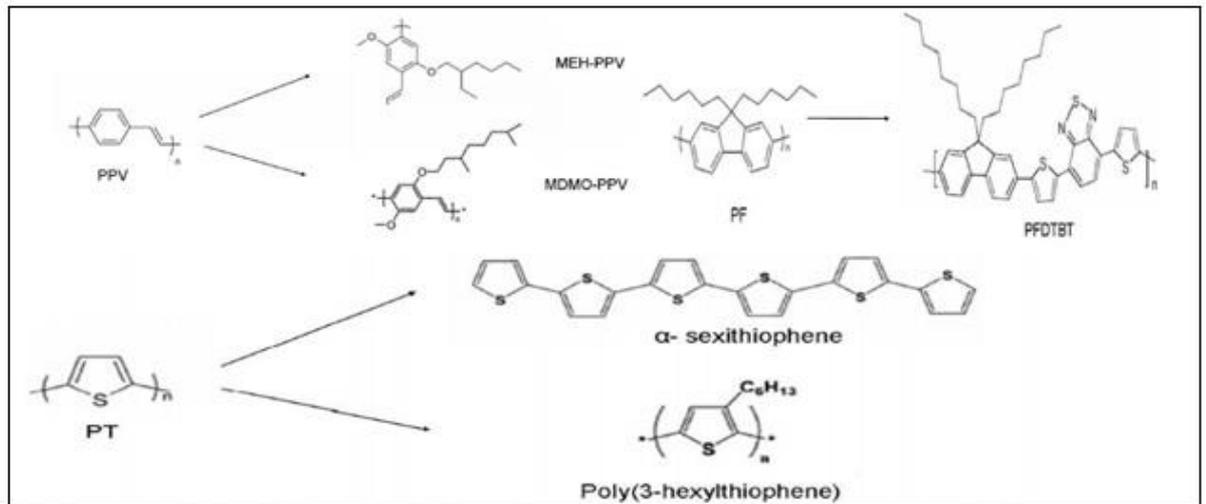


Figure (IV.2): Les polymères conjugués et leurs dérivés utilisés dans les cellules photovoltaïques organiques [4]

IV.2.2.2 Petites molécules

On peut distinguer deux catégories : les petites molécules accepteurs et donneuses d'électrons, parmi les conditions sur les petites molécules accepteurs pour réaliser la configuration photovoltaïque doit avoir une mobilité des électrons élevée et une affinité électronique plus élevée que celle du semi-conducteur donneur [5]. Parmi les molécules répondant ces critères sont :

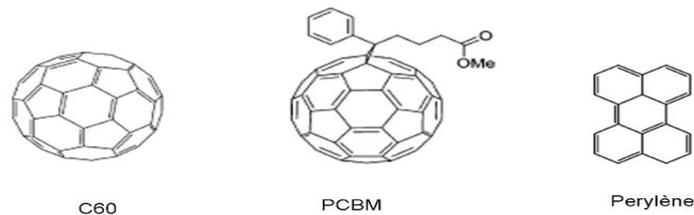
Fullerène C₆₀ : La molécule de C₆₀ appelé fullerène qui est composée de 60 atomes de carbone.

Le pentacène : le pentacène qui est une chaîne aromatique d'hydrocarbures composée de cinq noyaux.

Le phthalocyanine : Une des « petites » molécules les plus employées en tant que matériau donneur est le phthalocyanine de cuivre. Les phthalocyanines ont l'avantage de posséder une bonne stabilité et des hautes mobilités.

Les petites molécules donneuses d'électrons sont beaucoup plus nombreuses que les molécules accepteuses. La structure moléculaire des petites molécules les plus utilisées dans les cellules PV est donnée en **figure (IV.3)**.

- Molécules accepteuses d'électrons(type n)



- Molécules donneuses d'électrons (type p)

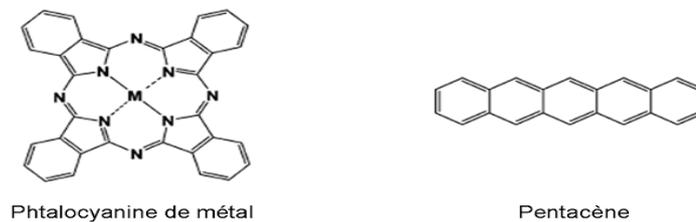


Figure (IV.3) : les petites molécules les plus utilisées dans PVO [5]

IV.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

.Le processus de conversion se déroule alors en quatre étapes successives :

IV.3.1 Absorption des photons et génération d'excitons

L'absorption des photons dans le matériau se traduit par le passage d'un électron du niveau de la HOMO vers celui de la LUMO. Le couple électron-trou ainsi créé est appelé exciton. Les excitons possèdent une durée de vie très courte, de l'ordre de la nanoseconde, au-delà de laquelle ils peuvent disparaître de manière radiative ou non radiative (vibration ou rotation des molécules).[5]

IV.3.2 Diffusion des excitons

L'exciton créé diffuse dans le matériau. Pour pouvoir conduire ensuite à la génération d'électricité, ce exciton va devoir se dissocier à une interface entre le matériau donneur et le matériau accepteur. Sinon, il va se désexciter de manière radiative ou non radiative [5]

IV.3.3 La dissociation de l'exciton

La dissociation des excitons en charges libres nécessite un champ électrique fort. Un champ peut être obtenu en appliquant une tension externe ou grâce à la différence de potentiel

rencontrée à l'interface entre le matériau donneur HOMO et le matériau accepteur LUMO. En effet, ces deux matériaux possèdent des niveaux énergétiques différents, induisant un champ électrique local, si l'exciton atteint cette interface, sa dissociation peut alors être observée [6]

IV.3.4 Transport des charges et collecte aux électrodes

Les porteurs de charges doivent être collectés aux électrodes pour générer un courant électrique. De plus, un équilibre entre les mobilités des trous et des électrons, respectivement dans le donneur et l'accepteur, est nécessaire pour éviter l'apparition de charges d'espace. Le transport des charges électriques est en outre très dépendant de la pureté des matériaux puisque les impuretés se comportent comme des pièges [6].

La collection des charges peut être optimisée, soit par l'amélioration de la cristallinité et la pureté de la couche active, soit par l'utilisation de couches intermédiaires dont le rôle est de favoriser leur évacuation vers leurs électrodes respectives.

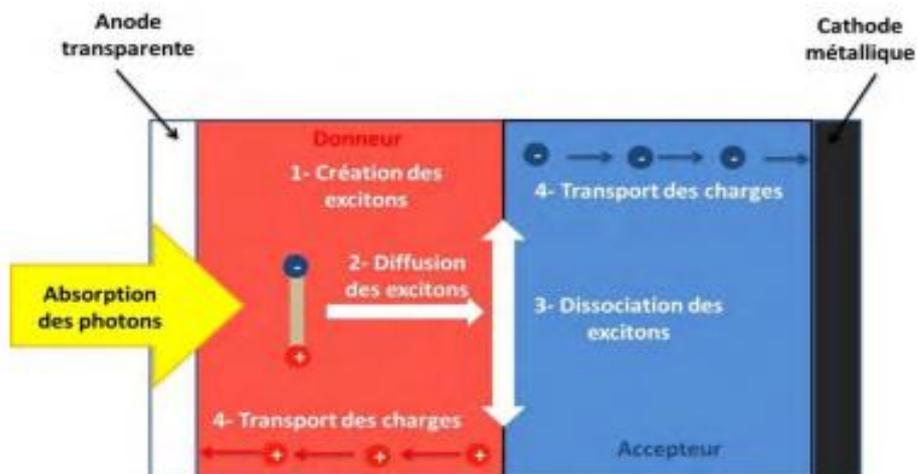


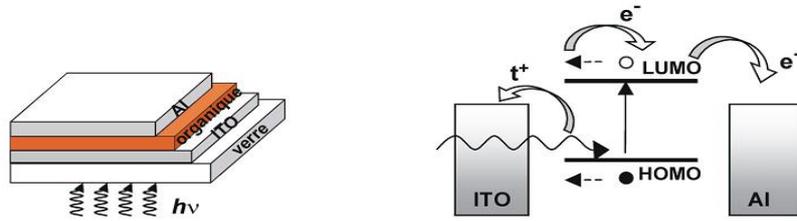
Figure (IV.4) : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

IV.4 Architecture d'une cellule solaire organique

IV.4.1 Structure monocouche (Schottky) [7]

Appelée généralement structure Schottky, elle consiste en un film organique déposé entre deux électrodes métalliques (figure IV.5). L'oxyde d'indium et d'étain (noté ITO pour Indium Tin Oxyde) est souvent utilisé pour l'anode et un métal avec un travail de sortie plus faible que l'ITO tel que Al, Ca ou Mg pour la cathode. Le choix des métaux est déterminant pour réaliser un contact ohmique d'un côté du matériau organique et rectifiant de l'autre côté. En effet, le champ électrique généré à l'interface bloquante, forme une barrière de potentiel. Cette barrière est responsable de la dissociation des excitons.

Si l'exciton est créé près de l'interface ohmique, il doit traverser toute l'épaisseur du matériau pour atteindre le site de dissociation. Or, la longueur de diffusion est faible, de l'ordre de 5 à 30nm.



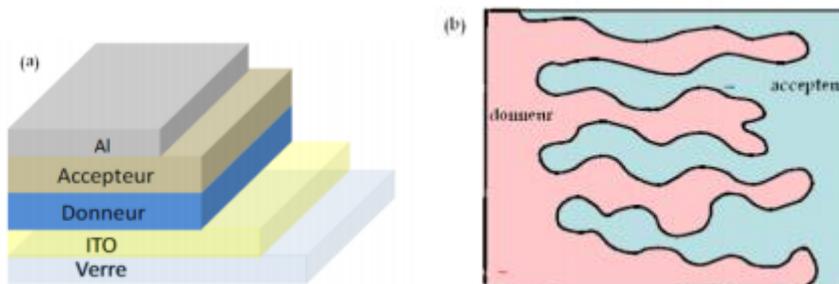
Figure(IV.5) : structure monocouche [8]

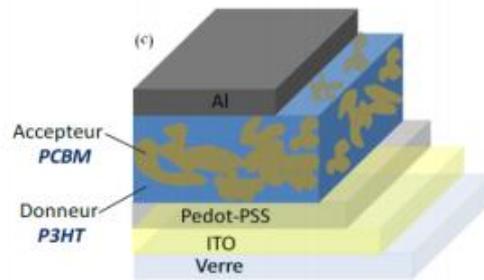
Structure d'une cellule de type Schottky (à gauche). Représentation des niveaux d'énergie d'un contact ITO/organique/Al (à droite).

IV.4.2 Structures bicouche

Appelée aussi structure hétérojonction ou jonction PN, elle est composée de deux matériaux de natures différentes (donneur et accepteur d'électrons) mis en contact entre deux électrodes **figure (IV.6)**. Dans ce cas, la zone active pour la conversion photovoltaïque se trouve à l'interface entre le donneur et l'accepteur. Le champ électrique créé à cette interface est dû à la différence entre le potentiel d'ionisation du donneur et l'affinité électronique de l'accepteur. Il permet la dissociation des excitons qui atteignent ce site. Ainsi, les charges libres vont migrer séparément vers leurs électrodes respectives : (les électrons par l'accepteur vers la cathode et les trous par le donneur vers l'anode).

Les cellules en structure bicouche peuvent être séparées en deux groupes : les hétérojonctions planaires **(a)** et les hétérojonctions en volume. Ces dernières peuvent s'arranger de deux manières différents : elle peuvent former une jonction « inter digitée » **(b)**, ou une jonction « interpénétrée » **(c)**





Figure(IV.6) : Trois types d'hétérojonctions rencontrées dans les cellules solaires organiques [9]

Les hétérojonctions planaire D/A sont, quant à elles, principalement fabriqués par l'évaporation sous vide de matériaux moléculaires appelés aussi (petites molécules) comme le PTCDA, PTCBI...

pour la structure de type hétérojonction en volume, la couche active est constituée d'un mélange physique entre le donneur et l'accepteur d'électrons. Ce type de cellules permet de multiplier les zone inter faciales entre le matériau donneur et le matériau accepteur et de réduire les problèmes des pertes par recombinaison des excitons générés loin de l'interface . cette structure a été développée parallèlement pas les équipes de A.Heeger et R.Friend, en 1995 [10,11] qui on utilisé comme couche active un mélange de MEH-PPV comme donneur et du CN-PPV comme accepteur, avec un rendement énergétique 0,9%.

Par la suite, des études récentes sur le même système ont montré des rendements de conversion énergétique de 1,7 % après optimisation par recuit thermique [12]

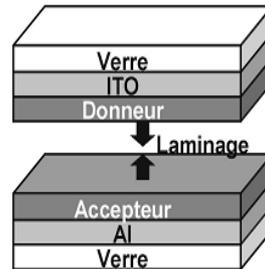
IV.4.3 Structure p-i-n

Un des problèmes associés aux cellules hétérojonction (interpénétré) est qu'il difficile de contrôler la façon Dont le donneur et l'accepteur s'organisent.une solution consiste à associer les avantages de la structure bicouche à l'hétérojonction volumique en jouant à la fois sur la dissociation des excitons et le transport des charges aux électrodes tout limitant les mécanismes des recombinaisons. Une solution consiste donc à utiliser les techniques développées dans le cadre des OLED et des semi-conducteurs inorganiques à savoir l'architecture PIN.une zone active non dopée (I) est prise en sandwich entre deux zones dopées qui assurent un transport des charges vers les électrodes de façon sélective et avec très peu de pertes ohmiques dues aux fortes conductivités des zones Pet N .

La couche intrinsèque peut être définie par un mélange de matériaux donneur et accepteur d'électrons. A l'origine ce type de structure a été réalisé par Hiramoto. [13]

IV.4.4 Structure laminée

Dans cette structure, le donneur et l'accepteur sont déposés sur l'anode (ITO) et la cathode (Al) respectivement. En suite, les deux plaquettes obtenues sont mises en contact, en appliquant une légère pression et en chauffant l'une d'elle (**figure IV.8**). Ainsi, les molécules peuvent diffuser d'une couche à l'autre pendant le processus de laminage pour former une couche de mélange D+A, ou les excitons peuvent se dissocier. La structure laminée présente l'avantage d'élaborer et de traiter indépendamment les deux couches organiques.



Figure(IV.7): structure laminée [7]

IV.5 Types des cellules organiques

IV.5.1 Cellules de type Graetzel [14]

Le professeur Graetzel, et ses collègues ont élaboré une cellule solaire avec un rendement de conversion d'énergie supérieure à 7% en 1991 et 10% en 1993. Cette cellule solaire est appelée Dye-sensitized Solar Cell (cellule solaire sensibilisée par un colorant) ou cellule Graetzel (en référence à son inventeur le professeur Michel Graetzel).

Pour fabriquer une cellule solaire standard de type Graetzel, nous suivons les étapes suivantes :

- On met du scotch sur la face conductrice de la lame ITO.
- On met la pâte de TiO_2 et on l'aplatit sur le même côté du verre ITO.
- On met cette électrode sur une plaque de cuisson et on la chauffe à environ $150^{\circ}C$ pendant 10 minutes.
- On prépare la solution de colorant.
- On plonge l'électrode de TiO_2 dans la solution de colorant pendant 10 minutes.
- On met du graphite avec un crayon foncé sur la surface conductrice d'un autre verre ITO comme une autre contre-électrode.
- On sort l'électrode de TiO_2 et on la plonge dans la solution de teinture.

- On place l'épaisseur sur l'électrode de TiO_2 et on met quelques gouttes de la solution électrolyte dans le trou.
- On associe l'électrode à la contre-électrode, après on les fixe avec les clips.

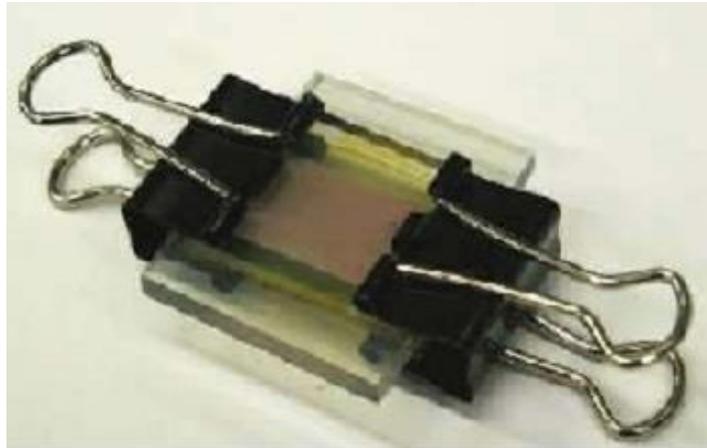


Figure (IV.8) : Photo final de la cellule

IV.5.2 La pérovskite

Une cellule solaire à pérovskite est constituée d'un substrat verre/FTO sur lequel est déposé l'oxyde d'étain dopé au fluor FTO, et sur FTO est déposé le dioxyde de titane TiO_2 . Le TiO_2 sert à améliorer le transport d'électrons. La couche active est constituée d'un matériau pérovskite.

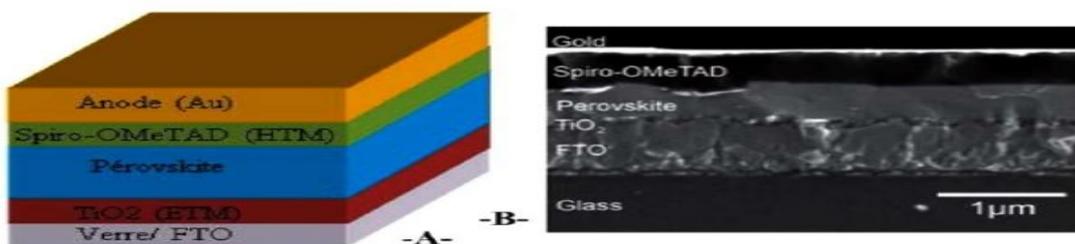


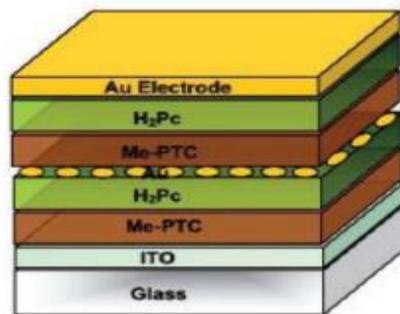
Figure (IV.9) : Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [15]

Les pérovskites ont récemment attiré beaucoup d'attention en raison de leur coefficient d'absorption élevé, grande mobilité de porteurs de charges, une longueur de diffusion de porteurs élevée et rendement important. La formule générale de la pérovskite est ABX_3 . Dans les cellules à base de matériaux à pérovskites, les matériaux semi-conducteurs organiques et inorganiques de type P sont utilisés comme matériau pour transporter les trous (HTM) [16] à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [15]

IV.5.3 Les cellules tandem

Des améliorations peuvent encore être apportées en empilant les cellules les unes sur les autres. L'objectif étant d'absorber la plus grande partie du spectre solaire tout en limitant les pertes par thermalisation. Ce concept, largement employé a permis d'atteindre des rendements de plus de 40 % dans le domaine du photovoltaïque inorganique et 6,7 % pour les cellules solaires organiques [17].

Pour réaliser une cellule tandem, le plus simple consiste à empiler deux cellules réalisées sur deux substrats différents. Cependant, pour des raisons de coût évidentes, cette solution n'est pas fiable. Il faut donc envisager de réaliser ces cellules de façon monolithique. La première structure « tandem » monolithique dans le domaine photovoltaïque organique a été développée par Hiramoto et al. En 1990 [19]. Il s'agit d'une structure qui consiste en empilement de deux cellules (sub-cellules) espacé par une couche métallique (Au). Chaque cellule est une bicouche jonction composée de 50 nm de H₂Pc (Phthalocyanine) et 70 nm d'un dérivé de perylene tetracarboxylic (Me-PTC).[19]



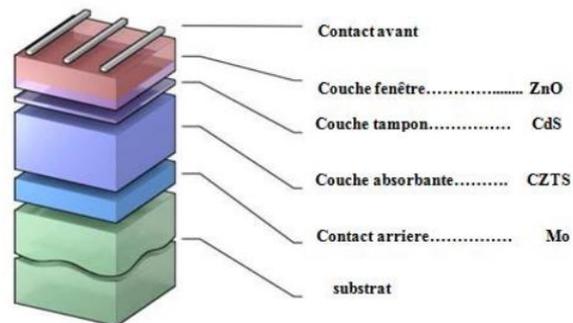
Figure(IV.10) : Structure d'une cellule tandem [18]

IV.5.4 Cellule czts

CZTs "cuivre, zinc, étain et soufre" est un semi conducteur type p avec une énergie de bande interdite directe pouvant être réglée dans la plage allant de 1,4 -1,56 eV et un coefficient d'absorption supérieur à 10^4 cm^{-1} , une cellule CZTs se compose de :

- Verre de protection
- Couche conductrice transparente d'oxyde de zinc
- Couche de sulfure de cadmium CdS
- La couche de CZTs
- Conducteur inférieur
- Substrat

Ces propriétés sont fortement souhaitées en matière photovoltaïque, donc c'est un semi-conducteur de choix. Ce matériau a servi de base à la fabrication de cellules solaires en couches minces dans de nombreux laboratoires du monde entier, D'autre part, les cellules CZTs utilisent des matériaux abondants non toxiques et peu coûteux. La disponibilité de cuivre, de zinc de l'étain et du soufre sur la croûte de notre terre sont de 50 ppm, 2.2 ppm et 260 ppm respectivement, alors que la disponibilité de l'indium est de 0.049 ppm sur la croûte de la terre qui est relativement très faible par rapport au zinc et à l'étain [20].



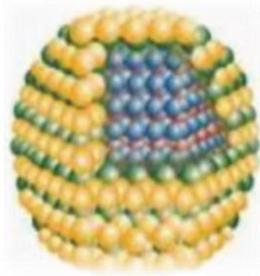
Figure(IV.11) : La structure de la cellule CZTs [20]

IV.5.5 Cellules solaires à base de points quantiques

Des cellules solaires à base de points quantiques (QD) ont été l'objet de plus de deux décennies de recherche dans l'espoir d'augmenter leur efficacité pour dépasser les cellules solaires à jonction unique.

À ce jour, aucun dispositif de travail unique n'a été développé dépasse l'efficacité d'une cellule solaire à jonction unique.

Questions fondamentales, y compris des hypothèses irréalistes impliquées dans les travaux théoriques, tendance à l'étirement observée résultats expérimentaux et absence de processus et de dimension le contrôle à l'échelle nanométrique existe avec la fabrication de cellules solaires basées sur QD peu susceptibles de jouer un rôle important dans la fabrication de générations futures de modules photovoltaïques. À base de silicium (Si) .la production photovoltaïque (PV) continuera de fournir croissance soutenue de l'industrie photovoltaïque. Cet article présente un examen des problèmes fondamentaux associés à la QD cellules solaires [21].

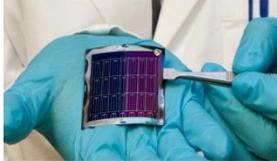


Figure(IV.12) : Cellules solaires à base de points quantiques [22]

IV.6 Etude comparative entre les différents types

Le tableau suivant montre une étude comparative entre les types des CSO :

<p>Cellules de type Grätzel</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Coût faible - Panneaux souples et légers - Esthétique : transparence et couleurs au choix - Stabilité des performances à haute température et au cours du temps (durée de vie estimée à 20 ans) - le rendement 15à18% [14] 	
<p>La pérovskite</p>	<ul style="list-style-type: none"> -cellules à pérovskites à grande surface -L'halogénure métallique de pérovskite est un matériau cristallin aux propriétés intéressantes. Récemment, - L'efficacité du transfert d'énergie est passée de 3% à plus de 22% en quelques années de recherche universitaire. - les cellules solaires à pérovskite sont sensibles à l'humidité.[23] 	
<p>Les cellules tandem</p>	<p>Pour réaliser une cellule tandem, le plus simple consiste à empiler deux cellules réalisées sur deux substrats différents. Cependant, pour des raisons de coûts évidentes, cette solution n'est pas viable. Il faut donc envisager de réaliser ces cellules de façon monolithique [18]</p>	

Cellule czts	les cellules CZTs utilisent des matériaux abondants non toxiques et peu couteux [20]	
Cellules solaires à base de points quantiques	les Cellules solaires à points quantiques synthétisés par solution possèdent un noyau inorganique entouré d'une couche d'encapsulation de matière organique -Même si l'efficacité des cellules solaires basées sur QD a améliorée de seulement 5% en 2010 [24] à près de 11% aujourd'hui, elle est encore loin derrière l'efficacité des cellules solaires à jonction unique (26,3%).	

Tableau(IV.1) : Etude comparative entre les types de SCO

IV.7 Applications des semi-conducteurs organiques

Les semi-conducteurs organiques offrent la possibilité de produire des éléments électroniques et des affichages économiques, souples et polyvalents. Les écrans organiques sont déjà commercialisés et leur conception simple, volume réduit et fortes performances leur ont permis de pénétrer rapidement le marché dominé actuellement par la technologie des cristaux liquides [25]. Parmi les nouvelles applications des technologies de semi-conducteurs organiques, on trouve :



Structure d'ombrage



Sacs solaires



Ecrans flexibles

IV.8 Fabrication des cellules photovoltaïques organiques

Une cellule Photovoltaïque Organique(OPV) est généralement fabriquée sur un substrat de verre recouvert d'ITO (couche mince – 150 nm – d'oxyde d'indium et d'étain possédant des bonnes propriétés de transparence dans le visible et de conductivité électrique). [26]

IV.8.1 Les étapes de fabrication [27]

IV.8.1.1 Produits utilisés

Les solvants utilisés comme l'éthanol, l'acétone, éthanol, iso-propanol et dichlorométhane anhydre (CH_2Cl_2) sont d'une haute pureté (de grade HPLC) et ne nécessitent aucune purification supplémentaire. Les autres agents chimiques tels que la poudre de zinc, l'acide chloridrique concentré sont aussi d'une grande pureté, ensuite (PEDOT:PSS) de type (Clevios PVP. AI4083) et Les électrodes de verre d'oxyde d'indium-étain (ITO).

IV.8.1.2 Les semi-conducteurs organiques utilisés

L'ester méthyle du [6,6]-phenyl-C₆₀-acide butyrique (PCBM)de grande pureté (99 %), a été obtenu de la compagnie Aldrich. Le tétra-tert-butylphthalocyanine de zinc (TTB-ZnPc), de grande pureté (99%).

IV.8.1.3 Préparation de la cathode à partir d'oxyde d'étain (ITO)

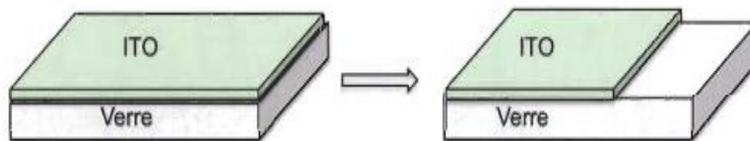
L'oxyde d'étain et d'indium (ITO) est l'un des matériaux les plus utilisés comme électrode pour la fabrication des CSOs et les diodes électroluminescentes (OLED, pour les LED organiques). L'intérêt de ce matériau réside dans le fait qu'il présente une bonne conductivité électrique et une propriété de transparence (90%) dans le visible, Ces panneaux sont découpés en lamelles de 2 x 2 cm.

IV.8.1.4 Gravure de l'anode d'ITO :

Avant leurs utilisations, les lamelles d'ITO doivent être gravées sur une partie de leur surface. les lamelles d'ITO utilisée dans ce travail ont été gravées sur un tiers de la surface

(figure 3.2). Pour ce faire, la procédure de gravure est réalisée par la réaction de la poudre de zinc avec l'acide chlorhydrique concentré effectuée de façon suivante:

- 1) La zone d'ITO désiré est protégée à l'aide d'un scotch tape, cette protection joue le rôle de masque.
- 2) La poudre de zinc est ensuite étalée sur la zone non protégée, puis quelques gouttes d'acide chlorhydrique sont déposées sur la poudre de zinc. Cette réaction très exothermique enlève le revêtement d'ITO et laisse le substrat de verre complètement dénudé.
- 3) La zone gravée est nettoyée (frotté bien fort pour enlever le reste d'ITO) à l'aide d'un coton-tige humide. Après quoi, les lamelles sont immergées dans l'eau pendant 30 à 40 secondes pour neutraliser le reste d'acide chlorhydrique.
- 4) Le scotch tape est retiré, les lamelles sont ensuite nettoyées par une suite de bain de solvants sous ultrason pendant 30 min chacun: Eau savonneuse, méthanol.
- 5) Enfin, les lamelles sont séchées et prêtes à passer à la seconde étape de nettoyage.



Figure(IV.13) : Schéma d'une lamelle verre/ITO avant et après gravure.

IV.8.1.5 Nettoyage des lamelles d'ITO

L'objectif principal de cette étape consiste à préparer l'ITO par des traitements de surface. La surface de l'ITO est dégraissée et nettoyée des impuretés par une suite de bain de solvants sous ultrason pendant 15 min chacun: eau distillée + détergent, eau distillée, acétone, éthanol et en fin isopropanol. Les échantillons sont ensuite séchés sous flux d'air

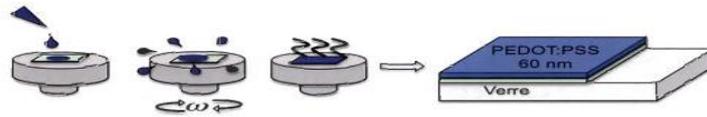
IV.8.1.6 Dépôt de la couche de PEDOT : PSS

Le PEDOT:PSS est un mélange de deux polymères, le poly(3,4 éthylènedioxythiophène) (PEDOT) et le poly(styrène sulfonate) de sodium (PSS). Le rôle principal de ce revêtement est d'optimiser le transfert des charges positives vers l'électrode d'ITO. Cette couche se trouve également à améliorer le contact entre l'électrode d'ITO et la couche organique.

Avant le dépôt de la couche de PEDOT : PSS, les lamelles ont été placées sur une plaque chauffante à 250°C pendant 15 min. Ce traitement vise à modifier les propriétés de tension de surface, afin de favoriser un dépôt uniforme de la couche de PEDOT : PSS.

Une fois cette étape terminée, les lamelles d'ITO ont été séchées sur plaque

chauffante à 130°C pendant 30 min. Ce traitement permet d'éliminer toute trace d'eau contenue dans le film de PEDOT : PSS et favorise aussi l'absorption de celui-ci sur la couche d'ITO.



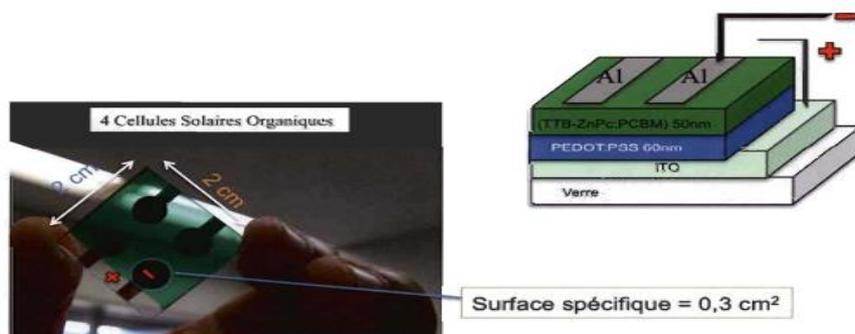
Figure(IV.14) : Dépôt de 60 nm de PEDOT : PSS par spin coating et image de l'appareil utilisé pour la mise en forme des films minces en solution.

IV.8.1.7 Caractérisation de l'anode

Cette caractérisation a pour but de vérifier qu'une fraction importante de la lumière visible peut pénétrer la CSO.

IV.8.1.8 Mise en forme de la couche active organique

La couche active organique est constituée d'un mélange de TTB-ZnPc et de PCBM. on utilise l'aluminium puisque son travail de sortie est d'environ 4,3 eV. L'utilisation de ces deux électrodes (ITO et aluminium) permet la création d'une structure asymétrique plus propice à la formation d'un champ électrique interne. La cathode d'aluminium est déposée sous vide à travers un masque qui définit la forme et la surface active des CSOs (0,3 cm² ou 30 mm²) (figure 3.6). Un tel vide est obtenu grâce à l'action d'une pompe mécanique, couplée à une pompe turbo moléculaire.



Surface spécifique = 0,3 cm²

Figure(IV.15): Schéma de la structure complète des cellules solaires organiques fabriqué Verre/ITO/PEDOT:PSS (60 nm)/TTB-ZnPc : PCBM (50 nm)/Al (100 nm), et image d'une lamelle comportant quatre cellules solaires de surface active 30 mm²

IV.9 Paramètres électriques et mécaniques d'un module PV à base d'organique

Le tableau suivant indique les paramètres électriques et mécaniques d'un module organique :

Tableau(IV.2) : les paramètres électriques et mécaniques d'un module organique

P_m (W)	0.375
I_{sc} (Ma)	110
V_{oc} (V)	6.92
I_{max} (mA)	78
V_{max} (V)	4.79
η (%)	4.7
FF	0.5
Ns	8
S (m ²)	0.008
M (kg)	0.1
Eg (eV)	4

IV.10 Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques organiques [28,29]

IV.9.1 Avantages

- Utilisation de multicouches: Plusieurs couches transparentes peuvent être superposées, ce qui augmentera l'efficacité des cellules..
- Coût plus faible que les cellules à silicium.
- la possibilité d'être déposée en grande surface
- la facilité de fabrication et de manipulation

IV.9.2 Inconvénients

- Ces cellules ne sont apparues sur le marché que récemment.
- Instabilité dans le temps: une cellule solaire doit être capable de produire de l'électricité pendant vingt ans au moins sans baisse de rendement significative.
- L'électrolyte actuellement utilisé majoritairement est instable. Les solvants le composant sont volatils et présentent un risque d'évaporation et même d'explosion de la cellule. Les sels d'iodure offrent un risque de corrosion de la cellule, entraînant ainsi des fuites de produits dangereux.

IV.10 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous devons nous concentrer sur l'impact des cellules solaires organiques sur l'environnement, qui est de consommer moins d'énergie dans la fabrication de cellules solaires organiques que dans Cellules solaires inorganiques. L'utilisation intensive des cellules solaires contribue à accroître l'utilisation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale et à faire des énergies renouvelables une source plus conviviale.

Références

- [1]. M .Merad Boudia, Etude et modélisation des cellules solaires organiques Application a une structure a hétérojonction en volume, Mémoire du Magister en physique énergétique et matériaux, l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen,2007 .
- [2]. A.J. Mozer and N.S. Sariciftci, 'Conjugated Polymer Photovoltaic Devices and Materials', Comptes Rendus Chimie, Vol. 9, N°5-6, pp. 568 – 577, 2006.
- [3].f. Monestier, thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Université Paul Cézanne, Université Pul Cézanne AIX-MARSEILLE III , 2008.
- [4]. M. Florent, Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques, Thèse doctorat à Université Paul cézanne Aix-Marseille,france 2008.
- [5]. T. Ibrahim, Modélisation et simulation des cellules solaires à base des matériaux organiques ,Application à la structure P3HT : PCBM, thèse de doctorat , Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes,2017.
- [6]. B. Damien, Etude des interactions électroniques aux interfaces des hétérojonctions organiques, thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2016
- [7].S.Alem-Boudjemline , "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques"these de doctorat,Université d'Angers,2004.
- [8]. M. Chakaroun, Evaluation de nouveaux concepts d'encapsulation de cellules solaires organiques pour l'amélioration de leur durée de vie, L'Université de Limoges, 2010.
- [9]. M. Urien, Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à bocs de type rigide-flexible, thèse de doctorat, L'Université BORDEAUX I , 2008.
- [10]. G.Yu et A.J.Heeger,Journal of Applied Physics,78,4510,1995
- [11]. J.J.M.Halls,C.A.Walsh,N.C.Greenham,E.A.Marseglia,R.H.Friend, S.C.Moratti et A.B.Holmes,Nature,376,498,1995.
- [12]. T. Kietzke, H.H.Horhold et D.Neher, Chem.Mter.2005,17,6532,2005.
- [13]. D. Minh Trung , Elaboration De Cellules Solaires Photovoltaïques A Base De Polymères Conjugues, Etudes Des Systems Restituables ,thèse de doctorat, L'université Bordeaux1,2009.
- [14].Hagfeldt A. and Grätzel M., Molecular Photovoltaics, Acc. Chem. Res. 2000, 33, 269-277.
- [15]. G.E Eperon, and all 'Morphological control for high performance, solution processed planar heterojunction perovskite solar cells', Advanced Functional Materials, Vol. 24, N°1, pp. 151 - 157, 2014.

[16]. M.Z. Mutalib, and all, 'Towards high performance perovskite solar cells: A review of morphological control and HTM development', Applied Materials Today, Vol. 13, pp. 69 - 82, 2018.

[17]. Kim, J.Y.et al.Efficient tandem polymer solar cells Fabrication by All-Solution processing. Science 317,222-225, doi :10.1126/science.1141711,2007.

[18]. M. Hiramoto.,and all, Effect of thin Gold Interstitial-layer on the Photovoltaic Propertiers of Tandem Organic Solar cell. Chemistry Letters , 327-330,1990.

[19]. D.Minh Trung, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, Etude des systèmes reticulabes, Thèse de Doctorat, l'Université Bordeaux 1,2009.

[20]. B.Ghania, Etude par simulation numérique de la cellule solaire à base de CZTs par SCAPS,Mémoire de fin d'étude en master intitulé.

[21]. Guneet Bedi1 , Student Member, IEEE and Rajendra Singh1,2, Fellow, IEEE 1 Holcombe Department of Electrical and Computer Engineering, 2 Department of Automotive Engineering, Clemson University, Clemson, SC, 29634 USA.

[22].“Quantum Dot: Latest Display Technology” (08/19/2014)
<http://techliveinfo.com/quantum-dot-latest-display-technology>

[23]. Park, N.-G. Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology. Materials Today, 18(2), 65-72. doi: 10.1016/j.mattod.2014.07.007,(2015).

[24]. R. Wang, Y and all “Colloidal quantum dot ligand engineering for high performance solar cells,” Energy and Environmental Science, pp. 1130-1143, 2016.

[25].B. Brousse, Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques obtenue par dépôt physique. Universitaire de Limoges, 2004.

[26].V.Y. Mer ritt,IBM J. Res.Devlop, 22(1978) 353.

[27]. L. Abonis Bekale, Elaboration de cellules solaires organiques à base de ttra_tert_butyl_phthalocyanine de zinc (TTB-ZnPc),Mémoire présenté a l'Université du Quebec a trois-rivières, niversité du Quebec, Mi 2012.

[28]. M. Belarbi, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.

[29].D. Abdelouahab, Etude de l'effet de la température sur les paramètres d'une cellule photovoltaïque organique , mémoire du fin d'étude, Centre Universitaire De Béchar, Juin 2008

Chapitre V

La quatrième génération des cellules PV

V.1 Introduction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion jusqu'à 50%!

Les cellules à jonctions multiple permettent d'inventer de nouvelles techniques de production d'électricité à travers les panneaux solaires. Un semi-conducteur comme le silicium ne peut produire de l'électricité qu'à partir d'une certaine longueur d'onde de rayon solaire. Grâce aux nouvelles méthodes scientifique on prévoit une exploitation possible des rayons solaires de près de 80% grâce à ces cellules multi-jonctions. Cela constituerait un grand progrès au niveau du rendement des panneaux photovoltaïques de nos jours[1].

Dans ce chapitre nous aborderons le principe des MJ, la description des cellules MJ, et leur l'état de l'art, ainsi la procédé de fabrication et on finit par les avantages et les inconvénients.

V.2 Principe des multi-jonctions (MJ)

Le principe des cellules à jonctions multiple est basé de convertir une partie beaucoup plus importante du spectre solaire que les cellules de première génération (avec une seule jonction) grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents.

Henry à démontré en 1980 que l'on pouvait atteindre un rendement théorique de 72 % avec 36 jonctions de gaps différents, et 56 % avec seulement 3 jonctions.

Ainsi, une cellule MJ composée d'une infinité de cellules mono-jonction de gaps différents convertirait le spectre solaire de façon optimale [2].

V.3 Description des cellules multi-jonctions

V.3.1 Structure des sous-cellules

La structure classique de sous-cellule réalisée dans des matériaux semi-conducteurs III-V se décompose en 4 couches [3].

- une couche fenêtre (window layer) qui passive la face avant de la cellule.
- l'émetteur et l'absorbeur qui forment la jonction PN.
- le BSF (Back Surface Field) qui passive la face arrière.

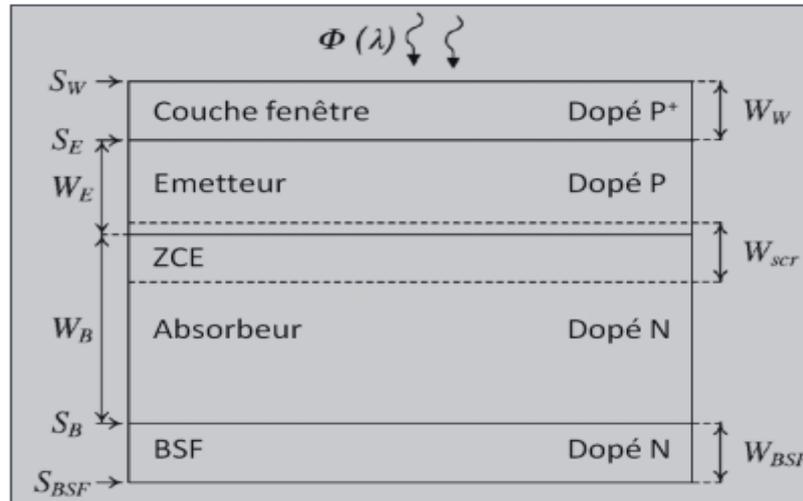


Figure (V.1) : Structure classique d'une sous-cellule réalisée avec des matériaux semi-conducteurs III-V [3].

Avec S les vitesses de recombinaison aux interfaces, W les épaisseurs des différentes couches, et ZCE la zone de charge d'espace.

Comme pour les cellules silicium, les sous-cellules III-V sont constituées autour d'une jonction PN. La différence majeure réside dans la façon dont sont passivées les interfaces avant et arrière de cette jonction. Le point essentiel est de limiter les vitesses de recombinaison aux interfaces, notées S_E et S_B . Pour des technologies silicium, les surfaces sont passivées par des diélectriques du type SiO_2 ou SiN_x . Pour des cellules III-V, des couches présentant une grande énergie de gap et en accord de maille sont utilisées comme couche fenêtrée.

La figure si contre présente la structure de bandes typique d'une sous-cellule III-V. Les points clés de l'optimisation de ces couches sont les suivants :

- Les bandes des porteurs minoritaires, c'est-à-dire la bande de conduction pour l'émetteur et la bande de valence pour l'absorbeur la discontinuité conduisant à une barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires. Ceci permet aux porteurs minoritaires d'éviter les interfaces où ils se recombineraient, permettant d'agir comme passivation. Les bandes des porteurs majoritaires ne doivent présenter aucune discontinuité (ou minime) afin de préserver de bonnes propriétés de transport des porteurs majoritaires.
- Pour limiter la présence de défauts aux interfaces, et limiter ainsi les vitesses de recombinaison, la couche fenêtrée et la couche BSF doivent être en accord de maille avec le matériau de la jonction PN. Si cette condition est réalisée, les vitesses de recombinaison S_E et S_B de l'émetteur et de l'absorbeur respectivement resteront faibles. Dans ce cas de figure, on

dit que la couche fenêtre passive la face avant de la cellule, et le BSF passive l'interface avec la couche tampon.

- Afin que la couche ne participe pas à l'absorption de la lumière incidente, la couche fenêtre doit être transparente vis-à-vis de la jonction PN. De plus, la couche BSF doit être transparente pour la lumière absorbée par la sous-cellule suivante. Cette condition conduit donc à des matériaux à grand gap et de préférence indirects.

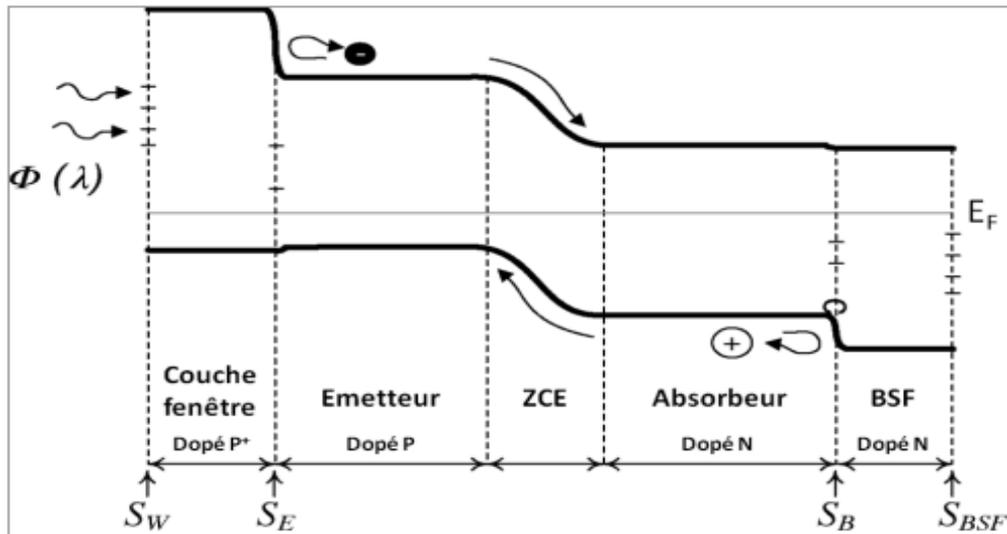


Figure (V.2) : Diagramme de bandes d'une sous-cellule [3].

V.3.2 Cellules à jonctions multiples

Les dispositifs photovoltaïques III-V peuvent atteindre des rendements très élevés car ils sont souvent basés sur le concept de multi-jonction, ce qui signifie que plus d'une bande interdite est utilisée. Une grande partie d'énergie des photons énergétiques est perdue en chaleur, tandis que les photons dont l'énergie est inférieure à la bande interdite sont perdus car ils ne sont pas absorbés [4].

L'utilisation des matériaux à faible bande interdite, une grande partie de l'énergie transportée par le photon n'est pas utilisée. Cependant, l'utilisation de plus de bandes passantes, la même quantité de photons peut être utilisée mais moins d'énergie est gaspillée sous forme de chaleur. Ainsi, de grandes parties du spectre solaire et une grande partie de l'énergie du spectre solaire peut être utilisée en même temps, si plus de on utilise des jonctions p-n.

Comme substrat, un germanium (Ge) On utilise une gaufrette. À partir de cette plaquette, la cellule inférieure est créée. Le germanium a une bande passante de 0,67 eV. La cellule du

milieu est basée sur le Ga As avec un écart d'environ 1,4 eV. La cellule supérieure est basée sur Ga InP avec un écart de l'ordre de 1,86 eV.

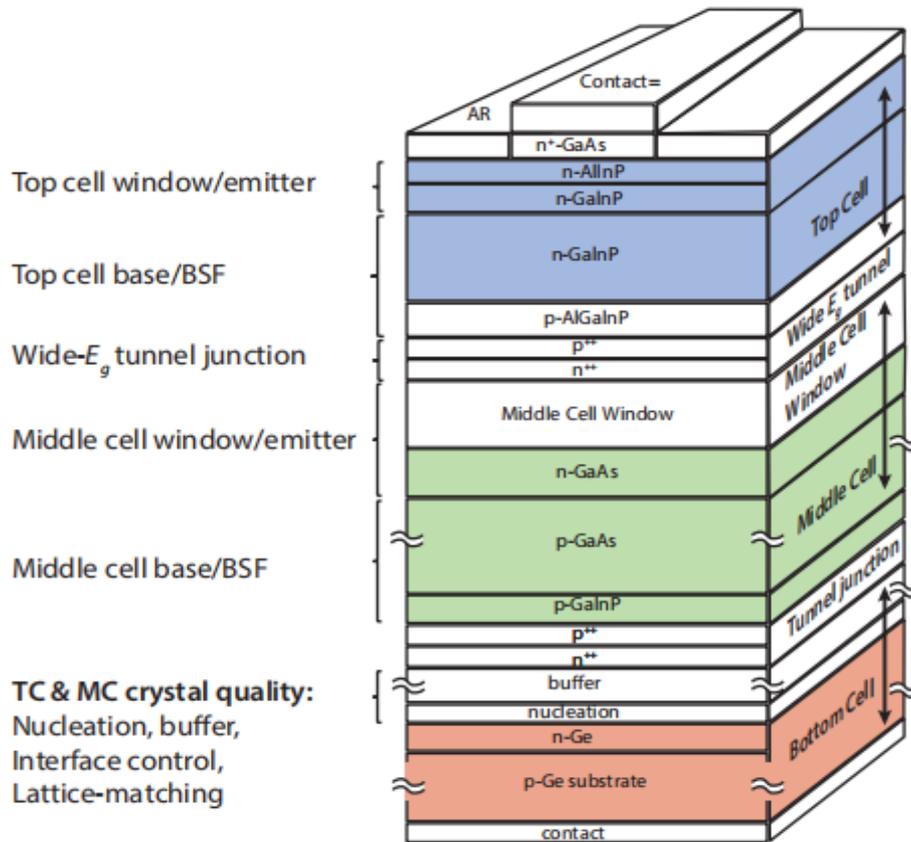


Figure (V.3) : Une cellule typique à triple jonction III-V [4].

V.4 Performances des cellules multi-jonctions III-V

Le tableau ci contre présente les performances des cellules record actuelles à base de matériaux III-V en fonction du nombre de jonctions.

Tableau (V.1) : Les performances des cellules à base de matériaux III-V.

Structures	Matériaux utilisés	Meilleurs rendements mesurés
structures à 2 jonctions [5,6]	GaInAsP/GaInAs	35.5 %
	GaInP/GaAs	30% à 32.6%
structures à 3 jonctions [7-14]	InGaP/GaAs/InGaAs	44.4%
	InGaP/GaAs/GaInNAs	44 %
	InGaP/InGaAs/InGaAs	40.9 % à 42.6 %
		41 % à 42.4 %
	GaInP/GaAs/GaInAs	42.3 %
	InGaP/InGaAs/Ge	41.6 %
41.1 %		
structures à 4 jonctions [15-18]	InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs	46 %
	InGaP/GaAs/InGaAs/InGaAs	45.7 %
structures à 5 jonctions [19,20]	Non renseigné	40.7 %

V.5 Types des cellules MJ

Il existe plusieurs types des cellules à jonction-multiple [21]:

- parmi les cellules conçues à partir d'un substrat en silicium cristallin, une autre structure avancée est la cellule à hétérojonction qui se différencie des cellules à homo-jonctions. Les cellules à homo-jonctions sont constituées d'un même matériau dopé différemment dans l'émetteur et dans l'absorbeur.
- Une hétérojonction est une jonction formée par deux semi-conducteurs différents ou par un métal et un semi-conducteur.

Quand les deux semi-conducteurs ont le même type de conductivité, on parle d'hétérojonction *isotype*. Lorsque le type de conductivité diffère, on parle d'hétérojonction *anisotype*. C'est ce dernier type d'hétérojonction qui présente davantage d'intérêt.

V.6 Fabrication des cellules solaire à base de matériaux antimoniure

V.6.1 Structure des cellules

La structure des cellules en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ est composée d'une homo-jonction p-n recouverte par une couche de protection en GaSb (nommée cap layer) qui empêche l'oxydation de l'alliage quaternaire. Deux cellules quaternaires ont été réalisées pour deux compositions d'alliage différentes : $x=0,31$ et $x=0,50$.

Une homo-jonction p-n et une structure plus complète composée d'une couche fenêtre et d'un BSF en $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}_{0,04}\text{Sb}_{0,96}$ [3].

L'absence d'hétérojonction dans les structures à homo-jonctions p-n abruptes permet de modéliser de façon plus aisée le comportement des cellules. En effet, une modélisation numérique d'hétérojonction requière une connaissance fine des propriétés optiques et électriques de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, et notamment des offsets de bandes (avec le GaSb) qui sont des paramètres prépondérants.

La structure de cellule plus complète en GaSb (avec couche fenêtre et BSF) a, quant à elle, été réalisée afin d'obtenir un rendement optimum.

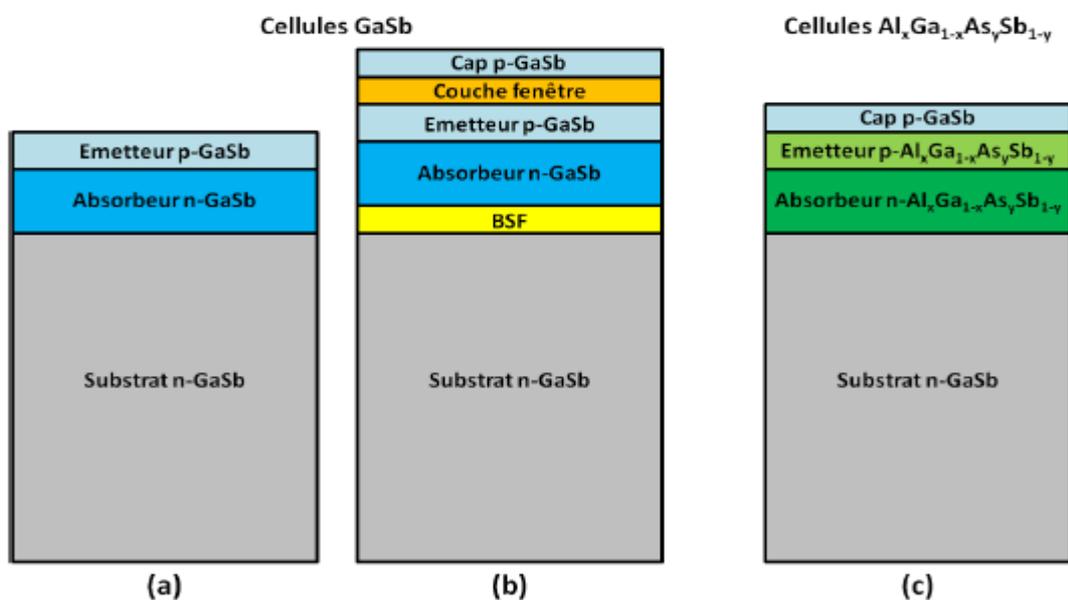


Figure (V.4) : Structures P-sur-N crues en GaSb (a) sans et (b) avec couche fenêtre et BSF, et (c) en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ [3].

V.6.2 Processus de fabrication

La fabrication d'une cellule solaire se déroule intégralement en salle blanche. Il existe quatre principales étapes de fabrication comme montre la figure.

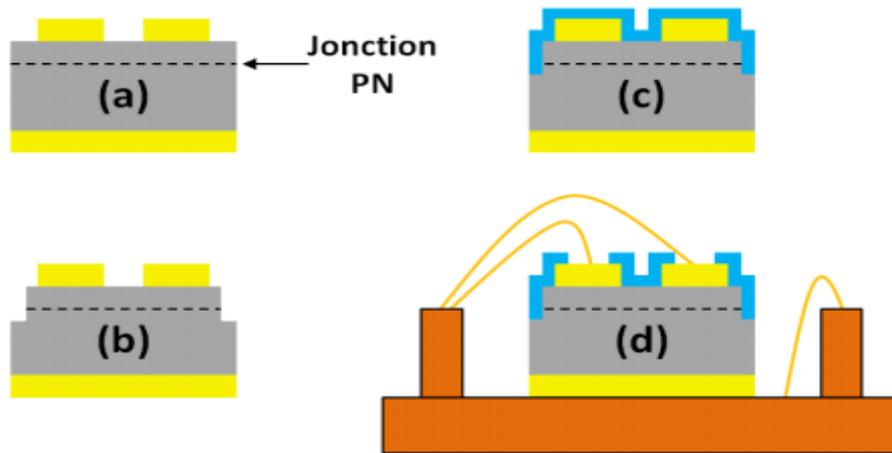


Figure (V.5) : Principales étapes technologiques de la fabrication d'une cellule Solaire [3].

- **métallisation des contacts :** la première étape est la métallisation de la face arrière de la cellule suivie du traitement thermique associé à la métallisation, et les métallisations sont précédées d'une désoxydation dans une solution de HCl [16,69,75] pendant 30 secondes [3]. L'ordre des métallisations a été défini en fonction des traitements thermiques nécessaires pour diffuser le contact. Celui de la face arrière étant le plus important, nous avons débuté le procédé de fabrication par cette face de la cellule. La métallisation de la face arrière consiste en un dépôt de 300 nm d'AuGeNi par pulvérisation cathodique dans un bâti de dépôt Alcatel SCM 600.

Le dépôt de Ti/Pt/Au est réalisé par évaporation par faisceau électronique (ebeam) dans un bâti de dépôt Univex 350. Le dépôt de la tri-couche se fait par un dépôt de 20 nm de titane dans un premier temps qui sert de couche d'accroche, suivi de 30 nm de platine qui agit comme barrière limitant la diffusion des 150 nm d'Au qui sont déposés en dernier.

Une photolithographie UV permet ensuite de dessiner la grille de contact sur la face avant de la cellule, avant que celle-ci soit métallisée.

- **Gravure du mesa :** cette étape consiste à définir la surface de la jonction PN, La gravure d'un matériau semi-conducteur peut se faire soit par voie physique (on parle de gravure sèche) soit par voie chimique (on parle de gravure humide). Il existe deux principaux types de gravures sèches :

1. **la gravure plasma** (Ion Beam Etching) où, à l'aide d'un plasma ionique et d'un flux d'argon, les ions Ar^+ bombardent la surface du semi-conducteur et arrachent les atomes de la surface.

2. **la gravure ionique réactive** (Reactive Ion Etching) [76,77] où l'on combine un bombardement ionique et une attaque chimique pour graver le semi-conducteur à l'aide d'un plasma contenant des gaz réactifs et des gaz neutres.

La gravure sèche a l'avantage d'être anisotropique comparée à la sélectivité des gravures humides, mais peut faire apparaître des défauts de gravure notamment pour l'IBE.

- **Dépôt de diélectriques par PECVD :** Le dépôt par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) permet d'une part le dépôt de couches de qualité avec un bon contrôle des épaisseurs (vitesses de dépôt inférieures à 200 nm/minute), et d'autre part un dépôt homogène sur toute la surface. Les diélectriques déposés ont pour rôle de passiver les surfaces de nos échantillons, mais ils peuvent de même jouer un rôle anti-reflet en ajustant judicieusement l'épaisseur de celui-ci.
- **Mise sur support de la cellule solaire :** Selon l'application visée, les cellules solaires ont été soit montées sur support TO8 pour des mesures en laboratoire, soit sur un support en cuivre personnalisé pour des mesures en conditions réelles sous concentration solaire.

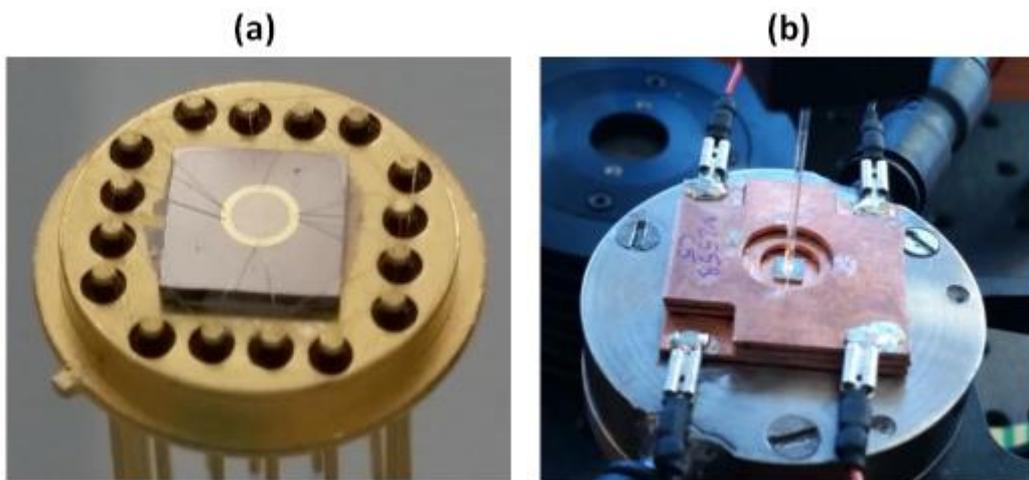


Figure (V.6) : (a) Support TO8. (b) Embase cuivre fabriquée au laboratoire[3].

La figure suivante résume l'architecture des quatre cellules antimoniures fabriquées.

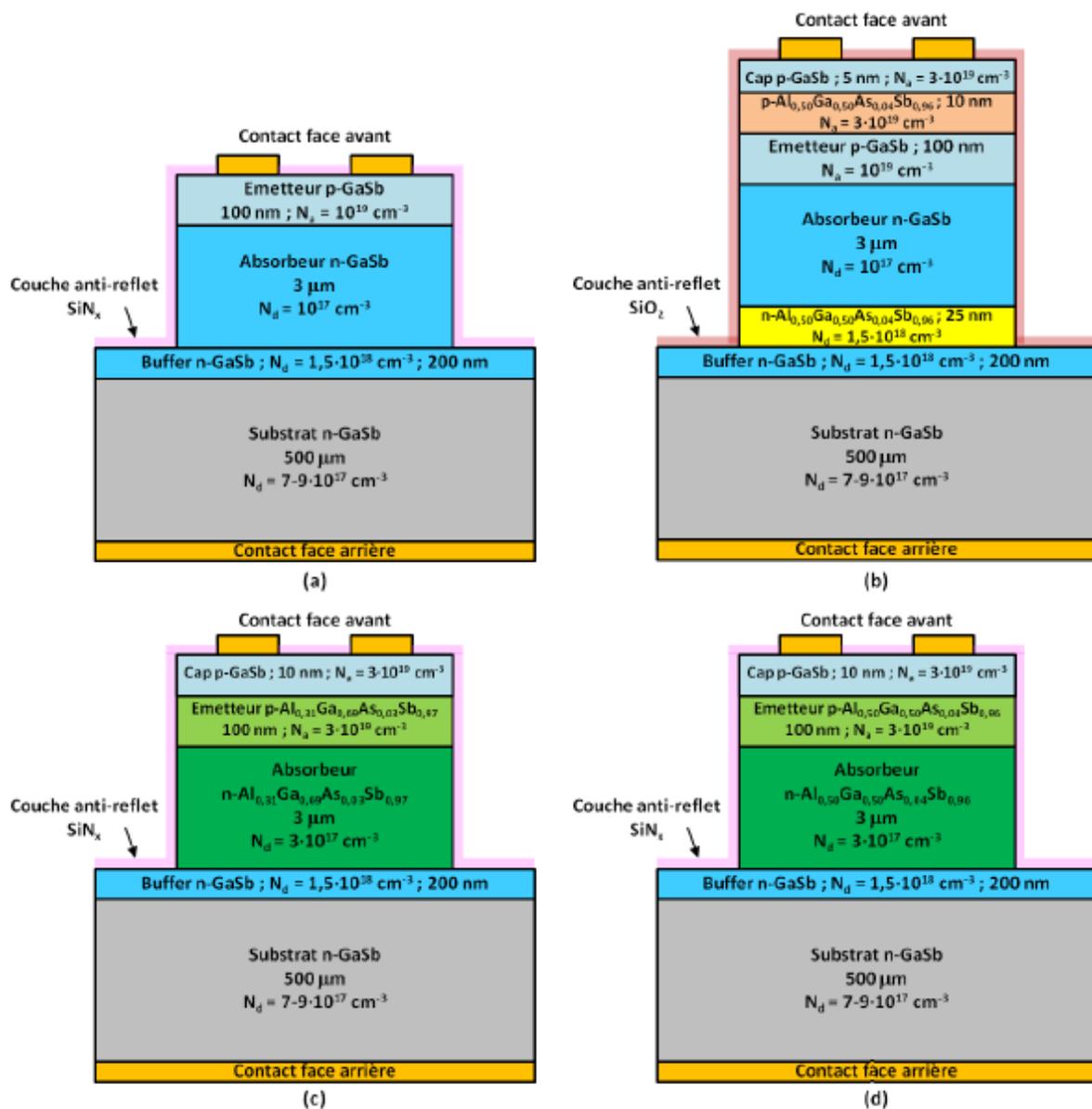


Figure (V.7) : Architecture des cellules étudiées en GaSb [3].

V.7 Avantages et inconvénients de technologie III-V

V.7.1 Cellules photovoltaïques multi jonctions

- **Avantages**

-Rendement record : environ 40% et maximum 50 % [1].

- **Inconvénients**

-leur coût de fabrication est élevé.

-développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable.

-nécessitent l'utilisation de métaux rares.

V.7.2. Panneau solaire de technologie III-V

- **Avantages**

-rendement important : supérieur à 50 %.

- **Inconvénients**

-nécessitent de faire appel à des métaux précieux.

- cette technologie n'est aujourd'hui économiquement viable que dans les zones où l'ensoleillement est très important [1].

- ils sont plus complexes, plus fragiles, plus délicats à transporter et à monter.

- il faut que la lumière concentrée soit bien focalisée sur la cellule.

V.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la 4^{ème} génération des cellules PV, la technique de fabrication, ce principe, les performances des cellules multi-jonctions, ces types et domaine d'application et les avantages et les inconvénients.

Références

- [1]. http://www.acgrenoble.fr/lycee/triboulet.romans/IMG/pdf/diapo_photovoltaique.pdf
- [2]. C. Henry, Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells, *J. Appl. Phys.* 51 (1980) 4494–4500. doi:10.1063/1.328272.
- [3]. Alexandre Vauthelin. Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires. *Electronique*. Université Montpellier, 2018. Français. NNT : 2018MONT073. tel-02151158
- [4]. arno.S,Klaus.J, et all, Solar energy the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems, UIT Cambridge, England, 2015.
- [5]. N. Jain, K.L. Schulte, J.F. Geisz, D.J. Friedman, R.M. France, E.E. Perl, et al., High-efficiency inverted metamorphic 1.7/1.1 eV GaInAsP/GaInAs dual-junction solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 112 (2018) 53905. doi:10.1063/1.5008517.
- [6]. I. García, I. Rey-Stolle, B. Galiana, C. Algora, A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1000 suns, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 92–95. doi:10.1063/1.3078817.
- [7]. T. Takamoto, H. Washio, H. Juso, Application of InGaP / GaAs / InGaAs Triple Junction Solar cells to Space Use and Concentrator Photovoltaic, SHARP Corp. (2014) 5–9.
- [8]. K. Sasaki, T. Agui, K. Nakaido, N. Takahashi, R. Onitsuka, T. Takamoto, Development Of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells, *AIP Conf. Proc.* 1556 (2013) 22–25. doi:10.1063/1.4822190.
- [9]. V. Sabnis, H. Yuen, M. Wiemer, High-efficiency multijunction solar cells 119 employing dilute nitrides, *AIP Conf. Proc.* 1477 (2012) 14–19. doi:10.1063/1.4753823.
- [10]. H. Yuen, High-Efficiency Solar Cells for CPV (Oral Presentation 17/05/13), China-America Front. Eng. Symp. (2013).
- [11]. J.F. Geisz, A. Duda, R.M. France, D.J. Friedman, I. Garcia, W. Olavarria, et al., Optimization of 3-junction inverted metamorphic solar cells for high-temperature and high-concentration operation, *AIP Conf. Proc.* 1477 (2012) 44–48. doi:10.1063/1.4753830.
- [12]. D. Aiken, E. Dons, N. Miller, F. Newman, P. Patel, Commercial concentrator cell results and record IMM solar cell efficiency, 8th Int. Conf. Conc. Photovolt. Syst. (2012) 44–48.
- [13]. P. Chiu, S. Wojtczuk, X. Zhang, C. Harris, D. Pulver, M. Timmons, 42.3% Efficient InGaP/GaAs/InGaAs Concentrators using Bifacial Epigrowth, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.* (2011) 002523–002526. doi:10.1109/PVSC.2011.6186460.

- [14]. R.R. King, a. Boca, W. Hong, X.Q. Liu, D. Bhusari, D. Larrabee, et al., Band-Gap-Engineered Architectures for High-Efficiency multijunction Concentrator Solar Cells, 24th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (2009) 1–7. doi:10.4229/24thEUPVSEC2009-1AO.5.2.
- [15]. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (Version 45), Prog. Photovoltaics Res. Appl. 23 (2015) 1–9. doi:10.1002/pip.2573.
- [16]. F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T.N.D. Tibbits, et al., Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 22 (2014) 277–282. doi:10.1002/pip.2475.
- [17]. R.M. France, J.F. Geisz, I. Garcia, M.A. Steiner, W.E. McMahon, D.J. Friedman, et al., Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices, IEEE J. Photovoltaics. 5 (2015) 432–437. doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2364132.
- [18]. W. Scanlon, NREL demonstrates 45.7% efficiency for concentrator solar cell, (2014).
- [19]. P.T. Chiu, D.C. Law, R.L. Woo, S.B. Singer, D. Bhusari, W.D. Hong, et al., Direct Semiconductor Bonded 5J Cell for Space and Terrestrial Applications, IEEE J. Photovoltaics. 4 (2014) 493–497. doi:10.1109/JPHOTOV.2013.2279336.
- [20]. P.T. Chiu, D.C. Law, R.L. Woo, S.B. Singer, D. Bhusari, W.D. Hong, et al., 35.8% space and 38.8% terrestrial 5J direct bonded cells, 2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2014. (2014) 11–13. doi:10.1109/PVSC.2014.6924957.
- [21]. David Reaux. Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Paris-Saclay, 2017. Français.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. Cette énergie est produite par un dispositif (cellule solaire photovoltaïque) qui transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

L'objectif de ce travail est l'étude de fabrication des cellules photovoltaïques, on trouve quatre générations.

La première génération est les cellules cristallines, elle a deux types : cellules polycristallines et cellules monocristallines, leur rendement est varié entre 10 à 15% pour les cellules polycristallines et entre 12 à 19% pour les cellules monocristallines donc leur rendement est faible et ils ont un coût élevé.

La deuxième génération est les cellules à couches minces ces cellules sont réputées car elles ont été réduites considérablement d'épaisseur, ce qui explique la facilité des constructeurs à créer des panneaux photovoltaïques très souples, légers et faciles à installer. Ils ont un faible rendement entre 6 à 8% mais réagissent très bien même lors d'un faible ensoleillement comme l'intérieur d'une maison.

Les cellules de troisième génération sont plus souples, ultra-fines, et donc plus « agiles » que les panneaux en silicium. C'est les cellules organiques leur Rendement est entre 8 % à 10%.

La quatrième génération est les cellules à jonctions multiples, leur rendement est environ 40 à 50% ils ont développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable.

Enfin, nous disons que ces technologies sont encore à l'étude pour de nouvelles améliorations et nouvelles applications.