

Ce livre nous a permis de présenter bibliographiquement un aperçu sur l'histoire de l'énergie solaire, notions de base sur le spectre solaire, l'air masse et le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que l'exposition des performances (paramètres électriques) des cellules solaires photovoltaïques nécessaires à la compréhension de ces dispositifs sous ensoleillement et sous obscurités. Ensuite, la présentation des différentes technologies de fabrication (générations) des cellules solaires, et plus particulièrement de celles qui feront actuellement l'objet de la recherche scientifique et le développement technologique.

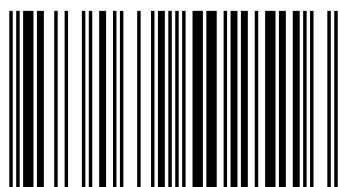


Dr. Moufdi HADJAB est né le 21 Janvier 1984 à M'Sila (Algérie), il est Docteur en matériaux et composants optoélectroniques (électronique) de l'université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès – Algérie (en 2018). Actuellement, il est Maître de Recherche 'B' au Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI (UDCMA – Sétif – Algérie)



Moufdi Hadjab

État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques



978-613-9-50251-6

Moufdi Hadjab

État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

Moufdi Hadjab

**État de l'art technologique des
cellules solaires photovoltaïques**

FOR AUTHOR USE ONLY

Éditions universitaires européennes

Imprint

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:

Éditions universitaires européennes

is a trademark of

International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page

ISBN: 978-613-9-50251-6

Copyright © Moufdi Hadjab

Copyright © 2019 International Book Market Service Ltd., member of
OmniScriptum Publishing Group

FOR AUTHOR USE ONLY

État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques

0 Sommaire

0	Sommaire	1
1	Introduction.....	2
2	Définition et historique du photovoltaïque.....	3
3	Spectre solaire et l'air masse.....	5
4	Fonctionnement et structure des cellules photovoltaïques.....	8
4.1	L'absorption du rayonnement solaire.....	9
4.2	La conversion de l'énergie absorbée aux charges électriques libres.....	10
4.3	La collecte des charges photogénérées.....	12
5	Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	14
5.1	La courbe courant-tension (J-V).....	15
5.2	Rendement quantique et réponse spectrale.....	20
5.3	Choix de matériau de base.....	21
5.4	Schéma électrique équivalent.....	22
6	Les différentes générations de cellules photovoltaïques.....	24
6.1	Les cellules de 1 ^{ère} génération: cellules cristallines.....	24
6.1.1	Les cellules en silicium monocristallin (c-Si).....	25
6.1.2	Les cellules en silicium polycristallin (p-Si).....	25
6.1.3	Les cellules en silicium microcristallin (μ -Si).....	26
6.2	Les cellules de 2 ^{ème} génération: couches minces "thin films".....	27
6.2.1	Les couches minces au silicium.....	27
6.2.2	Les couches minces à base de CdTe.....	29
6.2.3	Le diséléniure de cuivre, d'indium et de galium CIGS.....	29
6.3	Les cellules de 3 ^{ème} génération: Multijonction, concentrations.....	31
6.3.1	Le solaire photovoltaïque concentré.....	32
6.3.2	Les constituants organiques (polymères).....	33
6.3.3	Les cellules hybrides: thermique et photovoltaïque.....	33
7	Les cellules solaires à base de $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$	34
7.1	Aspect technologique des cellules solaires à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$	35
7.2	Structure d'une cellule CIGS.....	37
8	Conclusion.....	39
9	Références bibliographiques	40

1 Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. Il fournit une énergie colossale à la Terre (10000 fois l'énergie nécessaire) sous forme d'énergie lumineuse, la plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie couvre une partie importante de la surface terrestre [1-4].

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 (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Bien que l'énergie photovoltaïque la plus jeune des énergies renouvelables, et devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance (disponibilité), l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, et elle est souple et fiable [5].

La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire *Bell* en 1954 sur une simple jonction P-N au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif. L'application terrestre et spatiale de ces matériaux en photovoltaïque dépend fortement de leurs propriétés optoélectroniques et thermiques. Ces deux applications sont très importantes, notamment, l'application spatiale pour alimenter les satellites en électricité utilisés dans plusieurs domaines (télécommunication, militaires, météorologie,...). L'application terrestre ayant ainsi un impact important sur l'éclairage des routes désertiques, les signalisations dans les ports, l'alimentation des habitations et des radars isolés.

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons d'abord quelques notions sur la source d'énergie exploitée dans le domaine photovoltaïque: le rayonnement solaire et l'air masse. Nous décrirons ensuite le fonctionnement et structure des cellules photovoltaïques standards, leurs caractéristiques principales, ainsi les différentes générations limitant leurs rendements. Enfin, nous étudierons les cellules à base de CIGS basées sur la technologie des couches minces mises en oeuvre pour améliorer les performances des cellules solaires.

2 Définition et historique du photovoltaïque

Le terme «photovoltaïque», souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots «photo», un mot grec signifiant lumière, et «Volta», le nom du physicien italien *Alessandro Volta*, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque. L'histoire du PV remonte en 1839, lorsque le physicien français *Antoine César Becquerel* découvrait le principe photovoltaïque. L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand *Heinrich Rudolf Hertz* [6]. C'est *Albert Einstein*, le premier qui a pu expliquer le principe du photovoltaïque en 1923. En 1955, des chercheurs américains (*Chapin, Fuller, Pearson et Prince*) travaillant pour "les laboratoires Bell Telephone", développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. En 1959, le premier satellite alimenté par des piles PV fut lancé. La première maison avec une installation photovoltaïque a vu le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. Alors, en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourue 4000 kilomètres en Australie [7]. Aujourd'hui, avec l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de production, le marché photovoltaïque s'est considérablement

développé. Durant ces vingt dernières années, il a progressé de 20 % à 25 % par an atteignant 427 MW en 2002. Néanmoins, le photovoltaïque représente moins de 0.1 % de toute la production énergétique mondiale [8].

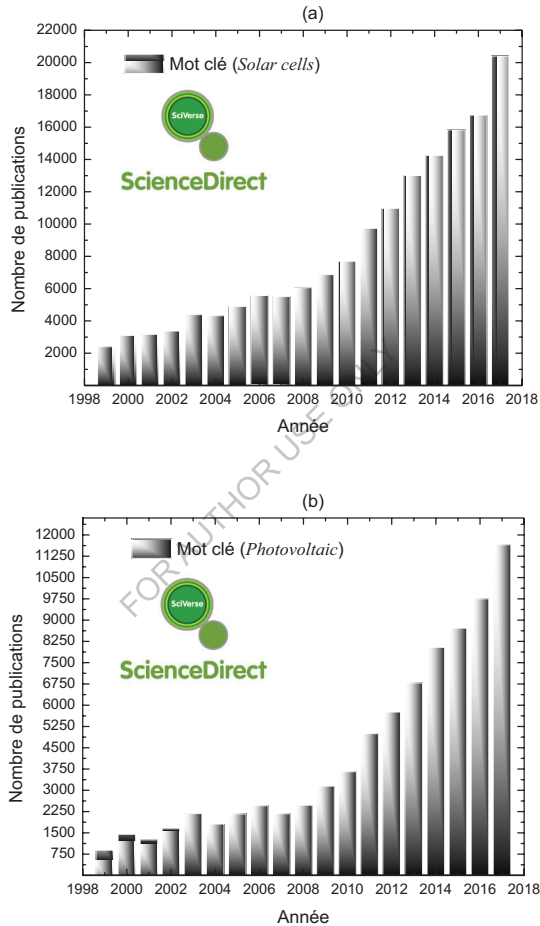


Figure 1 Le nombre de publications par année depuis 1999 jusqu'à 2017, où les termes (a) «Solar cells» et (b) «Photovoltaic» ont été introduits, les statistiques sont tirées à partir de la base de donnée ScienceDirect.

Les Figures (1 a et b) montrent le nombre de publications scientifiques par année où les termes «Solar cells» et «Photovoltaic» ont été introduits comme des mots clés. On remarque, qu'il y a une augmentation considérable du nombre des articles publiés par année.

En outre, Il y a une grande croissance du nombre de publications scientifiques de quelques types (générations) des cellules solaires au cours des derniers vingt ans, ce qui concerne l'étude des cellules solaires de la deuxième génération (les cellules solaires en couches minces) ceci est illustré dans la Figure 2. Les statistiques sont tirées à partir de la base de données *ScienceDirect*.

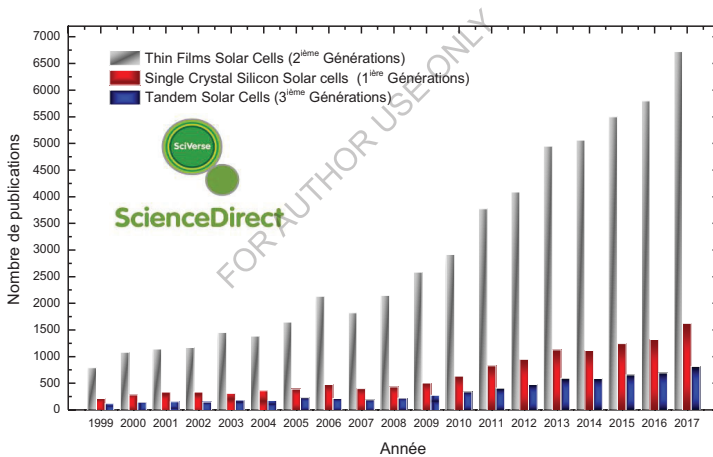


Figure 2 Le nombre de publications par année de quelques types (générations) des cellules solaires dans les derniers vingt ans, les statistiques sont tirées à partir de la base de données *ScienceDirect*.

3 Spectre solaire et l'air masse

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 Km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 Km de la terre (Fig. 3). Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie

phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes; de 0.2 μm (l'ultraviolet) à 3 μm (l'infrarouge lointain) [9-11].

Hors atmosphère le rayonnement (Longueur d'onde λ en mètre) émis par le soleil (AM0) est constitué de [10]:

- 9% d'UV ($0.1 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
- 43% de visible ($0.4 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$)
- 48% d'infrarouges ($0.75 < \lambda < 5 \mu\text{m}$)

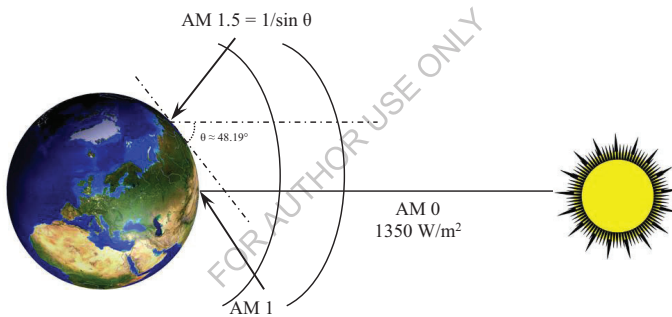


Figure 3 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de corpuscules (appelés photons) dotées d'une énergie propre E_{ph} qui répond elle-même à la relation suivante:

$$E_{ph} = h\nu = hc / \lambda \quad (1)$$

Dans laquelle h représente la constante de Planck [J.s], ν : la fréquence [s^{-1}] et c la vitesse de la lumière dans le vide [m.s^{-1}].

La dualité (onde électromagnétique et particules) de la lumière est essentielle dès lors que l'on souhaite comprendre les interactions rayonnement-matière; les phénomènes intervenant dans l'absorption de la lumière et la conversion photoélectrique dépendent à la fois de l'énergie et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Ainsi, on définit le phénomène d'absorption de la lumière par un matériau par la loi de *Beer-Lambert* (relation 2) où le coefficient d'absorption α (en m^{-1}) est lui même défini par la relation 3. k est le coefficient d'extinction du matériau qui dépend lui aussi de la longueur d'onde du rayonnement [12]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad (3)$$

Avec I_0 : Intensité de la lumière incidente (W), I : Intensité de la lumière sortante (W) et x : Longueur du trajet optique (m)

La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5800 K environ. Les matériaux photovoltaïques réagissent différemment selon la longueur d'onde de la lumière à laquelle ils sont soumis. La connaissance de la distribution en longueur d'onde de l'énergie solaire s'avère donc primordiale. La Figure 4 représente les spectres solaires [1, 13, 14].

L'énergie par unité de surface où irradiance, fournie par le soleil, hors atmosphère et sous incidence normale, est constante, voisine de 1.36 kW.m^{-2} . Afin d'établir un système de référence, la notion d'air masse (AM) a été introduite. L'air masse prend en compte l'angle θ formé par le soleil par rapport au zénith. $AM=1/\cos\theta$. AM_0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, AM_1 correspond à une position du soleil au zénith du lieu d'observation. Le spectre $AM_{1.5}$, correspondant à un angle du soleil de $48,19^\circ$ par rapport au zénith, est le plus couramment utilisé (Figure 3).

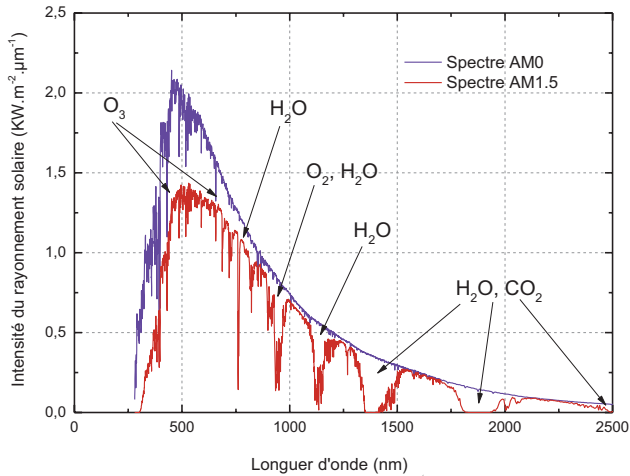


Figure 4 Représentation des spectres solaires AM0 et AM1.5 et des différentes molécules provoquant les principales atténuations.

L'ensemble des rayons lumineux correspondant est arrondi à 1 kW.m^{-2} . La traversée de l'atmosphère induit une atténuation non négligeable de l'énergie incidente. Cette atténuation est due aux phénomènes d'absorption par les molécules de l'atmosphère (H_2O , H_2 , CO_2 , O_3 pour l'essentiel) [13].

4 Fonctionnement et structure des cellules photovoltaïques

Le principe de fonctionnement des cellules solaires repose sur l'effet photovoltaïque et permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique au sein de matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure [15,16]. L'effet photovoltaïque provoque, sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela, il faut d'abord que l'énergie des photons incidents soit transmise à des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau [12]. Cette conversion d'énergie peut se diviser en

trois étapes clés: (i) l'absorption du rayonnement solaire (photons) dans le matériau, (ii) La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres et (iii) la collecte des charges photogénérées dans un circuit électrique extérieur [17-19].

4.1 L'absorption du rayonnement solaire

L'absorption des photons dans un matériau conducteur ou semi-conducteur permet en effet la libération d'une certaine quantité de porteurs libres. Ce mécanisme de photogénération peut être représenté à l'aide d'une caractéristique importante du matériau, dite le gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence (B_v) et le minimum de la bande de conduction (B_c) d'un matériau. La B_v est présumée être entièrement occupée par des électrons, et la B_c entièrement vide [10, 15, 20]

Il existe deux types de gap: le gap direct et le gap indirect [20].

- ✧ **Gap direct:** Lorsque le minimum de la bande de conduction B_c et le maximum de la bande de valence B_v correspondent à la même valeur du vecteur d'onde (k), le gap est direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Le GaAs et le MgO sont des exemples de matériaux à gap direct (voir la Figure 5-a)
- ✧ **Gap indirect:** cette fois-ci, sur la Figure 5-b on remarque que la transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique: les transitions électroniques sont non radiatives. A énergie égale ou un peu supérieur à celle du gap, il n'est possible d'absorber le photon que grâce à l'intervention d'un phonon. Ce qui ajoute une nouvelle condition à l'absorption et diminue ainsi grandement ses probabilités. Le ZnO est un exemple de semi-conducteur à gap indirect.

A l'équilibre, les électrons possèdent une énergie correspondant à des états situés dans la B_v et sont dits «liés». Un photon incident, dont l'énergie $h\nu$ est supérieure à l'énergie de

gap E_g du matériau, peut permettre le passage d'un électron de la B_v à la B_c . On considère alors que l'électron ayant rejoint la bande de conduction est excité, et qu'il laisse un trou (équivalent à une charge positive) dans la bande de valence. La paire électron-trou créée forme un exciton. Le transfert d'énergie entre le photon incident et l'électron de la B_v respecte les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement [10,15].

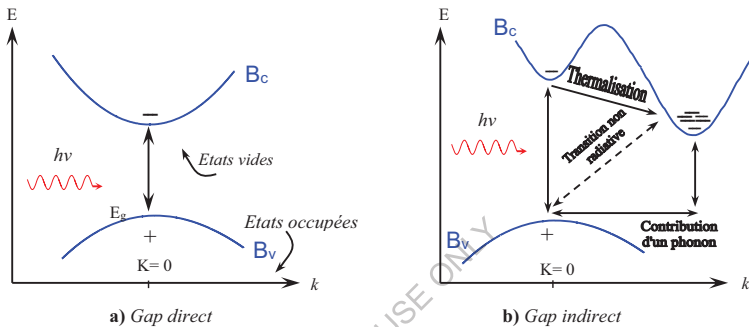


Figure 5 Transitions électroniques pour un gap direct et un gap indirect.

4.2 La conversion de l'énergie absorbée aux charges électriques libres [20]

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors, si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau, libérés de l'attraction de l'atome. Il y aura, par conséquent, création d'un électron libre et d'un trou. Un trou correspond au comportement d'une bande entièrement pleine privée d'un électron. Pour simplifier, on assimile ce comportement à celui d'une charge positive dans une bande entièrement occupée. La circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre, forme un courant électrique, lorsqu'une charge est branchée.

Ce phénomène peut être mis en jeu dans les semiconducteurs. Pour les isolants, soit le gap est très large et il est quasi impossible d'engendrer des paires électron-trou, c'est le cas

du diamant par exemple, soit le nombre de défauts, très grand en raison de la structure amorphe du matériau, est tel que les porteurs sont constamment piégés et ne peuvent donc pas créer de courant par leur déplacement, c'est le cas du verre. Dans le cas du verre, la représentation schématique des diagrammes de bandes (Figure 6) de l'isolant n'est en réalité pas juste car, de part sa structure amorphe, les électrons ne respectent pas le schéma de bande. Ce schéma permet néanmoins de bien comprendre la difficulté de porter un électron dans la bande de valence pour les isolants. Dans le cas du diamant si on peut engendrer des porteurs dans la bande de conduction leur mobilité est extrêmement grande et la conductivité est très grande également. Pour les conducteurs, il existe déjà une forte densité d'électrons totalement libres.

On voit clairement sur Figure 6 qu'il faut fournir une énergie au moins égale à celle du gap, qui est dépendant du matériau, pour faire monter un électron de la bande de valence à la bande de conduction et avoir création d'une paire électron-trou. De plus, l'énergie du photon supplémentaire à celle du gap, sera convertie en chaleur. On a donc création d'une paire d'électron-trou par photon au maximum. Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement théorique:

- ⊗ L'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique. Le gap optique représente l'énergie minimum requise à un électron de la bande de valence pour accéder à la bande de conduction.
- ⊗ La perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

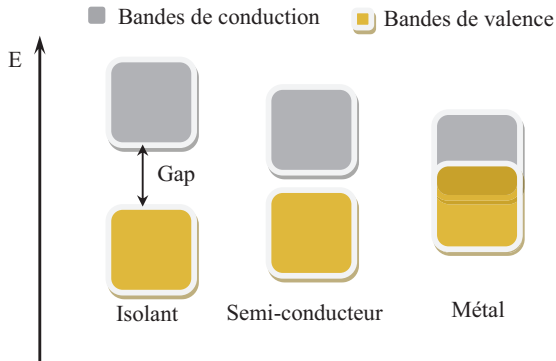


Figure 6 Représentation schématique des diagrammes de bandes d'un isolant, semi-conducteur et conducteur [20].

4.3 La collecte des charges photogénérées

Les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur: ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement pleine plaque sur la face arrière [21].

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur. Il y aura, dans cette partie de semi-conducteur, un excédant de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type n . Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédant de charges positives. Le matériau deviendra alors accepteur d'électrons. On dit qu'il est

dopé de type p . Par conséquent, une cellule photovoltaïque comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électron. [20, 22]

La jonction de ces deux zones va entraîner la création de la zone de charge d'espace (ZCE). C'est dans cette zone que les porteurs sont séparés [21].

La mise en contact de ces deux zones provoquera un champ électrique. En effet, les charges négatives excédentaires du matériau dopé n chercheront à rejoindre les charges positives du matériau dopé p . Et inversement pour les charges positives excédentaires du matériau p . On réalise ainsi ce que l'on appelle une jonction $p-n$, c'est-à-dire une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. Les types de barrières les plus communes sont l'homojonction (jonction $p-n$ dans le même semi-conducteur), l'hétérojonction (jonction $p-n$ entre deux matériaux semi-conducteurs différents) et les barrières Schottky (contact entre un métal et un semi-conducteur). La hauteur de barrière de potentiel et donc l'intensité du champ électrique sont diminuées par polarisation de la jonction en direct qui permet le passage de porteurs. Une polarisation inverse augmentera la hauteur de barrière. Le fonctionnement de la jonction $p-n$ est illustré sur la Figure 7 ci-dessous [20]:

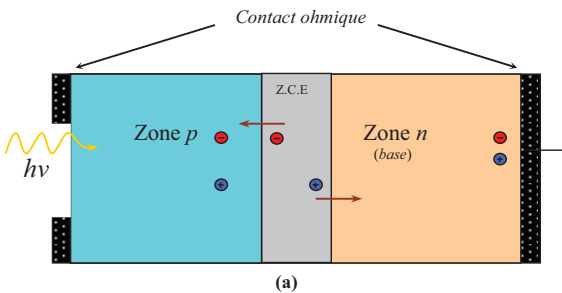


Figure 7 (a) Structure d'une cellule photovoltaïque.

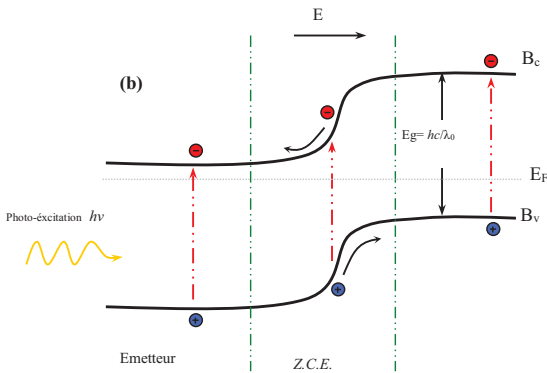


Figure 7 (b) diagramme énergétique d'une cellule photovoltaïque

Dans la zone n ou p , les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il y aura un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller dans la région n et les trous vers la région p . Il y aura un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour former un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [6, 20].

5 Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule photovoltaïque

La partie principale d'une cellule photovoltaïque est une jonction $p-n$. C'est l'éclairement de cette jonction qui va générer des porteurs de charges et permettre de récupérer une puissance électrique. On distingue deux régimes de fonctionnement qui dépendent de la polarisation de la diode: la polarisation directe qui correspond au régime passant (si le potentiel appliqué est supérieur à celui de la barrière de potentiel V_0) et la polarisation inverse qui correspond au régime bloqué. En régime passant, la barrière de

potentiel est levée, les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction sans être bloqués, un courant apparaît. En régime bloqué, seuls les porteurs minoritaires peuvent créer un courant dans la diode car ils n'ont pas de barrière de potentiel qui les retiennent. Ce courant est le courant I_s ou courant de saturation [22].

Après un rappel de la physique de la cellule photovoltaïque, cette partie traite de ses caractéristiques électriques principales.

5.1 La courbe courant-tension (J-V)

Nous avons vu dans la partie précédente que la jonction servant de base à la photopile est une diode. La jonction $p-n$ dans l'obscurité suit donc la relation caractéristique (I-V, J-V pour la densité de courant) d'une diode:

➤ **Sous éclaircissement:**

Les photons incidents vont générer des paires électron/trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption [22]:

- ⊗ Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction $p-n$, les paires électron/trou, créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés puis injectés dans la zone n (émetteur) et les trous dans la zone p (base). Un courant photocourant de génération est créé;
- ⊗ Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électron dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils sont injectés dans la zone n pour les électrons et dans la zone p pour les trous et deviennent majoritaires. Un photocourant de diffusion est créé.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photocourant de porteurs minoritaires résultant I_{ph} , qui est proportionnel à l'intensité lumineuse.

➤ **Sous obscurité:**

La densité de courant dans une telle structure de type jonction *p-n* est appelé densité de courant d'obscurité et il a la forme suivante [19, 22]:

$$J_{obs} = J_s \left(e^{\left(\frac{V}{V_t}\right)} - 1 \right) \quad (2)$$

Avec: V : est la tension aux bornes de la jonction.

$V_t = kT/q$: potentiel thermodynamique [V]

k : est la constante de Boltzmann $\{k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ [J.K}^{-1}]\}$

q : est la charge élémentaire $\{q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}\}$

J_s : densité de courant de saturation de la jonction [A]

T : température absolue [K]

J_{obs} : densité de courant d'obscurité [A]

La caractéristique d'une jonction éclairée est identique à celle de la même jonction dans l'obscurité à ceci près qu'une densité de courant (J_{ph}) vient s'ajouter au courant d'obscurité (J_{obs}). Ce flux de porteurs minoritaires photogénérés va à l'inverse du flux de majoritaires (courant de diffusion) considéré comme le courant positif dans la convention électrique des composants passifs. Une diode sous éclairement voit donc sa caractéristique J-V décalée vers les valeurs négatives de courant (relation 3).

$$J_{\text{éclairage}} = J_{ph} - J_{obs} = J_{ph} - J_s \left(e^{\left(\frac{V}{V_t}\right)} - 1 \right) \quad (3)$$

Ainsi, dans une cellule solaire, deux courants s'opposent: le courant d'éclairément et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairément la caractéristique à l'allure présentée sur la Figure 8.

La densité de courant que l'on veut collecter dans le cas d'une cellule photovoltaïque est $J_{\text{éclairage}}$ que l'on notera J dans la suite. La courbe J-V (Figure 8) permet de déterminer les paramètres électriques de la cellule.

- ⊗ J_{sc} : Densité de courant de court-circuit
- ⊗ V_{oc} : Tension de circuit ouvert
- ⊗ P_{max} : Puissance maximale débitée
- ⊗ J_{max} : Densité de courant au point de puissance maximale
- ⊗ V_{max} : Tension au point de puissance maximale

Une cellule solaire ne peut être assimilée à aucun générateur classique. On peut en effet la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale et comme une source de courant constante dans la partie horizontale. Une caractéristique fondamentale des cellules solaires est que pour une irradiance et une température donnée, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe J-V est fixée. C'est la valeur de la charge R qui va déterminer le point de fonctionnement. La puissance électrique produite sous éclairage est égale au produit de l'intensité délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut donc adapter R à ces bornes pour la faire fonctionner à P_{max} .

Puissance maximale, P_{max} est la puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V.J$ est maximum. Si V_{max} et J_{max} sont la tension et le courant pour les quels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de coté V_{max} et J_{max} qu'on peut inscrire sous la courbe $J(V)$ (Figure 8).

$$P_{\text{max}} = (JV)_{\text{max}} = V_{\text{max}} \cdot J_{\text{max}} \quad (4)$$

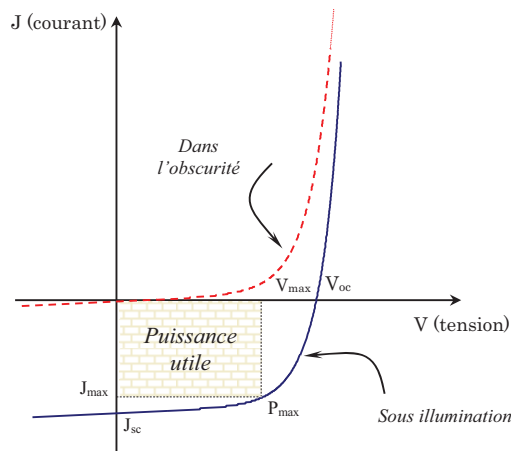


Figure 8 Caractéristique J-V sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [1, 6, 7].

Le **densité de courant de court-circuit (J_{sc})** correspond à la valeur maximum de la densité de courant débitée par la cellule photovoltaïque. Dans ce cas, les deux électrodes qui contactent la zone n et p sont en court-circuit et les porteurs minoritaires vont être drainés par le champ interne. C'est ce courant de porteurs minoritaires qui constitue le courant de court-circuit. La valeur de J_{sc} est limitée par des aspects optiques (absorption limitée du flux lumineux, réflectivité du substrat, absorption dans les couches d'encapsulation du module) et par la longueur effective de diffusion des porteurs minoritaires. A distribution spectrale donnée, ce paramètre dépend aussi de l'irradiance du rayonnement incident.

Le **tension de circuit ouvert (V_{oc})** correspond à la valeur de tension qui permet de réduire suffisamment la barrière de potentiel V_D pour obtenir un courant global nul. En effet, les porteurs photo-générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction (électron coté n , trou coté p), induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation génère un

courant de diode dans le sens direct égal et opposé au courant des porteurs photo-générés. La V_{oc} est liée au rapport entre J_{sc} et J_s par la relation (5), et donc aux recombinaisons des porteurs de charge dans le volume et en surface.

$$V_{oc} = \frac{V}{V_T} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_s} + 1\right) = V_T \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_s} + 1\right) \quad (5)$$

Le facteur de forme (FF) de la courbe J-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit $J_{sc} \times V_{oc}$. Le FF est limité dans la plupart des cas par des résistances parasites et son expression est donnée par la relation (6) [10, 12]:

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (6)$$

On en vient donc au paramètre référence pour évaluer la qualité d'une cellule solaire: « **le rendement de conversion (η)** » qui est le rapport entre la puissance fournie par celle-ci et la puissance incidente. Il s'exprime selon la relation (7) en fonction des paramètres extraits de la courbe J-V sous éclaircissement [10, 12].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_m} = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{P_m} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_m} \quad (7)$$

Le rendement est souvent utilisé comme paramètre pour comparer les performances de différentes cellules solaires. Il est défini comme le rapport entre la puissance fournie par la cellule (soit $J_{sc} \times V_{oc} \times FF$) et la puissance incidente fournie par le rayonnement solaire. Le rendement dépend donc du spectre solaire et de l'intensité du rayonnement lumineux, ainsi que de la température de la cellule elle-même. Par conséquent, des normes ont été définies afin de permettre la comparaison des cellules solaires entre elles, ainsi les cellules solaires terrestres sont mesurées sous un rayonnement standardisé AM1.5G à une température de 25 °C. AM1.5 signifie que le coefficient Air Mass a une valeur de 1.5. Ce dernier traduit la

réduction de la puissance solaire incidente lorsqu'il traverse l'atmosphère et est absorbé par l'air et la poussière. Le G signifie Global et marque la prise en compte des radiations diffuses et directes. Ainsi la puissance incidente calculée pour un rayonnement AM1.5G est de 970 W.m^{-2} . Par commodité, le spectre a par la suite été normalisé à une valeur de 1 kW.m^{-2} afin de faciliter les calculs [21].

5.2 Rendement quantique et réponse spectrale

Les photons ayant une énergie supérieure au gap du semi-conducteur pourront créer une paire électron-trou. L'énergie excédentaire sera perdue, elle aussi en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Une autre technique fondamentale de caractérisation est la réponse spectrale. Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photo-courant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident [20].

La réponse spectrale d'une cellule solaire est le rapport du courant total généré par la cellule au courant qui peut être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident. Elle renseigne sur la réaction de la cellule à la radiation incidente et permet de fixer la gamme d'utilisation de la cellule.

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation:

$$RS = \frac{q\lambda}{hc} \cdot EQE \quad (8)$$

Le terme EQE (*External Quantum Efficiency*) représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est

égal à 1 si chaque photon génère une paire électron-trou. Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE.

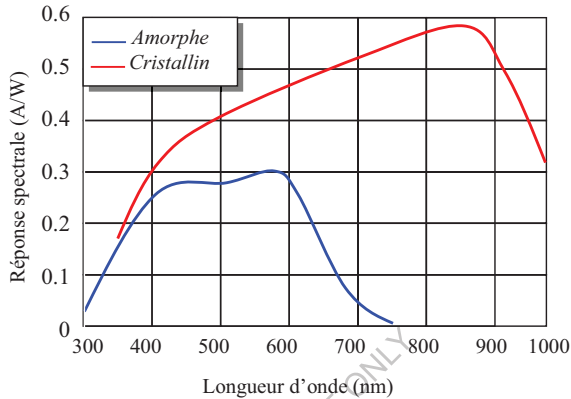


Figure 9 Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline [20].

On peut alors accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, en raison de la variation du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde, l'émetteur (en surface de la cellule) collecte les photons de faible longueur d'onde alors que la base ne prend en compte que les photons de grande longueur d'onde. Par exemple, les RS de cellules au silicium cristallin et au silicium amorphe sont représentées sur Figure 9 [20].

5.3 Choix de matériau de base

Parmi les paramètres qui limitent le rendement de conversion d'une cellule solaire, la largeur de la bande interdite E_g apparaît comme l'un des plus importants. C'est en effet l'énergie nécessaire à la création d'une paire électron-trou. En outre, elle fixe la valeur maximale de la tension de circuit ouvert. On emploie d'ailleurs le terme de facteur de tension F pour exprimer le rapport entre ces deux paramètres [22]:

$$F = q \frac{V_{oc}}{E_g} \quad (9)$$

La photo-tension théorique maximale est la tension de diffusion qui dépend de la concentration en impuretés. Celle-ci ne peut atteindre une valeur proche de la tension correspondant à la largeur de la bande interdite, que pour des matériaux très dopés où le niveau de Fermi est voisin de bord de bande. Cela engendre une diminution de la longueur de diffusion des porteurs excédentaires et les porteurs de charge se recombinent avant d'atteindre la jonction. Le courant de court-circuit décroît [22].

On peut atteindre des rendements théoriques compris entre 10% et 30% avec certains semi-conducteurs tels que le silicium, le germanium, l'arséniure de gallium, le phosphore d'indium, le sulfure de cadmium et le cuivre d'indium, de gallium et de sélénium.

5.4 Schéma électrique équivalent [20]

La modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque offre trois avantages importants: une facilité d'utilisation grâce au circuit électrique équivalent, une vulgarisation des propriétés du système et donc la compréhension de phénomènes complexes en est facilitée.

Dans le cas où la cellule se comporte en générateur de puissance, il existe plusieurs modèles électriques, aussi appelés circuits équivalents, pour reproduire le comportement de la cellule à l'aide de composants électroniques. Les circuits utilisés le plus fréquemment dans la littérature pour modéliser les cellules cristallines constituées d'une jonction $p-n$ sont les circuits à une et deux diodes (Figure 10).

On déduit du schéma de la Figure 10, l'équation caractérisant la variation du courant en fonction de la tension à l'aide des lois de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{R_{sh}} \quad (10)$$

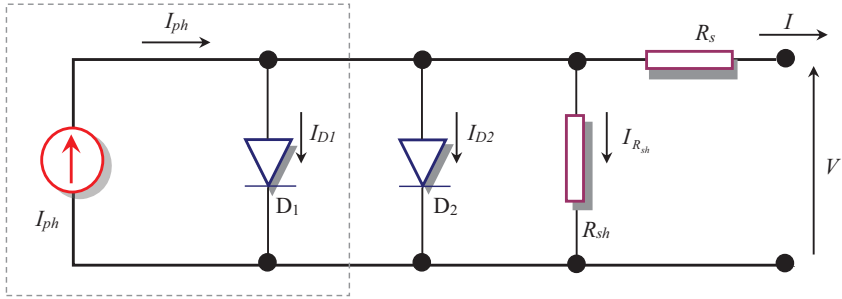


Figure 10 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque: modèle à deux diodes [20].

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{n_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{n_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}} \quad (11)$$

I_{01} est le courant de saturation de la première diode due à la diffusion et I_{02} celui de la deuxième diode due aux recombinaisons, n_1 et n_2 , sont respectivement les facteurs d'idéalité de ces deux diodes. Le facteur d'idéalité de la diode de recombinaisons varie beaucoup d'une cellule à une autre, ce qui témoigne d'une fréquence de recombinaison plus ou moins grande suivant le matériau et sa qualité. Le modèle à une diode ne fait pas la distinction entre la diffusion et la recombinaison et inclut les deux dans une même diode. Les résistances R_s et R_{sh} tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. R_s est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts avant et arrière. R_{sh} rend compte des courants de fuites engendrés par des impuretés métalliques dans la jonction ou encore des imperfections du réseau cristallin. La connaissance des valeurs de ces résistances parasites est importante dans l'étude de la qualité du matériau et la recherche de l'amélioration du rendement d'une cellule. En effet, le facteur de forme est directement lié à ces deux résistances. Plus R_{sh} est grand, moins il y a de courants de fuite et meilleur est le facteur de forme. Plus R_s est petit, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur ou à la surface du semi-conducteur et meilleur est le facteur de forme.

6 Les différentes générations de cellules photovoltaïques

Une compréhension approfondie a été acquise ces dernières années à la fois dans la conception des cellules, dans la qualité des matériaux utilisés et dans un piégeage efficace de la lumière, qui, combinés à l'optimisation des procédés de fabrication, ont conduit à l'efficacité record [23].

Selon l'institut allemand Fraunhofer [24], la capacité totale installée dans le monde a atteint 242 GW à la fin de 2015, qui a été une année record. Elle était de 134 GW en 2013 et de 178 GW en 2014, ce qui confirme une croissance soutenue du photovoltaïque (elle a été en moyenne annuelle de 42 % entre 2000 et 2015) [25]. Bien que l'apport du photovoltaïque dans l'énergie mondiale reste relativement faible vu les problèmes rencontrés lors de la conversion énergétique, les coûts de productions et le stockage d'énergie. C'est pourquoi de nombreuses études et recherches se font pour améliorer et essayer de résoudre ce genre de désagrément et pour cela nous allons voir brièvement les technologies actuelles disponibles pour mieux appréhender l'importance des recherches sur les nouveaux matériaux semi-conducteurs [26].

A l'heure d'aujourd'hui, on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques, sont comme suit:

6.1 Les cellules de 1^{ère} génération: cellules cristallines

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur (80% des panneaux sur le marché) [15, 20]. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté [27]. On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium polycristallin.

6.1.1 Les cellules en silicium monocristallin (c-Si)

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération [28]. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [29]. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse, donc très onéreuse, technologie qui demande beaucoup d'énergie pour obtenir un cristal pur. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires » [28]

Les avantages et les inconvénients de ces cellules sont comme suite [27]:

- (+) Très bon rendement (le rendement des cellules monocristallines est actuellement de l'ordre de 15 à 19% en industrie et de 25% en laboratoire) [20]
- (+) Sensibilité accrue aux rayonnements directs
- (-) Coût élevé

6.1.2 Les cellules en silicium polycristallin (p-Si)

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre. Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules polycristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur [28]. Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17% selon l'institut allemand Fraunhofer [24]

Les avantages et les inconvénients du silicium polycristallin sont [20, 27] :

- (+) Bon rendement (le rendement en industrie est de 12 à 16% et 20.4% en laboratoire, moins bon que les cellules monocristallines)
- (+) Coût moins élevé que pour les cellules monocristallines

(+) Sensibilité accrue aux rayonnements directs

(-) Forte sensibilité à la température

6.1.3 Les cellules en silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$)

En Février 2013, l'Institut de microtechnique de l'école polytechnique fédérale de Lausanne EPFL a obtenu une efficacité de 10.7% pour une cellule solaire en couches minces de silicium, battant un record du monde établi en 1998. Ces cellules utilisent 100 fois moins de matière première que les technologies usuelles, soient deux micromètres seulement de matériau photovoltaïque actif. Le laboratoire de photovoltaïque (PV-Lab) de l'EPFL, faisant partie de son Institut de microtechnique (IMT) à Neuchâtel, a établi un nouveau record du monde d'efficacité pour une cellule en silicium de type «microcristallin». Avec un rendement de 10.7%, les chercheurs suisses ont dépassé de 0.6% le précédent record, détenu depuis 1998 par la société japonaise *Kaneka Corporation*. Cette efficacité remarquable a été confirmée de manière indépendante par l'Institut Fraunhofer (ISE *CalLab solar cells*) de Freiburg (Allemagne).

Ce résultat pourrait de prime abord paraître décevant par rapport aux standards de l'industrie photovoltaïque, qui propose des modules dont l'efficacité s'échelonne entre 15 et 20%. La technologie photovoltaïque classique se base toutefois sur des tranches (wafers) de silicium cristallin ayant une épaisseur d'environ 180 micromètres. La technologie développée au PV-Lab permet au contraire d'atteindre 10.7% de rendement avec 1.8 micromètre de silicium seulement, soit 100 fois moins de matière que pour les technologies classiques. Ce procédé permet ainsi d'économiser les matières premières et offre de courts temps de «retour énergétique»: l'énergie nécessaire à la production des modules est récupérée en moins d'une année dans les régions ensoleillées [23].

6.2 Les cellules de 2^{ème} génération: couches minces "thin films" [20]

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté) et entre autres ...

Dans le cas de couches minces, la couche de semi-conducteur est directement déposée sur un substrat de verre ou de plastique... etc. La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de 1^{ère} génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation en «wafers».

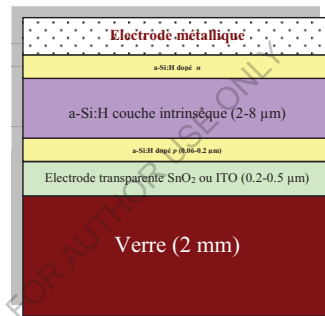
6.2.1 Les couches minces au silicium

Le silicium amorphe est un semi-conducteur ayant d'excellentes propriétés optiques, mais de faibles propriétés électroniques, ce qui mène à des rendements modules dans l'industrie assez faible, de l'ordre de 6 à 8% (13.4%, record cellule en laboratoire). Le processus de fabrication présente en revanche des coûts peu onéreux.

Parmi les propriétés des couches minces au silicium sont :

- ⊗ **Influence de l'éclairement:** Une particularité du silicium amorphe est qu'il continue à produire de l'électricité à très faible éclairement ($<20 \text{ W m}^{-2}$), contrairement aux autres technologies. C'est pour cette raison qu'on l'utilise pour les appareils en usage intérieur (calculatrices, montres).
- ⊗ **Influence de la température:** une cellule au silicium amorphe a une perte de l'ordre de $0.2\%/^{\circ}\text{C}$ en puissance en moyenne, pour une température de fonctionnement supérieure à 25°C . Mais ce coefficient dépend de la cellule. Il peut très bien être proche de 0 ou voire être même positif.
- ⊗ **Effet de stabilisation sous lumière:** le matériau qui comporte un certain nombre de défauts à l'échelle atomique, se dégrade de 10 à 15 % pour une multi-jonction et de 20 à 25% pour une simple jonction pendant les premiers

temps d'exposition au soleil (typiquement, les 1 000 premières heures d'exposition) à la suite de quoi, il se stabilise. Ce phénomène est lié aux défauts métastables du matériau qui s'activent aux premières heures d'illumination. Il s'agit d'une baisse de la photoconductivité du matériau sous fort éclairage et cet effet dépend de l'épaisseur de la jonction et des conditions de dépôt. Il est en partie réversible : lorsque les panneaux sont exposés dehors, ils récupèrent une partie de leur puissance perdue en été lorsque la température est élevée (>60°C dans les cellules) de même lors d'un recuit (par ex. 150°C).



Module a-Si:H

Figure 11 Structure d'une cellule au silicium amorphe hydrogéné [20].

En raison des méthodes d'élaboration, (évaporation, pulvérisation, décomposition d'hydrure gazeux comme SiH₄ dans du plasma), le silicium amorphe a une structure désordonnée. Il faudrait citer la Figure 11. D'autre part l'épaisseur de la couche intrinsèque n'est pas de 2-8 µm mais de 200-300 nm. Les couches dopées ont une épaisseur entre 30 et 60 nm.

6.2.2 Les couches minces à base de CdTe

La technologie à base de CdTe présente des rendements en dessous du cristallin, de l'ordre de 7 à 9% en industrie (21.0%, record cellule en laboratoire) mais bénéficie d'un faible coût à la production. Sa capacité d'absorption de la lumière et son coefficient thermique avantageux lui permet d'être en adéquation presque parfaite avec le spectre solaire. Son principal inconvénient est sans nul doute la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre qui oblige la recherche à réduire au maximum son épaisseur, qui avoisine aujourd'hui 3 μm . De plus, le cadmium est toxique. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module photovoltaïque ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2g de Cd. Sa structure consiste en une couche d'absorption en CdTe qui est placée sur un substrat de verre au contact d'autres couches de jonction, puis couverte par une plaque de verre qui scelle le panneau hermétiquement. Comme on ne sait pas réaliser de jonction $p-n$ sur CdTe, une hétérojonction est formée en déposant un autre semi-conducteur peu absorbant, le sulfure de cadmium (CdS type n)

6.2.3 Le diséléniure de cuivre, d'indium et de galium CIGS

Le CIGS partage des points communs avec le CdTe: la faible disponibilité de l'indium (une centaine d'années selon Indium Corporation) oriente la recherche à travailler sur la réduction de l'épaisseur de ce composant (2 μm aujourd'hui). Il nécessite également une couche de CdS pour former une jonction $p-n$.

Il présente le plus fort coefficient d'absorption des semi-conducteurs PV. Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement.

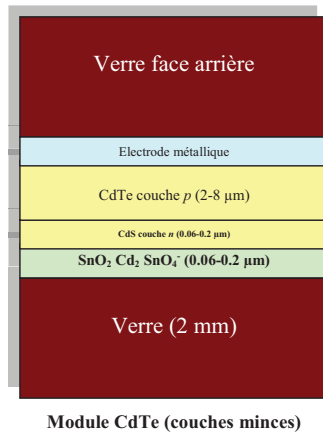


Figure 12 Structure d'une cellule CdTe [20].

On peut associer une quantité limitée de gallium (CIGS) pour améliorer ses propriétés d'absorption.

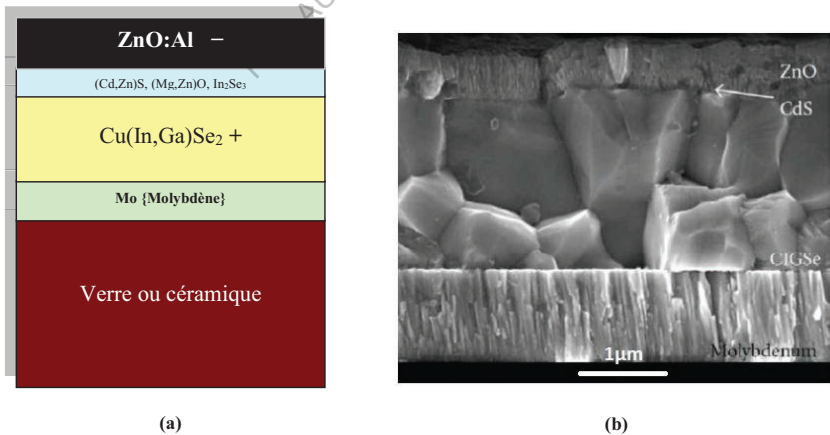


Figure 13 Structure d'une cellule CIGS, (a) Module CIGS (couches minces), et (b) Image MEB de la tranche de la cellule CIGS [20, 27].

Généralement les cellules de 2^{ème} génération possèdent divers avantages et inconvénients [20, 27]:

- (+) Sensibilité accrue aux rayonnements diffus
- (+) Moins sensible à l'ombrage dû à la forme longitudinale des cellules
- (+) Moins de matériau de base pour la fabrication
- (+) Moins sensible aux fortes températures
- (+) Permet la fabrication de panneaux souples et flexibles
- (+) La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes
- (-) Certains éléments très polluants lors de la fabrication (La toxicité de certains matériaux ex. cadmium)
- (-) Performance diminuant dans le temps
- (-) Rendement moindre que les cellules de 1^{ère} génération
- (-) La rareté de certains matériaux

Notons que le diséléniure de cuivre qui est au stade de la production industrielle et offre un rendement de 13% pour certains modules commerciaux et 21.0% pour les cellules en laboratoire). Les modules commerciaux ne présentent pas les problèmes de toxicité du cadmium. Les réductions de coût attendu à moyen terme pour cette technologie sont donc très promoteurs.

6.3 Les cellules de 3^{ème} génération : Multijonction, concentrations, ...

Il existe d'autres cellules, dites de troisième génération, qui reposent sur des macromolécules et des nanoparticules dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie et, potentiellement, d'un coût de revient plus faible. Malheureusement pour l'industrie photovoltaïque, ces cellules manquent de stabilité dans le temps, ce qui entraîne une durée de vie, lorsqu'elles sont exposées au soleil, trop courte pour les applications photovoltaïques. Une autre catégorie de cellules appartenant à la

troisième génération, basées cette fois-ci sur une logique de très hauts rendements, sont les cellules à multijonctions qui peuvent atteindre un rendement de plus de 40% en laboratoire et une limite théorique de 81%. Ces cellules sont en revanche très onéreuses et ne sont utilisées, pour le moment, que dans le domaine du spatial ou du solaire à concentration. Les cellules de troisième génération sont, pour l'instant, soit au stade de recherche, soit appliquées pour des domaines autres que le solaire photovoltaïques terrestres (sans concentration) [20].

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif [27]:

- ⊗ Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes)
- ⊗ Cellules à concentration
- ⊗ Utilisation de photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas abordé par la cellule
- ⊗ Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie
- ⊗ Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur

Parmi les technologies prometteuses de la 3^{ième} génération, on cite [30]:

6.3.1 Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe. Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche. Le rendement théorique maximum de la conversion

photon-electron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46%.

6.3.2 Les constituants organiques (polymères)

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dits, des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes: plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques. D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle.

6.3.3 Les cellules hybrides: thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ainsi qu'ils développent des capteurs solaires hybrides en combinant le photovoltaïque et le thermique.

Par conséquence, les avantages de ces derniers types (concentrations, organiques et hybrides) des cellules solaires sont comme suite [30]:

(+) L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.

- (+) Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- (+) Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- (+) La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- (+) Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle.

Généralement les progrès rencontrés au cours de des 40 dernières années dans le développement de fabrication des différentes générations des cellules photovoltaïques sont représentés dans la Figure 14.

7 Les cellules solaires à base de $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$

Comme il a été introduit dans la partie précédente (6), il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Nous décrivons, dans cette section définition, la structure, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule solaire à base de CIGS. Ensuite nous présentons l'aspect technologique des cellules solaire à base de CIGS.

Le contrôle des propriétés optoélectroniques du semi-conducteur en fonction de la teneur en éléments; cuivre (Cu), gallium (Ga), d'indium (In) et de sélénium (Se) rend compte d'une ingénierie fine du matériau à maîtriser, afin d'en accroître les performances.

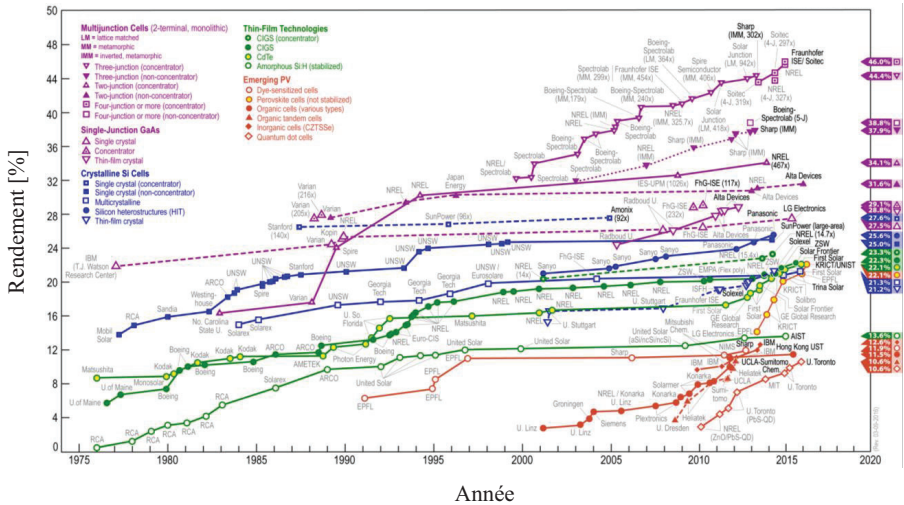


Figure 14 Meilleurs rendements réalisés par les différents types de cellules photovoltaïques au cours les dernières années 1975-2016 [31].

Le composé, à base de Cu, de Ga, d'In et de Se, de formule générale $CuGa_xIn_{1-x}Se_2$ (avec x compris entre 0 et 1), noté CIGS, est un semi-conducteur à bande interdite directe, dont la largeur varie entre 1 eV (CIS) et 1.7 eV (CGS). Il a un coefficient d'absorption exceptionnel qui dépasse 10^5 cm^{-1} pour un gap de 1.5 eV. Il est naturellement de type p et souvent utilisé avec le sulfure de cadmium, qui est lui de type n , pour former la jonction $p-n$. Il est considéré parmi les matériaux les plus prometteurs et un rendement de conversion record de 19% a été obtenu. Malheureusement le cadmium est connu par sa toxicité et l'indium devient de plus en plus cher et rare [32].

7.1 Aspect technologique des cellules solaires à base de $Cu(In,Ga)Se_2$

L'histoire de la technologie des cellules solaires à base de diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) constitue une formidable aventure scientifique et technologique dont les efforts ont permis d'augmenter les rendements des cellules solaires de 9 % dans les années 80 à plus de 20 en laboratoire et atteignent 13% à l'échelle

industrielle [15, 33]. Les progrès scientifiques qui ont permis la réalisation de cellules solaires en couche mince à très haut rendement ont eu lieu par sauts technologiques successifs. L'étude du passé de cette technologie et en particulier l'étude de ces différentes étapes clés est indispensable pour comprendre la complexité de la structure d'une cellule solaire à base de CIGS standard.

Les premières cellules solaires de type CIGS ont été fabriquées dans le laboratoire Bell au début des années 70. Destinées à la fabrication de photodétecteurs, les cellules étaient constituées de monocristaux de CuInSe_2 (CIS) évaporés sur un substrat alumine/molybdène. A partir de 1975, devant les difficultés de croissance des monocristaux de CIS, Kazmerski et ses collaborateurs envisagèrent la fabrication de couches minces de CIS. L'intérêt pour l'application photovoltaïque a très vite grandi devant les bons rendements autour de 9 % obtenus par BOEING en 1981 [15]. La structure de la cellule solaire utilisée à ce moment est présentée Figure 13. Le molybdène déposé sur un substrat de verre borosilicate constituait l'électrode arrière. Le CuInSe_2 déposé par co-évaporation constituait l'absorbeur de la cellule solaire et la fine couche de $(\text{Cd,Zn})\text{S}$ constituait la couche tampon. Enfin, la fenêtre optique était assurée par une couche de ZnO:Al . Depuis les années 80, quatre évolutions principales ont permis d'obtenir les rendements actuels [15]:

⊗ **Modification de la structure**

La modification de la couche de $(\text{Cd,Zn})\text{S}$ par la couche de CdS et l'introduction de la couche de ZnO:Al ont favorisé l'absorption du spectre aux faibles longueurs d'ondes.

⊗ **Introduction du gallium**

A partir de 1987, Chen et al. [34] tentèrent d'incorporer des atomes de gallium à la structure CIS. La substitution partielle de l'indium par le gallium a permis d'améliorer les performances électriques de la cellule solaire.

⊗ Influence du sodium

Dans les années 90, Hedstrom et al. [35] se rendirent compte de l'effet bénéfique du sodium pour les propriétés de la couche absorbante. En voulant changer le substrat initial par du verre sodé afin de réduire les coûts, ils s'aperçurent que les performances des cellules solaires étaient fortement améliorées. Ils attribuèrent par la suite l'effet bénéfique observé à l'influence du sodium provenant du verre sur le dopage de la couche de CIGSe.

⊗ Procédés de dépôts

L'importance des procédés de dépôts de la couche absorbante a été étudiée au sein du laboratoire de Boeing. En passant d'une à deux puis trois étapes, les procédés de dépôt ont permis d'améliorer les performances des cellules solaires par différents phénomènes: enterrement de la jonction $p-n$, gradients de gallium et recristallisation [36].

7.2 Structure d'une cellule CIGS [33]

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre sodocalcique (*Soda-Lime Glass*, SLG). La Figure 13 présente la structure standard d'une cellule à base de CIGS.

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. La couche située directement au dessus du contact arrière, est composée du matériau absorbant, 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. 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 [37]. 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 ($\text{Zn}(\text{O},\text{S})$, $(\text{Zn},\text{Mg})\text{O}$, $\text{In}_2(\text{S},\text{Se})_3$, 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 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 [38]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium ($\text{ZnO}:\text{Al}$) 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. 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.

8 Conclusion

Cet état de l'art nous a d'abord permis de présenter un aperçu sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque, notions importantes sur le spectre solaire et l'air masse ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque. Nous exposons ensuite les performances d'une cellule photo-voltaïque nécessaires à la compréhension de ces dispositifs sous ensoleillement et sous obscurités. En fin, les différentes technologies des cellules solaires ont été bien discutées et plus particulièrement de celles qui feront actuellement l'objet de cette étude bibliographique, à savoir le désiliniure, cuivre, d'indium et galium CIGS sous sa forme chalcopyrite.

FOR AUTHOR USE ONLY

9 Références bibliographiques

- [1] C. Alonso, thèse de Doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III– France, 2003.
- [2] S. M. Aït-Cheikh, thèse de Doctorat, École nationale polytechnique (ENP) – Alger, Algérie, 2007.
- [3] C. Cabal, thèse de Doctorat, université Toulouse III – Paul Sabatier– France, 2008.
- [4] K. Touafek, M. Haddadi, A. Malek, W. Bendaikha, Revue des énergies renouvelables, centre de développement des énergies renouvelables (CDER), 11 N° 1 (2008) 153–165.
- [5] M. A. Cid-Pastor, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, France, 2006.
- [6] N. Oleksiy, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2005.
- [7] S. Berson, thèse de Doctorat, université Joseph Fourier – Grenoble I, France, 2007.
- [8] S. Alem-Boudjemline, thèse de Doctorat, université d'Angers, France, 2004
- [9] Anne Labouret et Michel Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*. 2ième édition, Dunod éditions, Paris, France, 2005.
- [10] T. Desrues, thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon– France, 2009
- [11] S. Petibon, thèse de Doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III, France, 2009.
- [12] S. -D Vecchi, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon–France, 2013.
- [13] S. Quozola, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2007.
- [14] B. Equer, *Energie solaire photovoltaïque*, Vol. 1, Ellipses éditions, Paris, 1993.
- [15] E. Leonard, thèse de Doctorat, Institut des matériaux Jean-Rouxel (IMN) de la faculté des sciences et techniques de Nantes – France, 2013.

- [16] H. Mathieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*. Dunod éditions, 2004.
- [17] B. Thuillier, thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon– France, 2001.
- [18] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy, *Le pompage photovoltaïque*, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa, EIER, CREPA, Canada, 1998.
- [19] M. Hadjab, mémoire de Magister, université Djillali Liabès – Sidi Bèl Abbès – Algérie, 2011.
- [20] T. Mambrini, thèse de Doctorat, université Paris-Sud – France, 2014.
- [21] G. Poulain, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon – France, 2012.
- [22] N. Sahouane, thèse de Doctorat, université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie, 2016.
- [23] <https://actu.epfl.ch/news/nouveau-record-du-monde-pour-des-cellules-solaires/> (dernier accès le 26.08.2017)
- [24] Photovoltaic report, Fraunhofer institute for solar energy systems (ISE) Freiburg, Allemagne, 12 Juillet 2017.
- [25] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-developpement-du-photovoltaique-dans-le-monde> (dernier accès le 27.08.2017).
- [26] S. Benghabrit, thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran (USTO) Algérie, 2015.
- [27] <http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html> (dernier accès le 27.08.2017).
- [28] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique> (dernier accès le 30.08.2017).
- [29] http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques (dernier accès le 30.08.2017).

- [30] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque> (dernier accès le 06.09.2017).
- [31] <https://www.nrel.gov/> National renewable energy laboratory (NREL) (dernier accès le 06.09.2017)
- [32] M. Tablaoui, thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 – France, 2015.
- [33] C. Roger, thèse de Doctorat, Université de Grenoble– France, 2013.
- [34] W. S. Chen, J. M. Stewart, B. J. Stanbery, W. E. Devaney, R. A. Mickelsen, Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., New Orleans (1987) 1445–1447.
- [35] J. Hedstrom, H. Ohlsen, M. Bodegard, Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conf., New York (1993) 364–371.
- [36] A. M. Gabor, J. R. Tuttle, Mi. H. Bode, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 4 (1996) 247–260.
- [37] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18 N° 6 (2010) 411– 433.
- [38] U. Rau, P. O. Grabitz, J. H. Werner, Appl. Phys. Lett., 85 N° 24 (2004) 6010.

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**More
Books!**



yes
I want morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.shop

Achetez vos livres en ligne, vite et bien, sur l'une des librairies en ligne les plus performantes au monde!

En protégeant nos ressources et notre environnement grâce à l'impression à la demande.

La librairie en ligne pour acheter plus vite

www.morebooks.shop

KS OmniScriptum Publishing
Brivibas gatve 197
LV-1039 Riga, Latvia
Telefax: +371 686 20455

info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com



FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY