

Chapitre I :

La conversion

photovoltaïque

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

I.1. Introduction

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ».

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord montrer les principales caractéristiques du spectre solaire, pour présenter ensuite l'idée principale de la conversion photovoltaïque. Pour cela, le principe de la conversion photovoltaïque est rappelé. Ensuite, nous abordons la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. Puis nous énumérons les principaux paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque. Enfin nous terminons ce chapitre par l'état de l'art en technologies photovoltaïque, en passant en revue les différentes filières technologiques pour la fabrication des cellules solaires.

I. 2. Spectre solaire

I.2.1. Qu'est-ce que la lumière ?

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde. [1]

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de raies d'absorptions. Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

Le rayonnement ultra-violet émis par le Soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les UV-A ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

nanomètres ($1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{mètre}$), les UV-B dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les UV-C qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la Terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont soit absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation

$$\Delta E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda \quad (\text{I-1})$$

h étant la constante de Planck c'est-à-dire $6,63 \times 10^{-34}$ Joules par seconde. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1350 Watts/m² (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m². [2]

I.2.2. Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, microondes... Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie. Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 μm (= 3000 nm).

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer «Ultraviolette» la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On réalise la

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

même décomposition avec un prisme (figure I-1). On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre. [1]

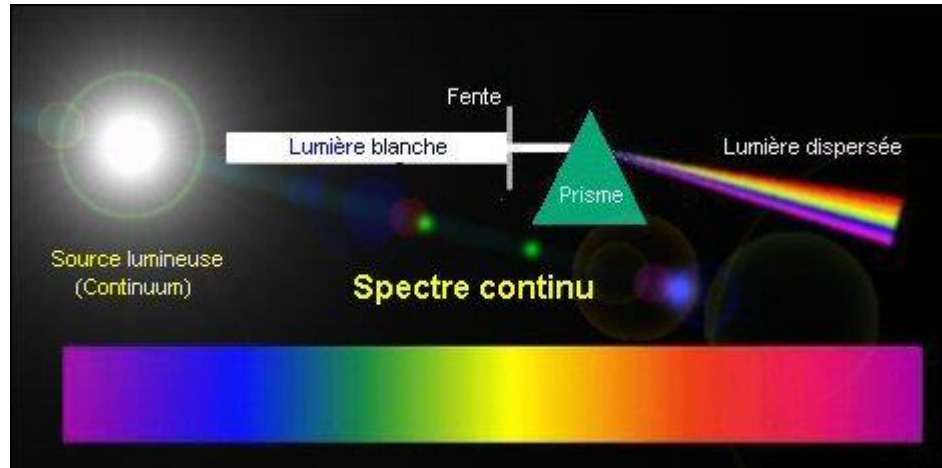


Figure I-1 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme [3].

Tableau I-1 : Principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages [1].

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	> 1 mm	$< 3 \times 10^{11}$ Hz	Radio, TV, radars
Infrarouge	1 mm à 0,8 μm	3×10^{11} à 4×10^{14} Hz	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	0,8 à 0,4 μm	$3,7 \times 10^{14}$ à $7,5 \times 10^{14}$ Hz	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	0,4 à 0,05 μm	$7,5 \times 10^{14}$ à 6×10^{15} Hz	Bronzage, purification de l'eau
Rayons X	0,05 μm à 10^{-2} Å	6. 1013 à 3. 1020 Hz	Radiographie
Rayons gamma	$< 10^{-2}$ Å	$> 3. 1020$ Hz	-

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

I. 3. La conversion photovoltaïque

I.3.1. Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. [3]

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (I -2)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [4]

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau, ...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Quessier [5]. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1.4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1.12eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit (I_{cc}). [6]

I.3.2. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{Serie})}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{Serie})}{R_{Shunt}} \quad (I-3)$$

Où $V_T = \frac{K \times T}{e}$ représente le potentiel thermodynamique, I_{sat} , le courant de saturation de la jonction, K , la constante de Boltzman ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin), T , la température de la cellule en Kelvin, e , la charge d'un électron, n , le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} , le courant fourni par la cellule, V_{CELL} , la tension aux bornes de la cellule, I_{CC} , le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, R_{shunt} , la résistance modélisant les courants de fuites de la

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

jonction, et finalement, R_{serie} , la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions. La Figure I-2 représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation (1-3). [7]

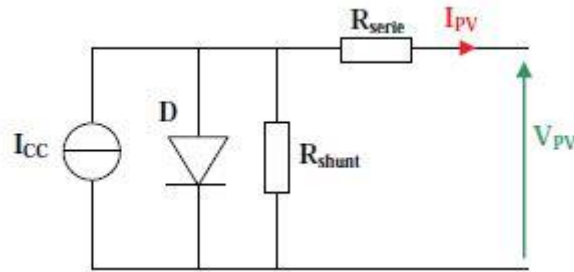


Figure I-2 : électrique équivalent Schéma d'une cellule en silicium cristallin.

I.3.3. Paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{co} , un courant de court-circuit I_{cc} et un facteur de forme FF . Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres, Ces caractéristiques permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photocourant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p , donné par la relation:

$$I_{ph} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (I-4)$$

b) Tension de circuit ouvert

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{kT}{q}\right) \cdot \ln \left[\left(\frac{I_{cc}}{I_o}\right) + 1 \right] \quad (I-5)$$

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

c) La puissance caractéristique d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure I-3) est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \quad (I-6)$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

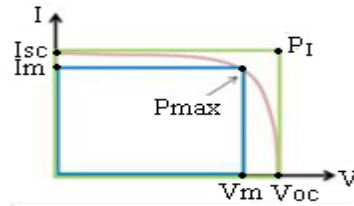


Figure I-3 : Puissance maximum d'une cellule PV.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_i correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure I-3) :

$$P_i = P_{maxid\acute{e}ale} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (I-7)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V_{(P_{max})}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni $I_{(P_{max})}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (I-8)$$

d) Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{max} et la puissance idéale P_i . Le facteur de forme FF (en angl. File Factor) correspond au rapport [8 ,9] :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I-9)$$

e) Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o qui est normalisée à 100 mW cm^{-2} pour un spectre de $AM_{1,5}$. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_o [10] :

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_o} = FF \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_o} \quad (I-10)$$

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

I. 4. Etat de l'art en technologies photovoltaïque

I.4.1. Première génération

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin. polycristallin. rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince. [11]

a) Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [12].

a.1 La méthode Czochralski

L'étape suivante consiste à obtenir du silicium monocristallin. La principale méthode est celle de Czochralski [13] (silicium CZ, environ 80% de la production et 95 % des circuits intégrés). On fait fondre le silicium polycristallin dans un four d'étirage sous argon à 1450°C. Un germe monocristallin est amené au contact du silicium fondu puis tiré lentement (de 0,4 à 3 mm/min). Lors de la croissance du cylindre de silicium, le creuset contenant le silicium liquide et le cylindre sont animés d'un lent mouvement de rotation en sens inverse. On obtient alors un lingot cylindrique de 60 à 100 kg pour environ 2 m de longueur dans le cas de disques (wafers) de 200 mm. Depuis 1998, la production s'est étendue à des diamètres de 300 mm. Un des principaux fondeurs de microprocesseurs annonce la transition vers des wafers de 450 mm de diamètre pour 2012.

a.2 La méthode de la zone fondue flottante

L'autre technique (20% de la production) est celle de la zone fondue flottante (silicium FZ) qui permet d'obtenir du silicium d'une plus grande pureté en évitant la contamination par le creuset. Le processus consiste à produire une zone liquéfiée en chauffant un bâton de silicium polycristallin. Le bâton est déplacé verticalement et suivant une lente rotation. Un germe de cristal est utilisé pour initier la croissance. Cette méthode est cependant plus longue et plus chère. [14]

Avec les matériaux Cz et FZ, dits de la micro-électronique, il est possible d'obtenir un rendement de conversion record en laboratoire : 24,7 % (Université de New South Wales, Australie), soit supérieur de huit points à ceux de l'industrie. [15]

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

b. Le silicium polycristallin (multicristallin)

La majorité des modules photovoltaïques sont à base de silicium polycristallin (poly c-Si), plus souvent appelé silicium multicristallin (mc-Si). L'intérêt du silicium multicristallin est au niveau de coûts de production plus faibles, du fait de l'utilisation de procédés de coulage des lingots en blocs, beaucoup plus rapides et moins coûteux en énergie que dans le cas de la synthèse de monocristaux Cz ou FZ (24 à 48 h contre quelques semaines pour ces derniers).

Une variante de la technologie de croissance par coulage de mc-Si, le procédé Polix de EDF-PW, est représentée figures I-4. Des blocs de plus de 450 kg sont ainsi obtenus par refroidissement contrôlé du silicium en fusion dans un moule de nature appropriée (souvent en quartz).

Afin de diminuer le bilan énergétique de la croissance de lingots de silicium, des matériaux mc-Si produits par coulée continue en creuset électromagnétique (EMG) ont été développés au Japon et en France.

Cependant, le matériau Si multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire du silicium monocristallin Cz ou FZ. La présence de joints de grains, associés à d'éventuelles contaminations par des impuretés métalliques, du carbone et de l'oxygène, introduit des défauts importants qui pénalisent le rendement (< 20 %).

Par ailleurs, des recherches importantes sont menées sur les procédés de purification du silicium à partir du silicium métallurgique, obtenu par carboréduction de la silice et dont la pureté de 99 % est incompatible avec l'obtention de propriétés électroniques suffisantes. Il faut pour cela réduire la concentration des impuretés métalliques en particulier à quelques parties pour million (ppm), par distillation et condensation par l'intermédiaire de chlorosilane dans le cas de l'électronique et de la filière monocristalline (exemple du procédé Siemens). Dans le cas de la filière mc-Si, on part d'un silicium moins pur que pour le mono c-Si, déchets de silicium électronique et silicium métallurgique, que l'on fond dans un creuset en quartz recouvert d'une couche de nitrure de silicium (pour faciliter le démoulage). Ensuite, grâce à un gradient de température contrôlé entre le haut et le bas du creuset, le silicium liquide se solidifie donnant naissance à un lingot avec des grains de silicium de plusieurs centimètres. [12]

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

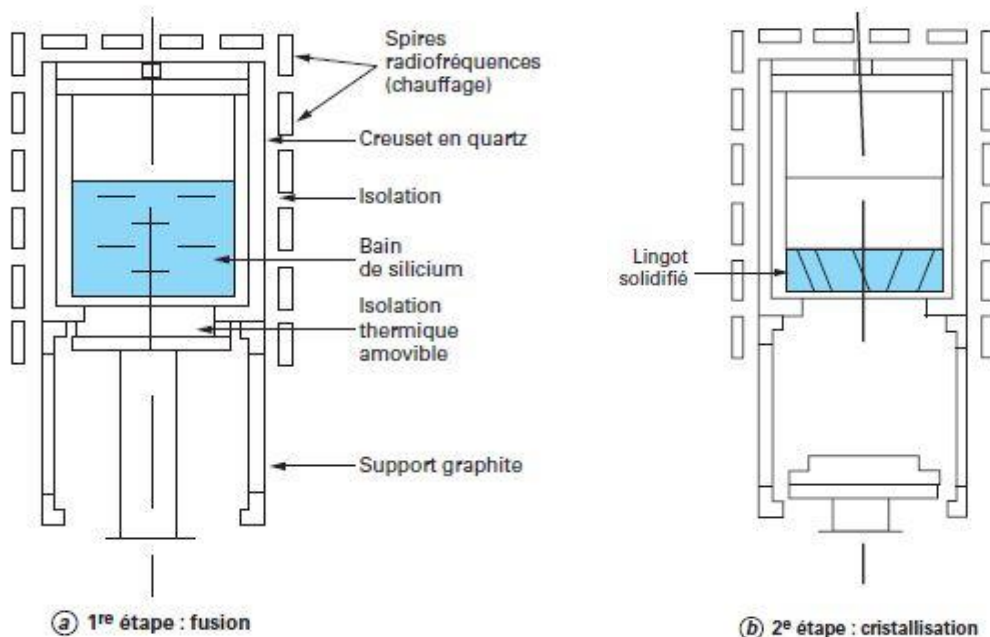


Figure I-4 : Principe de croissance par solidification directionnelle du type Polix développé par EDF-PW.

c. Silicium en ruban (ribbon) autosupporté

Les techniques de production de silicium en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. Plusieurs procédés ont été développés. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. La plus connue est basée sur l'effet de la capillarité entre deux lèvres de carbone. Ce procédé, illustré sur la figure I-5(a), a été initié aux USA par Mobil-Tyco dans les années 1975, puis transféré en Allemagne par RWE Schott Solar. D'autres méthodes utilisent des techniques de croissance de ruban sur un film ou une maille de carbone. C'est le cas de la société SOLARFORCE en France qui utilise comme support de croissance un ruban de graphite (figure I-5(b), procédé RST), et qui permet de déposer des rubans de silicium de part et d'autre du graphite. Le principal avantage de la méthode RST est l'obtention de silicium ruban très mince ($< 100 \mu\text{m}$), permettant ainsi un gain matière très important.

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

Cependant, la vitesse de croissance linéaire est lente, généralement de quelques cm/min à quelques dizaines de cm/min. La vitesse optimale est imposée par les critères de solidification qui imposeront la taille des grains, la pureté du matériau par la ségrégation des impuretés, la déformation et les contraintes dans les plaquettes.

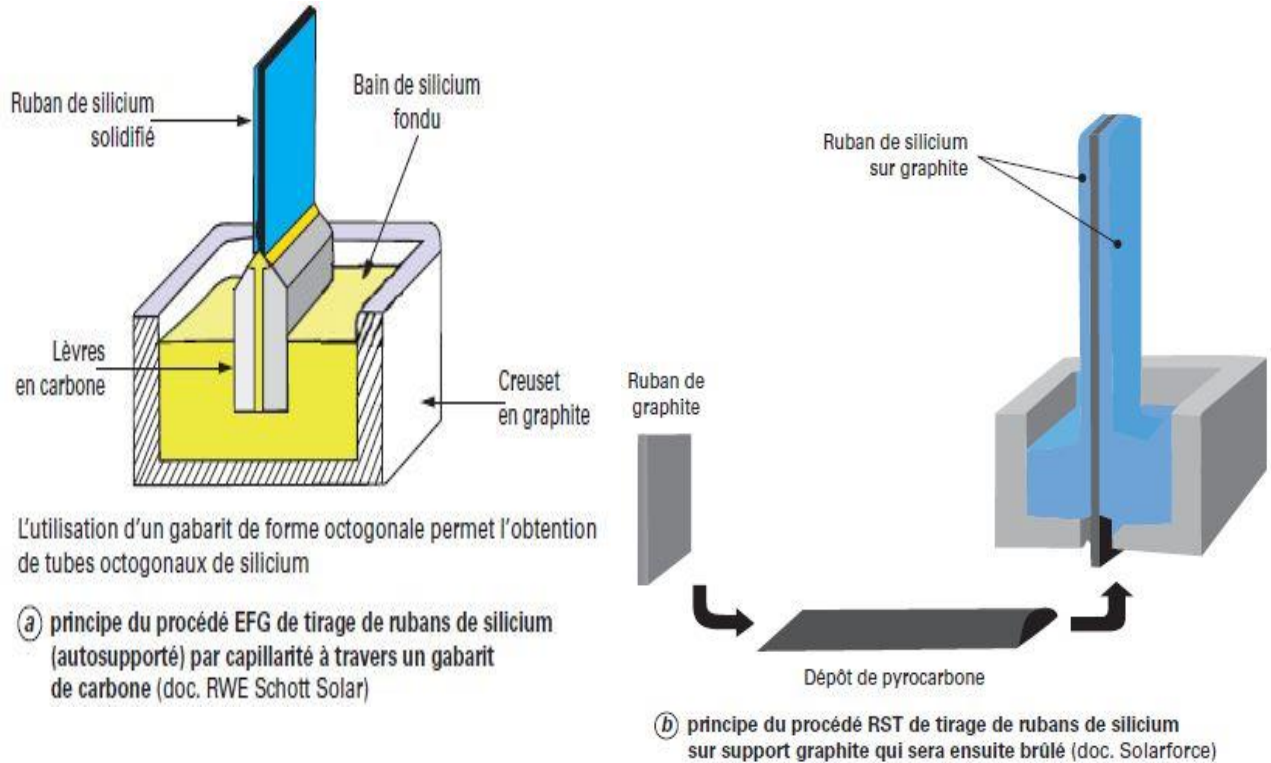


Figure I-5 : Procédés de production du silicium en ruban.

I.4.2. Deuxième génération : filière couches minces

a) Silicium nanocristallin et amorphe

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n.

Ces structures pin sont déposées directement sur le support à basse température (200 °C ou moins) à partir de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (appelée PECVD pour plasma enhanced-CVD), par décomposition du gaz silane (SiH_4). Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application dans le domaine des modules souples que l'on peut déployer sur les grandes toitures, fabriqués par les technologies en rouleau (roll to roll) sur des supports plastiques ou métalliques, et dans celui des supports verre de grande surface pouvant aller jusqu'à près de 5,7 m² d'un seul tenant.

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

b) Cellules à base de tellurure de cadmium CdTe

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS avec l'énergie du gap E_g 2,4 eV), qui laisse passer la lumière. On parle alors de couche fenêtre. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2 μm autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs, dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques μm .

c) Matériaux à base de séléniure de cuivre indium gallium

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celles du CdTe du fait de leur caractère ternaire, voire quaternaire (avec le gallium, CIGS), ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant partiellement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène.

I.4.3. Troisième génération

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

a) Les cellules multijonctions

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs (dits III-V). Comme montre la figure I-6 :

- une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.
- une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges.

Chapitre I : La conversion photovoltaïque



Figure I-6 : vue schématique de la composition de la cellule à multijonction.

b) Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO_2) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iode-iodure.

c) Cellules organiques

Une des filières émergentes est celle des cellules tout organique. Dans ce cas, on se sert de la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant ainsi de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'en faire des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellules organique à jonction interpénétrée était né (BulkHeterojunction). Le système de base montré sur la figure I-7 est celui où le donneur est constitué par des molécules de fullerène fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène. [15]

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

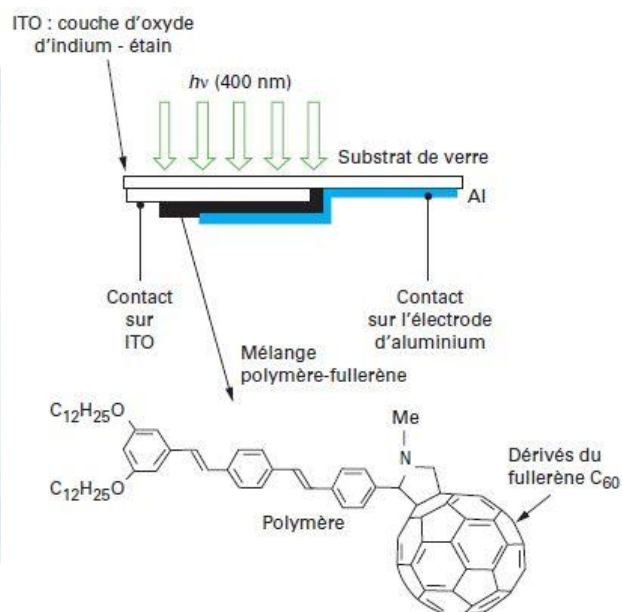
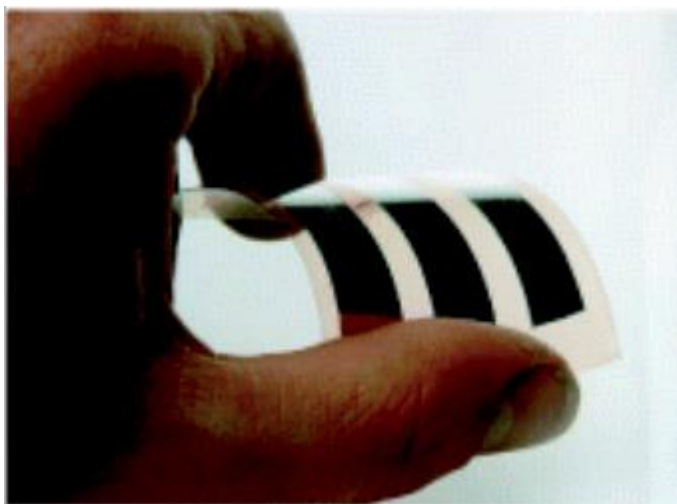


Figure I-7 : Cellule souple à base de matériaux organiques (doc. Université de Linz, Autriche).

On peut résumer les rendements des cellules au tableau suivant :

Tableau I-2 : les différentes technologies photovoltaïques.

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
1^{ère} génération				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2^{ème} génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
3^{ème} génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

I. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré le mode de fonctionnement de la cellule solaire à partir de son absorption du spectre solaire jusqu'à la production d'électricité. Nous avons décrit dans ce chapitre les composants du spectre solaire et le principe de fonctionnement de la cellule solaire, nous avons ensuite fait une modélisation de la cellule et nous avons fini ce chapitre par l'état de l'art en technologie photovoltaïque.

Chapitre I : La conversion photovoltaïque

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] A. Labouret, P. Cumunel, and J.-paul B.B. Faraggi, “Cellules solaires Les bases de l’énergie,” *Dunod ; Paris ; (2010)*.
- [2] <https://sites.google.com/site/tpesoleil2012/fayolle/composition-des-rayons>
- [3] F.E.T. Technologies, “Le photovoltaïque,” 1921, pp. 1-10.
- [4] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, Page(s):1275 – 1278, 13-17 May 1996.
- [5] William Shockley and Hans J. Queisser ; « Detailed balance limit of efficiency of P-N junction solar cells » ; J. APPL. PHYS. 32, 510; DOI:10.1063/1.1736034,(1961).
- [6] Zaouk, D.; Zaatari, Y.; Khoury, A.; Llinares, C.; Charles, J.-P.; Bechara, J.; Ajaka, M.; « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », *Environment and Solar*, Page(s):93 – 95, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000.
- [7] Stéphane Petibon “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques” ; Thèse de Doctorat de l’Université de Toulouse (2009).
- [8] K.G. Deepa, R. Jayakrishnan, K.P. Vi-Jayakumar, C.S. Kartha, V. Ganesan, *Sol. Energy* 83, 964-968 (2009).
- [9] K.R. Murali, C. Vinothini, K. Srinivasan, *Mater. Sci. Semic. Proc.* 15, 194-198 (2012).
- [10] A. Antony, ” Preparation and characterisation of certain II-VI, I-III-VI semiconductor thinfilms and transparent conducting oxides”, Thèse Doct., Cochin Univ. of Science and Technology, India p. 17 (2004).
- [11] M. Abdhahak, “Etude et Identification paramétrique d’une cellule photovoltaïque organique,” thèse de magister, 2011.
- [12] J.-C. Muller. *Techniques de l’ingénieur. Dossier BE8579.*
- [13] Czochralski growth of silicon, W. Zulehner, *Journal of Crystal Growth*, Volume 65, Pages 189-213 Issues 1-3, 2 December 1983.
- [14] W. Schröder et al, “Silicon Grown by the Floating Zone Technique” *Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, (1994)
- [15] M. Sablier, “Spectrométrie de masse - Principe Électricité photovoltaïque marchés et appareillage Par : Électricité photovoltaïque Matériaux et marchés,” *Renewable Energy*, 2015.