

I.1 Introduction

La capacité photovoltaïque solaire mondiale atteindra 320 à 430GW d'ici fin 2018 (figure 1.1). Le scénario minimal (« Low scenario ») suppose que les marchés dans les pays d'émergents ne décolleront pas, alors que le scénario optimiste (« High scenario ») assume un marché vigoureux des PV dans les régions émergentes [1].

La production des panneaux solaires s'appuie sur deux technologies majeures :

- Matériaux solides cristallisés
- Matériaux amorphes en film mince

La première catégorie (matériaux solides cristallisés) représente environ 90% de la part de marché, les matériaux amorphes et en film mince couvrent 10%, mais avec une tendance à la hausse.

Néanmoins, Il existe d'autres technologies émergentes comme les cellules solaires photo-électrochimiques de **Grätzel** et les cellules organiques. Malgré, leurs propriétés prometteuses, ces cellules solaires ne sont pas encore mûres pour la production en masse et l'installation de centrales de grande puissance [1].

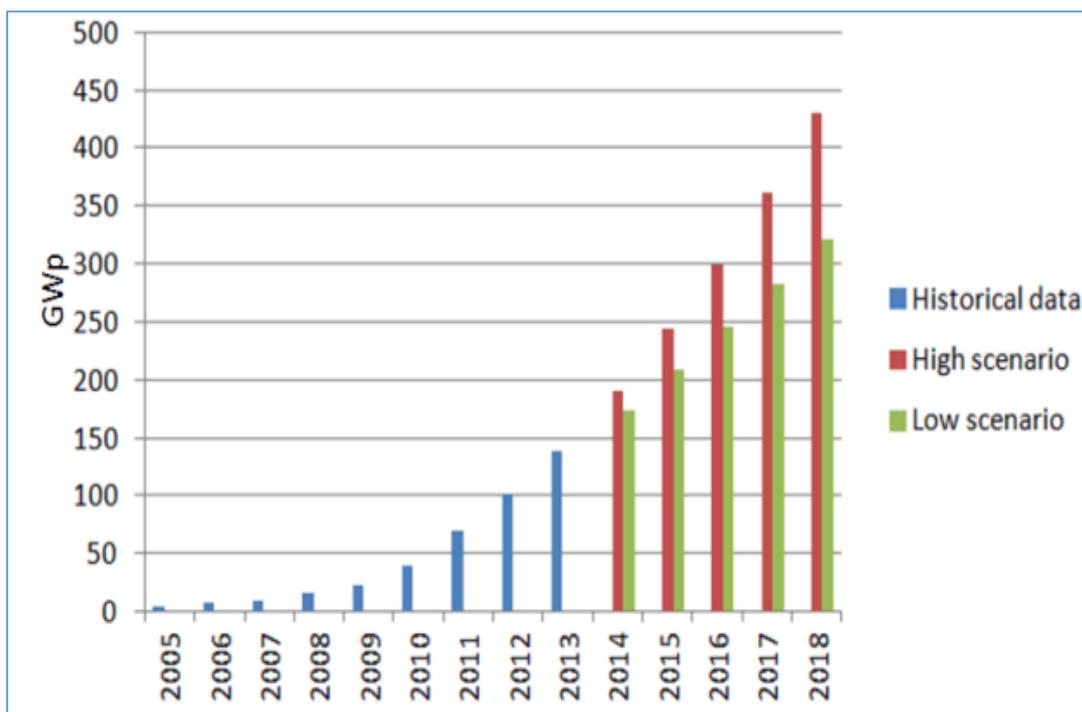


Fig. 1.1 : scénario cumulatif Global de PV jusqu'en 2018, données de [1]

I.2-L'Effet Photovoltaïque

I.2.1-Définition et historique

Le mot « photovoltaïque » (PV) est composé de deux mots ; « photo » qui veut dire lumière et « voltaïque », au nom du physicien italien **Alessandro Volta** inventeur de la première batterie électrochimique, qui signifie électricité [2]. Donc la conversion photovoltaïque consiste à la transformation directe de la lumière en électricité, en se servant d'une cellule photovoltaïque. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français **Edmond Becquerel** en **1839** [2]. Il plaçait deux électrodes enrobées de platine dans un récipient avec un électrolyte et a déterminé un courant circulant entre elles. Par la suite il a constaté que l'intensité du courant a changé lorsqu'il est exposé à la lumière. En **1883**, l'inventeur américain **Charles Fritts** construit un petit module de cellules de sélénium en les couvrant avec une très mince électrode d'or. Mais c'est jusqu'au **1887**, le physicien allemande **Heinrich Rudolf Hertz** découvre l'effet photovoltaïque. En **1904**, **Albert Einstein** expliqua la théorie de cet effet. C'est le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en **1921** [2].

En **1955**, les chercheurs américains **Chapin, Fuller, Pearson** et **Prince**, travaillant pour les laboratoires Bell Telephone (actuellement : **Alcatel-Lucent Bell Labs**), ont pu développer une cellule photovoltaïque avec un rendement de **7 %**. Par la suite, les Américains lancent en **1959** le satellite **Vanguard** totalement alimenté par des piles photovoltaïques ont un rendement de **9%**. [3]

Les exploitations domestiques des cellules solaires ont vue le jour, en **1973**, par la première maison avec une installation photovoltaïque à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique, et en **1983** (en Australie), par la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque et capable de faire parcourt **4000 kilomètres** [3].

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de **25%** [3].

I.2.2-L'énergie solaire photovoltaïque

La source principale de lumière naturelle de notre planète est le Soleil. Les systèmes solaires photovoltaïques permettent de convertir cette énergie lumineuse en énergie électrique. Nous détaillerons dans ce qui suit les caractéristiques du rayonnement solaire [4].

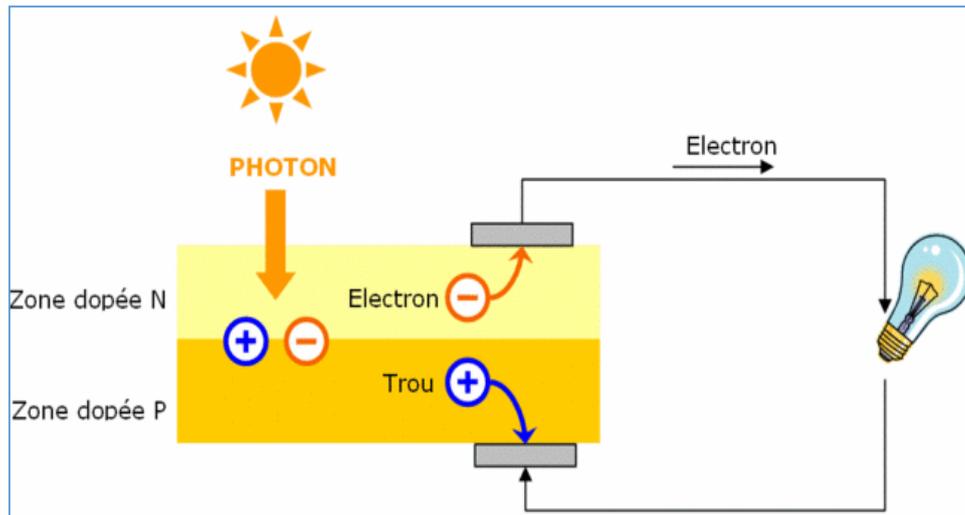


Fig. 1.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [5]

I.2.3-Rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 5900°K. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1.35 kw/m², Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.1)$$

Où θ représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. [6]

L'AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur). On distingue aussi les spectres AM1.5D et AM1.5G correspondant respectivement au flux direct et au flux global et les spectres AM1 correspond au soleil à la verticale ($\theta=0$) et l'AM4 correspond à l'horizon ($\theta=75^\circ$). [7]

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes caractérisées par leur gamme de longueur d'onde (voir figure 1.2). Elle est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie comme suit : [8]

Ultraviolet	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$
Infrarouge	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$

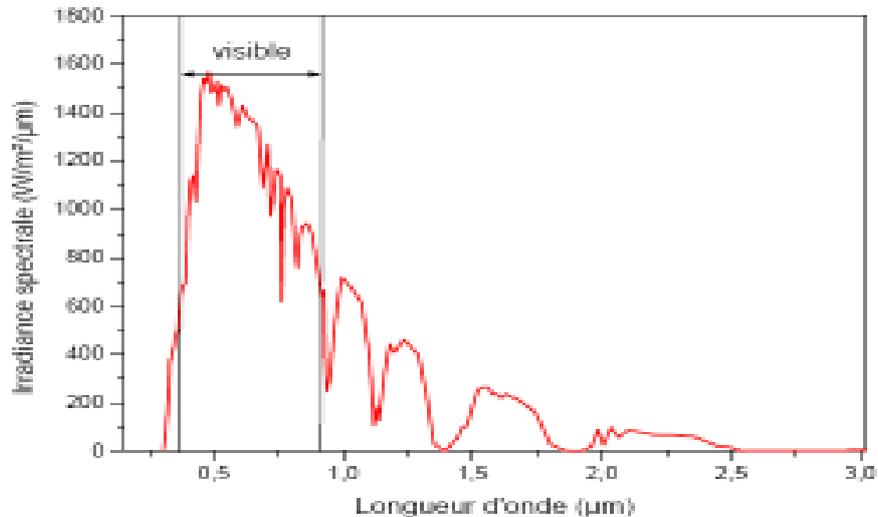


Fig.1.3 : Spectre solaire en fonction de la longueur d'onde[9]

I.3-La cellule photovoltaïque

I.3.1-Architecture de la cellule

I.3.1.1-La passivation

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique de la surface, en neutralisant les effets des défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque, dont les plus importantes sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium SiN_3 . [10]

I.3.1.2-Texturisation de la surface [11]

On peut faire la texturisation de la surface, soit en combinaison avec un revêtement de la couche antireflet soit avec elle-même. Elle est utilisée pour réduire au minimum la réflexion de la surface de la cellule. Par exemple ; un substrat monocristallin peut être texturisé par attaque chimique le long des faces des plans cristallins.

I.3.1.3-Champ électrique dans la zone arrière (BSF)

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base [12]

I.3.1.4-Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo-générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractérisation (I - V) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important [13]

I.3.1.5-La couche antireflet [12]

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Pour minimiser la réflexion de la lumière une couche antireflet (CAR) est utilisée. L'épaisseur de la couche antireflet est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad (1.2)$$

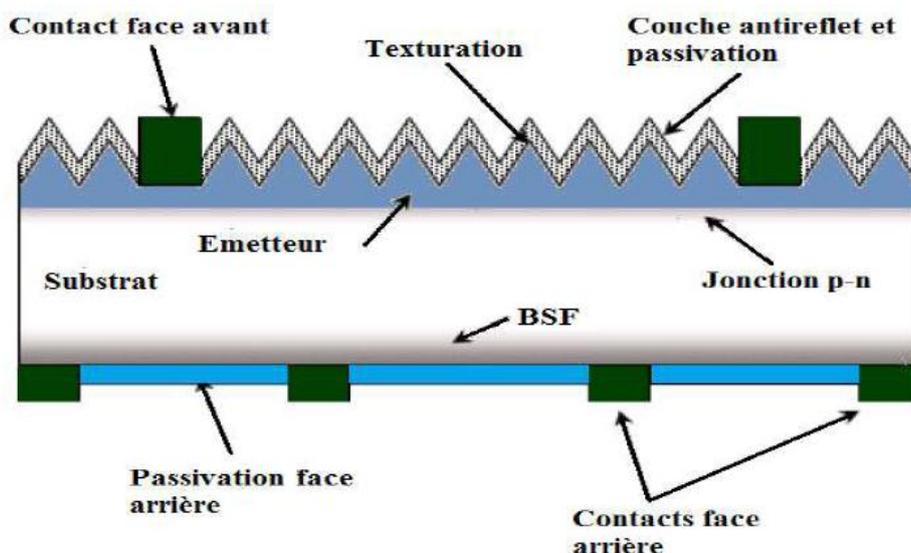


Fig.1.4. Structure de cellule solaire [14]

I.3.2-Principe de fonctionnement général d'une cellule

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en l'énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons, ayant une énergie est supérieure au gap du semi-conducteur par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, donc création de paires électron/trou dans le matériau.
- Collecte des particules générées dans la cellule [12]

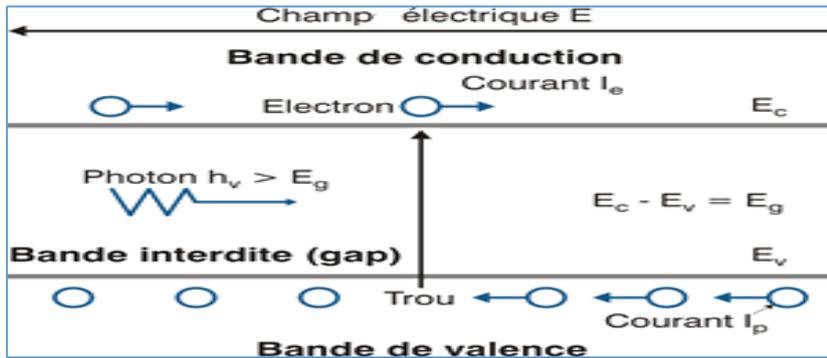


Fig.1. 5 : Principe d'absorption d'un photon incident dans une cellule photovoltaïque [12]
 L'énergie nécessaire pour transférer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction est égale à l'énergie de bande interdite. Un photon ayant une énergie supérieure ou égale à E_g , engendre ainsi la génération d'un électron libre dans la bande de conduction (BC). Ce processus laisse dans la bande de valence (BV) un trou. L'ensemble formé par ces deux particules s'appelle un exciton. Ces derniers sont instantanément dissociés à la température ambiante. Aussi, l'éclairement augmente le courant inverse par la création de paires électrons-trous dans la ZCE mais aussi dans les zones dopées [13]

I.3.3-Schéma électrique équivalent

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire comporte :

- ✚ Un générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo-généré opposé au courant d'obscurité I_{obs} de la diode polarisée en direct.
- ✚ Une résistance série R_s due à la résistivité des différentes couches de la cellule (l'émetteur, la base ainsi que les contacts métalliques).
- ✚ Une résistance de shunt (ou parallèle) R_{sh} : traduit le courant de fuite dû aux défauts à travers l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule.

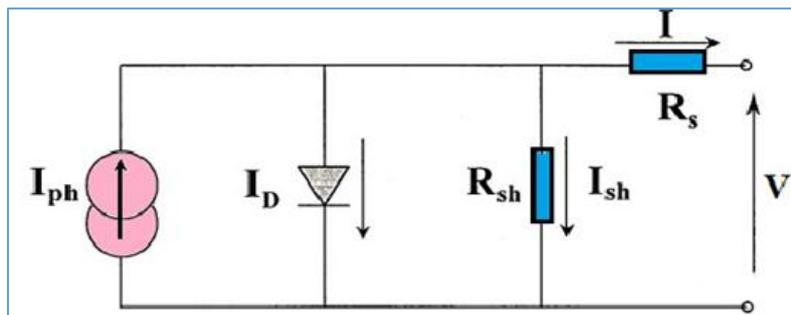


Fig.1.6. Schéma électrique réel de la cellule solaire [10].

I.3.4-Paramètres électriques d'une cellule solaire

I.3.4.1 Courant de court-circuit : I_{cc} [6]

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de : la surface éclairée, la longueur d'onde ainsi que la température.

I.3.4.2 Tension de circuit ouvert : V_{co}

Cette tension est déduite quand le courant traversant la cellule devient nul.

I.3.4.3 Puissance maximale et Facteur de forme : FF

La puissance fournie au circuit extérieur, par une CPV éclairée dépend directement de la résistance de charge. Cette puissance est maximale, pour un point de fonctionnement de la caractéristique courant-tension P_m tel que :

$$p_m = v_m \cdot I_m \quad (1.3)$$

Où V_m représente la tension correspondante à la puissance maximale fournie et I_m le courant correspondant à la puissance maximale fournie (voir figure 1.7)

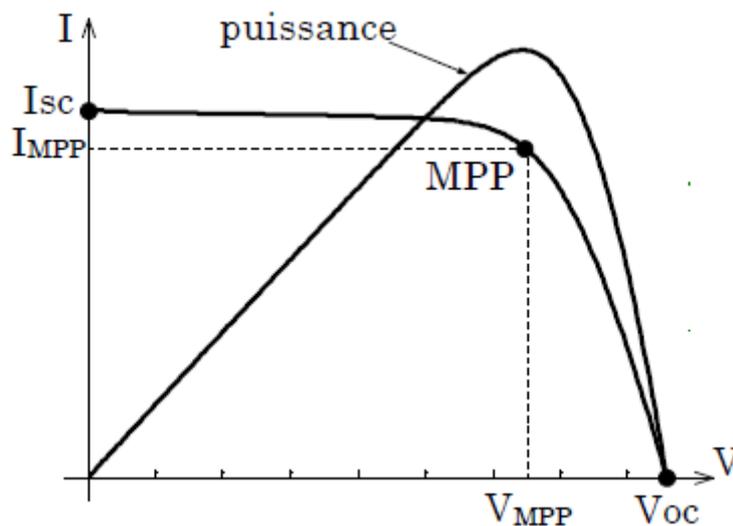


Fig.1.7. Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque. [15]

Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale.

Dans ce cas, le facteur de forme est défini par la relation suivante [19] :

$$FF = \frac{p_m}{v_{co} \cdot i_{cc}} = \frac{v_m \cdot I_m}{v_{co} \cdot i_{cc}} \quad (1.4)$$

I.3.4.4 Rendement de conversion : η

Le rendement « η », d'une cellule solaire, est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} , tel que :

$$\eta = \frac{p_m}{p_{in}} = \frac{FF \cdot V_{CO} \cdot I_{CC}}{P_{in}} \quad (1.5)$$

I.4-Les différents types de cellules solaires

I.4.1-Les panneaux en silicium cristallin

A l'heure actuelle, les panneaux en silicium cristallin sont les plus utilisés et sont divisés en deux catégories :

I.4.1.1-Silicium monocristallin

Les panneaux monocristallins sont composés de cristaux de silicium de grande pureté. Le lingot de silicium monocristallin a une forme cylindrique, un diamètre de 13-20 cm et une longueur de 200 cm, et est obtenu par la croissance d'un cristal filiforme en lente rotation. Ce cylindre est ensuite coupé en plaquettes de 200-500 μm d'épaisseur et la surface est traitée pour obtenir des « microrainures » visant à minimiser les pertes par réflexion.

Le principal avantage de ces cellules est leur efficacité (14 à 17%), leur longue durée de vie et la conservation des caractéristiques avec le temps.

Le coût de ces modules est d'environ 3.2 à 3.5 €/W et les panneaux élaborés avec cette technologie sont généralement caractérisés par une couleur bleu foncé. [16]

I.4.1.2-panneaux en silicium poly cristallin (Figure 1) : ou les cristaux constituant les cellules s'agregent en prenant différentes formes et sens. En fait, les irisations typiques des cellules en silicium polycristallin sont causés par les différents sens des cristaux et donc par le comportement différent par rapport à la lumière. Le lingot de silicium polycristallin est obtenu en faisant fondre et en coulant le silicium dans un moule en forme de parallélepède. Les plaquettes ainsi obtenues ont une forme carrée et des stries caractéristiques de 180-300 μm d'épaisseur.

L'efficacité est inférieure à celle du silicium monocristallin (12 à 14%), toutefois le coût est plus avantageux, de 2.8 à 3.3 €/W. La durée de vie est élevée (comparable à celle du silicium monocristallin) de même que la conservation des performances avec le temps (85% de l'efficacité initiale après 20 ans).

Les cellules élaborées à partir de cette technologie peuvent être reconnues à leur surface présentant des grains de cristaux assez visibles. [16]

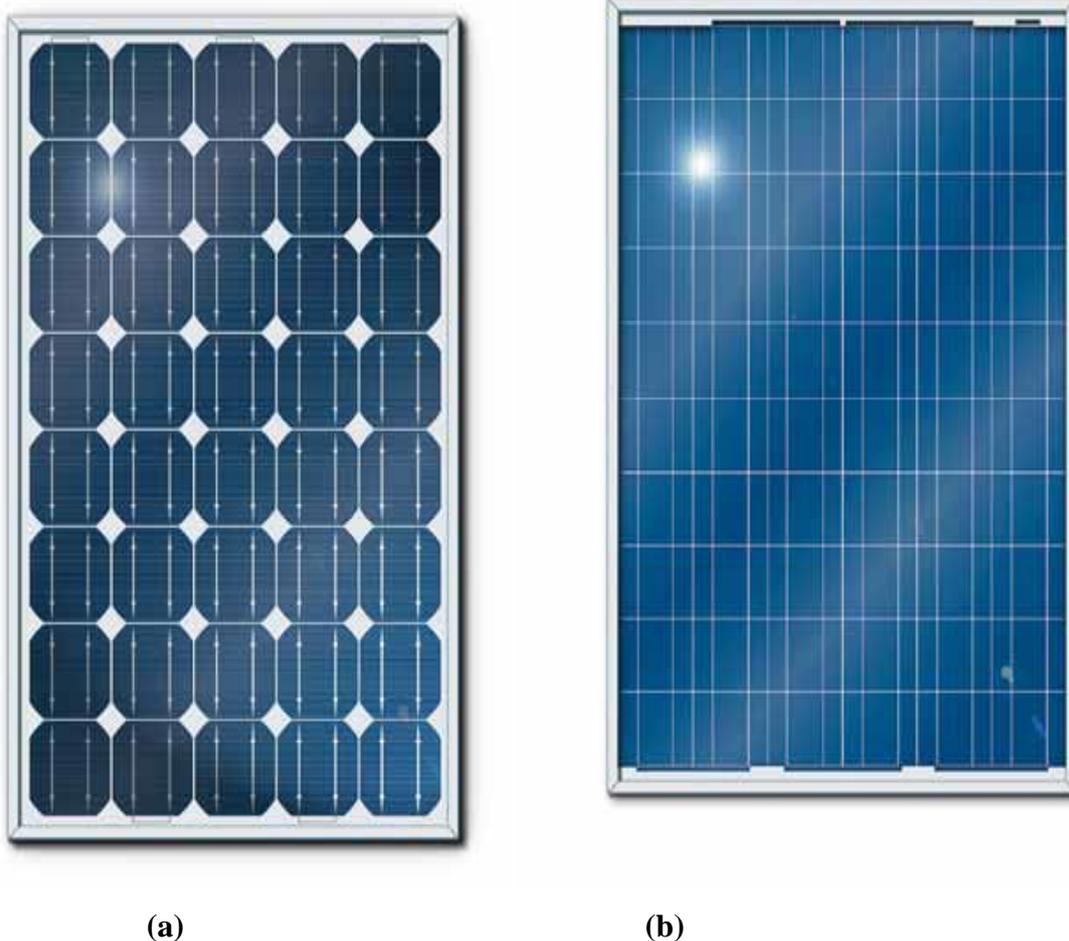


Fig1.8 : (a) Panneau en silicium monocristallin, (b) Panneau en silicium polycristallin [16]

I.3.6.1.3-Les cellules amorphes

Le silicium amorphe (a-Si) a été le premier matériau utilisé pour réaliser une cellule solaire en couche mince grâce à sa forte absorption. Cependant, le rendement de conversion reste médiocre à cause du taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe, il est situé entre 8% et 10%. Le silicium amorphe a été d'abord utilisé pour des applications «portables » de faible puissance pour des produits électroniques comme les calculettes ou les montres à quartz. L'amélioration des performances joint au cout inférieur au silicium cristallin lui ont permis de pénétrer le marché des panneaux salaires dans certaines applications où le cout importe plus que le rendement. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des performances des cellules et la mise au point de techniques de dépôt plus rapides pour développer des cellules multi-jonctions.[16]

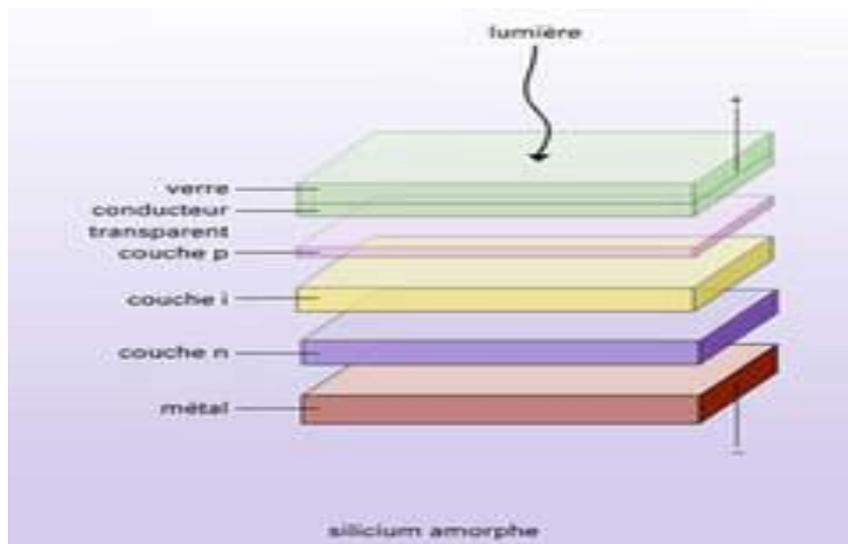


Fig1.9 : Représentation de couche mince [17]

I.4-Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [18]

I.4.1- Avantages

- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée assez longue.

I.4.2- Inconvénients :

- la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais périodique.
- Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. Une perte de rendement de 1 % par an.
- De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.