

II.1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur l'énergie solaire et le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi les types du refroidissement des panneaux photovoltaïque.

II.2. Rayonnement solaire :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion dans l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.
- Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuage) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil.
- L'albédo est la partie réfléchi par le sol, il dépend de l'environnement du site. La neige par exemple renvoi énormément de rayons lumineux.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions. [8]

II.3. Energie solaire :

L'énergie solaire est l'une des formes des énergies renouvelables (ENR) primaires (Soleil, eau douce, océans, vent, biomasse, géothermique) pouvant être convertie en énergies finales (chaleur, électricité carburants). L'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie

maréotrice. Elle est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère est utilisée pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, électricité ou biomasse. L'énergie solaire, transmise par rayonnement, rend possible la vie sur Terre par apport de chaleur et de lumière, permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement du Soleil est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète.

Pour exploiter l'énergie solaire, on utilise des capteurs solaires, qui sont de deux types :

- les capteurs solaires thermiques : permettant soit la production de chaleur à partir de l'énergie solaire, c'est l'énergie solaire thermique ; soit une conversion indirecte de l'énergie solaire en électricité, on parle alors d'énergie solaire thermodynamique ;
- les capteurs (panneaux) solaires photovoltaïques : permettant une conversion directe de l'énergie solaire en électricité, c'est l'énergie solaire photovoltaïque. [9]

II.3.1. Energie solaire thermique :

La production d'énergie solaire thermique est basée sur l'utilisation du rayonnement solaire pour chauffer un fluide caloporteur grâce à un système de capteurs solaires (Figure II.1) ; on obtient ainsi de l'énergie thermique utilisée directement par le consommateur : chauffe-eaux sanitaires, chauffage des maisons, ...).



Figure II.1: Schéma de principe de l'utilisation de l'énergie solaire thermique (gauche) et photo d'un capteur solaire sur le toit d'une habitation (droite).

L'énergie solaire dite thermodynamique fonctionne sur le même principe. Cependant, les capteurs utilisés sont de forme parabolique permettant de concentrer les rayons solaires.

L'énergie thermique obtenue grâce au fluide caloporteur chauffé à très haute température (Jusqu'à 3000°C) est alors transformée en énergie mécanique et électrique par le moyen de turbines et d'un cycle thermodynamique.

II.3.1.1 L'énergie solaire en Algérie :

L'énergie solaire a de formidables possibilités. Certains spécialistes parlent de complémentarité entre gaz naturel et solaire. La planète, à travers l'énergie solaire, peut répondre aux besoins de la population. Les possibilités sont énormes. Les énergies renouvelables sont devenues compétitives. Le Sahara est capable de répondre 1000 fois à une demande d'énergie... [10]

II.3.1.2. Gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure II.2 :

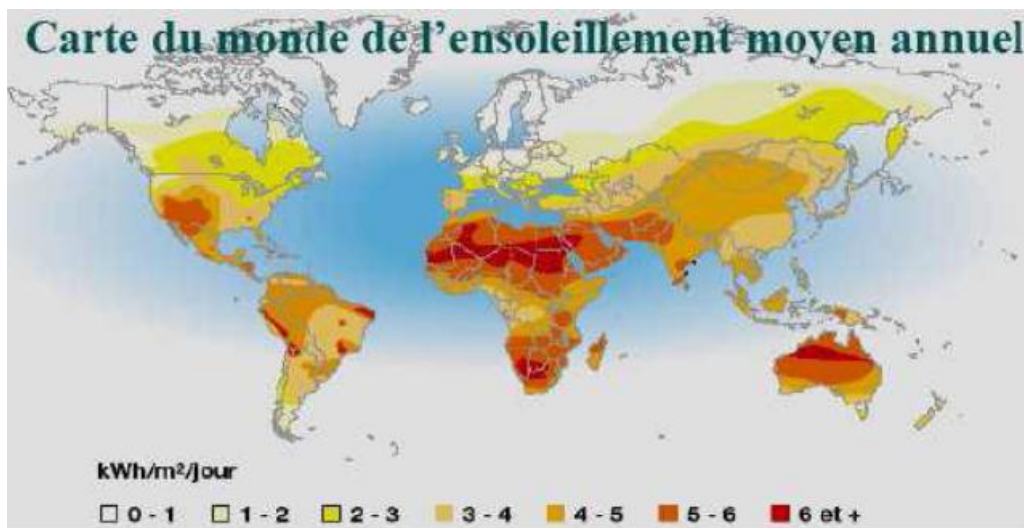


Figure II.2 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire

photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau II.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau II.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques. [9]

II.3.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

Depuis les années 90, le marché du photovoltaïque s'est développé de façon remarquable avec une croissance exponentielle (Figure II.3). La puissance cumulée des installations photovoltaïques à l'échelle mondiale est passée de 1,4GWc en 2000 à 9,2GWc en 2007, avec une part assez importante des installations raccordées au réseau électrique, soit 13GW de puissance installée en 2008 dans le monde, et une croissance de plus de 70% de la capacité existante l'année précédente.

Les cellules solaires permettant une conversion directe de l'énergie solaire en électricité, elles sont utilisées à différentes échelles, des petits composants comme les calculettes aux grandes centrales électriques.

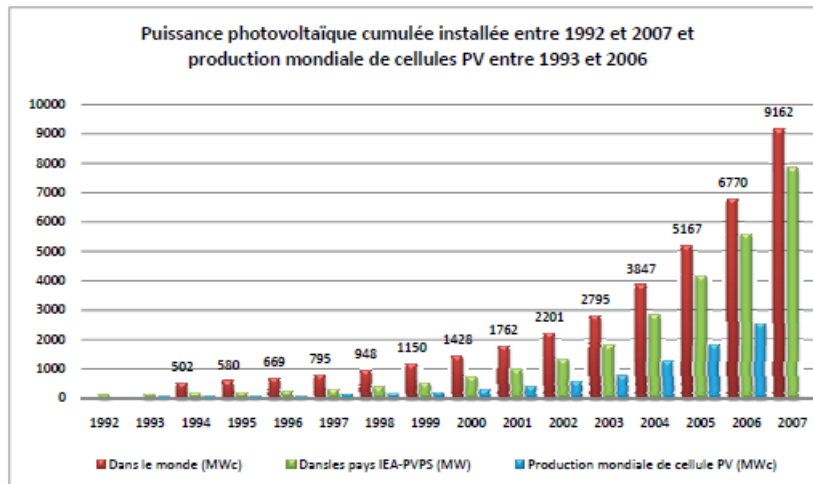


Figure II.3 : Evolution temporelle de la puissance PV installée dans les pays de l'IEA-PVPS [Nowak, 2008] et dans le monde [Loyen, 2008b] et de la production annuelle mondiale de cellules photovoltaïques [EurObserv'ER49, 2007].

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. [11]

II.4. Historique :

Quelques dates importantes dans l'histoire système du photovoltaïque :

- **1838 :** Le physicien français EDMOND BEQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet photovoltaïque.
- **1875 :** WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **1954 :** Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- **1958 :** une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973 :** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque.
- **1985 :** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.

II.5. Définition de conversion photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.

II.6. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

II.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un composant à semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique ; donc le principe de fonctionnement fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

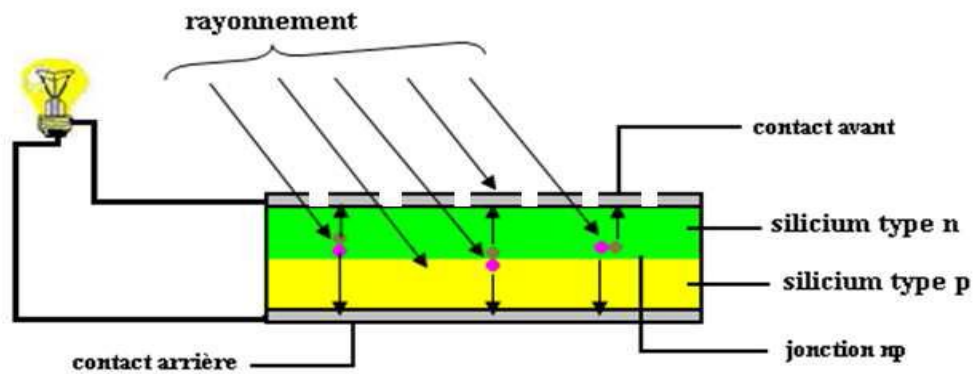


Figure II.4 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [12]

II.8. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

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

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteurs;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créés est nécessaire.

Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure II.4.

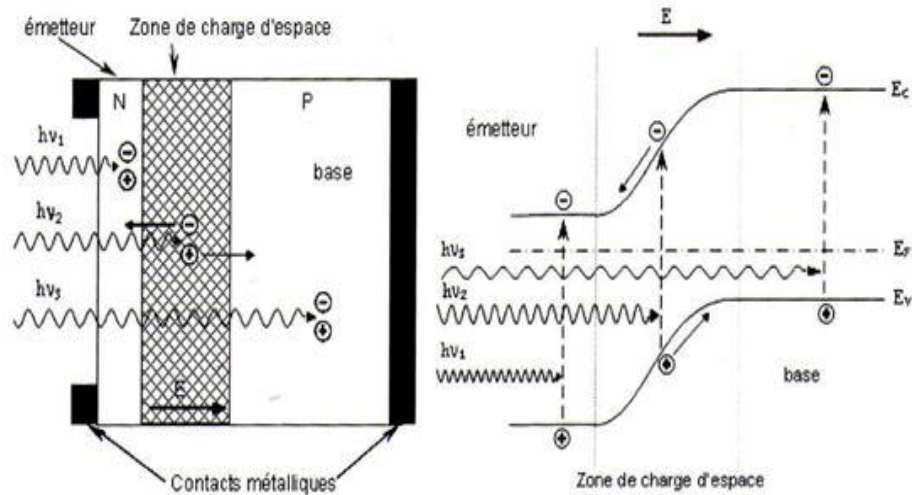


Figure II.5 : Structure (droite) et diagramme de bande (gauche) d'une cellule photovoltaïque.

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

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion,
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura une photo courant de génération. [13]

II.9. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque :

II.9.1. la cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans la figure (II.6) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident.

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap (E_g), le nombre d'électrons libres du semiconducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

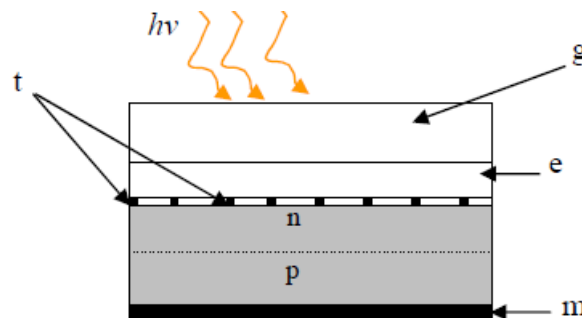


Figure II.6 : présentation schématique d'une cellule solaire.

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction pn, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif I traverse de n vers p.

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt.

Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19% pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium polycristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe.

Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques.

II.9.2. Le module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (II.7). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la

tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (II.7.b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène.

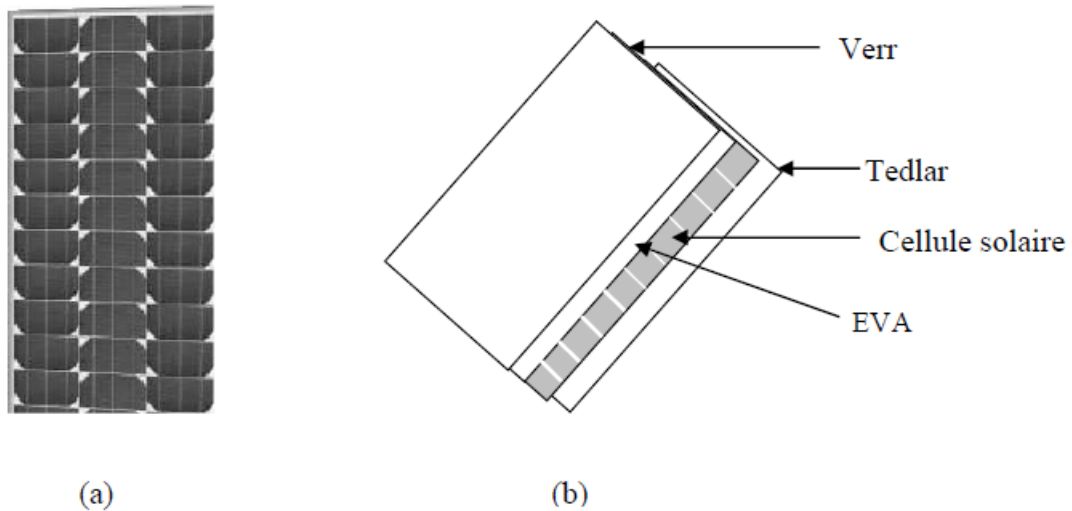


Figure II.7 : Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (II.8). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.

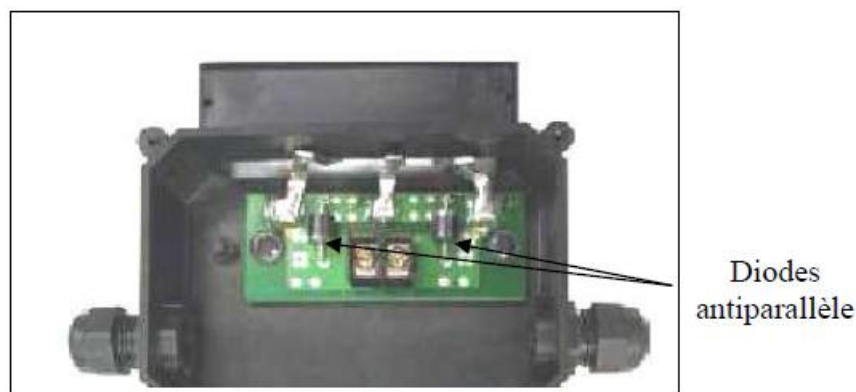


Figure II.8 : Boîte de jonction.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24,48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt- crête) puissance obtenue pour (l'enseulement maximal).

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%.

II.9.3. Panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure II.9 : Panneau solaire.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la figure (I.10), Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Figure II.10 : Boîte de dérivation.

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent:

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

II.10. Système de stockage :

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conceptions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

Capacité en Ampère heure : Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

- **Rapports de chargement et déchargement :** Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

- **Température :** Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut diminuer la durée de vie de la batterie.
- **La durée de vie :** Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).
- **Profondeur de décharge :** La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

La profondeur de décharge : Cependant, affecte même les batteries de cycle profond. plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

- La tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- Le taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné. [17]

II.11. Les différentes technologies :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

II.11.1. Cellule en silicium monocristallin :

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.

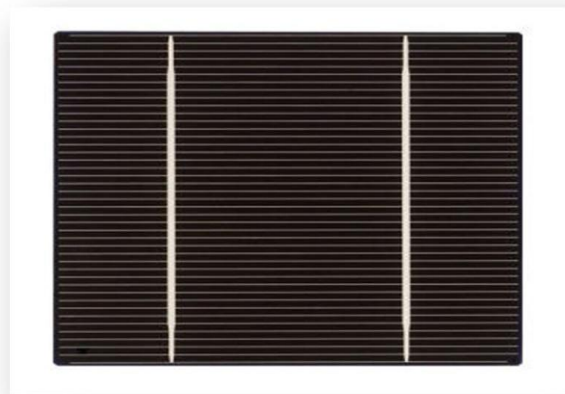


Figure II.11 : Monocristallin.

Avantage :

- Très bon rendement (17.2%).

Inconvénients :

- Coût élevé,
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

II.11.2. Cellule en silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

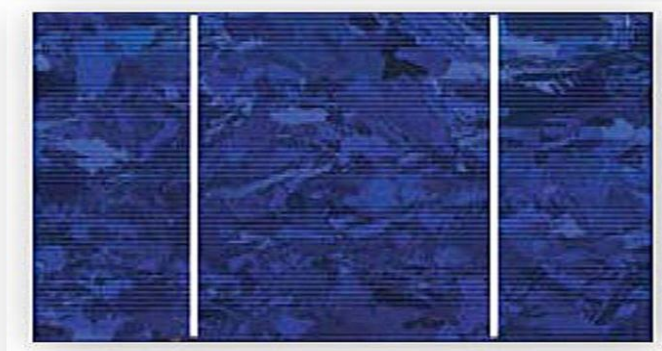


Figure II.12 : Multicristallin.

Avantages :

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

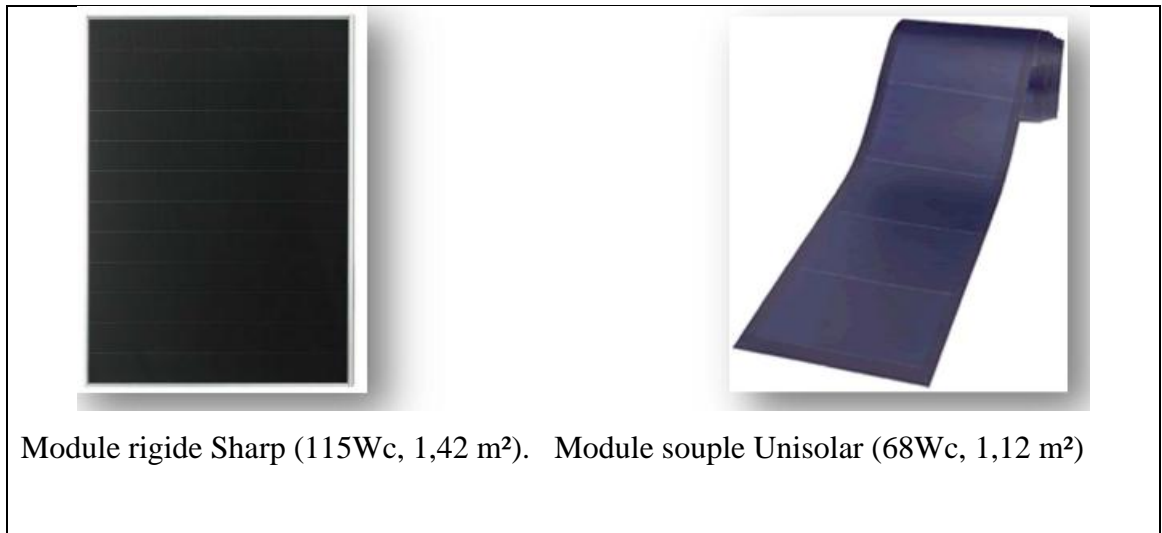
Inconvénient :

- Les mêmes que le monocristallin.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix).

II.11.3. Cellule en silicium amorphe :

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres.



Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m²). Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²)

Figure II.13 : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe).

Avantages :

- Fonctionnement avec un éclairage faible.
- Moins chères que les autres.

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 7%)
- Performances diminuent sensiblement avec le temps.

On trouve aussi certaines cellules qui utilisent d'autres matériaux :

- GaAs : arséniure de galium. Matériau monocristallin, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix les destine au domaine spatial.
- CdTe : tellure de cadmium. Matériau polycristallin déposé sur un substrat en verre.
- CIS : diséléniure de cuivre et d'indium. Ce matériau donne des photopiles très stables dans le temps.
- TiO₂ : dioxyde de titane. Cette technologie en est au stade expérimental.

Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande. [16]

II.12. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque : [13]**II.12.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

II.12.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.
- Si la température de panneau photovoltaïque est augmenté, on peut avoir des fondues.

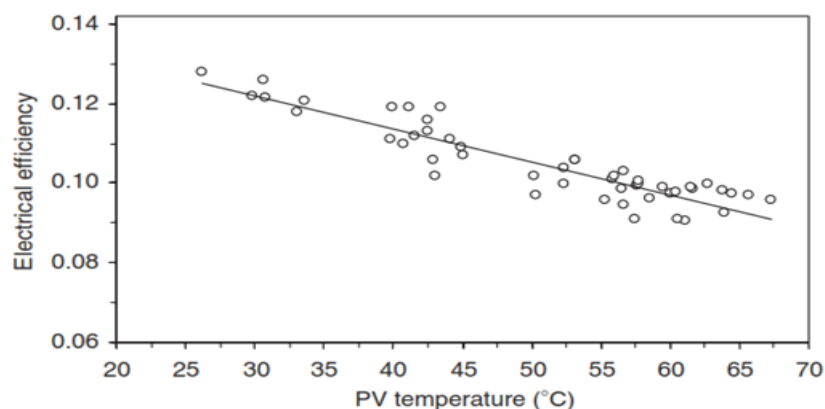


Figure.II.14 : efficacité électrique en fonction de température de PV. [21]

II.13. Refroidissement des panneaux photovoltaïques : on a trois types de refroidissement des panneaux photovoltaïques comme on a vu dans le chapitre I : le refroidissement avec l'eau, le refroidissement avec l'air et refroidissement mixte.

II.13.1. Système de refroidissement à l'eau :

C'est une méthode de refroidissement des panneaux photovoltaïques et au même temps c'est une méthode de chauffage de l'eau. Le capteur comprend une surface qui absorbe le rayonnement solaire. Le fluide caloporteur qui circule dans les tubes, sous le capteur refroidit les cellules photovoltaïques et réchauffé par l'énergie solaire.

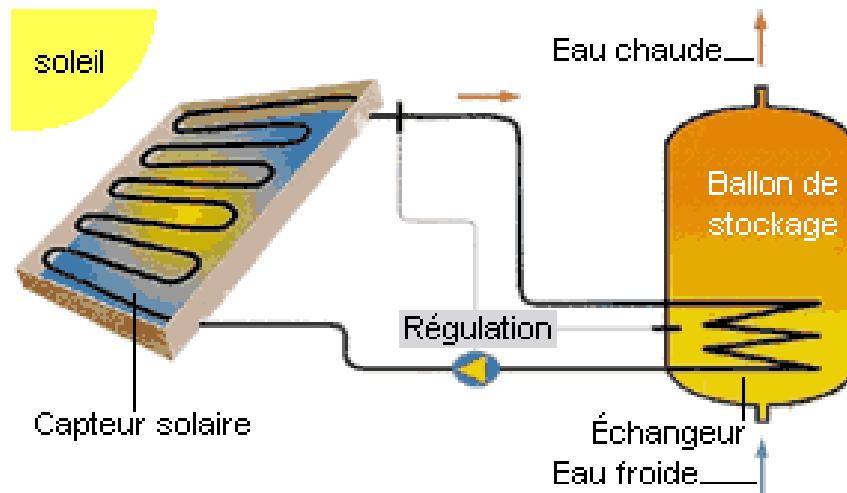


Figure II.15 : Système de refroidissement à l'eau.

II.13.1.1. Refroidissement des cellules photovoltaïques, amélioration du rendement :

Le passage d'eau dans l'échangeur entraîne un refroidissement des cellules photovoltaïques. Nous avons utilisé une caméra thermique afin d'observer l'effet de la circulation d'eau dans l'échangeur sur la température des cellules photovoltaïques.

Pendant la mesure, le débit de l'eau circulant dans le panneau solaire hybride est de 200L/h et sa température de 20°C. On observe bien un refroidissement homogène du panneau hybride (panneau de gauche, en bleu, sur l'image ci-dessous).

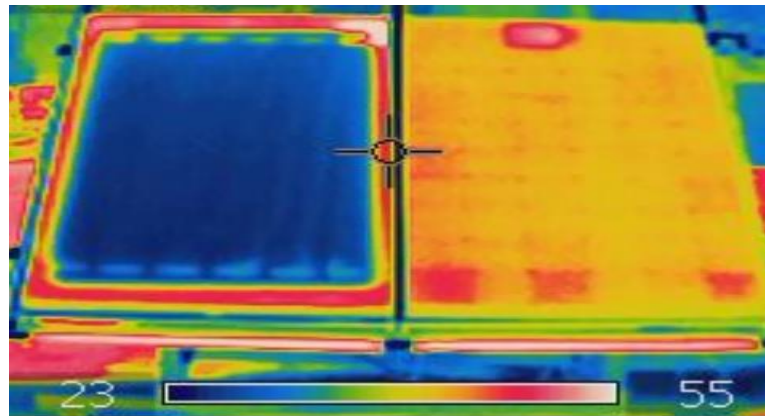


Figure II.16 : Refroidissement homogène du panneau hybride.

Le panneau témoin est un panneau photovoltaïque standard, on observe une différence d'environ 20°C entre les deux panneaux (panneau de droite sur l'image ci-dessus). Cette circulation homogène du fluide dans l'échangeur entraîne un refroidissement de toute la surface des cellules photovoltaïques, à contrario d'un échangeur qui serait constitué de tubes en serpentin, comme on le voit sur certains panneaux hybrides.

Le gradient de température avec un bon ensoleillement ($800\text{W}/\text{m}^2$) est environ de 2°C par panneau pour un débit de $200\text{L}/\text{h}$. Si l'installation comporte 6 panneaux en série, le gradient total est environ de 10°C . Ce gradient pénalise peu la production photovoltaïque du dernier panneau et il permet d'évacuer efficacement la chaleur. [14]

II.13.2. Système de refroidissement à l'air :

Dans les systèmes de refroidissement à l'air (ou systèmes de refroidissement par voie sèche), circule dans des serpentins, tubes ou conduites qui sont refroidis par un flux d'air.

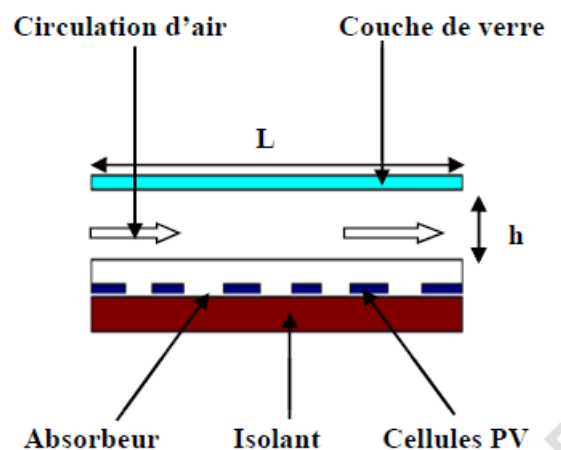


Figure II.17 : Système de refroidissement à l'air.

Et pour réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du composant. On a des études paramétriques menées sur un système PV/T à air ont montré qu'une faible épaisseur de lame d'air améliore les transferts thermiques mais réduit le débit massique de ventilation de la lame, d'où une réduction du rendement thermique du système. Pour pallier ce problème en optimisant les transferts de chaleur convectifs et radiatifs, la solution proposée est d'accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV. Pour cela, des configurations intégrant des plaques nervurées ou planes, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame d'air ont été envisagées (Figure.I.17).

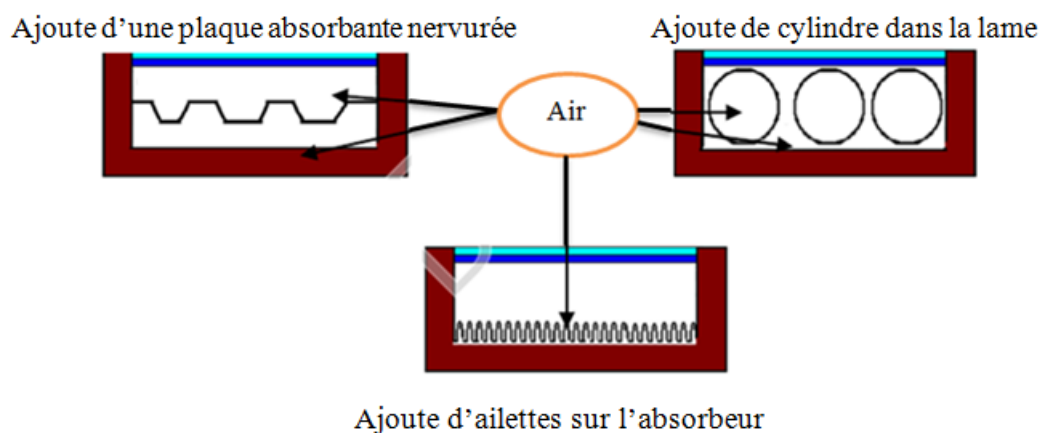


Figure.II.18 : Quelques exemples de modifications du capteur solaire PV/T hybride à air.

II.14. Conclusion :

La minimisation des aspects environnementaux se traduit souvent par une comparaison entre les systèmes de refroidissement à eau et à air. Il fut préconisé plus tôt dans ce chapitre de ne pas choisir entre système de refroidissement à l'eau et à l'air à partir de considérations générales, car les contraintes locales peuvent limiter l'utilisation de chacun de ces systèmes. Toutefois, il pourrait s'avérer opportun de considérer ou de reconsidérer les besoins en eau d'un système de refroidissement à la vue des programmes pour la conservation de l'eau et de la demande croissante d'une eau de bonne qualité à d'autres fins (publiques et industrielles) que celle du refroidissement.

Le point de bascule économique dans le choix entre les systèmes à refroidissement par air sec et par eau n'est pas fixe et, selon les sources, se situera pour des températures finales requises entre 50 et 65°C, en fonction des conditions climatiques locales. [15]