Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la ≪ lumière électricité ≫ [3].

I.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 µm [4], l'énergie associe à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 0.4µm).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à 0.8 µm).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 0.8µm).

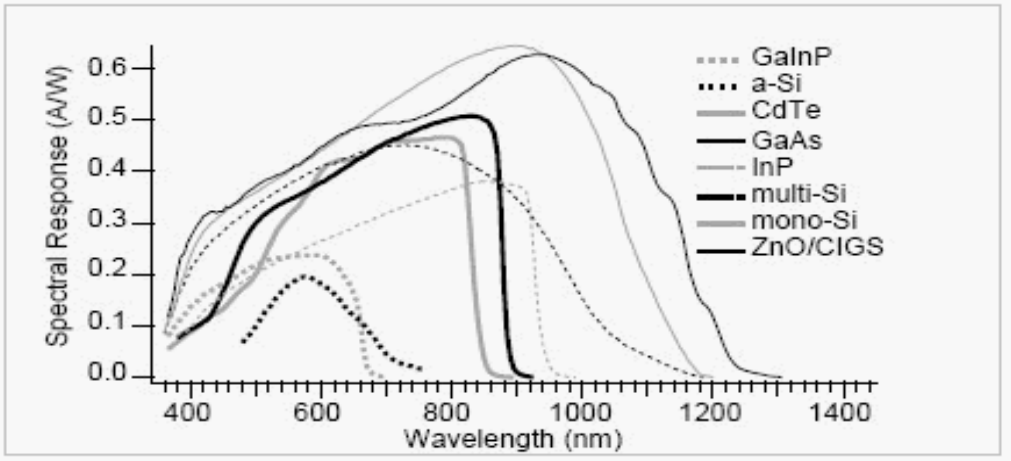


Figure I.1 : Réponse spectrale d'une cellule (PV).

Au cours de ces dix derniers années ce spectre à été homologués par l'organisation international de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m^2.

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,…etc.).

I.3 Déclinaison du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre [5], sa valeur en degré est donnée par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi.\frac{284+nj}{365}\right) \qquad \text{(I.1)}$$

La déclinaison varie entre -23,45° le 21 décembre et +23,45° le 21 juin.

Où j: est le numéro d'ordre du jour de l'année (n=1 pour le 1er Janvier, n=32 pour le 1er Février,...etc.)

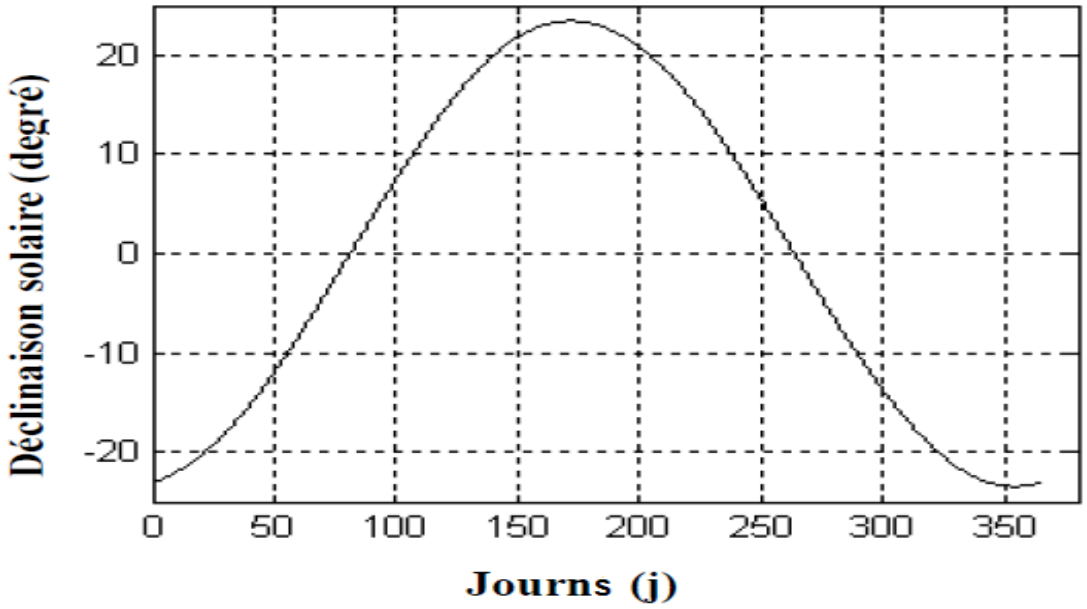


Figure I.2 : Courbe de déclinaison du soleil.

I.4 Modèle simplifié de l'éclairement

Selon [6], [7] la quantification de l'éclairement incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

- $G = G_m \sin\left[\frac{\pi(t-t_0)}{12}\right]$ (I.2)

- G_m : L'éclairement maximal du site (W/m2).
- t : Temps solaire en heure.
- t_0 : temps de la levée du soleil (6h).

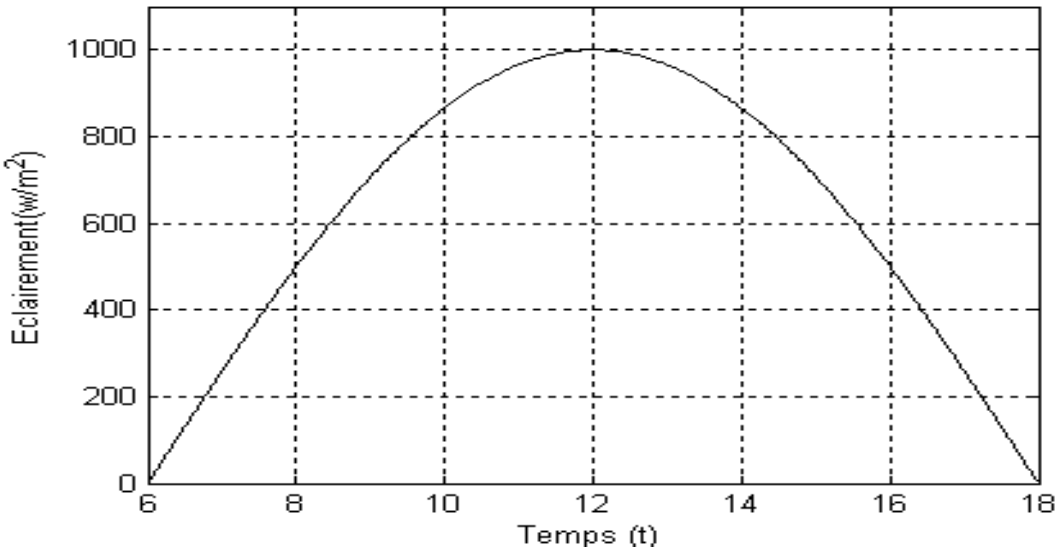


Figure I.3 : Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps.

I.5 Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque:

1839 : Le physicien français Edmond Beckerel découvre 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 Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

I.6.Cellules photovoltaïque

I.6.1 Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

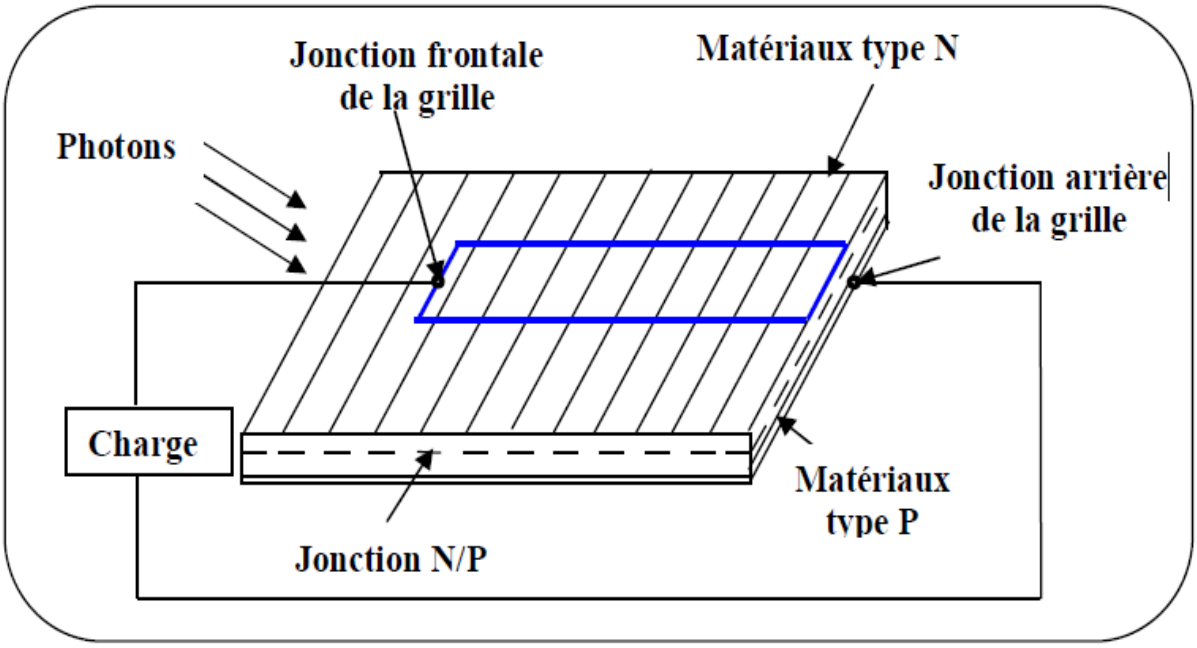


Figure I.4 : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert VOC. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de

la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit ISC et dépend fortement du niveau d'éclairement.

I.6.2. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté sur la figure I.5.

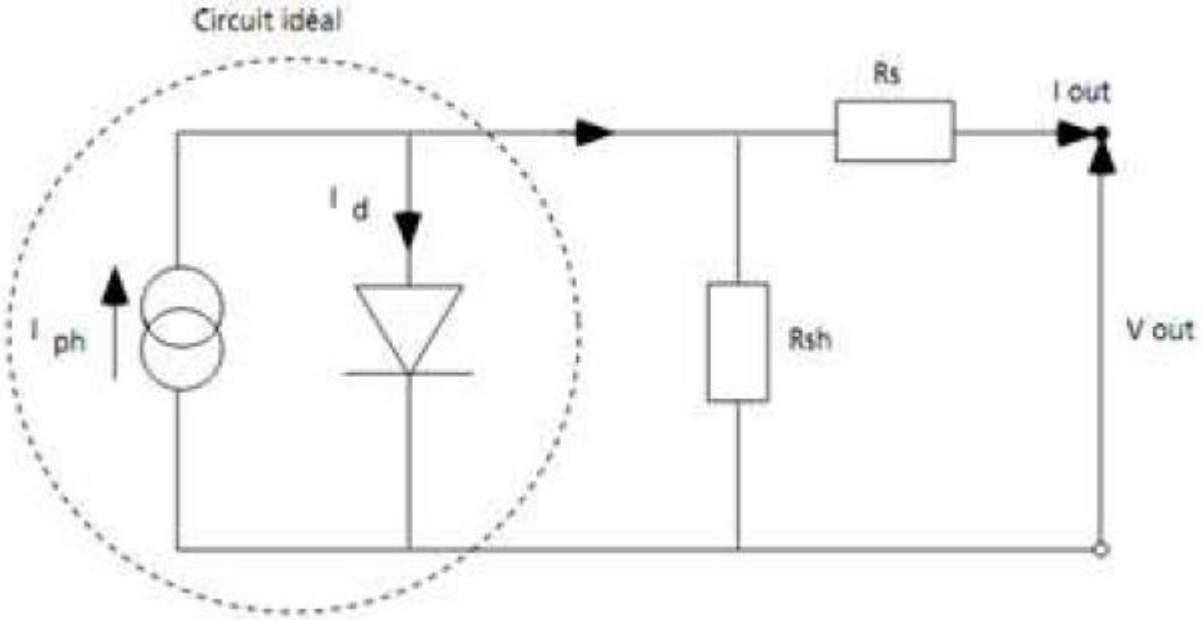


Figure I.5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Pour une cellule idéale, le courant électrique débuté par la cellule s'exprime par :

$$I(V) = I_{ph}(\emptyset) - I_d(V) \quad \text{(I.3)}$$

Où:

- $I(V)$: courant disponible.
- V : tension aux bornes de la jonction.
- $I_{ph}(\emptyset)$: courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux (ø).
- $I_d(V) = I_S\, e^{\frac{qV-1}{JKT}}$ (I.4)
- kT/qVaut 26 mV à 300 K pour le silicium.
- J : coefficient d'idéalité de la diode.
- Is : courant de polarisation de la diode : tension aux bornes de la jonction.

Cette représentation schématique de la photopile est idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série (Rs) et une résistance en dérivation ou shunt (Rsh). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Sur la figure I.6 est rapportée la caractéristique courant-tension $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

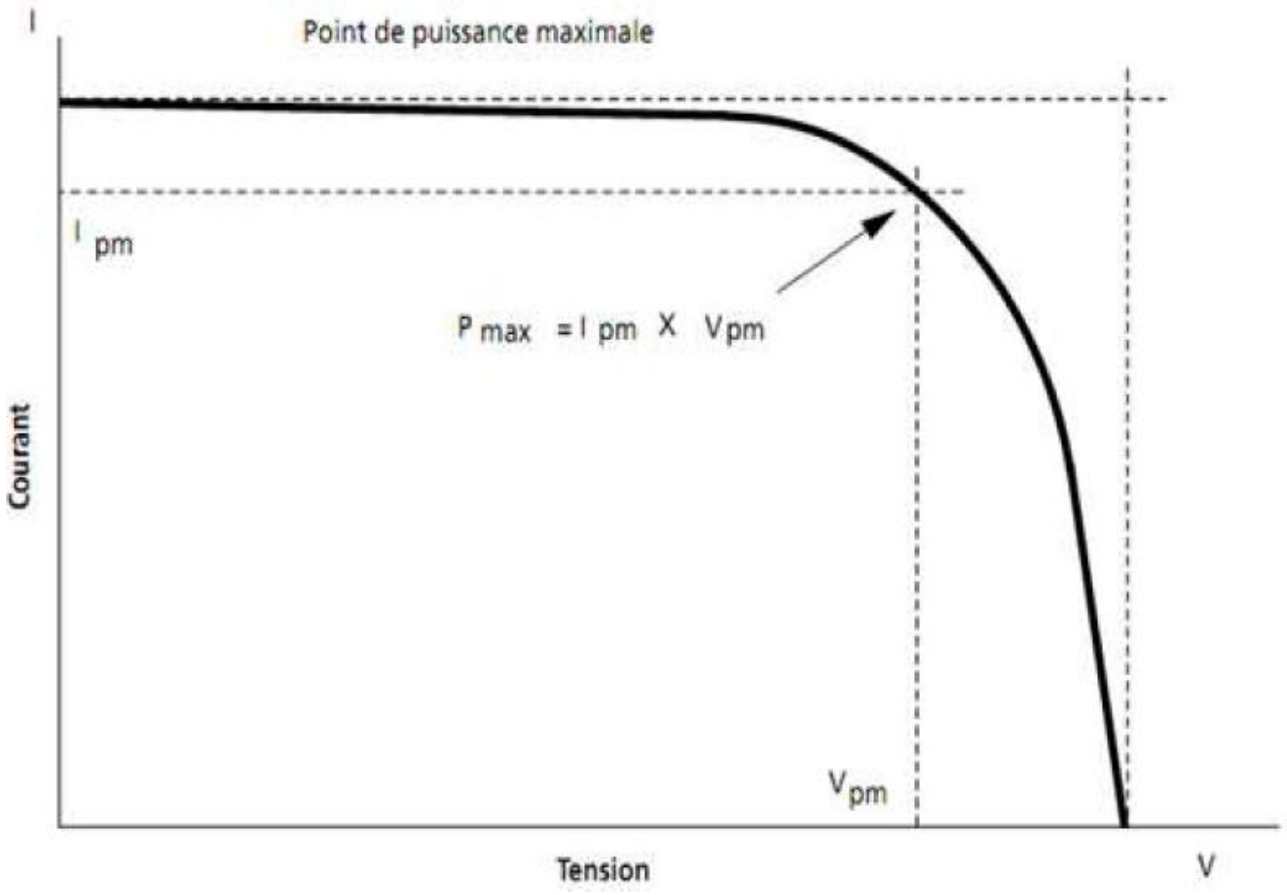


Figure I.6 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

I.6.3. Influence de l'ensoleillement et de la température

Nous avons vu que le courant I_{ph} produit par la photopile est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre, la tension *V* aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction p-n du matériau lui-même (pour le silicium

monocristallin, elle est de 590 mV pour une température de 25 °C). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule (Pmax) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension Figure I.7.

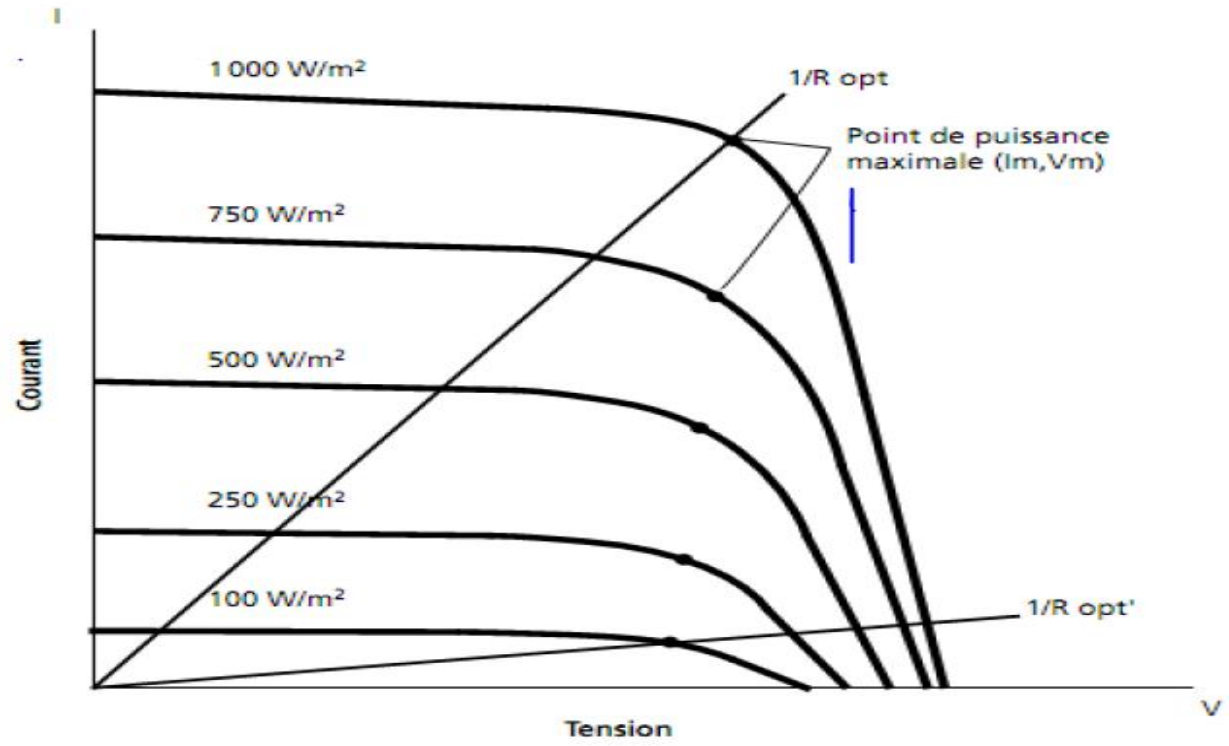


Figure I.7 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I = f(V)$.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm2/°C alors que la tension décroît de 2,2 mV/°C/cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ 0,4%/°C. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

I.7 Technologie des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs. L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de *13* à *18 %*.
- Leur durée de vie est habituellement de plus de *25* à *30* ans et pour le monocristallin l'efficacité et de *12* à *15 %*.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de *6* à *10 %*. Leur durée de vie est généralement inférieure à *20* ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie1 revue du 9 Juillet 2006)

Type de cellules	**Rendements des cellules (%)**			**Domaines d'application**
	Théorique	En labo	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faible puissance, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de touts tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faibles puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre,) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	Systèmes de concentration, espace (satellites)
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissance, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Cadmium CdTe	28.5	16	9-11	Modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)

Tableau I.1 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

I.8 Différentes configuration des systèmes PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants : [4], [8]

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

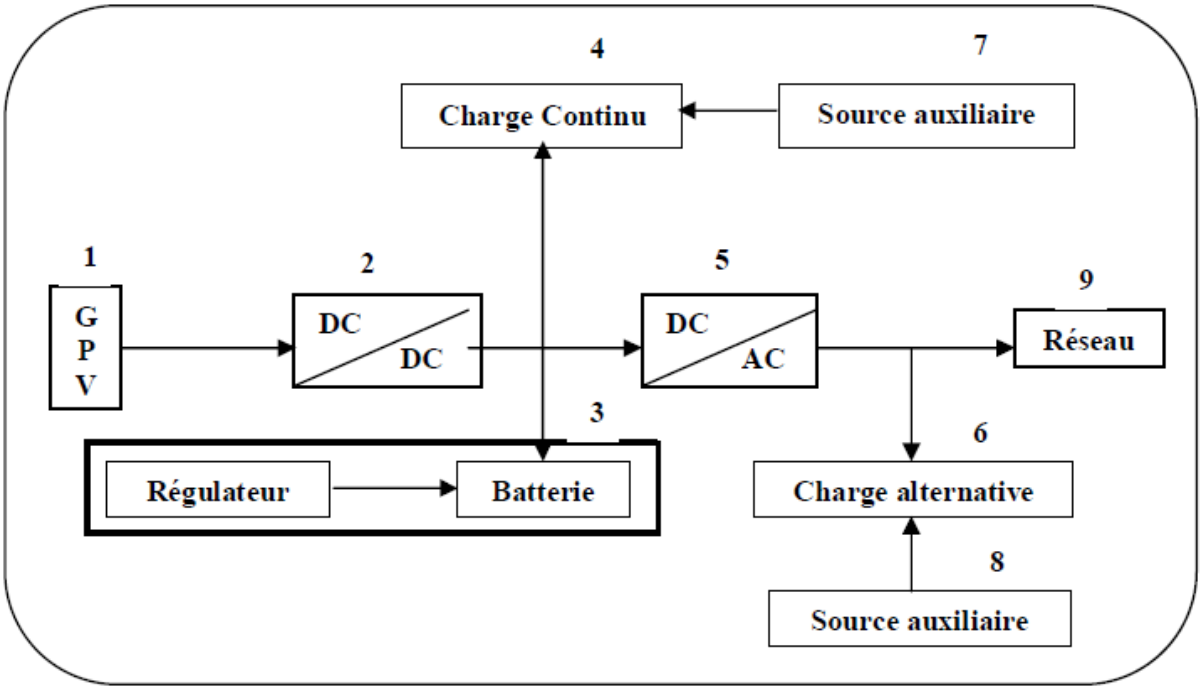


Figure 1.8 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.

I.8.1 Système autonome sans batterie

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

I.8.2 Système autonome avec batterie

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

I.8.3 Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu (Figure 1.8 les blocs [(1), (2), (4)]). Si la charge et de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit (Figure 1.8 les blocs [(1), (5), (6)]).

I.8.4 Système avec appoint électrique

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu (Figure 1.8 les blocs [(1),(2),(3),(4),(7)]) et (les blocs [(1),(2),(3),(4),(7),(9)]) ; ou de type alternatif (Figure 1.8 les blocs [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]).
Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

I.9 Les applications du photovoltaïque

Marquée par une grande variété permise par les caractéristiques intrinsèques de la technologie photovoltaïque, la longue liste des applications du photovoltaïque peut être répartie en deux grandes catégories :

I.9.1 Les applications autonomes

C'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique, apparues les premières, comportent quatre domaines distincts :

- Les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes.
- Les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et microordinateurs.
- Les applications professionnelles comme les relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière...etc.
- L'électrification rurale des sites isolés, habitats dispersés, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement.

I.9.2 Les applications raccordées

Elles sont raccordées au réseau public de distribution d'électricité et on peut les subdiviser en trois grands domaines :

- Les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel (maisons individuelles, habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industries, agricultures, ...). Les modules peuvent êtres sur-imposés à la toiture (toit en pente ou toiture terrasse) sans assurer le clos ni le couvert ou bien intégrés au bâti dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, ...). Leur surface active va de quelque dizaine à quelque milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelque kilowatts-crêtes à quelque mégawatts-crêtes.
- Les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit ...). Leur surface active va en général de quelque centaine à quelque milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelque dizaine à quelque centaines de kilowatts-crêtes.



Figure 1.9 : Ombriere photovoltaïque de parking.

- Les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique. Leur surface active va de quelque millier à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de quelque centaine de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts).

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont : [9]

I.10.1 Avantage :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- -ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- -ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit et non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.10.2 Inconvénients :

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque et de l'ordre de 10 à 15 %
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continu et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marche fonctionnent avec du 230 V alternatif.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technologie photovoltaïque, commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire, et comment il pénètre notre atmosphère selon différents angles et comment ces angles influent sur son énergie (air mass AMx). Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que leurs diverses filières technologiques.

Enfin, on a fini par décrire les deux grandes catégories d'applications photovoltaïques, parmi lesquelles on a parlé des installations photovoltaïques autonomes qui seront bien détaillées dans le chapitre suivant.