



Cours N°2- Energie photovoltaïque

2.1 Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

2.2 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

2.2.1 Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multicristallin.

a) Le silicium mono-cristallin

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, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

b) Le silicium multicristallin (Polycristallin)

Le silicium multicristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



Figure 2.1 – Photos de cellules monocristalline (a) et multicristalline (b).

c) Les couches minces

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Si est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%.

d) Cellules organiques et plastiques

Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%).

2.3 La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

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 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

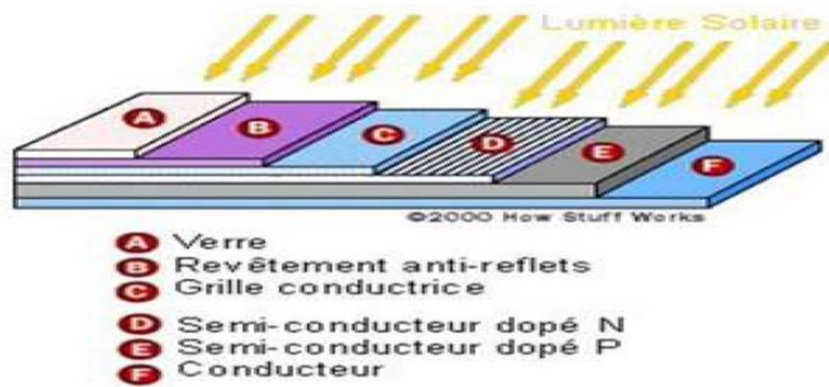


Figure 2.2 – Structure basique d'une cellule solaire.

2.4 Les principaux composants d'un système PV

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois éléments principaux. La figure (2. 3) montre les principaux composants d'un système photovoltaïque.

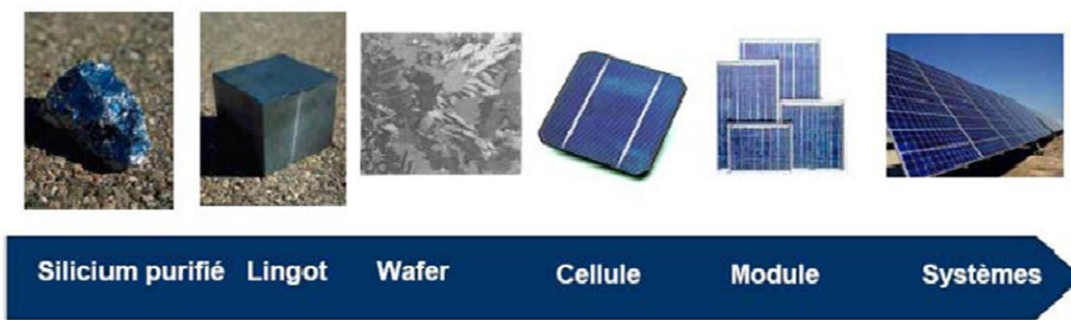


Figure 2.3 – Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.

2.5 Association des cellules photovoltaïques

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

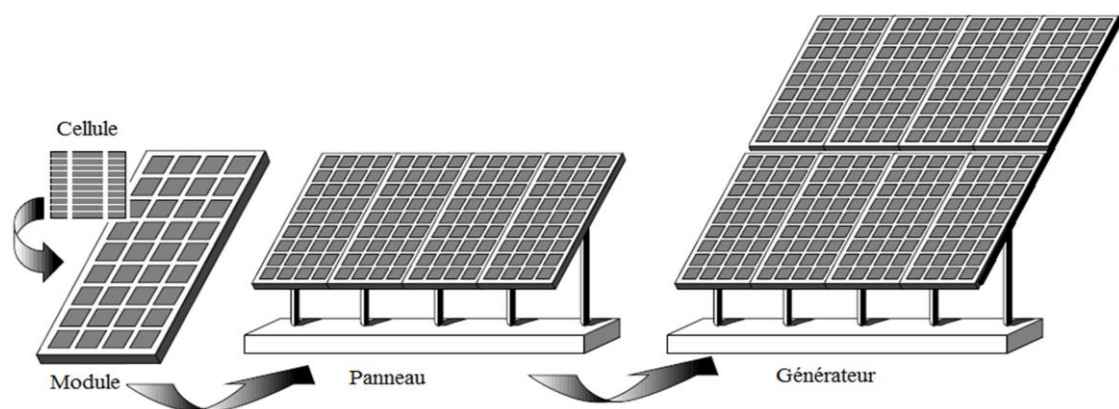


Figure 2.4 – Les principaux composants d'un système photovoltaïque.

La puissance disponible aux bornes d'une cellule PV est plus faible, typiquement de 0,5W, il est nécessaire d'associer les cellules en série ou en parallèle ou série-parallèle, afin d'obtenir la puissance compatible et ensuite, afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité de courant souhaité. Ainsi pour (N_s) cellule en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle.

La puissance disponible en sortie d'un GPV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : La tension de sortie du GPV.

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

2.5.1 Association en série

Le regroupement des cellules en série (N_s) permet d'augmenter la tension du GPV par contre le courant traversées les cellules reste le même. La tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série (N_s) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules série est représenté par la figure (2.5).

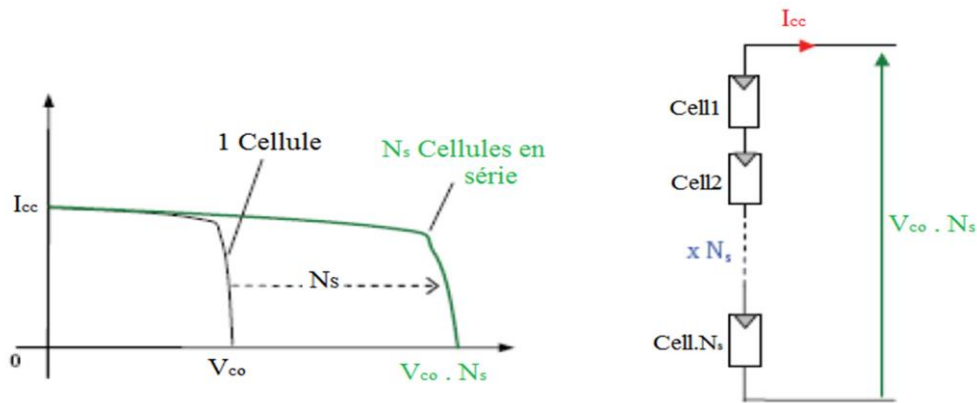


Figure 2.5 – Les caractéristiques d'une association série de (N_s) cellules.

Où : $V_{co}N_s = N_s \cdot V_{co}$; $I_{cc} = I_{cc}N_s$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

$V_{co}N_s$: La somme des tensions en circuit ouvert de (N_s) cellules en série.

$I_{cc}N_s$: Le courant de court-circuit de (N_s) cellules en série

2.5.2 Association en parallèle

Le regroupement des cellules en parallèle (N_p) permet d'augmenter le courant du GPV par contre la tension aux bornes des cellules reste le même. Le courant augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle (N_p) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules parallèle est représenté par la figure (2.6).

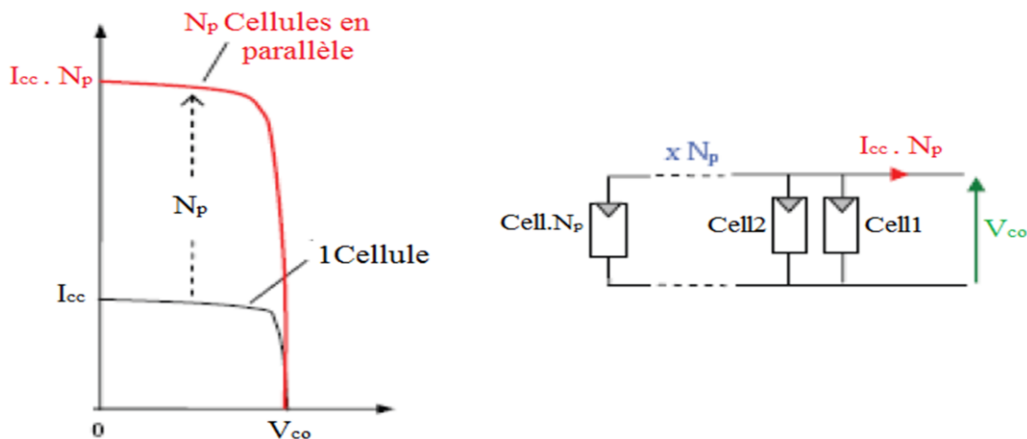


Figure 2.6 – Les caractéristiques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

Où : $I_{ccNp} = Np \cdot I_{cc}$; $V_{co} = V_{coNp}$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

I_{ccNp} : La somme des courants de court-circuit de (Np) cellules en parallèle.

V_{coNp} : La tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle.

2.5.3 Association en série-parallel

Le regroupement des cellules en série-parallel ($Ns \cdot Np$) permet d'augmenter la tension et le courant du GPV, la tension et le courant augmentent proportionnellement au nombre de cellules série-parallel ($Ns \cdot Np$) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules série-parallel avec une diode de protection est représenté par la figure (1.26).

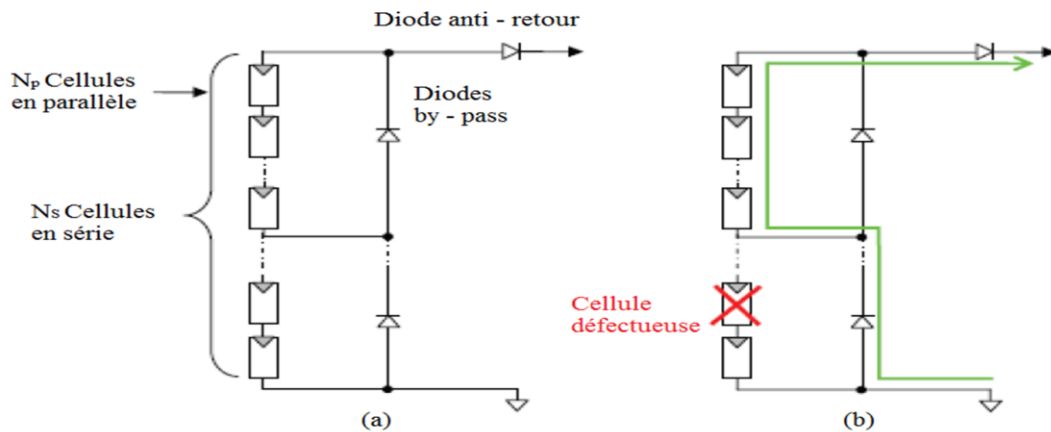


Figure 2.7 – (a) : Architecture classique d'un panneau solaire PV avec diodes de protections (b) : défaillance d'une cellule du module PV et activation de la diode (by-pass) mise en évidence du courant de circulation I_{pv}

2.6 Fonctionnement à puissance maximale

La caractéristique électrique $p(V)$ de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement, comme pour la cellule, I_{max} et V_{max} . Sur la figure 2.8, nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de 80W crêtes constitué de 36 cellules monocristallines en série, en fonction de la température et de l'éclairement. La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

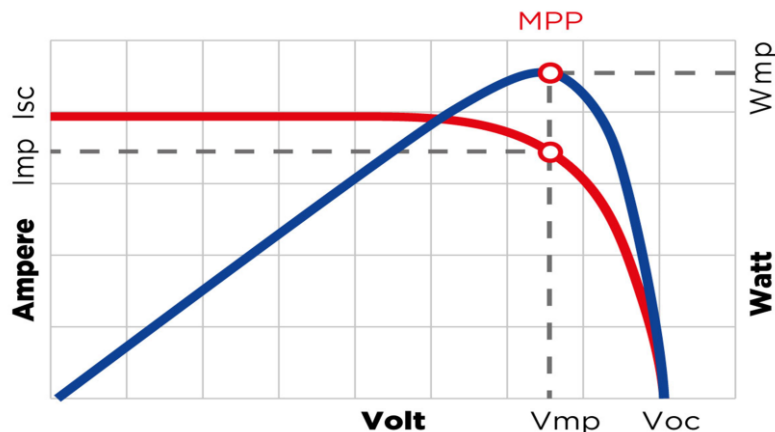


Figure 2.8 – Evolution du PPM d'un module photovoltaïque.

2.6.1 Influence de l'éclairement

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure 2.9, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale Pmax. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit Icc varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert Vco (à vide) varie très peu.

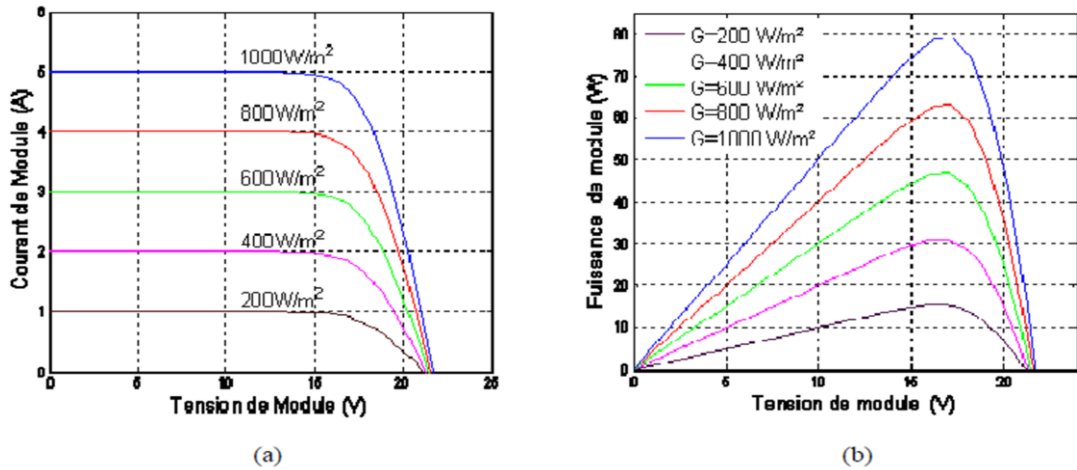


Figure 2.9 – Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'irradiation.

2.6.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure 2.10 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000 (W.m⁻²).

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide Vco décroît avec la température. Plus la température est élevée plus Vco est faible et le courant de court-circuit Icc augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur Icc peut être négligée dans la majorité des cas.

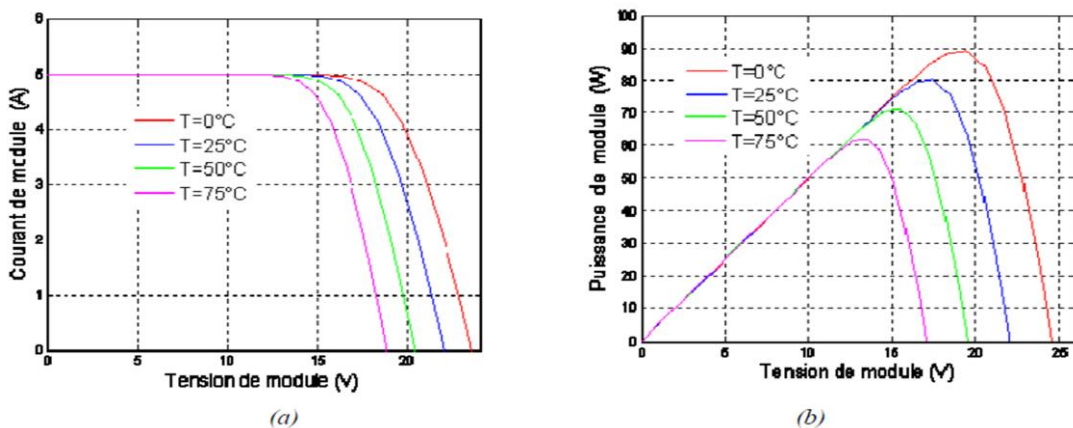


Figure 2.10 – Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures.

2.7 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.

2.8 Les 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.

2.9 Les différents types de systèmes photovoltaïques

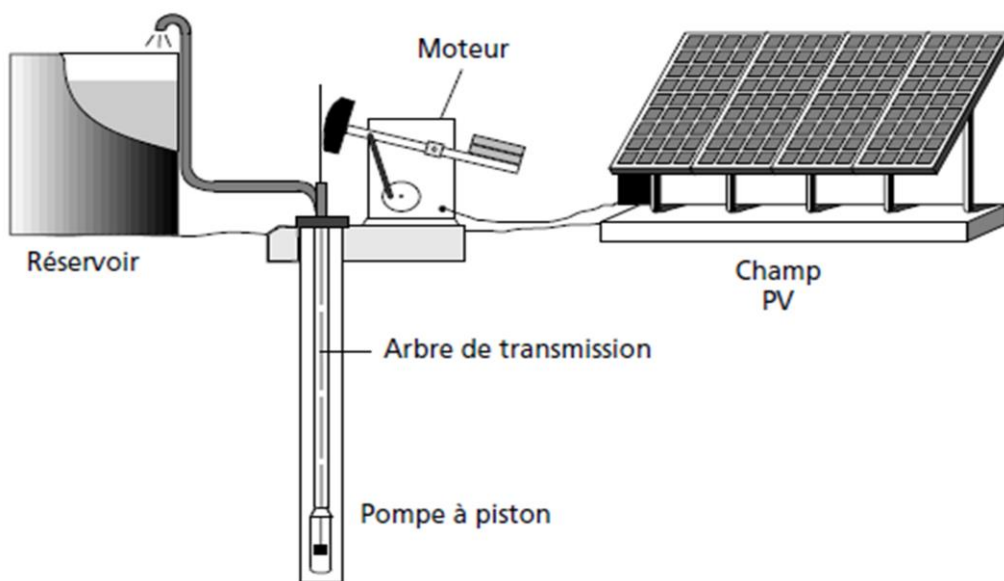


Figure 2.11 – Installation photovoltaïque couplée au réseau avec système de stockage.

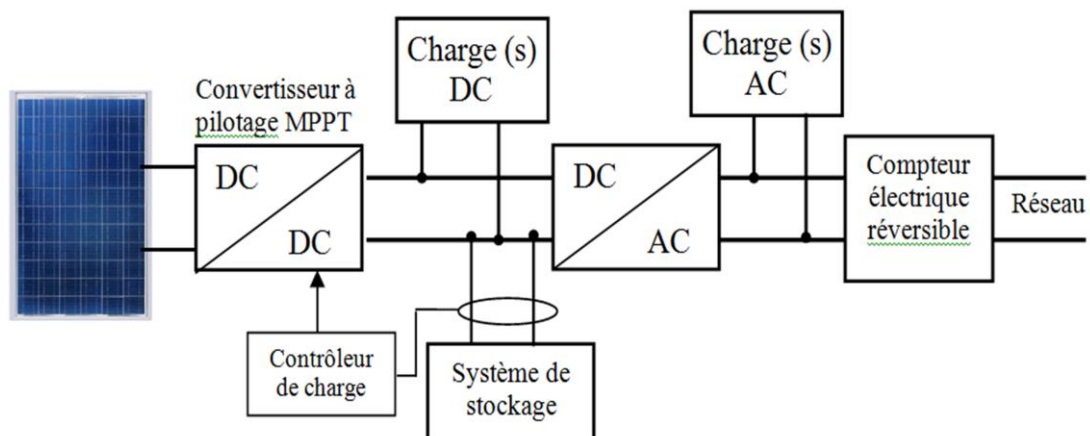


Figure 2.12 – Système de pompage photovoltaïque