



# **Energie Renouvelable**

## **Solaire**

# **L'Énergie Solaire**

**L'énergie solaire désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil.**

**On sait que le soleil est la source d'énergie la plus puissante.**

**La production de l'électricité à partir du soleil nécessite seulement d'exploiter cette source puissante et gratuite.**

L'énergie solaire donc, est une énergie **renouvelable** importante, propre moins chère.

Elle est reçue sur terre sous forme cyclique et discontinue avec une contenance de puissance très petite allant de **0** à **1 kW/m<sup>2</sup>**. cette quantité est affectée par les conditions **climatiques** et **atmosphériques**.

# Unité de mesure

dans le système SI, l'énergie solaire est exprimée en **Joule**. Dans le calcul de l'énergie solaire, la moyenne par heure, par mois ou par an est généralement utilisée dont on dit:  **$\text{kJ}/\text{m}^2/\text{jr}$** , ou  **$\text{kJ}/\text{m}^2/\text{mois}$**  ou  **$\text{kJ}/\text{m}^2/\text{an}$** .

Pour la puissance solaire, elle est exprimée comme:  **$\text{W}/\text{m}^2$** , ou  **$\text{kW}/\text{m}^2$** .

# La composition d'une Centrale Solaire

Une centrale d'énergie solaire se compose des sous-systèmes suivants:

## 1) Le collecteur ou concentrateur solaire

Le collecteur ou le concentrateur solaire sert à recevoir les rayons solaires et collecter l'énergie y contenue. Il peut avoir l'un des types suivants:

- ✓ type plat sans concentrateur.
- ✓ type parabolique avec un concentrateur

## 2) Le milieu de Transport d'énergie

Il représente la substance comme **l'eau**, **l'air**, un **métal liquide** ou **gaz** sont utilisés pour transporter l'énergie thermique obtenue du collecteur vers **l'échangeur** de chaleur ou vers le stockage thermique.

Pour les systèmes d'énergie **solaire** qui utilise la technologie **PV solaire**, le transport d'énergie électrique est par le biais des composants **semiconducteur SC**.

### 3) Le stockage d'énergie

L'énergie solaire n'est pas disponible d'une manière continue.

C'est pour cette raison qu'on a besoin d'un outil et un mécanisme pour emmagasiner ou stocker l'énergie solaire collectée pour une utilisation dans les périodes d'absence du soleil (nuit, nuage).

On distingue trois types de moyens de stockage:

- ✓ le stockage **thermique**.
- ✓ le stockage par **batteries**.

### **3) Systèmes de conditionnement, contrôle et protection**

Le besoin de la charge en terme d'énergie électrique varie en fonction du temps, c'est-à-dire, elle se change et varie d'un moment à un autre.

En plus, l'énergie fournie par la centrale est caractérisée par quelques grandeurs comme: **la tension, le courant, la fréquence, la puissance, etc.**

Vu ces caractéristiques, une adaptation (**conditionnement**) stable, contrôlée et protégée avec le besoin de la charge variable s'avère **nécessaire**.

L'unité de conditionnement de puissance élabore les fonctions suivantes:

- ✓ control (commande) et régulation.
- ✓ automatisation.
- ✓ surveillance.
- ✓ protection,..... etc.

# Énergie du Soleil

Le soleil envoie des **rayons** contenant environ  **$3.8 \times 10^{26} \text{ W}$**  dans toutes les directions. De cette quantité de **puissance**, environ  **$1.7 \times 10^{17} \text{ W}$**  est reçue par la terre. Sur terre, il arrive une moyenne de puissance environ  **$1.35 \text{ kW/m}^2$**  varie au long de l'année de  **$1.33 \text{ kW/m}^2$**  (au mois de Janvier) à  **$1.43 \text{ kW/m}^2$**  (au mois de Juillet).

L'énergie **thermique solaire** est une forme d'énergie dont la technologie permettant d'exploiter l'énergie solaire pour générer et produire **l'énergie thermique** ou électrique pour l'utiliser à des fins industrielles ou domestiques (résidence, bureaux, firmes, ...) ou commerciales.

# Exploitation de l'énergie solaire

L'exploitation de l'énergie provenant du **soleil** est réalisée en utilisant deux **approches** (technologies):

- 1. Par la technologie de collecteur thermique.**
- 2. par la technologie de Photovoltaïque PV solaire.**

# L'énergie thermique solaire

L'énergie thermique solaire est le type d'énergie solaire le plus directement disponible. Les applications de cette énergie est multiple allant de petites centrales de **1 kW** à des centrales de **200 MW** dont la température est **< 150 °C** et entre **150 °C - 300 °C**

L'unité basique dans les systèmes d'énergie thermique solaire est le **collecteur thermique**

Le **collecteur thermique** solaire fonctionne sous le principe qu'il collecte **la chaleur** des **rayons solaires**. En absorbant cette chaleur, le **collecteur** convertit les radiations solaires incidentes en une **énergie thermique**.

Par l'utilisation des canaux de transport (**fluides**: l'air, l'eau avec antigel) écoulant dans les **tubes** des collecteurs, cette chaleur est **stockée** dans **réservoirs thermiques**

**spécifiques** ou directement pour alimenter les thermo-génératrice à base d'une turbine thermique ou à gaz qui assure la conversion thermique-électrique dont la puissance électrique est utilisée pour alimenter la charge locale ou être connectée au réseau électrique. L'énergie thermique solaire issue du collecteur peut aussi être délivrée directement aux échangeurs de chaleur.

Les systèmes de **stockage thermique** emmagasine la chaleur pendant **quelques heures** pour une utilisation en nuit ou dans les périodes de nuage.

Les applications qui utilisent **l'énergie thermique solaire** sont diversifiées allant de cuisines simples de **1 kW** aux centrales solaires **thermoélectriques** de **200 MW**.

## 2) l'énergie PV Solaire

Afin de réduire au maximum les émissions en **gaz toxique** à cause de la révolution industrielle basée sur l'exploitation néfaste des ressources **d'énergie fossile nuisible** simultanément pour l'environnement et la vie humaine, une convention a été signée dans ce sens, dont **la tendance** et **les recommandations** sont focalisées sur l'intérêt d'investir d'une manière intensive dans **les énergies renouvelables**.

La densité de la puissance radiée du soleil (référée comme la constante d'énergie solaire;  $G$ ) dans l'atmosphère est estimée par  $1.37 \text{ kW/m}^2$ . une partie de cette énergie est **absorbée et dispersée dans l'atmosphère** autour de la terre. Les radiations solaire arrivant finalement à la surface terrestre sont estimées d'avoir une densité de puissance pic de  $1 \text{ kW/m}^2$  vers l'heure de midi.

La technologie de **Photovoltaïque PV** concerne essentiellement la conversion de cette énergie solaire en une forme **électrique** utilisable.

# La Cellule Solaire

La **cellule solaire** est élément basic dans un système de conversion **PV**.

Les **cellules solaires** dans un système PV solaire convertissent l'énergie solaire contenue dans la lumière directement en **électricité** utilisable.

Le consommateur utilise des appareils pour exploiter et utiliser cette électricité comme: l'éclairage, le pompage d'eau, le réfrigération, télécommunications, télévision,....

Le fonctionnement d'une **cellule solaire** est basé sur l'**effet Photovoltaïque** pour produire l'électricité.

Une cellule solaire typique consiste d'une **jonction PN** à base d'un matériau semiconducteur similaire à une diode électronique. C'est-à-dire, la jonction est formée lorsque deux couches de semiconducteur sont établies par le processus de dopage (l'ajout des impuretés dopants de type **N** et **P**).

En faisant ce dopage, un champ électrique s'établi à travers la jonction PN entre les deux couches.

À la projection de la cellule aux **rayons solaires**, l'énergie lumineuse (**photons**) crée des **charges électriques libres** séparées par le champ électrique et génère une tension électrique entre les deux terminales de la cellule.

Si une charge est branchée, un courant sera écoulé. Ce courant qui est appelé photocourant ( $I_{ph}$ ) est **proportionnel** à l'intensité solaire.

# Schéma Électrique Équivalent d'une Cellule PV Solaire

Un schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire consiste d'une source de courant ( $I_{ph}$ ) en parallèle avec une diode à jonction PN comme montré sur la figure suivante

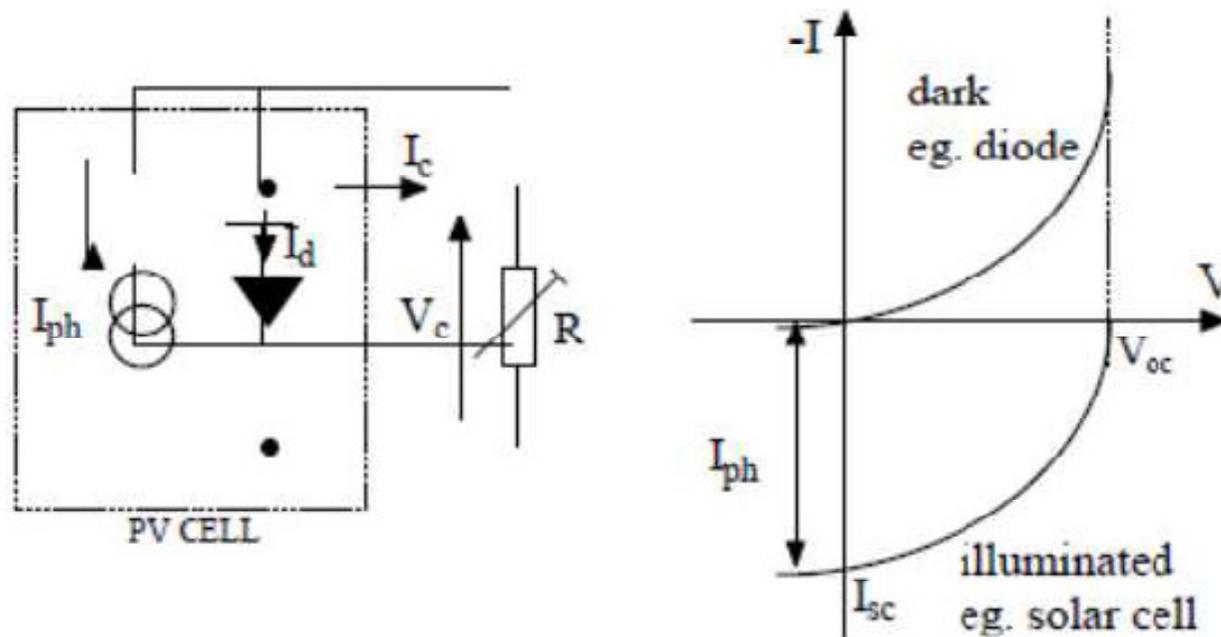


Figure 2: Equivalent circuit of a solar cell

La relation entre les courants et tensions dans un circuit équivalent de la cellule solaire est donnée par:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{KT}} - 1 \right)$$

Avec:

**I**: est le courant total arrivant la charge branchée à la sortie.

**$I_{ph}$** : est le courant généré par la cellule solaire.

**$I_D$** : est le courant parcouru dans la diode.

**$V_D$** : est la chute de tension à travers la diode.

**$q$** : est la charge électrostatique d'électron ( $q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

**$K$** : est la constante de Boltzmann ( $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ )

**$T$** : est la température de fonctionnement de la cellule solaire ( $^\circ \text{ Kelvin}$ ).

**$I_o$** : est le courant de saturation inverse de la cellule solaire (la diode).

## **Caractéristique I-V d'une cellule PV Solaire**

À partir du circuit équivalent précédent pour une cellule PV, et afin de compléter la modélisation, une résistance variable est connectée à la sortie du générateur de la cellule PV comme charge.

**Si on court-circuite les deux terminales de la sortie, la tension de sortie et celle à travers la diode sont zéros.**

**À ce moment, le courant total généré par la cellule PV ( $I_{ph}$ ) apparaît entièrement à la sortie, c'est-à-dire:  $I_{ph} = I_{ph}(\max) = I_{sc}$ .**

**Si on augmente la valeur de la résistance de la charge, la tension à travers la diode augmente aussi.**

**À ce moment, une partie du courant généré par la cellule PV est parcourue à travers la diode, ce qui implique une diminution de la valeur vers la sortie.**

**Si on maintient l'augmentation de la résistance de charge jusqu'à une valeur donnée, on atteint une ouverture du circuit au niveau les deux terminales de la sortie.**



**À ce moment là, le courant à la sortie est nul et tout le courant généré par la cellule PV est parcouru à travers la diode et la tension de sortie est maximale, c'est-à-dire:**

$$V_D = V_{\max} = V_{oc}.$$

**Ce comportement est illustré par la caractéristique I-V de la cellule PV suivante.**

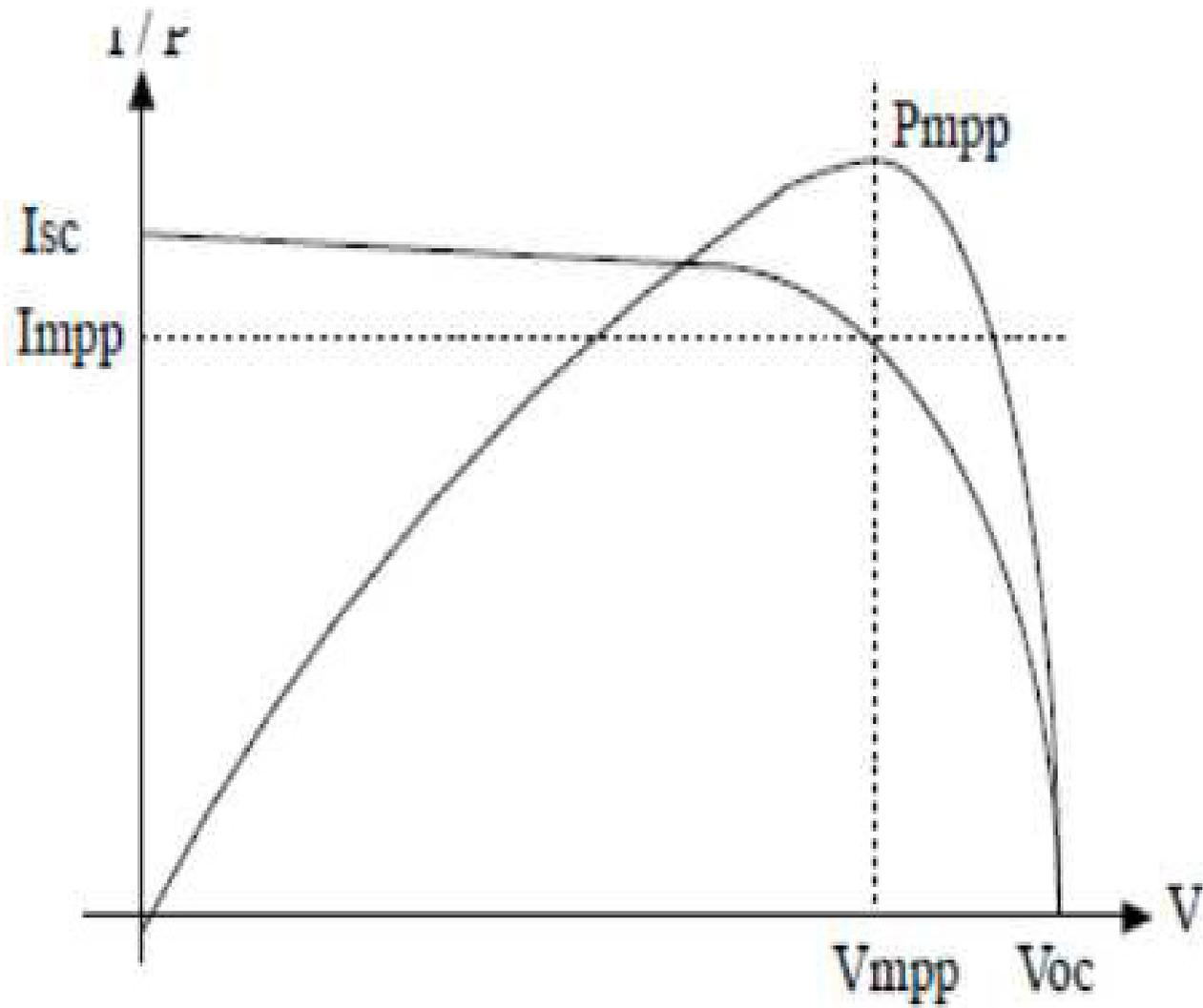


Figure 3:  $I$  vs.  $V$  characteristics of a solar cell

## Point de Puissance Max d'une Cellule PV (MPP)

Une **cellule solaire** peut fonctionner sur tous les points au long de sa caractéristique I-V auparavant discutée.

Sur cette courbe de caractéristique, deux points sont d'importance particulière:

- ✓ la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ): qui est définie comme étant la tension max pour un courant nul.

✓ le courant de **court-circuit** ( $I_{sc}$ ): qui est défini comme étant le courant max pour une tension nulle.

Pour une cellule PV à base d'un semiconduteur de type **Si** et sous des conditions de test standards, on a:  $V_{oc}=0.6-0.7$  V,  $I_s=20-40$  mA pour chaque  $cm^2$  de la surface de cellule.

La courbe représentant la variation de la puissance générée en fonction de la tension générée par la cellule PV montre qu'il existe un seul point sur la caractéristique I-V pour le quel la cellule PV génère une puissance Max.

On appelle ce point « **le point de la puissance**

**Max** »  $(V_{mpp}, I_{mpp})$  caractérisant chaque cellule PV solaire.

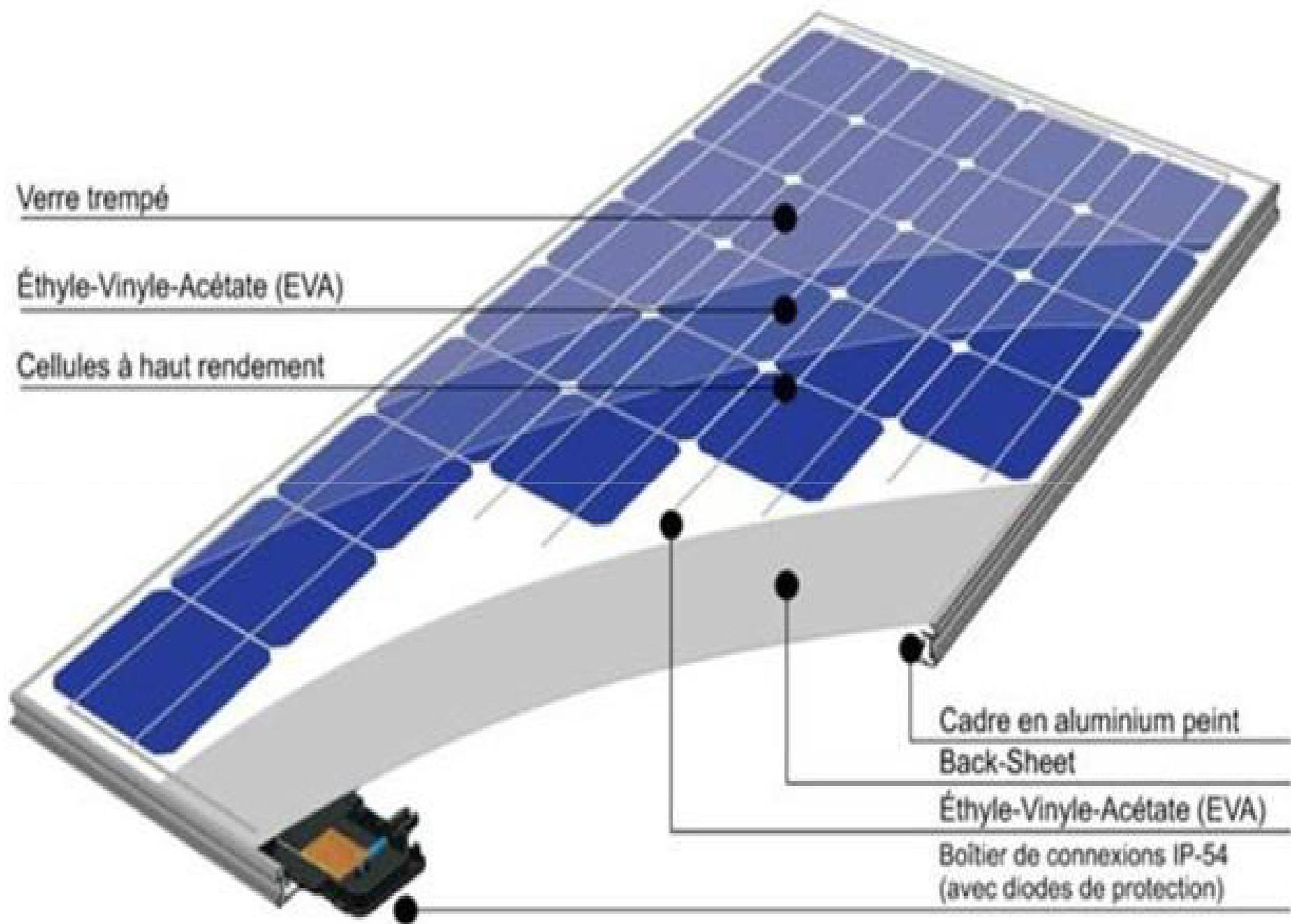
Un grand travail est désormais déployé pour assurer le fonctionnement du système de génération solaire à ce point quelque soit les conditions climatiques.

Des algorithmes sont utilisés dans ce sens.

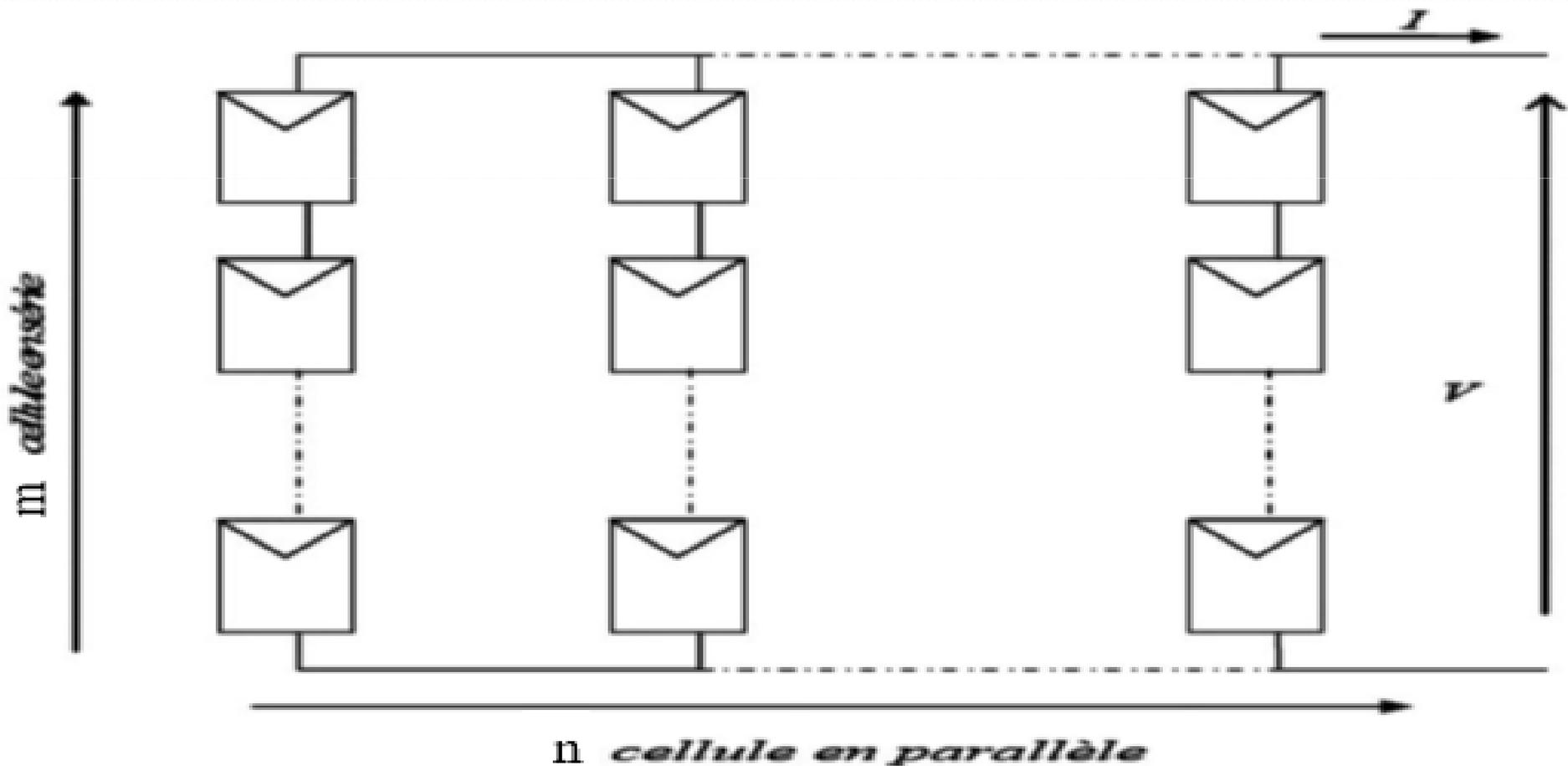
# Module PV, Panneau PV, Champ PV

Dû que la **cellule PV** solaire produit et génère une tension faible environ **0.5 V**, les équipements d'énergie solaire comportent les notions suivantes:

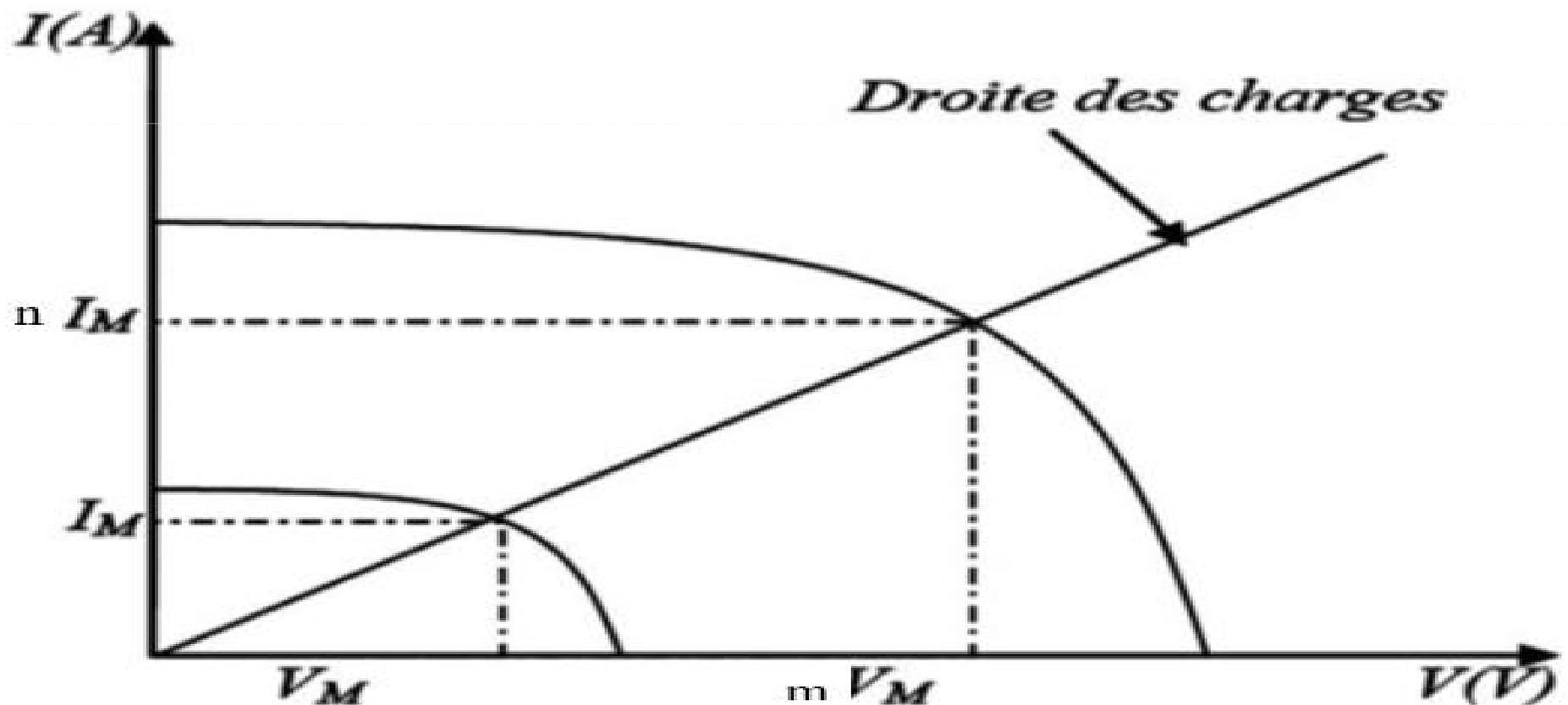
**(1) Le Module PV solaire:** est défini comme un ensemble des cellules PV solaires connectées en série ou/et en parallèle.



**La connexion en série de plusieurs cellules augmente la tension pour un même courant, tandis que leur mise en parallèle accroît le courant pour un niveau constant de tension.**



La courbe représentant la caractéristique IV d'un module PV de base est une courbe se déduisant de la courbe IV d'une cellule élémentaire comme il est illustré dans cette figure.

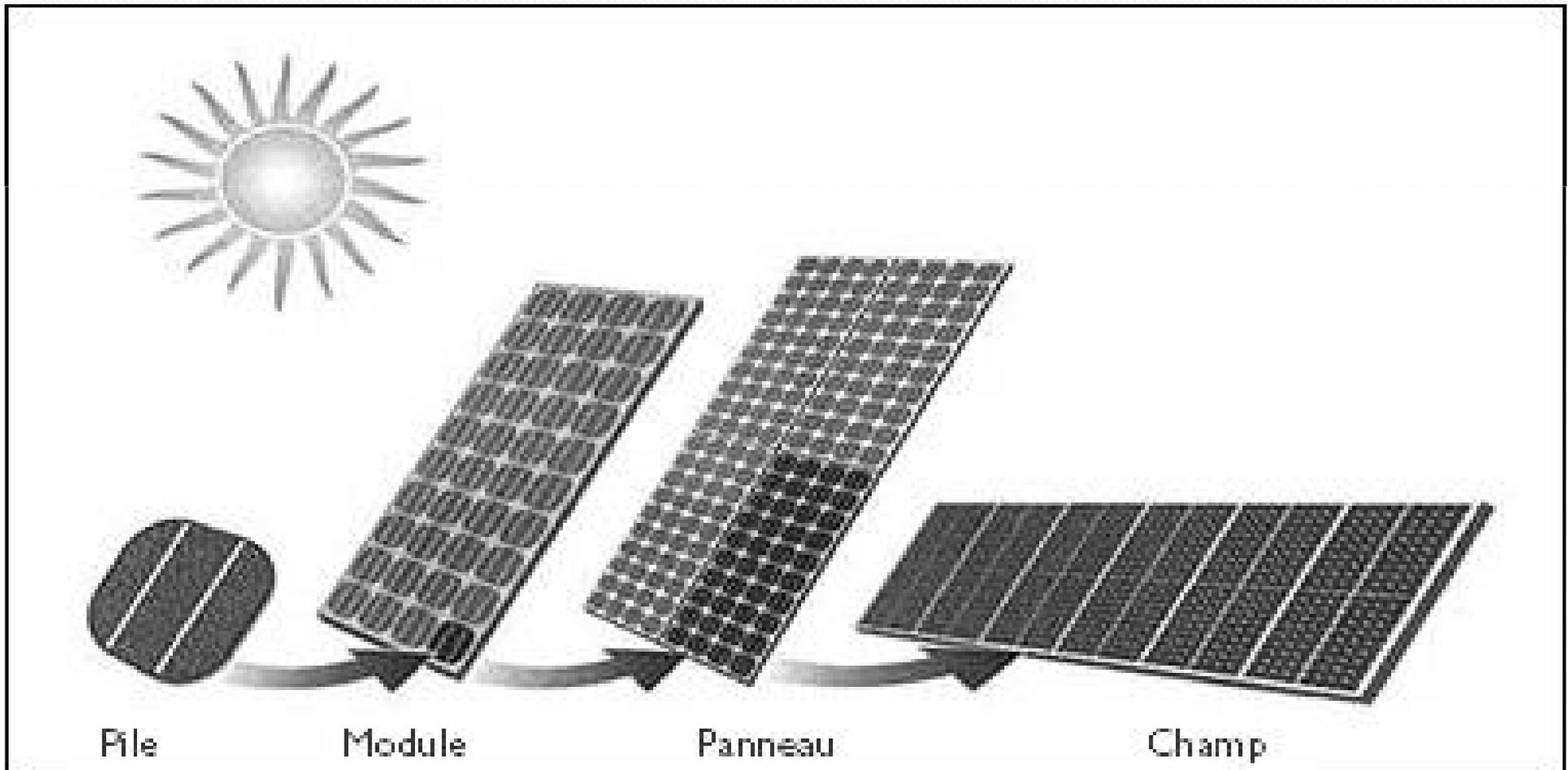


**(2) Le Panneau PV solaire:** est un ensemble des modules PV solaires interconnectées physiquement et électriquement en série et/ou en parallèle sur une structure de support afin de fournir la puissance crête requise définie selon les conditions spécifiques d'éclairement (irradiation) et température.

**(3) Le Champ PV solaire:** est un ensemble des panneaux PV solaire associés en parallèle et

en série.

La figure suivante illustre ces trois éléments  
constituant un équipement de production de  
**l'énergie solaire.**



**Les modules PV sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.**

**L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le max du flux solaire.**

**L'expérience a montré qu'il suffit d'incliner le module d'un angle de  $30^\circ$  pour obtenir un meilleur rendement.**

**Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin d'une boîte de dérivation qui regroupe le tous.**

**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.**



**Fig. :** PV panels to generate electricity directly from the sunlight

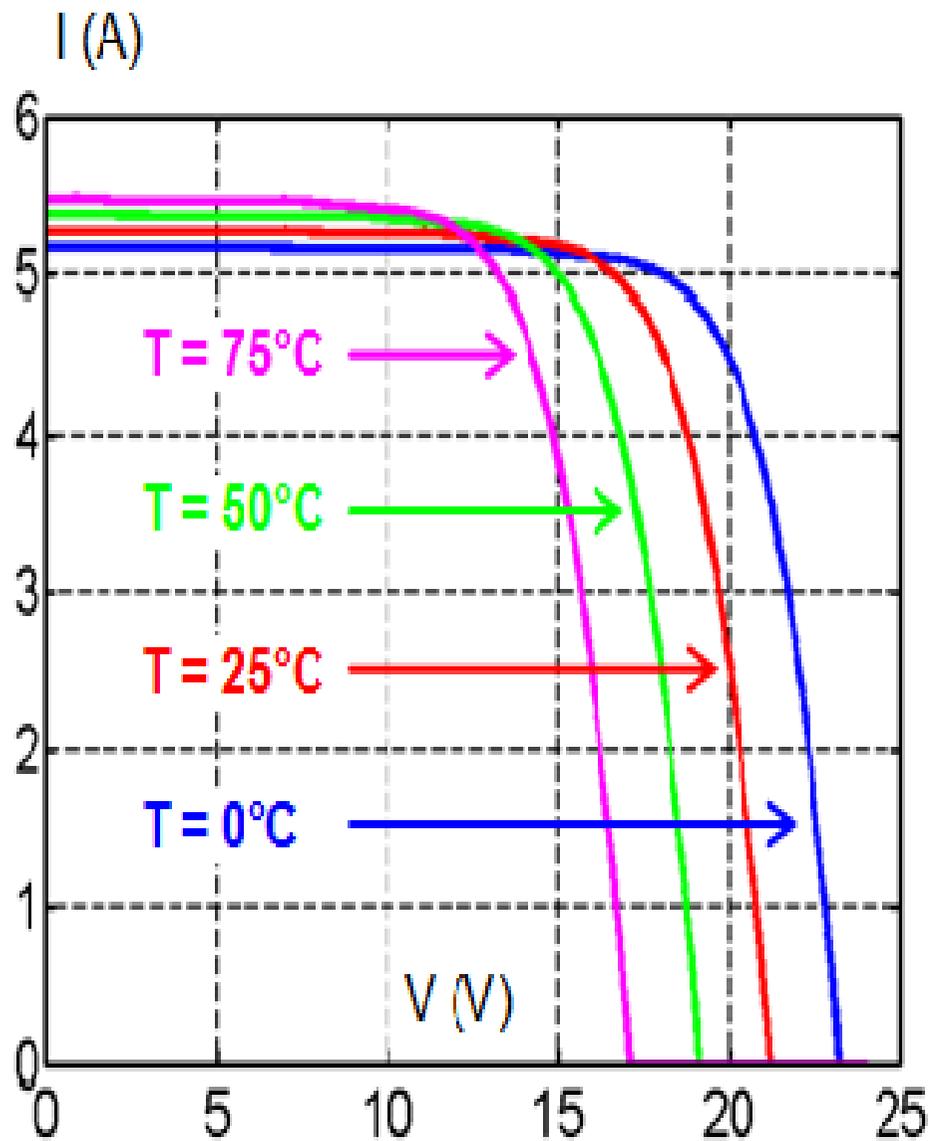
## **Le Panneau PV solaire et l'effet de l'environnement**

**Le rendement d'un Panneau PV solaire est influencé d'une manière critique par deux paramètres environnementaux.**

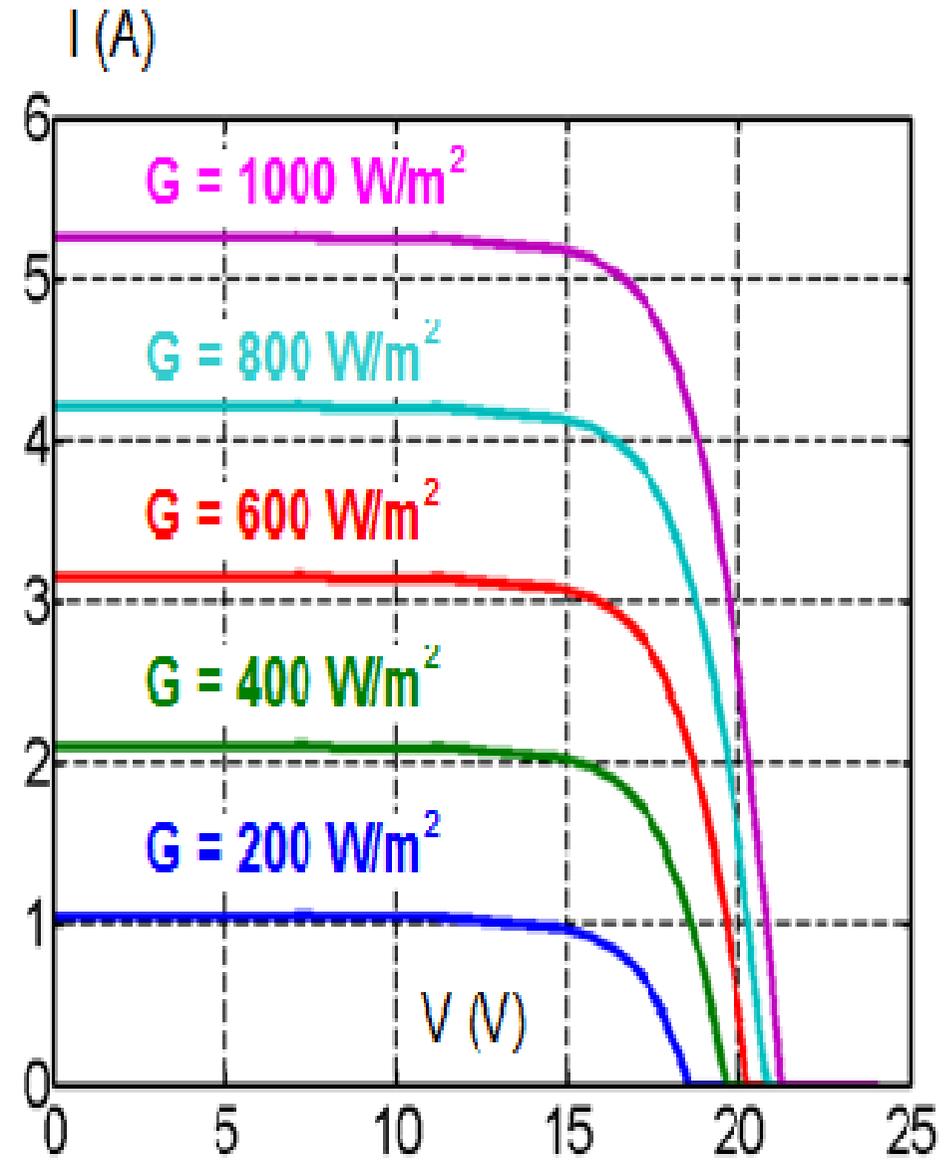
- (1) La Température de fonctionnement de la cellule PV.**
- (2) l'irradiation solaire (la densité des rayons solaires).**

d'une manière générale, Le système PV solaire possède une **caractéristique nonlinéaire** où ses performances ainsi que la puissance électrique générée à la **sortie** sont directement affectées par le changement et les variations des conditions opérationnelles (**la température et l'irradiation solaire**).

Dans les figures suivantes on montre cet effet sur le courant et la tension générés.



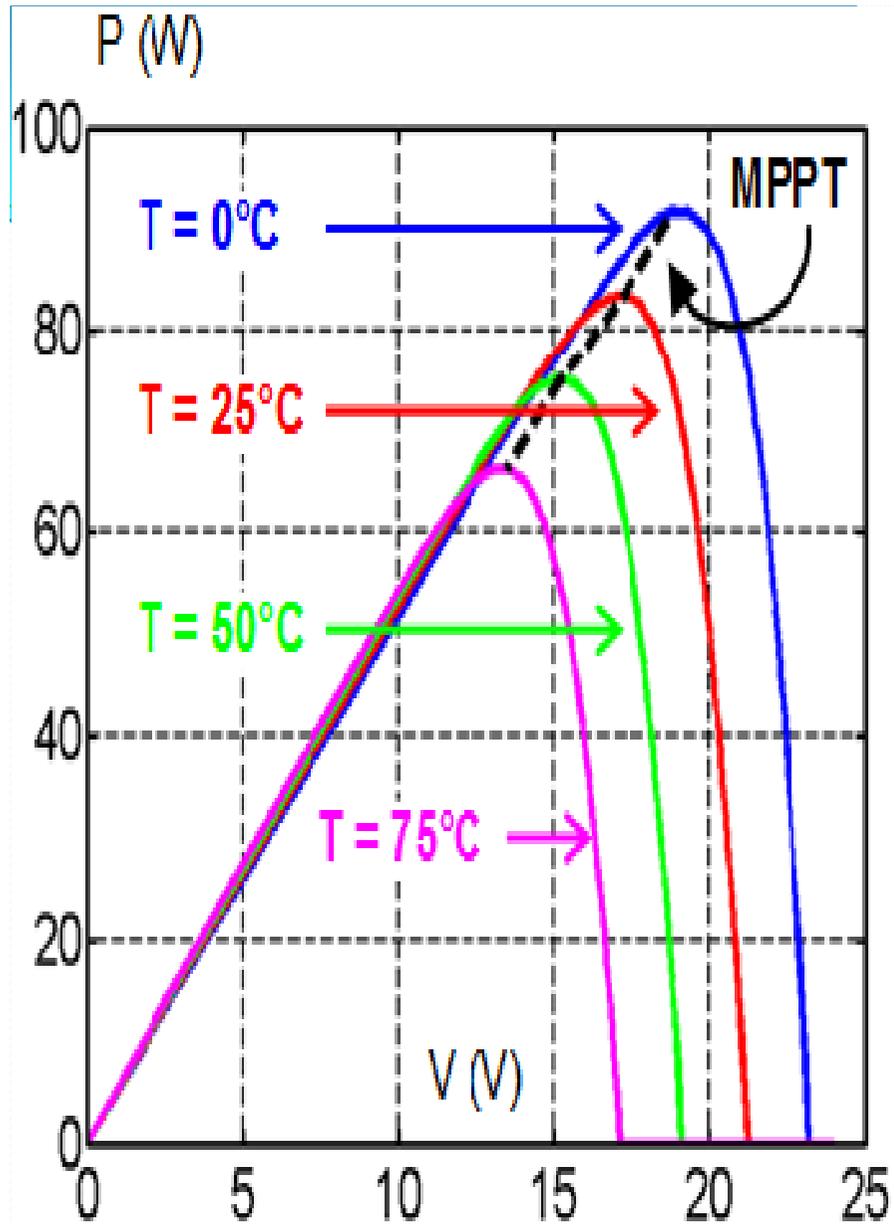
**Effect of temperature changes on I-V curves.**



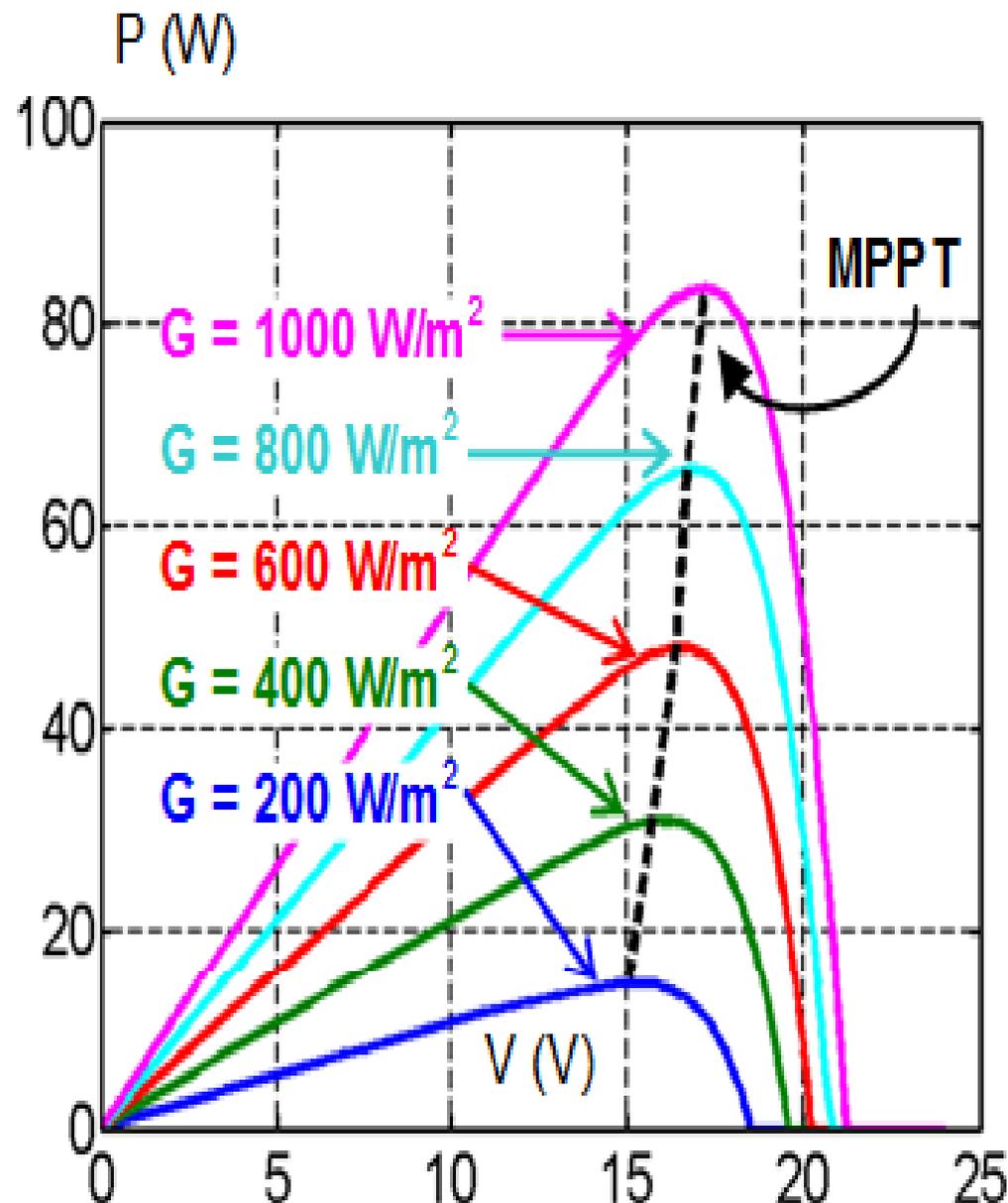
**Effect of solar irradiance changes on I-V curves.**

On voit que le courant généré par le PV solaire (le photocourant) augmente légèrement en augmentant la température et s'amplifié fortement par l'augmentation de l'intensité solaire.

Dans les figures suivantes, il est montré l'effet de ces paramètres de température et l'irradiation solaire sur la puissance totale générée par un PV solaire.



**Effect of temperature changes on P-V curves.**



**Effect of solar irradiance changes on P-V curves.**

À partir de ces figures, il est clair que la puissance générée à la sortie d'un PV solaire est directement proportionnelle avec la quantité des rayons solaires tombés sur la surface du PV et inversement proportionnelle avec sa température de fonctionnement.

Il est aussi clair que la variation et le changement de ces deux paramètres causent le changement du point où la puissance générée est maximum.

Ce qui implique que la tension de sortie d'un panneau (système) solaire doit être proprement variée par un convertisseur DC-DC afin de suivre le point de la puissance Max (MPPT).

# Composants d'un Système Électrique Solaire

Le panneau ou la structure solaire seul ne constitue pas un **systeme de puissance électrique solaire PV**. Par contre, on a besoin d'autres **éléments** pour construire ce système, comme:

- une infrastructure pour le montage.
- un suiveur du soleil, pour orienter toujours le panneau vers le soleil.

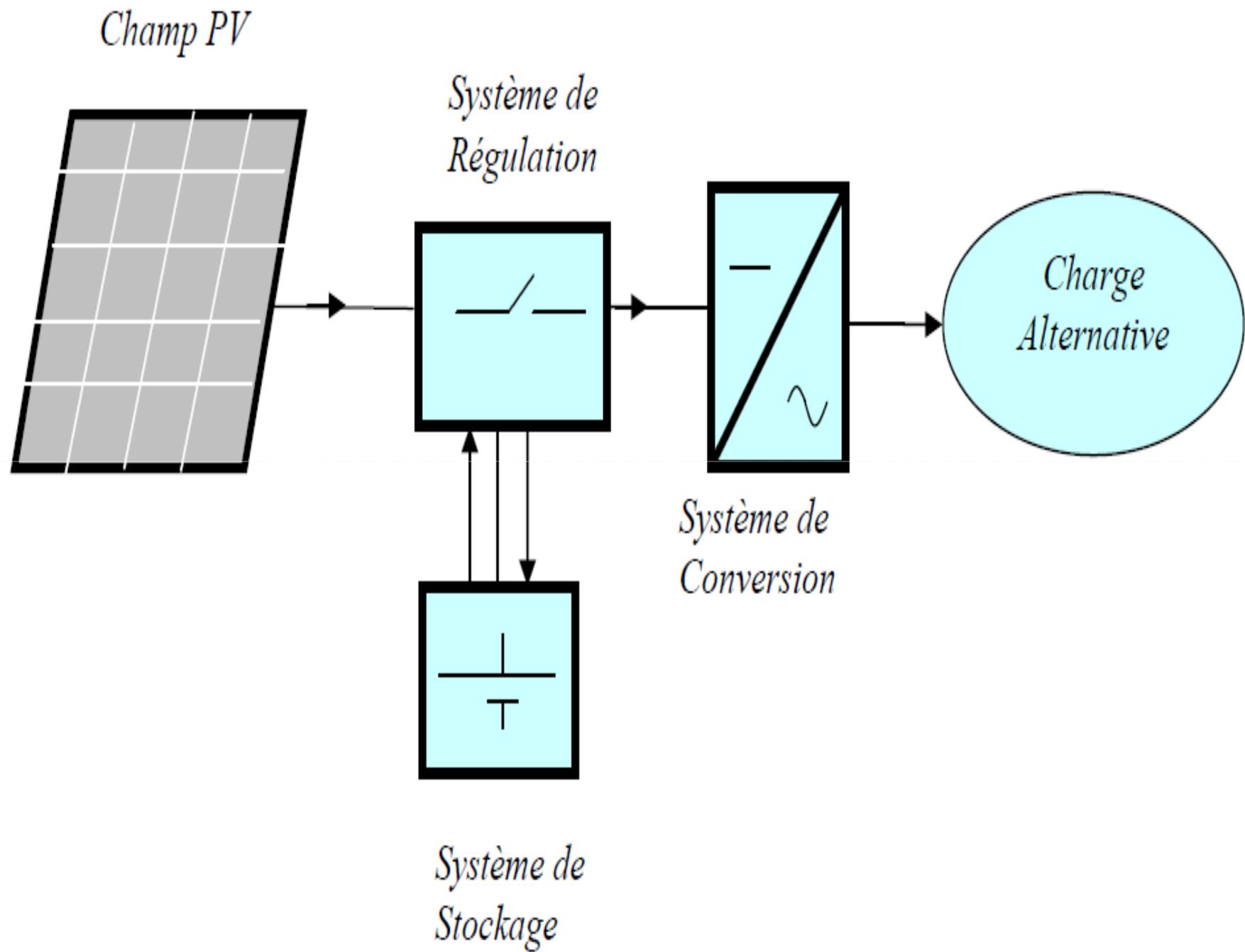
- des capteurs pour surveiller les performances du système.
- les convertisseurs de puissance (DC-DC, DC-AC).
- les batteries de charge.

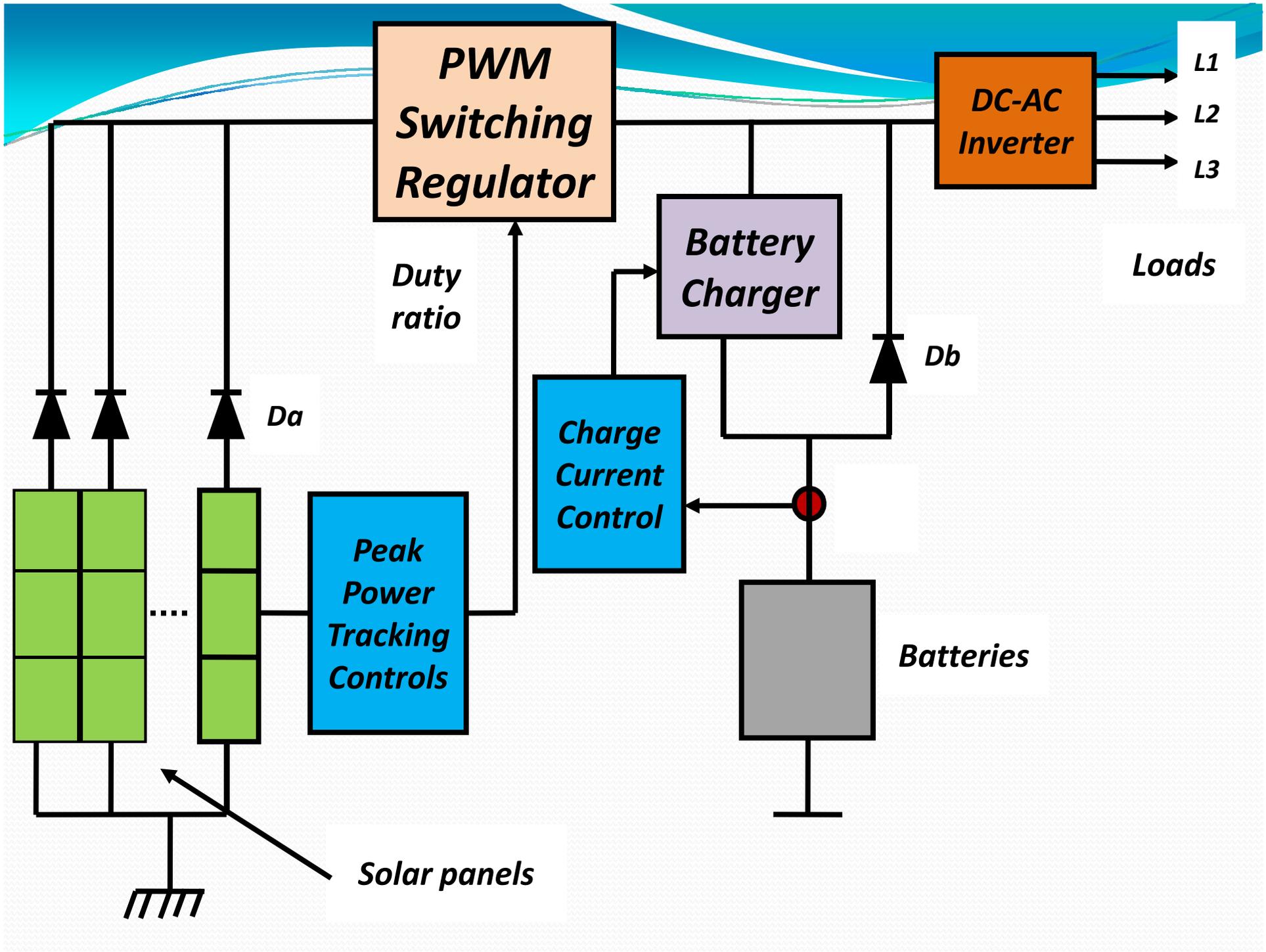
Le **convertisseur de puissance** DC-DC sert à conditionner la puissance de telle manière elle est directement utilisable par la charge ainsi pour charger les batteries.



Par contre, le convertisseur de puissance DC-AC (Inverter) est utilisé pour convertir la puissance DC en une puissance AC (50 Hz ou 60 Hz).

Cette architecture d'un système de puissance électrique **solaire** est représentée par le schéma suivant.





Dans cette architecture:

- ❖ Peak power Tracker (suiveur de la puissance Max):  
fonctionne sur la base qu'il mesure le courant et la tension à la sortie du panneau solaire et ajuste continuellement le point de fonctionnement correspondant à la puissance Max sous les conditions climatiques variables.
- ❖ le convertisseur DC-DC: reçoit la puissance solaire générée et la conditionne pour charger les batteries (c'est un chargeur batteries).

❖ le convertisseur DC-AC: en parallèle, la puissance solaire générée (de type DC) alimente ce convertisseur DC-AC pour fournir la puissance à la charge AC ou interface avec le réseau national.

❖ les batteries: servent à se décharger vers le convertisseur DC-AC en cas d'absence du soleil (la nuit, les périodes du nuage,...) et donc assure l'alimentation de la charge AC.



❖ le contrôleur de la charge: est utilisé pour surveiller la charge des batteries à travers les mesures des courants. C'est ce **contrôleur** qui arrête et faire marcher le chargeur batteries.

# Types de Systèmes de Puissance PV

Les systèmes de génération d'électricité Photovoltaïque (PV) sont classifiés en les types suivants:

- (1) Système Autonome (stand alone PV power system).
- (2) système connecté au réseau (Grid connected PV power system).
- (3) système Hybride (Hybrid PV power system).

## **(1) Système de Puissance PV Autonome**

Ce type de système PV est en général implémenté dans les sites éloignés ou ruraux qui ne disposent pas de l'accès au réseau électrique national.

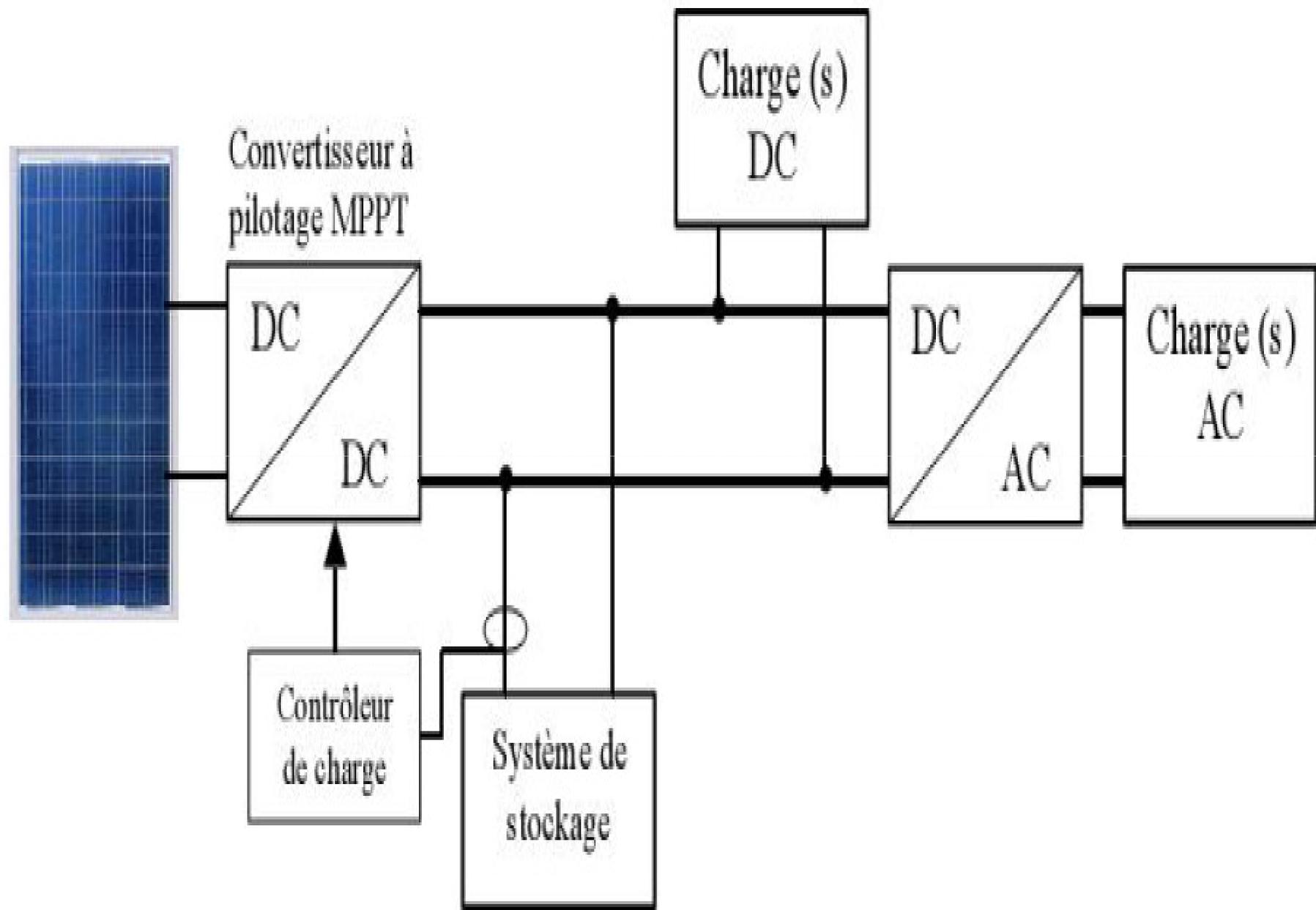
Ce type de système est utilisé dans les applications suivantes:

- **Le chargement des batteries:** dans ce cas, une stratégie de commande appropriée et sophistiquée est nécessaire pour prolonger la durée de vie des batteries et les prévenir contre le fonctionnement en basse charge ou non complète.

➤ **Le Pompage d'Eau:** dans les sites éloignés ou ruraux, les pompes entraînées manuellement ou les sources fossiles (diesel, essence) sont généralement utilisées dans le pompage d'eau.

En général, les systèmes PV solaires **Autonomes** comprennent quatre éléments:

- Un ou plusieurs modules PV,
- le système de régulation (conv. DC-DC).
- une ou plusieurs Batteries.
- l'onduleur (convertisseur DC-AC).



L'énergie produite par ces systèmes est immédiatement utilisée (le pompage,..), charger les batteries pour des utilisation différée ou convertie en puissance AC pour alimenter la charge de type AC.

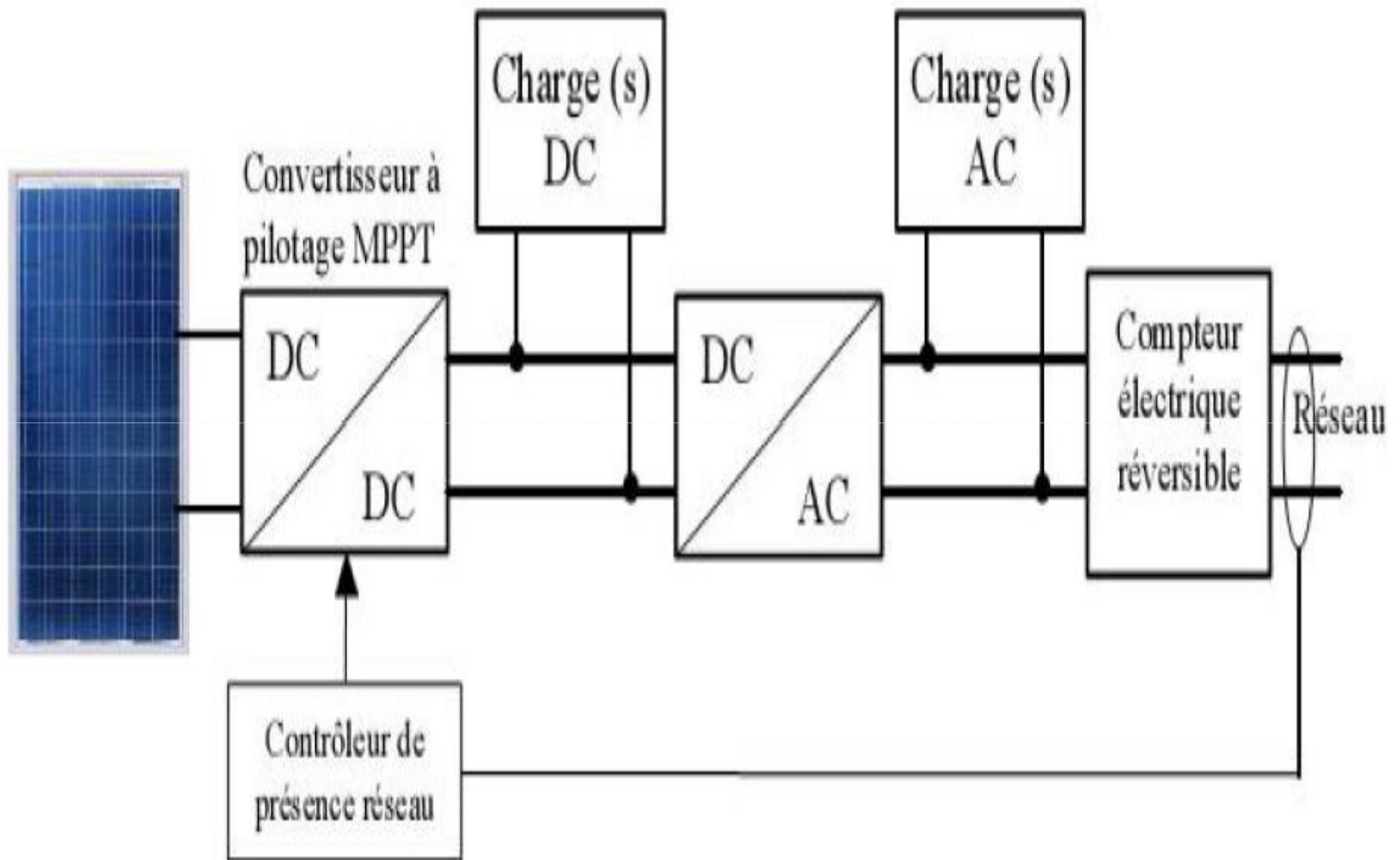
Les systèmes PV autonomes constituent alors une option intéressante qu'ils donnent aux populations à l'écart de réseau électrique national un accès à l'électricité avec un coût,

**une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.**

## **(2) Système PV Raccordé à un Réseau**

**Non autonome ou « Grid connected 'Tied' ».**

**Une configuration de ce système est montrée dans la figure suivante:**



***Systeme photovoltaïque raccordé au réseaux.***

Dans ces systèmes qui sont plus **économiques**, l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, ce qui signifie qu'une **éventuelle panne** de ce dernier rend non opérationnel le système de production d'origine renouvelable.

Dans ce système, un onduleur réversible est souvent utilisé pour accommoder aux charges à courant continu (**absence élément de stockage**).

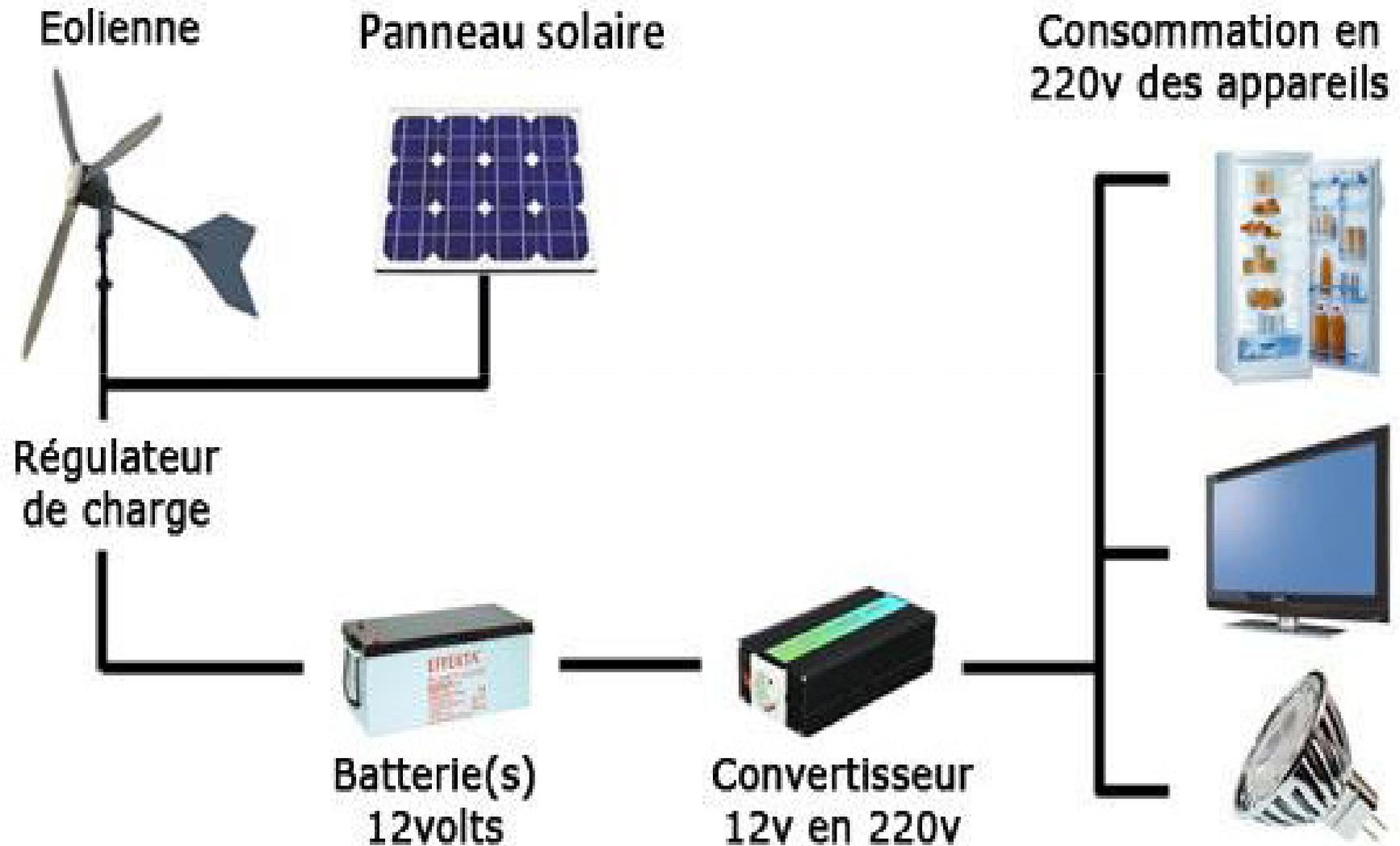
Si la production locale (du réseau) est supérieure à la production de la centrale PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie électrique du PV est fournie au réseau publique et sert à alimenter les consommateurs voisins.

### **(3) Système PV Hybride (Mixte)**

Un système PV Hybride reçoit une partie de son énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants de réseau de distribution d'électricité.

Pratiquement le système PV hybride est constitué d'un générateur PV combiné à une **turbine éolienne** ou un **groupe électrogène** à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie.

**Une configuration typique de ce système est montrée par la figure suivante.**



**Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères:**

- ✓ **simplicité**
- ✓ **l'application et le coût d'installation**
- ✓ **l'environnement**

**Toutefois, l'étude de systèmes PV solaires revient à l'étude de l'adaptation de la charge constituée soit d'une batterie ou bien une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.**

# Secteurs d'Application d'un Système PV

Les systèmes PV solaires sont, en général, installés pour répondre aux besoins des secteurs suivants:

- (1) Domaine spatial:** c'est le secteur le plus ancien dans l'utilisation des PV solaires pour alimenter les engins spatiaux (satellites, navettes, ...) dans les années soixante.
- (2) Secteur de Télécommunication:** Téléphonie Rurale, radiotéléphonie,...

**(3) Sites isolés:** services des eaux, services des forêts, pompage d'eau pour: irrigation, domiciles, villages,

**(4) Acquisition de données :** L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (**25 ans**).