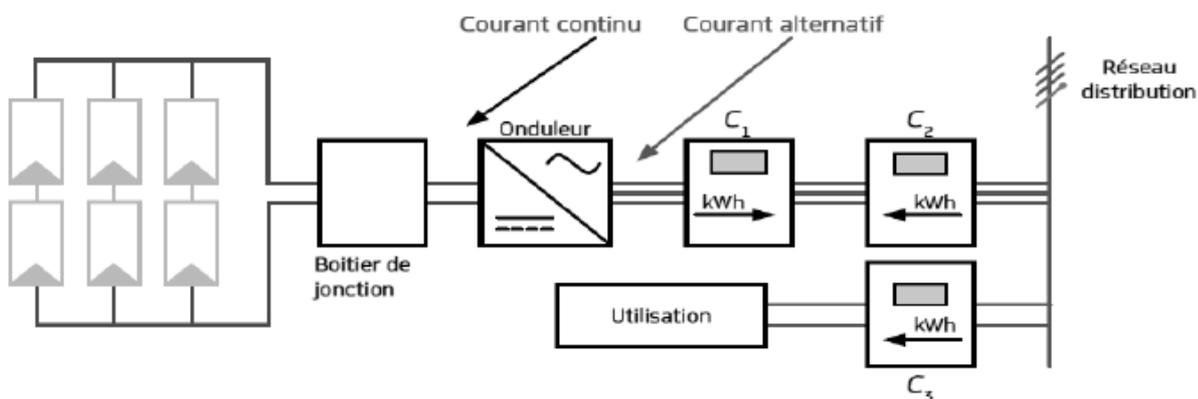


## CHAPITRE 3

### INTEGRATION DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE AUX RESEAUX

#### Introduction :

L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque est aujourd'hui plus rentable qu'une utilisation directe de l'électricité. Ceci est valable dans la mesure où le prix de vente du kWh est supérieur au prix d'achat. Pour effectuer un raccordement au réseau de distribution d'électricité, il est nécessaire d'adapter la tension continue à la sortie des panneaux photovoltaïques à la tension alternative du réseau de distribution. Il faut donc utiliser un onduleur.



**Figure 3.1** Synoptique d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau

Sur la figure 3.1, on peut voir 3 compteurs différents sur l'installation :

- C1 est le compteur de vente de l'électricité d'origine photovoltaïque,
- C2 est un compteur de non-consommation qui sert au fournisseur pour vérifier que le particulier ne se sert pas de ce branchement pour consommer de l'électricité sur le réseau,
- C3 est un compteur de consommation habituel.

#### Protection de l'installation PV raccordé au réseau des courts circuits :

Afin de protéger l'installation des courts-circuits, des éléments de protection électriques doivent être mis en place du côté du courant alternatif comme du côté du courant continu.

Du côté continu, il faut protéger l'installation contre les courts-circuits et les surtensions atmosphériques. Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur général permettant la coupure de l'ensemble des panneaux solaires en cas d'urgence. Du côté alternatif de l'installation, il faut protéger l'installation contre les surintensités, les surtensions atmosphériques. Il faut prévoir la mise en place d'un interrupteur sectionneur afin de déconnecter l'installation ainsi que la mise en place de la protection des personnes.

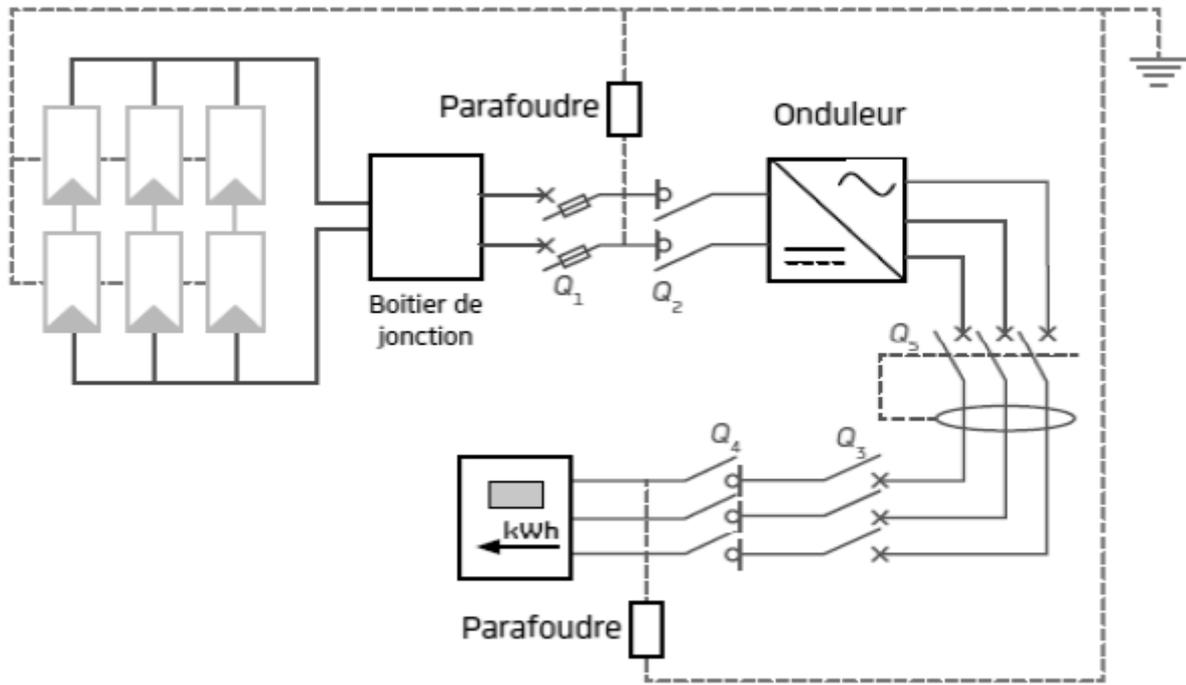


Figure 3.2 Schéma de protection d'une installation PV

**Chaine de conversion élémentaire :**

Un schéma simplifié d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau est représenté sur la figure 3.3

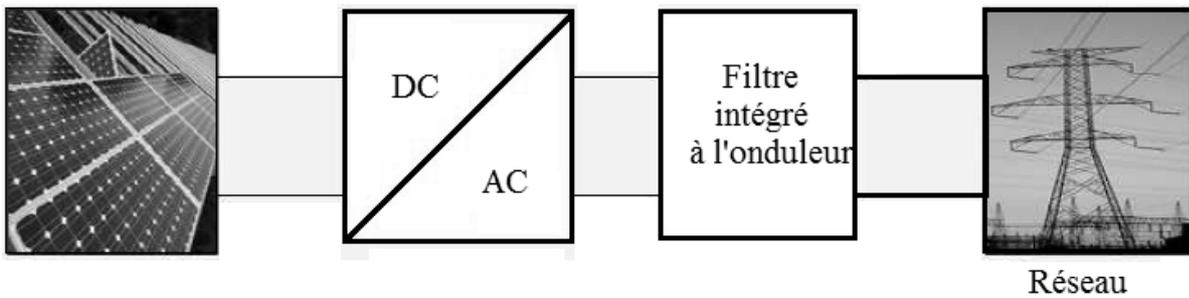


Figure 3.3 Schéma simplifié d'une installation PV raccordé au réseau

**Avantage :**

- ✦ Nombre minimum de composants ce qui diminue les pertes.

**Inconvénients :**

- ✦ Nombre important de panneaux PV à mettre en série
- ✦ Recherche du point de fonctionnement optimal plus difficile.

Recherche du point de puissance maximale :

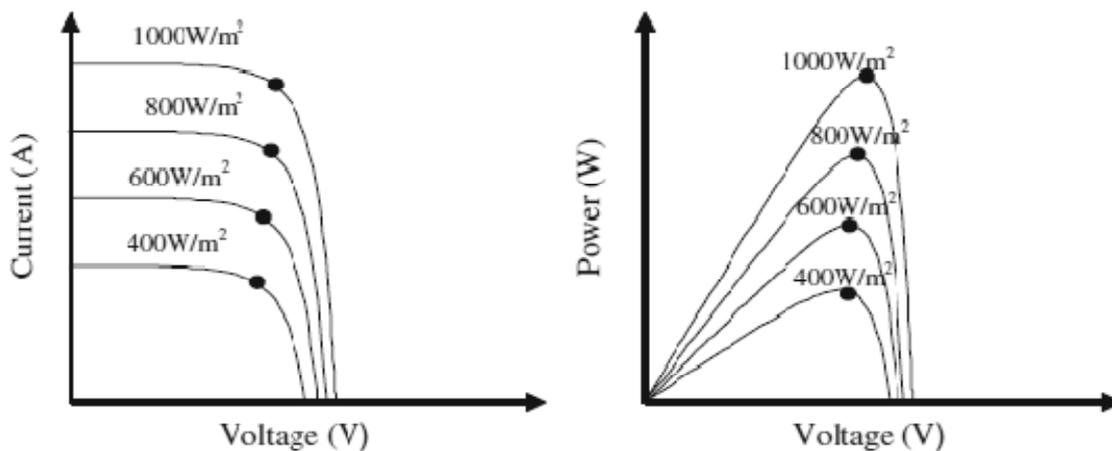
### Courbes caractéristiques des cellules solaires

La caractéristique électrique de la cellule PV est généralement représentée par la courbe ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) du courant en fonction de la tension, et la courbe ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) de la puissance en fonction de la tension pour différentes conditions.

#### Effet du rayonnement :

On note sur la figure 3.4 que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente quasi linéairement avec l'éclairement, et que la tension  $V_{oc}$  augmente légèrement. La puissance électrique maximale  $P_{MPP}$  augmente plus rapidement avec l'éclairement, c'est-à-dire l'efficacité est meilleure pour un éclairement élevé.

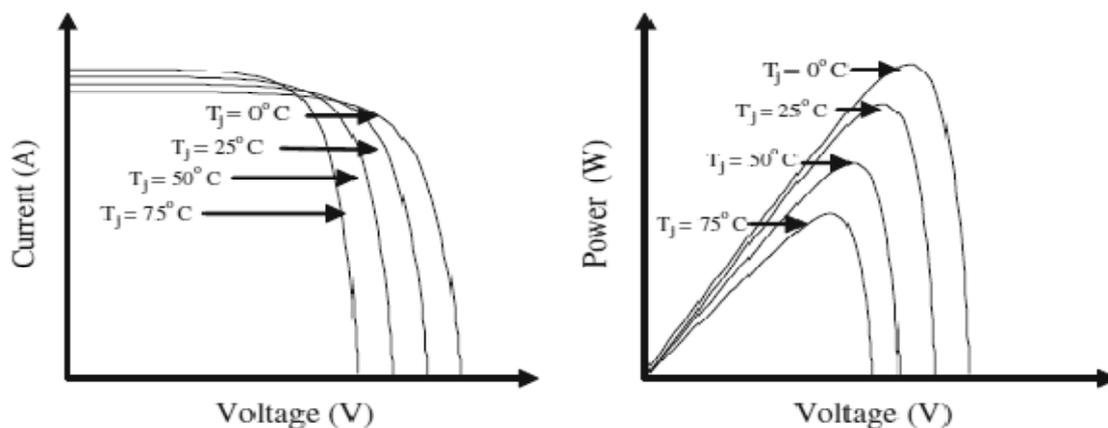
Les conditions de référence sont généralement choisies pour un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$



**Figure 3.4** Effet du rayonnement sur les caractéristiques électriques

#### Effet de la température :

On voit sur la figure 3.5 que lorsque la température interne de la cellule solaire augmente, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente légèrement en raison d'une meilleure absorption de la lumière, mais la tension en circuit ouvert diminue fortement avec la température. La puissance électrique maximale diminue également fortement avec la température



**Figure 3.5** Effet de la température sur les caractéristiques électriques

### **Système photovoltaïque :**

Un module photovoltaïque seul ne suffit généralement pas pour alimenter régulièrement une application. L'énergie qu'il fournit est très variable, et toujours en courant continu ; il faut souvent la stocker, et par la transformer.

On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires à l'alimentation d'une application en toute fiabilité (cellule solaire, connexions électriques, convertisseurs, montage mécanique,...)

Les systèmes PV peuvent être classés en trois catégories selon leurs applications:

1. Systèmes autonomes
2. Systèmes hybrides
3. Systèmes connectés au réseau.

#### **1-Systèmes autonomes « au fil du soleil »**

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. On peut les trouver dans les deux cas suivants :

##### **a-Alimentation directe**

Les systèmes PV autonomes sont conçus pour fonctionner indépendamment de l'électricité du réseau électrique, et sont généralement conçus et dimensionnés pour alimenter certaines charges en courant continu et / ou courant alternatif.

Le type le plus simple du système PV autonome est celui à couplage direct, où la sortie DC d'un module PV est directement connectée à une charge CC. Dans les systèmes à couplage direct, la charge ne fonctionne que pendant les heures d'ensoleillement.

Les applications courantes de ce système sont les ventilateurs, les pompes à eau et les petites pompes de circulation utilisées pour les systèmes de chauffage solaire de l'eau thermique.

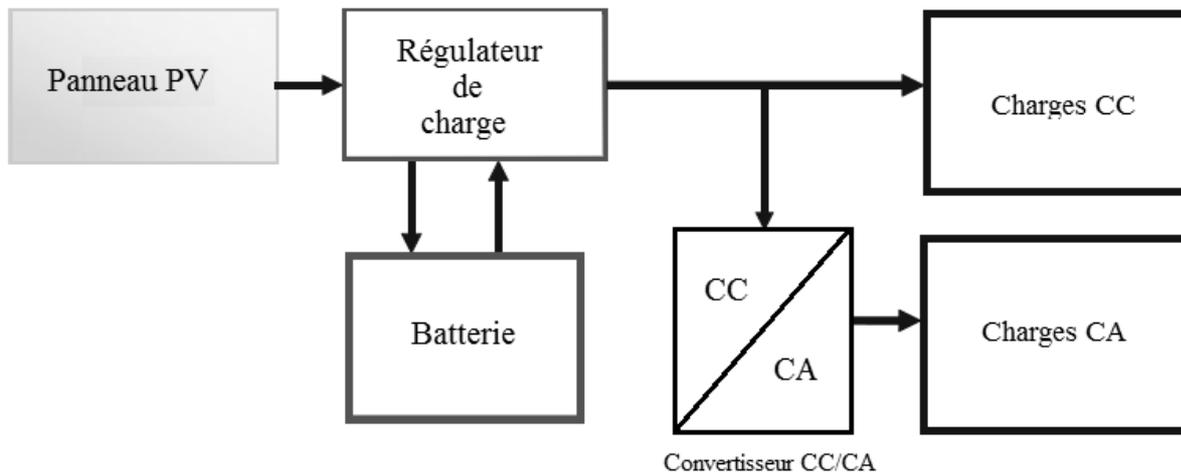


**Figure 3.6** Couplage directe d'un système PV

#### **2-Systèmes autonomes avec stockage**

Dans les applications photovoltaïques autonomes, l'alimentation électrique du système est requise, Ainsi, le stockage doit être ajouté au système. Généralement, les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de « réservoir » d'énergie en permanence. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débitant un courant de décharge de valeur différentes. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge. Lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

La Figure 3.7 montre un schéma d'un système PV autonome typique alimentant des charges de type CC et CA. [



**Figure 3.7** Système PV autonome avec stockage de batterie alimentant les charges CC et CA

Les panneaux photovoltaïques : produisent un courant électrique continu.

Le régulateur : optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.

Le convertisseur CC/CA : Transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.

Les batteries : sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

#### Avantages du système PV autonome

Les avantages les plus importants du système PV autonome sont :

- L'approvisionnement fiable de la charge en électricité pendant le temps de fonctionnement,
- Ce système a une longue durée de vie
- Faibles dépenses d'entretien

#### **3- Système autonome hybride :**

Etant donné que le système PV donne une puissance variable selon la saison, il est souhaitable de disposer une autre source autonome pour compléter l'apport photovoltaïque. On appelle ainsi ce système, un système autonome hybride.

#### **4-Système PV raccordé au réseau électrique de distribution**

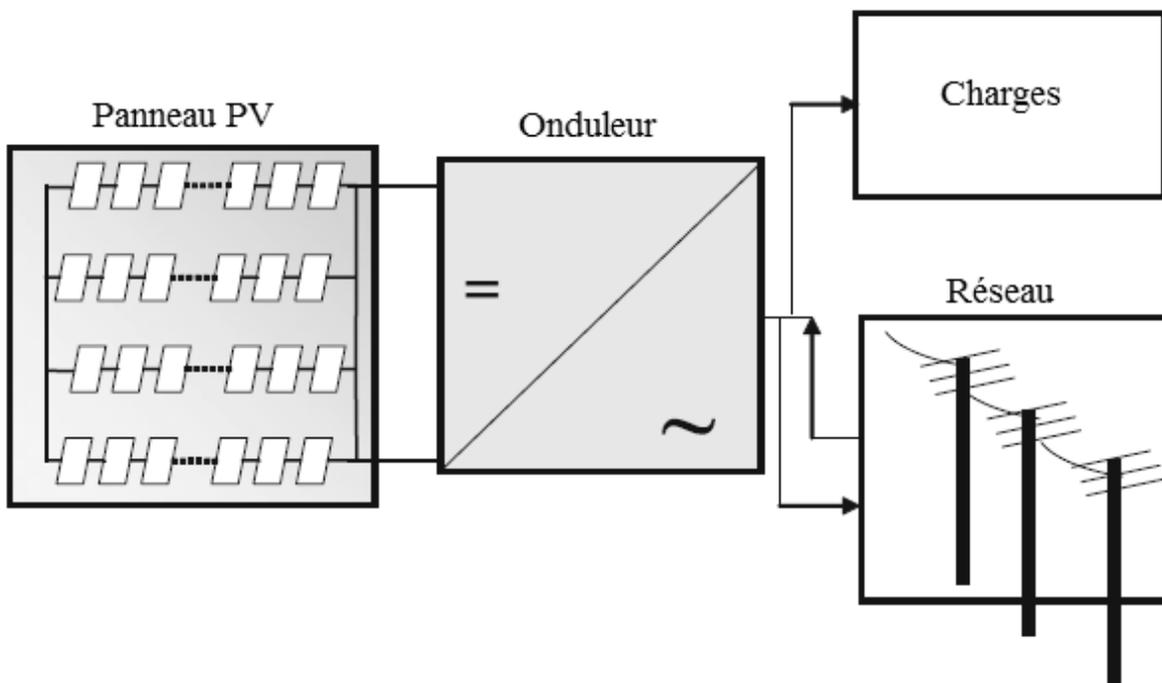
Ces systèmes fonctionnent en parallèle avec les réseaux électriques existants, permettent l'échange d'électricité vers et depuis le réseau. L'énorme avantage de cette solution, c'est l'absence de batterie, et l'injection de l'électricité est directement dans le réseau. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Le compteur marche alors dans les deux sens. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers des onduleurs.

Un système PV connecté au réseau peut être subdivisé en deux systèmes:

- Systèmes PV décentralisés.
- Systèmes PV centralisés.

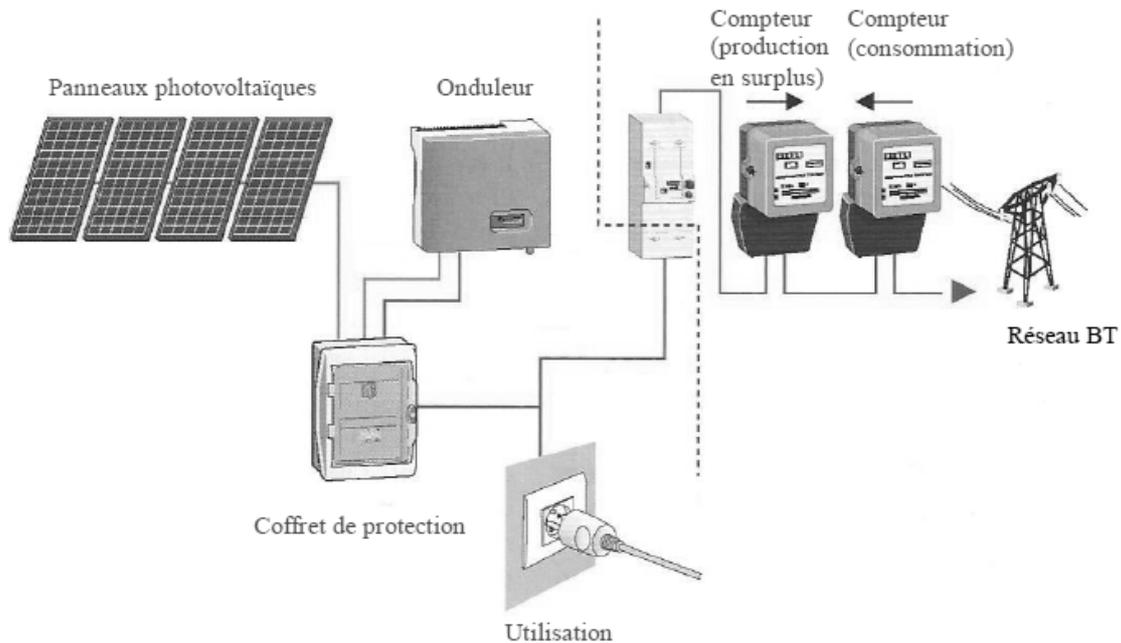
#### 4-1 :Systèmes PV décentralisés

Dans ces systèmes, le stockage d'énergie n'est pas nécessaire car le rayonnement solaire fournit de la puissance aux maisons, et s'il y a un surplus d'énergie, il peut être injecté dans le réseau figure (3.8). Dans ce cas, l'onduleur doit s'intégrer harmonieusement à l'énergie (tension et fréquence) fournie par le réseau. Pendant la nuit ou à des instants où la puissance PV est insuffisante, l'approvisionnement en électricité se fait directement du réseau électrique.



**Figure 3.8** Système PV raccordé au réseau, décentralisé

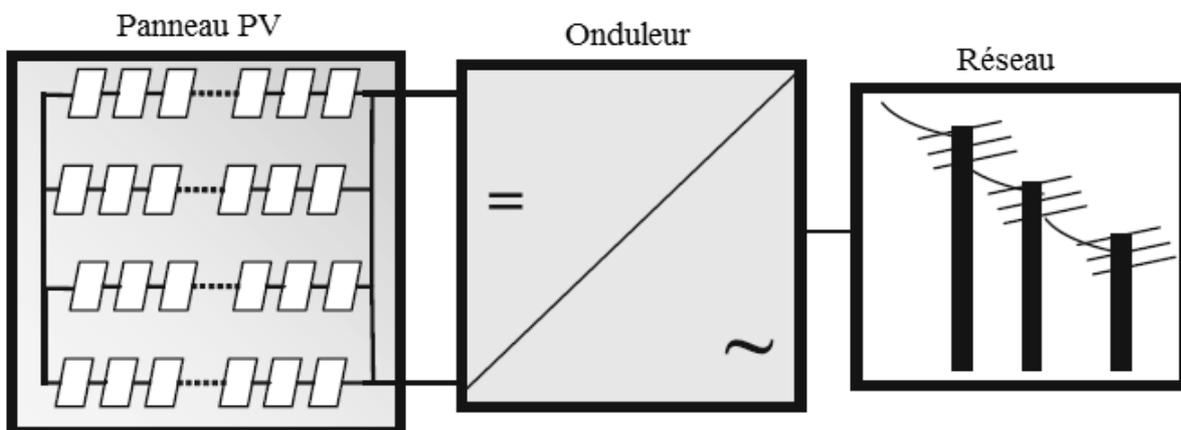
Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.



**Figure 3.9** Emplacement des compteurs pour système PV décentralisé

#### 4-2 : Systèmes PV centralisés

Ce sont des centrales photovoltaïques de puissance allant jusqu'à la gamme de MW. Avec ces systèmes, nous pouvons obtenir un réseau de moyenne ou haute tension.

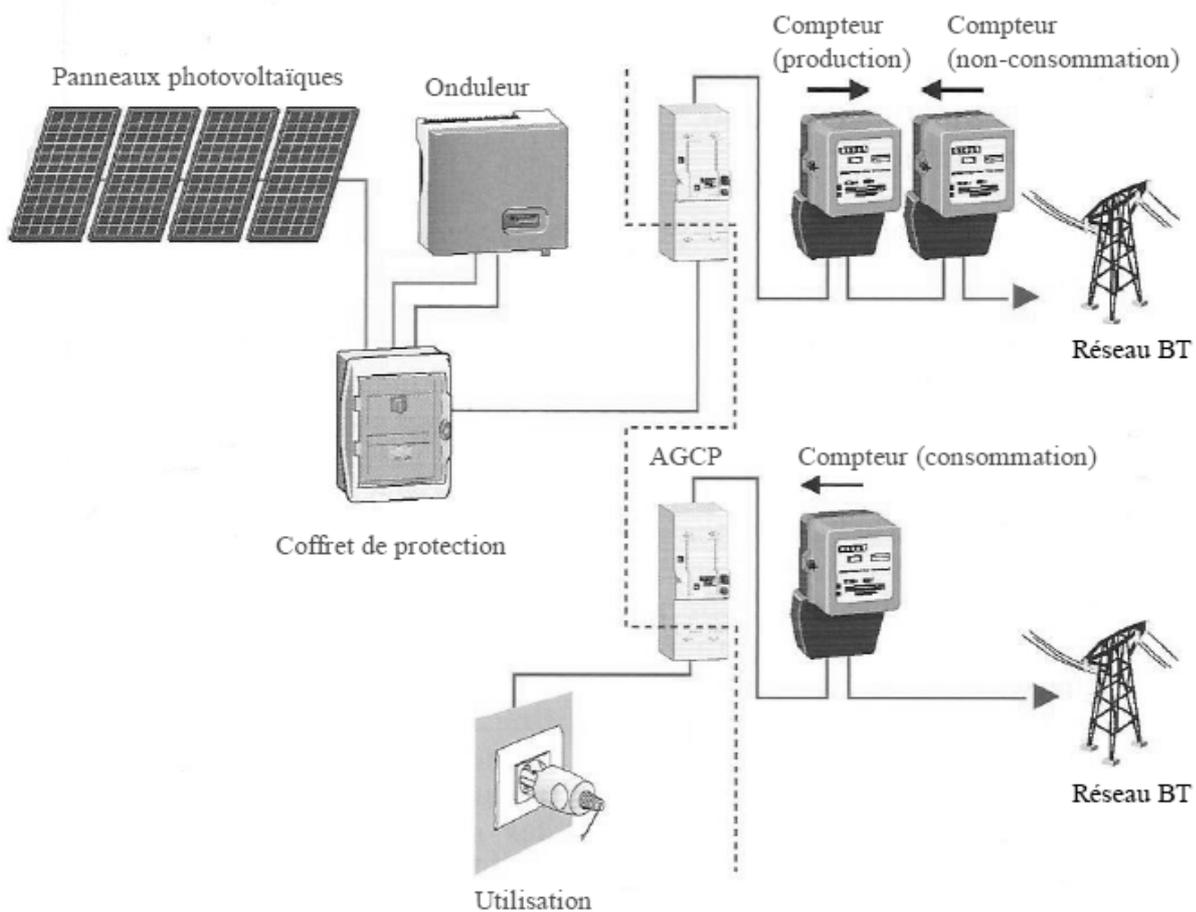


**Figure 3.10** Système PV raccordé au réseau, décentralisé

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :
  - ⊕ L'un pour la production,

- ✦ L'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).



**Figure 3.11** Emplacement des compteurs pour système PV centralisé

## Topologies des systèmes PV raccordés au réseau

### a/ Les onduleurs

Les rôles principaux des onduleurs dans les systèmes PV comme interface avec le réseau sont :

- 1/ Transformation de la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée.
- 2/ Exploitation du système PV au voisinage du point optimum de puissance
- 3/ Surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation.

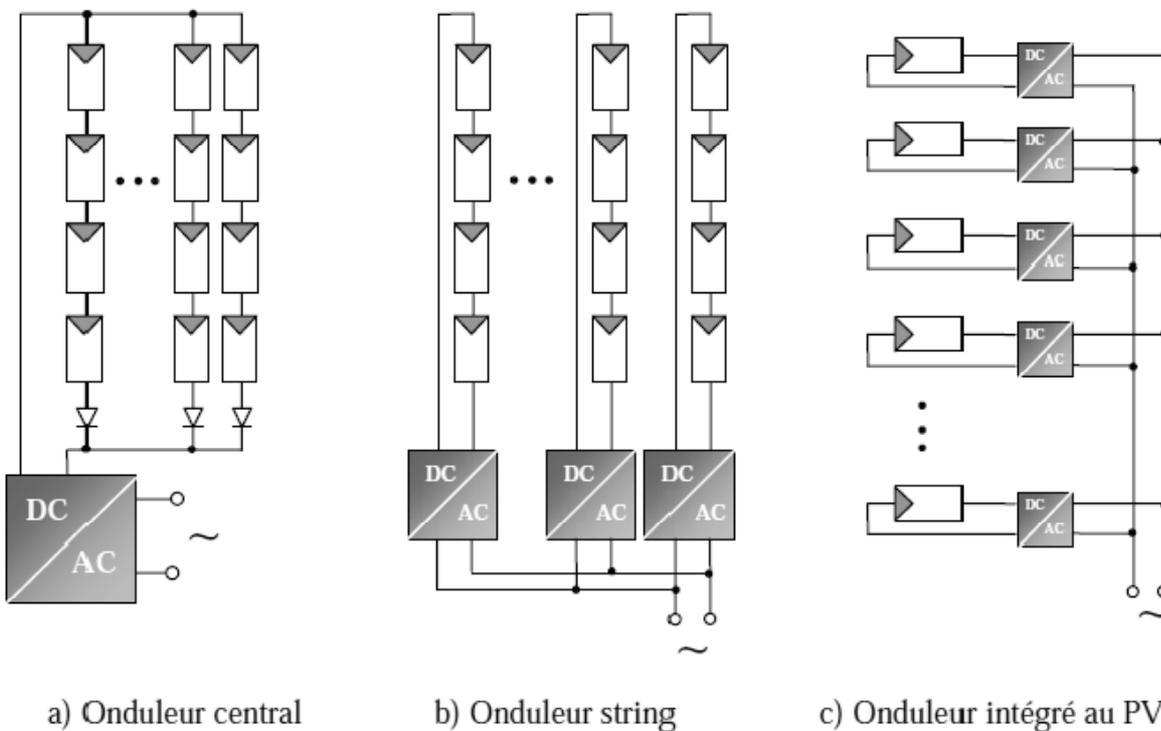
Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux.

### L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne, elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, Figure 3-12-a. Dans ce type, les onduleurs sont auto-commutés et basés sur des transistors bipolaires (IGBT) ou les transistors à effet de champ (FET).

### Les onduleurs strings

le système PV est constitué de strings (chaînes). Chaque string est relié à un onduleur et peut ainsi fonctionner à son PPM (Figure 3-12-b). Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique, mais augmente le nombre des onduleurs de moyenne puissance.



**Figure 3.12** Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique.

### 3-Les onduleurs intégrés aux panneaux PV.

Chaque panneau dispose de son propre onduleur (Figure 3-12-c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

## Topologies des systèmes PV

Basé sur le nombre d'étages utilisés pour la conversion d'énergie PV, les topologies du système PV connecté au réseau peuvent être catégorisées comme:

- (1) Systèmes multi-étages
- (2) Systèmes à deux étages
- (3) Systèmes à un étage

### 1/ Systèmes multi-étages

Les systèmes à plusieurs étages utilisent plus de deux étages pour traiter la puissance PV sous la forme requise. Les deux premières étages effectuent le conditionnement de la puissance PV pour MPPT et augmentent la basse tension à la sortie du système PV.

Le dernier étage est l'étage onduleur, responsable de la conversion de l'alimentation CC en une alimentation CA de haute qualité compatible avec le réseau.

Le problème majeur avec les systèmes multi-étapes est l'utilisation d'un grand nombre de composants qui provoque: une grande taille, un coût élevé, une basse efficacité et fiabilité.

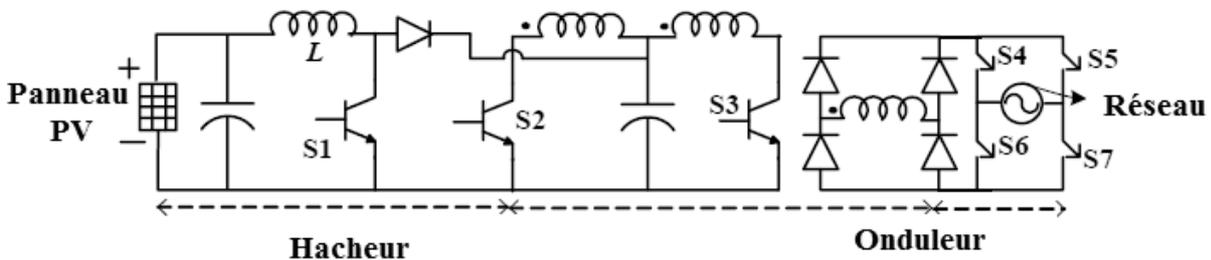


Figure 3.13 Exemple d'un système multi-étages raccordé au réseau

### 2/ Systèmes PV à deux étages

Habituellement, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau nécessitent deux étages. Le premier étage prend en charge MPPT et augmente la tension PV (si nécessaire). Le deuxième étage ondule la tension à la sortie du premier étage dans la forme requise pour alimenter le réseau. Le premier étage consiste en un hacheur élévateur ou abaisseur/élévateur de tension.

Certaines des configurations bien connues utilisées dans les systèmes à deux étages sont illustrées sur la figure 3.14.

La figure 3.14-a comporte un hacheur abaisseur-élévateur de tension pour prendre en charge la maximisation de puissance MPPT, l'onduleur qui fonctionne à la fréquence fondamentale du réseau et renvoie ensuite le courant sinusoïdal redressé sous la forme requise pour alimenter le réseau.

La figure 3.14-b comporte un hacheur abaisseur de tension et un onduleur.

La figure 3.14-c comporte un hacheur élévateur de tension et un onduleur.

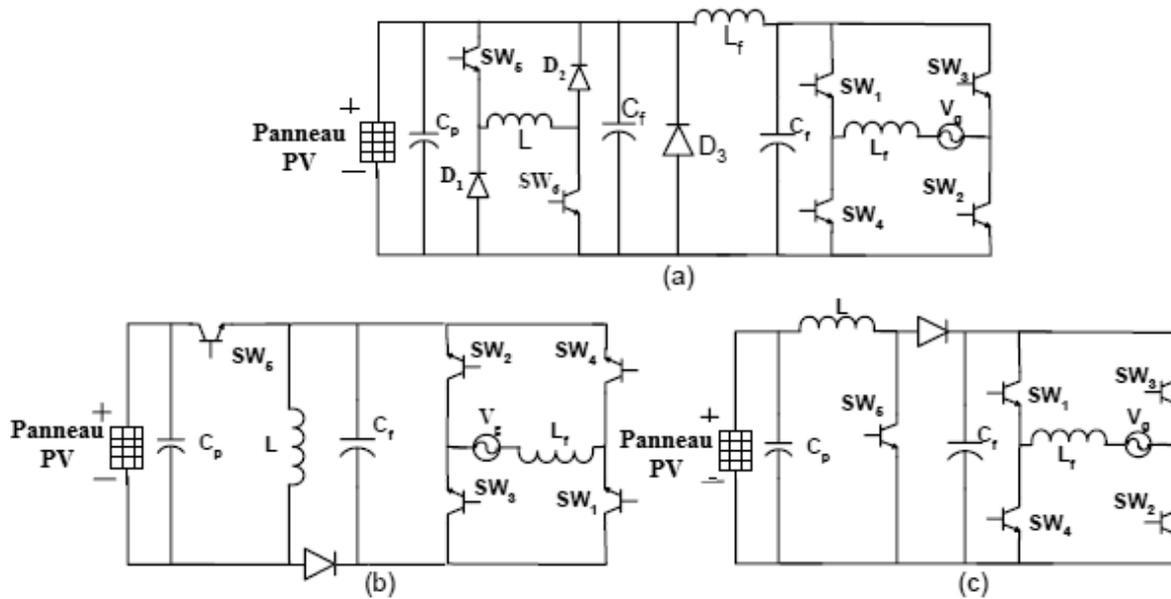


Figure 3.14 Exemple de topologies à deux étages d'un système PV

### 3/ Systèmes PV à un seul étage

Les systèmes à un étage constituent la solution intégrée pour les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, ou toutes les fonctions à savoir MPPT, ondulation et augmentation de tension (si nécessaire) sont prises en charge par l'onduleur lui-même. Une seule étape est donc utilisée pour le traitement de la puissance du système PV pour la convertir en forme requise.

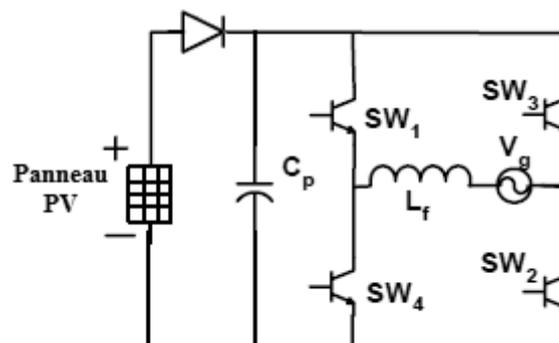


Figure 3.15 Exemple de topologie à un seul étage d'un système PV

### Algorithmes MPPT pour panneaux photovoltaïques

Un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un convertisseur électronique qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque
- Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe, éclairage, etc...), Ces régulateurs Sont aussi appelés "Power Trackers".

Les panneaux photovoltaïques suivent, selon leur technologie, une caractéristique puissance-tension ou puissance-courant possédant un unique maximum, et variant en fonction de l'irradiation, et de la température.

La méthode la plus simple pour évaluer le point de fonctionnement maximal, consiste à considérer la tension optimale correspondante proportionnelle à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , et de la même façon le courant optimal proportionnel au courant de court-circuit  $I_{cc}$ . cette méthode a cependant pour défaut, d'une part de nécessiter un panneau supplémentaire pour mesurer la tension de circuit ouvert ou le courant de court-circuit à tout instant, et d'autre part d'avoir un rendement limité, car les coefficients de proportionnalité dépendent alors de la température des cellules, qui peuvent être très variables.

### **Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau**

#### **Avantages**

- ⊕ n'ont pas besoin de stockage d'énergie.
- ⊕ Pas de gaspillage et tout excédent est livré au réseau. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.
- ⊕ On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares .
- ⊕ On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- ⊕ On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins .

#### **b. Inconvénients**

- ⊕ La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- ⊕ Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation.