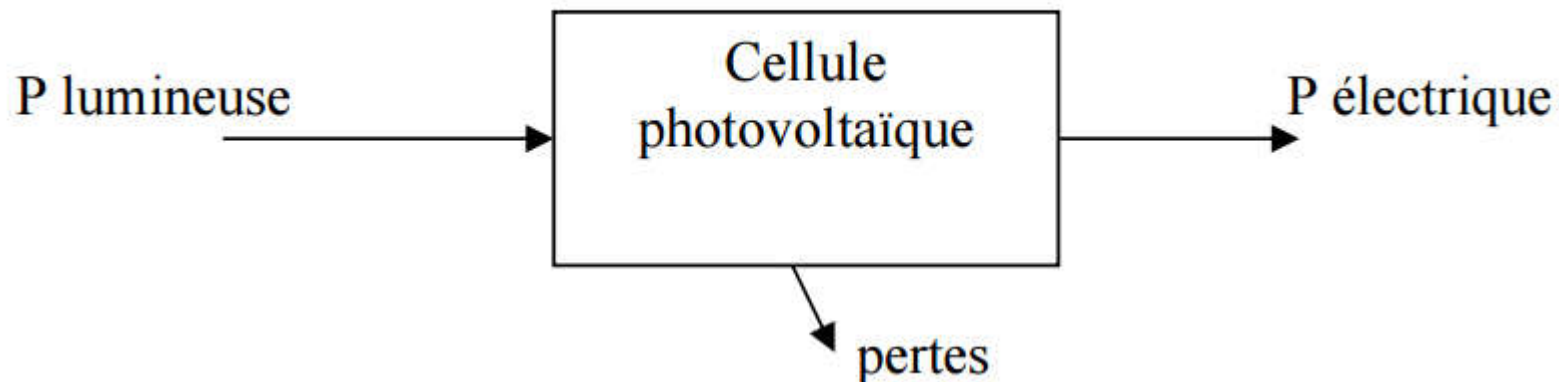


L'énergie solaire photovoltaïque

- L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium).



- Lorsque les photons frappent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

- Une cellule PV à base de silicium délivre une tension de l'ordre de 0.5 V et une intensité d'environ 20mA/cm²
- Le rendement d'une cellule photovoltaïque est faible : inférieure à 20%

- La **cellule photovoltaïque** est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- Un **panneau photovoltaïque** est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés **modules photovoltaïques**.
- Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un **champ photovoltaïque**.



cellule



panneau



champ

Génération des générateurs photovoltaïques

1ère génération , 85 % du marché en 2010

Plaquette de silicium cristallin , épaisseur 200 à 300 μm

Rendement moyen 12 à 16 % , coût 1,5 à 3 \$/Wc, tendance vers 1 \$/Wc

- Silicium mono cristallin (mono-Si) rendement 14 à 16 %
- Silicium multi cristallin (multi-Si) rendement 12 à 14 % ,



2ème génération, 15 % du marché en 2010

Couches minces, quelques μm sur un support souple ou rigide

Rendement moyen 5 à 12%, coût 1 à 2 \$/Wc , tendance vers 0,5 \$/Wc

- Silicium amorphe (a-Si) rendement 5 à 7%
- Tellure de cadmium (CdTe) rendement 9 à 11% ,
First Solar : Wc < 1\$ début 2009 ; 0,8\$/Wc fin 2010
- Diséleniure de cuivre et indium ou gallium (CIS ou CIGS) rendement 10 à 12%
- Arséniure de gallium (AsGa) rendement > 20%



3ème génération , <<< 1% du marché , coût : plusieurs \$/Wc

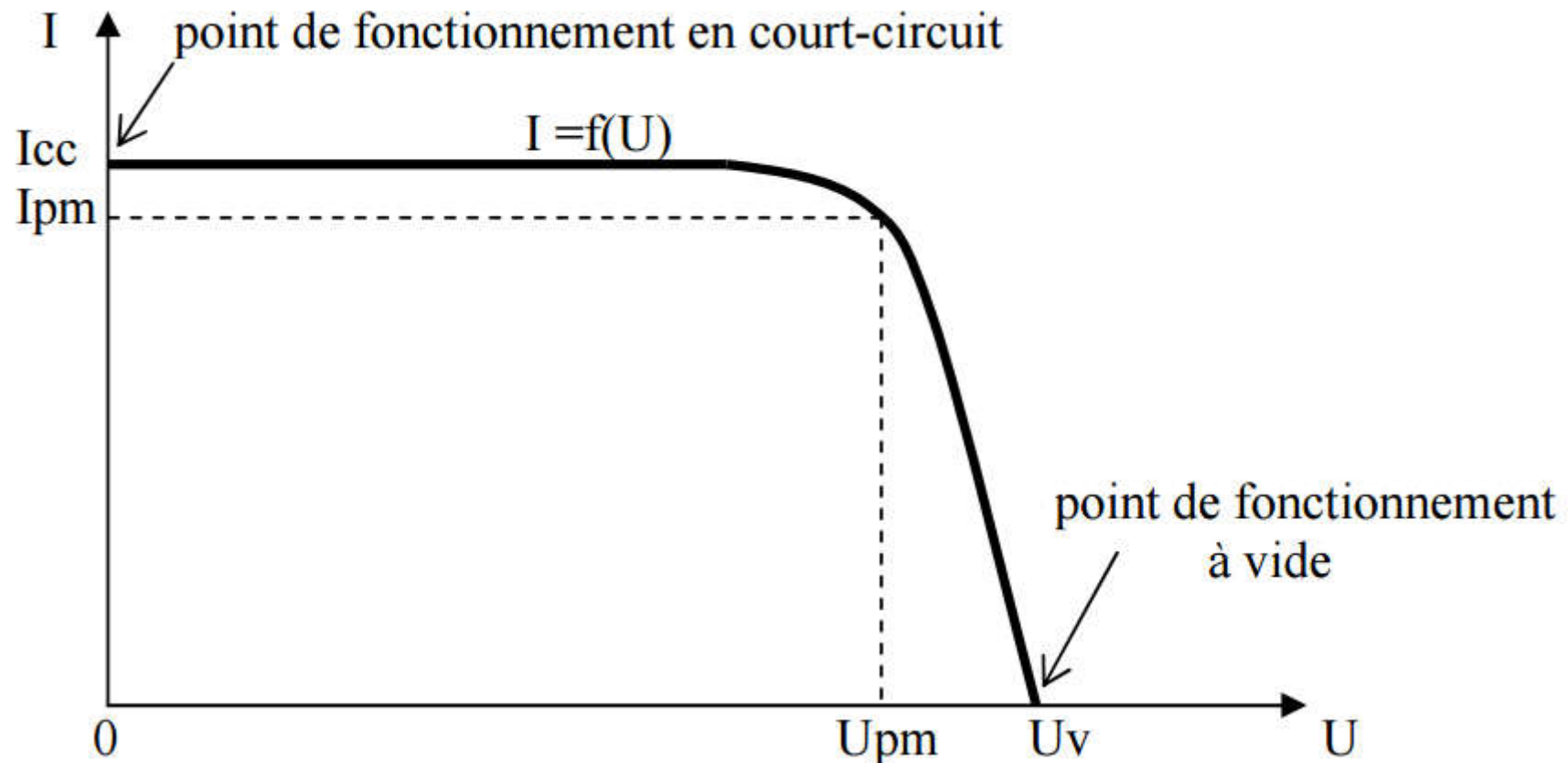
- Cellules multi-jonctions
rendement record de 41,6% en août 2009 par Spectrolab
- Cellules Graëtzel
faible coût, 10 % de rendement, problème de durée de vie
- Cellules organiques polymères
rendement de 5 % en laboratoire, faible durée de vie
- Cellules à base de nanotechnologie
récupération de l'énergie dans bande infrarouge



Caractéristiques électriques d'une cellule PV

- 1- Caractéristiques courant / tension

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante



Sur cette courbe, on repère :

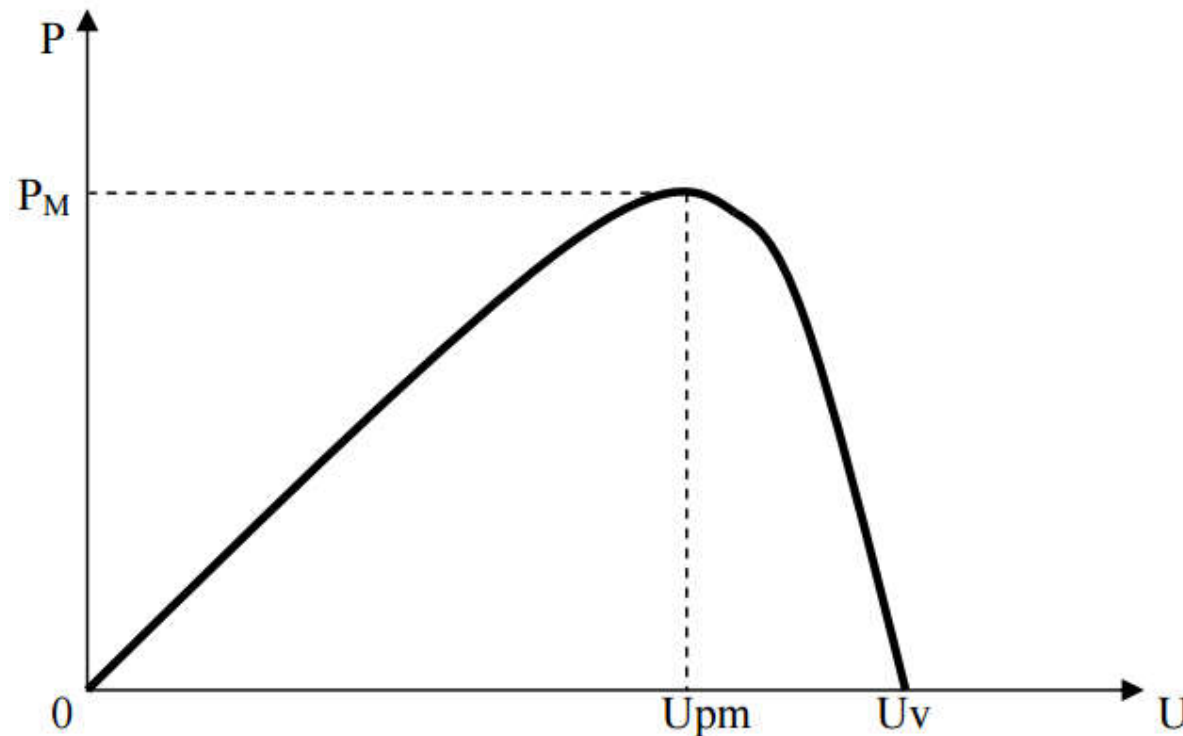
- ✓ le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0A$
- ✓ le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

Pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{cm}$, les valeurs caractéristiques sont :

$$I_{cc} = 3A \text{ et } U_v = 0,57V \text{ (} G = 1000W/m^2 \text{ et } \theta = 25^\circ C \text{)}$$

2- Caractéristiques puissance / tension

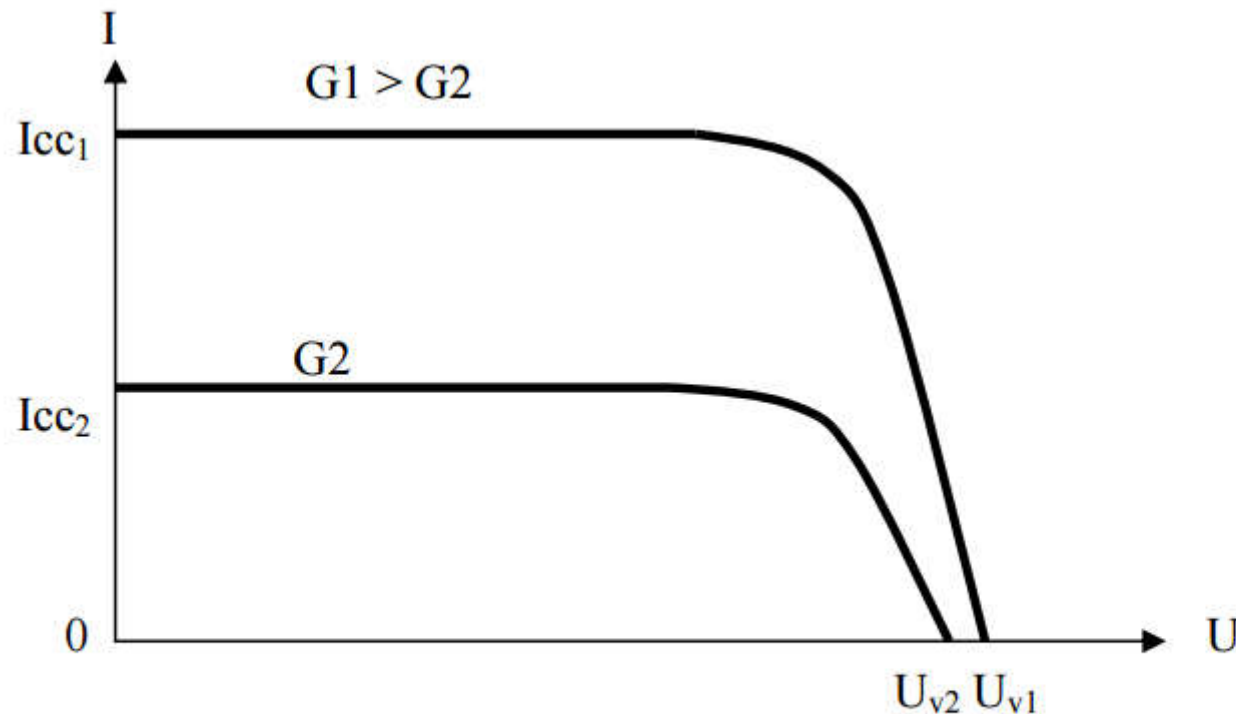
- La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$. Cette courbe a l'allure suivante :



- Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.
- Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont : $P_M = 1,24W$, $U_{pm} = 0,45V$, $I_{pm} = 2,75A$ ($G = 1000W/m^2$ et $\theta = 25^\circ C$)

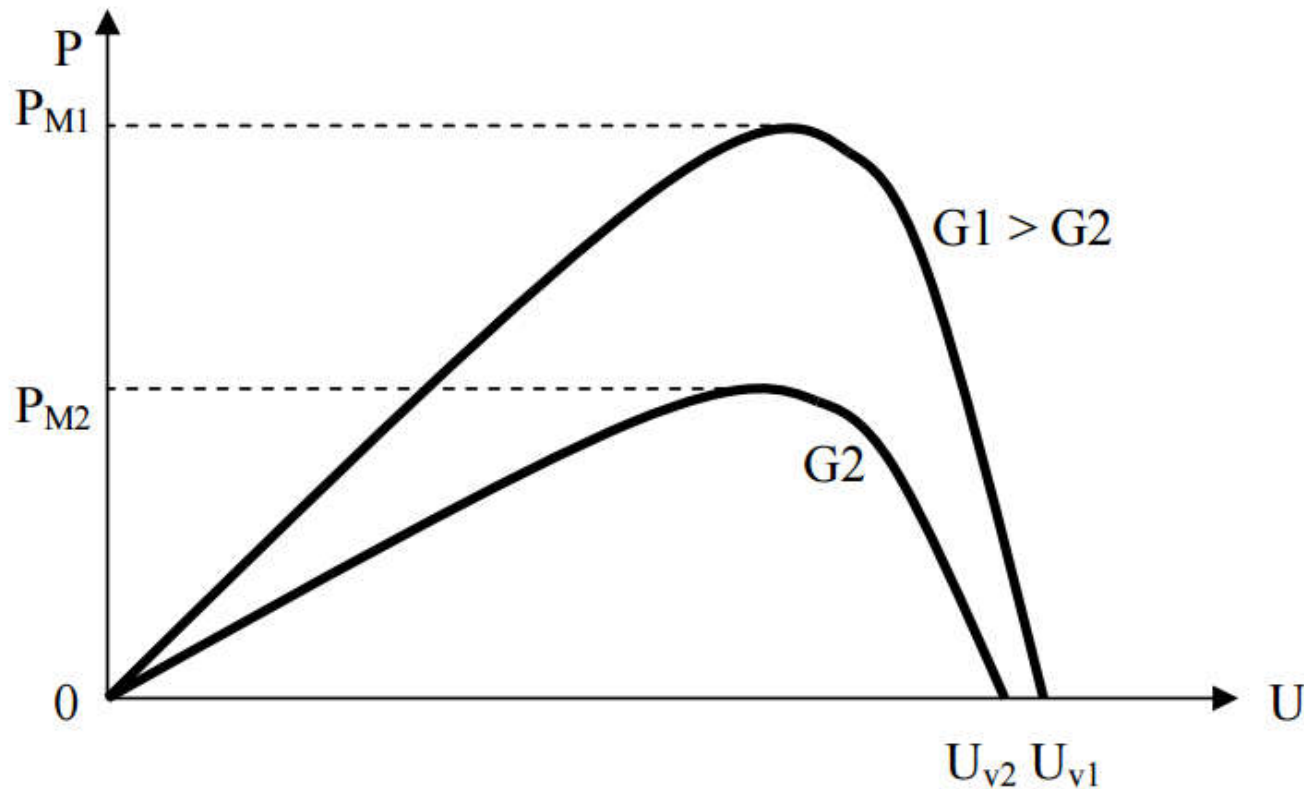
3- Influence de l'éclairement

- A température constante, la caractéristique $I = f(U)$ dépend fortement de l'éclairement :



Sur cette courbe, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide varie peu.

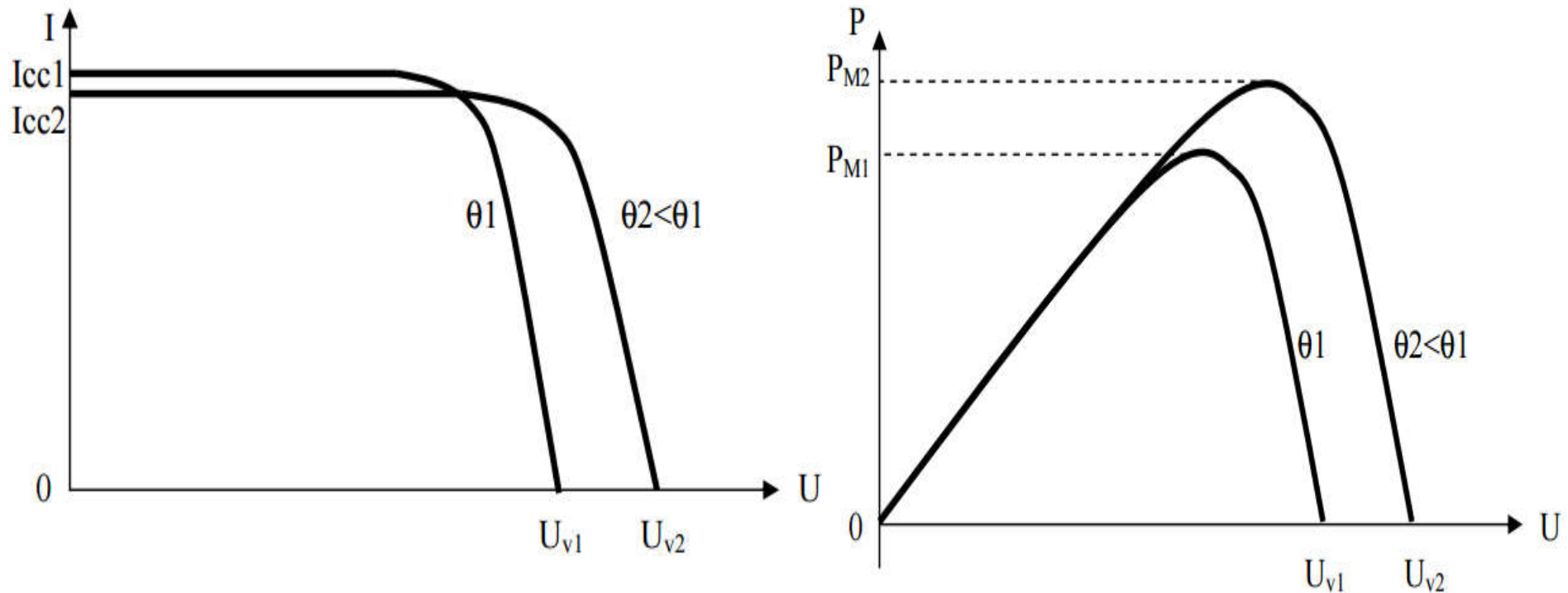
- A partir de ces courbes, on peut tracer les courbes de puissance $P = f(U)$:



Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.

4- Influence e la température

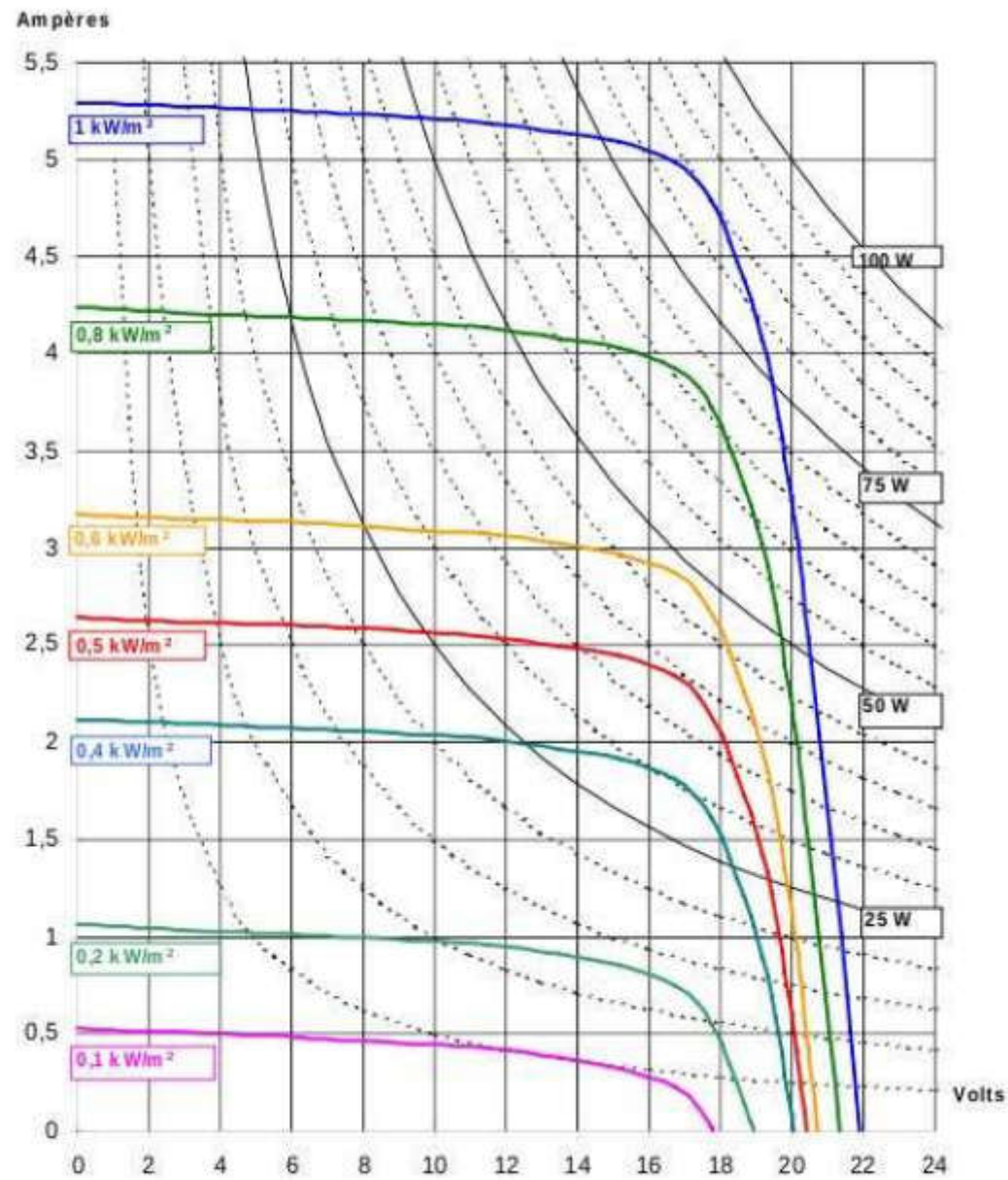
- Pour un éclairement fixé, les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ varient avec la température de la cellule photovoltaïque



- Sur ces courbes, on remarque que la tension à vide et la puissance maximum diminuent lorsque la température augmente.

Exemple

- Les caractéristiques $I=f(U)$ pour différents éclairagements pour le panneau PW850 de Photowatt sont données ci-dessous (1000W/m^2 , 25°C et AM 1,5)
- Quelle est la puissance maximale de ce panneau?



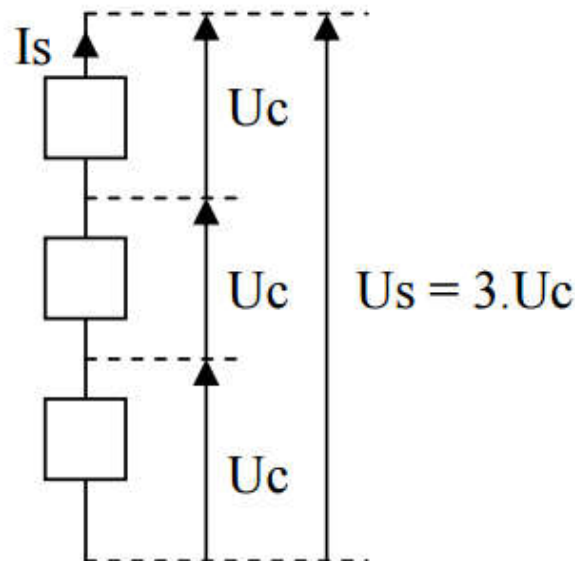
Groupement des cellules

Le **groupement série** permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en série la tension de sortie U_s a pour expression générale :

$$U_s = n \cdot U_c \quad \text{avec } U_c : \text{tension fournie par une cellule}$$

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

Exemple : groupement e 3 cellules en série

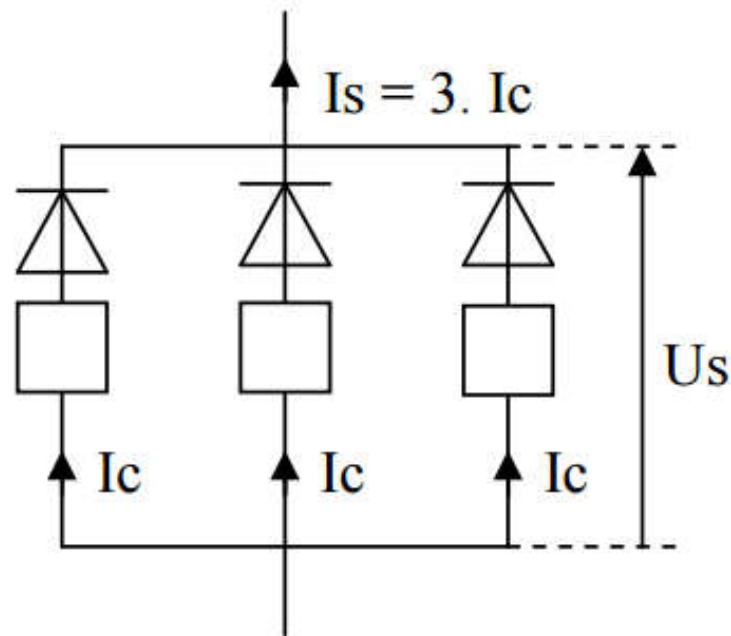


Le **groupement en parallèle** permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$$I_s = n \cdot I \quad \text{avec } I : \text{courant fourni par une cellule}$$

Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules.

Exemple : groupement de 3 cellules en parallèle



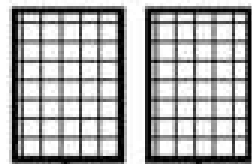
Pour éviter que les cellules ne débitent les unes sur les autres, on ajoute des diodes anti-retour.

Structures d'une installation photovoltaïque

1- Site isolé:

En site isolé le champ photovoltaïque peut fournir l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipements domestiques). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil.

Panneaux solaires

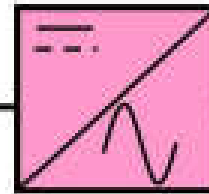


Régulateur

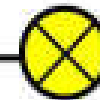


Batteries

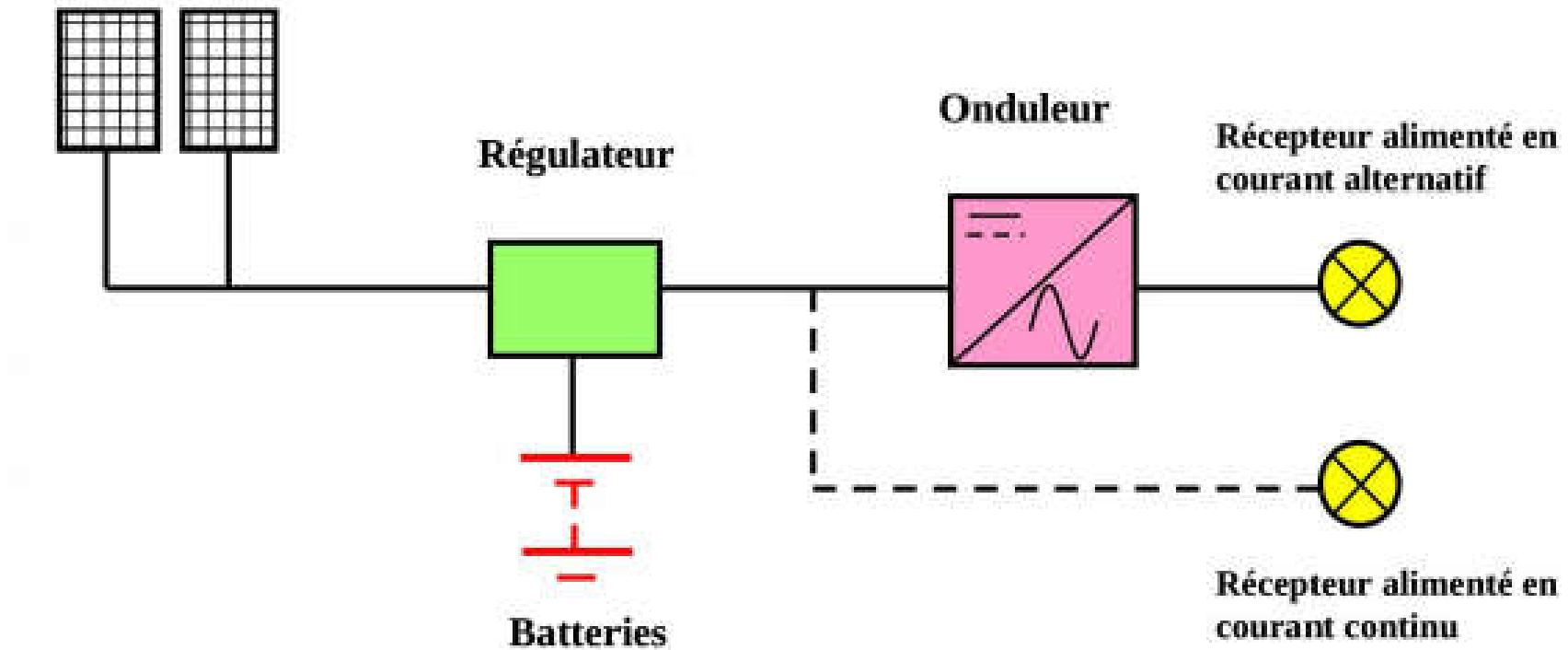
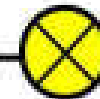
Onduleur



**Récepteur alimenté en
courant alternatif**



**Récepteur alimenté en
courant continu**

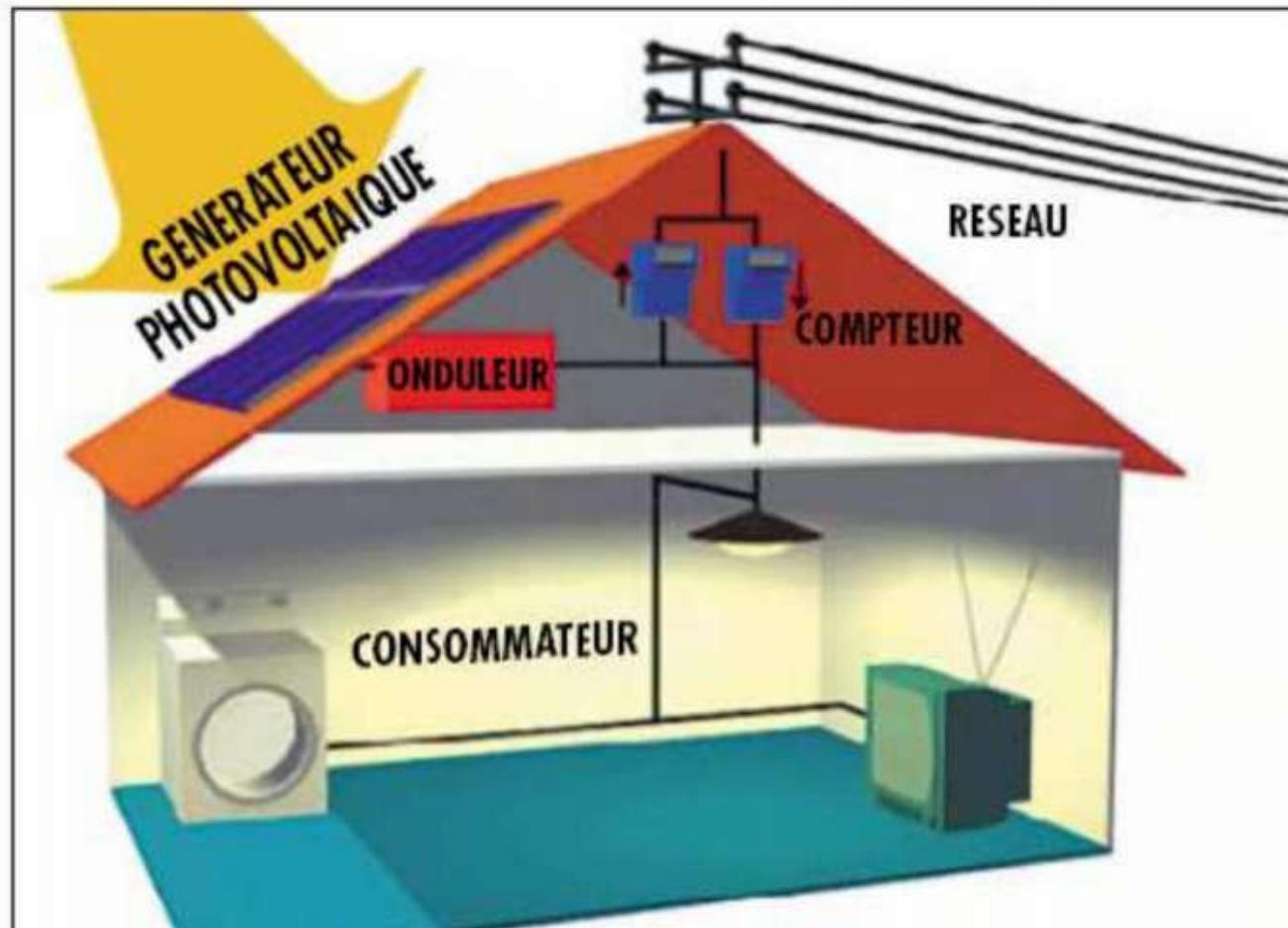


- Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique selon les besoins de l'utilisateur.

- Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. L'onduleur permet d'alimenter les récepteurs fonctionnant en alternatif.

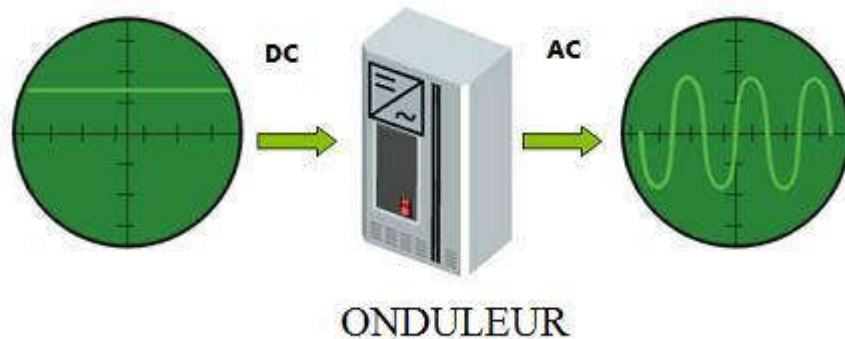
Site connecté au réseau

Pour ce type de site, le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur.

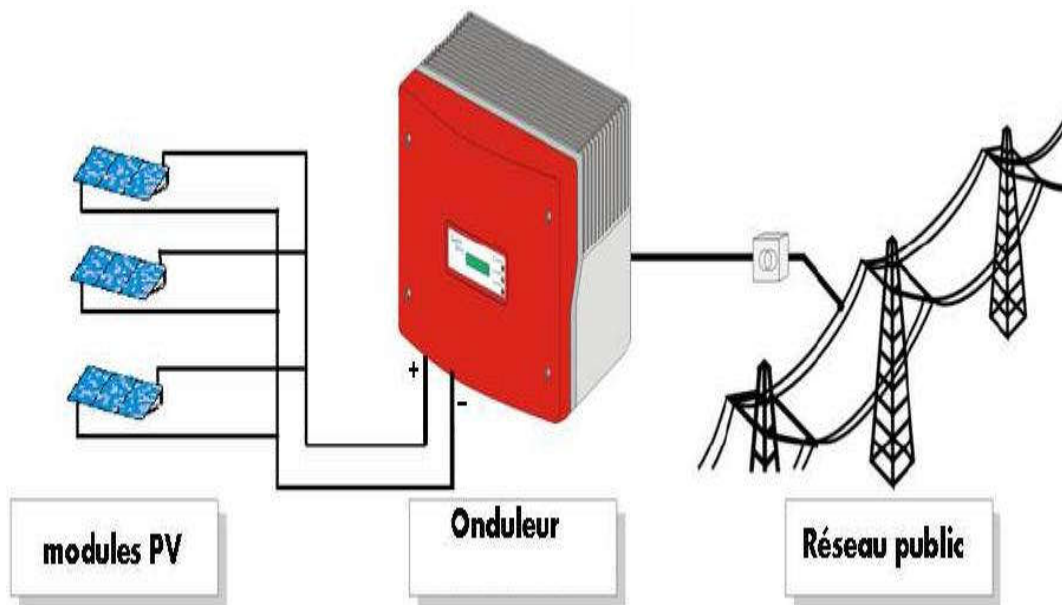


Le rôle de l'onduleur

1. Conversion continu-alternatif



On distingue la partie continue notée DC, reliée aux modules en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée AC, reliée au réseau en aval de l'onduleur



Le courant et la tension continus produits par les modules photovoltaïques sont transformés, via l'onduleur, en un courant et une tension alternatives compatibles avec le réseau.

2. Recherche du point de puissance maximum

- Le MPPT est un système intégré à l'onduleur et qui permet de câler le courant et la tension d'entrée de l'onduleur sur le point de puissance maximale du groupe photovoltaïque.

Ce point est le point de puissance maximum (MPP, Maximum Power Point en anglais) du groupe photovoltaïque

3. La protection de découplage

Toute installation photovoltaïque raccordée au réseau doit être équipée d'une fonction protection de découplage destinée à la séparer du réseau public de distribution en cas de défaut sur ce réseau.

La protection de découplage doit en outre arrêter l'injection d'électricité dans le réseau lors des travaux de maintenance du réseau.

Aujourd'hui, la très grande majorité des onduleurs intègrent une protection de découplage interne.

- Le rendement de l'onduleur s'exprime selon la formule mathématique suivante :

$$\eta = \frac{\text{Puissance en sortie}}{\text{Puissance en entrée}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

La puissance d'entrée $P_{DC} = U_{DC} \times I_{DC}$.

La puissance de sortie $P_{AC} = U_{\text{eff},AC} \times I_{\text{eff},AC} \times \cos \phi$.

La grandeur notée ϕ correspond, en électricité, au déphasage entre le courant et la tension.

Le courant alternatif $i(t)$ et la tension alternative $u(t)$ peuvent s'écrire mathématiquement de la façon suivante : $i(t) = \sqrt{2} \times I_{\text{eff}} \times \sin(2 \times \pi \times f \times t)$, où I_{eff} est le courant efficace et $f = 50 \text{ Hz}$ est la fréquence du réseau.

$u(t) = \sqrt{2} \times U_{\text{eff}} \times \sin(2 \times \pi \times f \times t + \phi)$, où $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ est la tension efficace, $f = 50 \text{ Hz}$ est la fréquence du réseau et ϕ le déphasage entre la tension et le courant.

Exercice

- Les caractéristiques d'un module photovoltaïque sont données dans le tableau ci-dessous lorsque le module reçoit une puissance rayonnante de 1000 W sur 1 m² de surface de module.

Caractéristiques électriques (à 1 000 W.m ⁻²)		
T cellules	25°C	50°C
P max (W)	36	32,5
U à P max (V)	16,3	14,4
I à 10 V (A)	2,29	2,28
I court-circuit* (A)	2,45	2,50
U circuit ouvert (V)	20,3	18,4

* L'intensité de court-circuit correspond à l'intensité du courant lorsque les deux bornes de la cellule photovoltaïque sont reliées par un fil conducteur (elle est en court-circuit).

- 1) uh. On placera :
 - a) le point de fonctionnement A correspondant à l'intensité de court-circuit ;
 - b) le point de fonctionnement B correspondant à un circuit ouvert ; c) le point de fonctionnement C correspondant à la puissance électrique maximale disponible.
- 2) Ce module reçoit, à 50°C, une puissance rayonnante surfacique de . La tension à ses bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à 10V. a) D'après les données, quelle est, alors, la valeur de l'intensité I du courant ? b) Quelle est la puissance électrique fournie ? c) La surface du module est égale à 0,185 m². Calculer le rendement énergétique du module.
- 3) Ce panneau est installé en site isolé dans un système autonome. Faites le schéma synoptique de l'installation