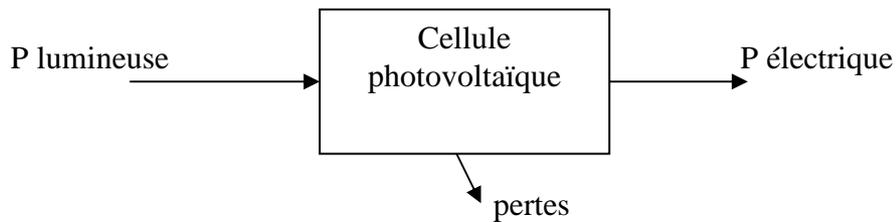


Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque

I- Présentation

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une **cellule photovoltaïque**.



Le rendement d'une cellule photovoltaïque est faible : inférieure à 20%

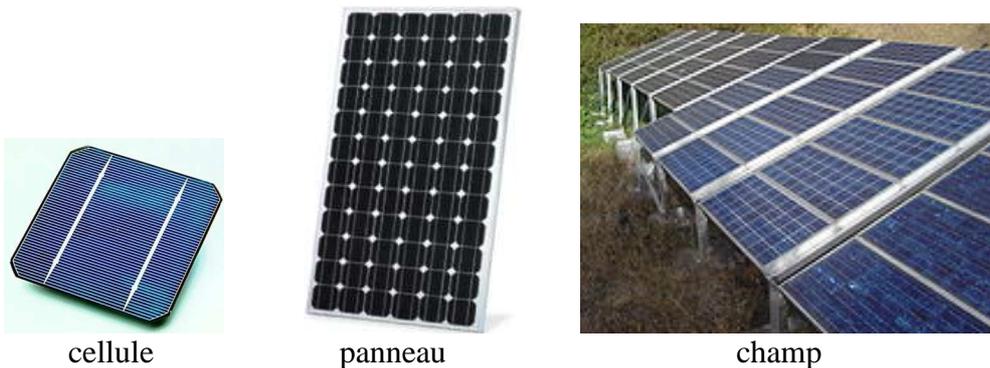
II- Définitions

1- Cellules, panneaux et champs photovoltaïques

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**.



2- Puissance lumineuse et éclairement

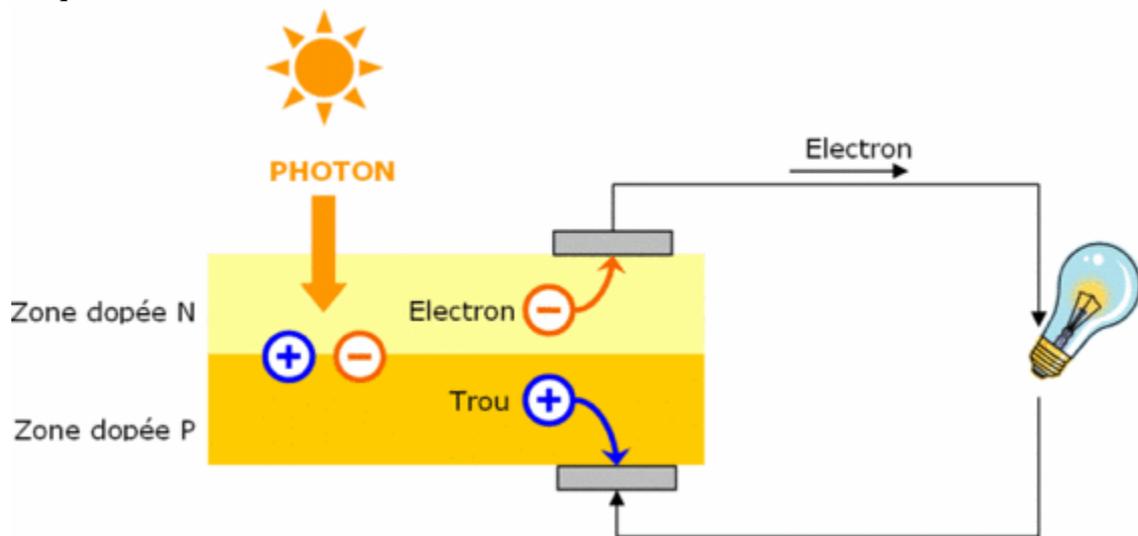
L'**éclairage** caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il s'exprime en W/m^2 . La grandeur associée à l'éclairage est notée **G**. Parfois, cette grandeur est aussi appelée **irradiance**.

III- Principe d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.



IV- Les différents types de générateurs photovoltaïques

1- Silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium 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.

Durée de vie : 20 à 30 ans.



- avantages :
 - ✓ bon rendement, de 12% à 18%
 - ✓ bon ratio Wc/m^2 (environ $150 Wc/m^2$) ce qui permet un gain de place si nécessaire
 - ✓ nombre de fabricants élevé
- inconvénients :
 - ✓ coût élevé
 - ✓ rendement faible sous un faible éclaircissement.

2- Silicium polycristallin (multicristallin)

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



- avantages :
 - ✓ cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
 - ✓ moins cher qu'une cellule monocristalline
- inconvénient :
 - ✓ moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
 - ✓ ratio Wc/m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ $100 Wc/m^2$)
 - ✓ rendement faible sous un faible éclaircissement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans

3- Silicium amorphe

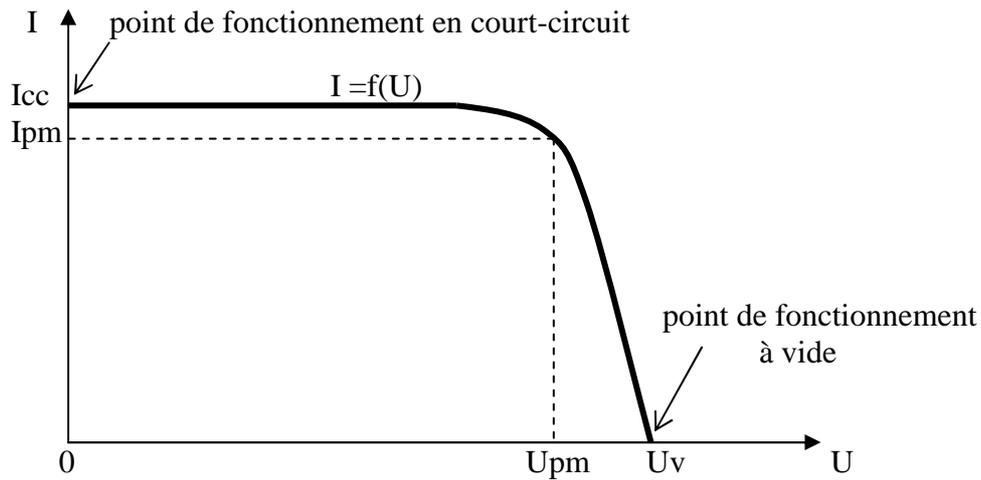
Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

- avantages :
 - ✓ fonctionne avec un éclaircissement faible ou diffus (même par temps couvert)
 - ✓ un peu moins chère que les autres technologies
 - ✓ intégration sur supports souples ou rigides.
- inconvénients :
 - ✓ rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
 - ✓ nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ $60 Wc/m^2$)
 - ✓ performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

V- Caractéristiques électriques d'une cellule

1- Caractéristiques courant / tension

A température et éclaircissement 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 $U = 0V$

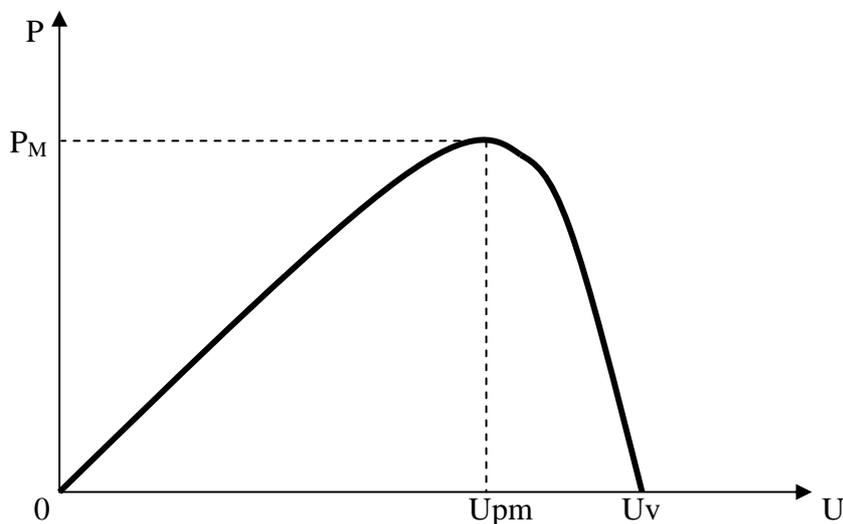
Pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{cm}$, les valeurs caractéristiques sont :

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

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).

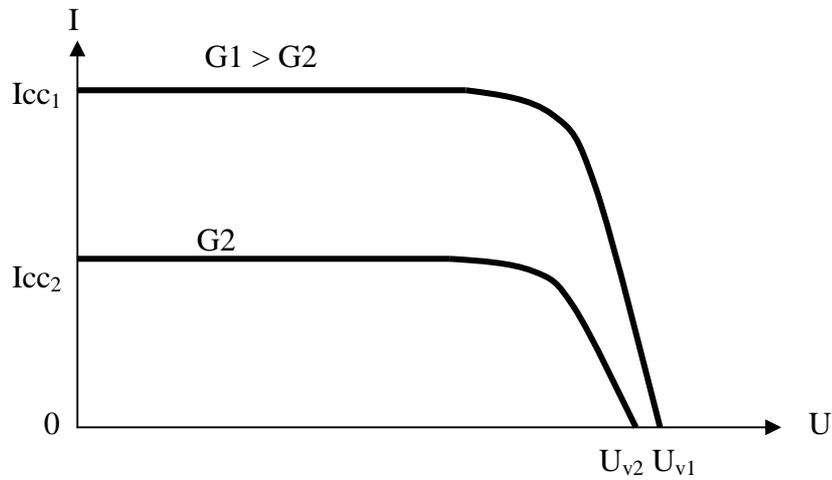
A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.

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

$$P_M = 1,24W \text{ , } U_{pm} = 0,45V \text{ , } I_{pm} = 2,75A \text{ (} G = 1000W/m^2 \text{ et } \theta = 25^\circ C \text{)}$$

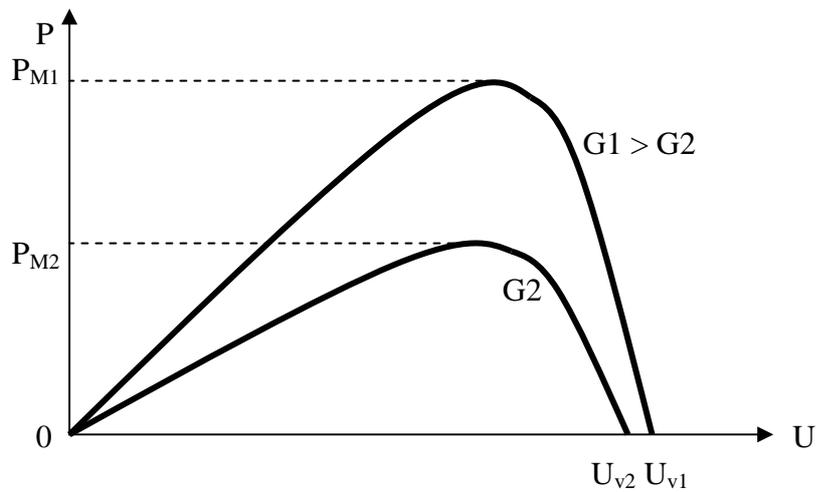
3- Influence de l'éclairement

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.

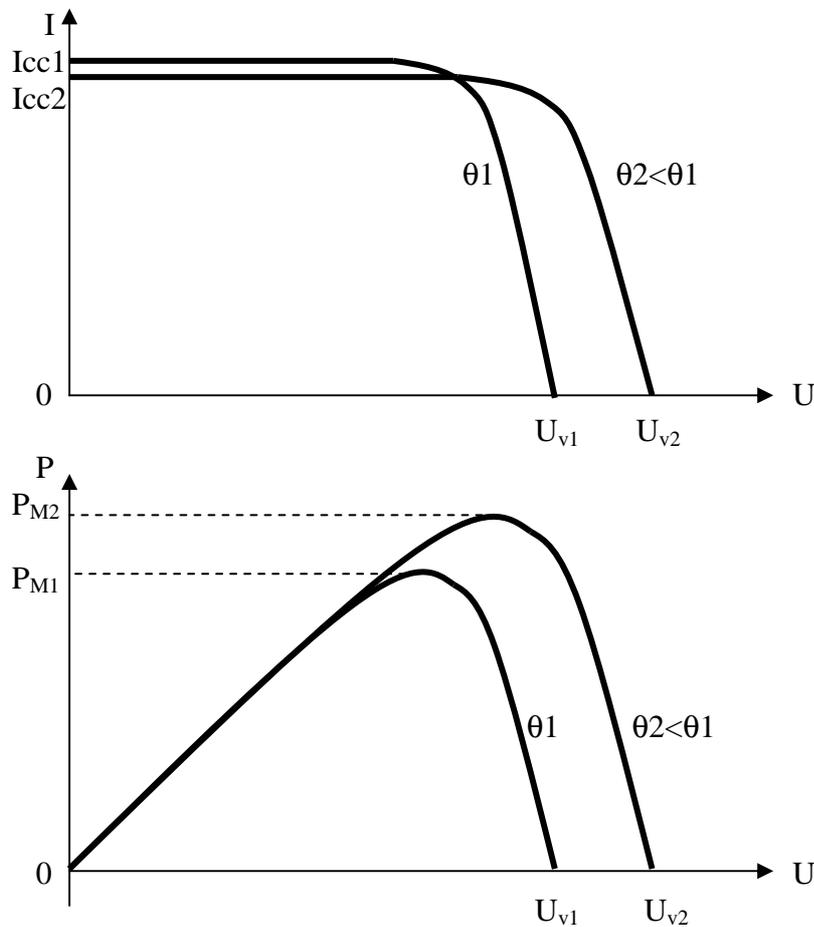
A partir de ces courbes, on peut tracer les courbes de puissance $P = f(U)$:



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.

5- Définition de la puissance de crête

Par définition, la **puissance de crête** représente la puissance maximum fournie par une cellule lorsque l'éclairement $G = 1000\text{W/m}^2$, la température $\theta = 25^\circ\text{C}$ et une répartition spectrale du rayonnement dit **AM 1,5**.

L'unité de cette puissance est le Watt crête, noté **Wc**.

Les constructeurs spécifient toujours la puissance de crête d'un panneau photovoltaïque. Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à 1000W/m^2 et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les 25°C .

VI- Groupements de cellules

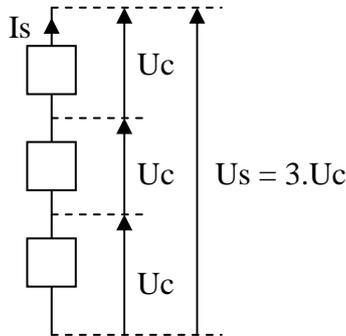
1- Principe

On peut grouper les cellules en série ou en parallèle.

- 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 :

$$U_s = n \cdot U_c$$
avec U_c : tension fournie par une cellule
Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

Exemple : groupement e 3 cellules en série

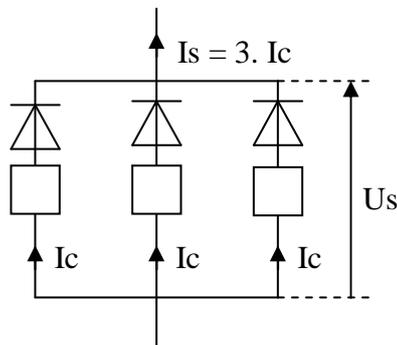


- Le **groupement en parallèle** permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$$I_s = n \cdot I_c$$
avec I_c : 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.

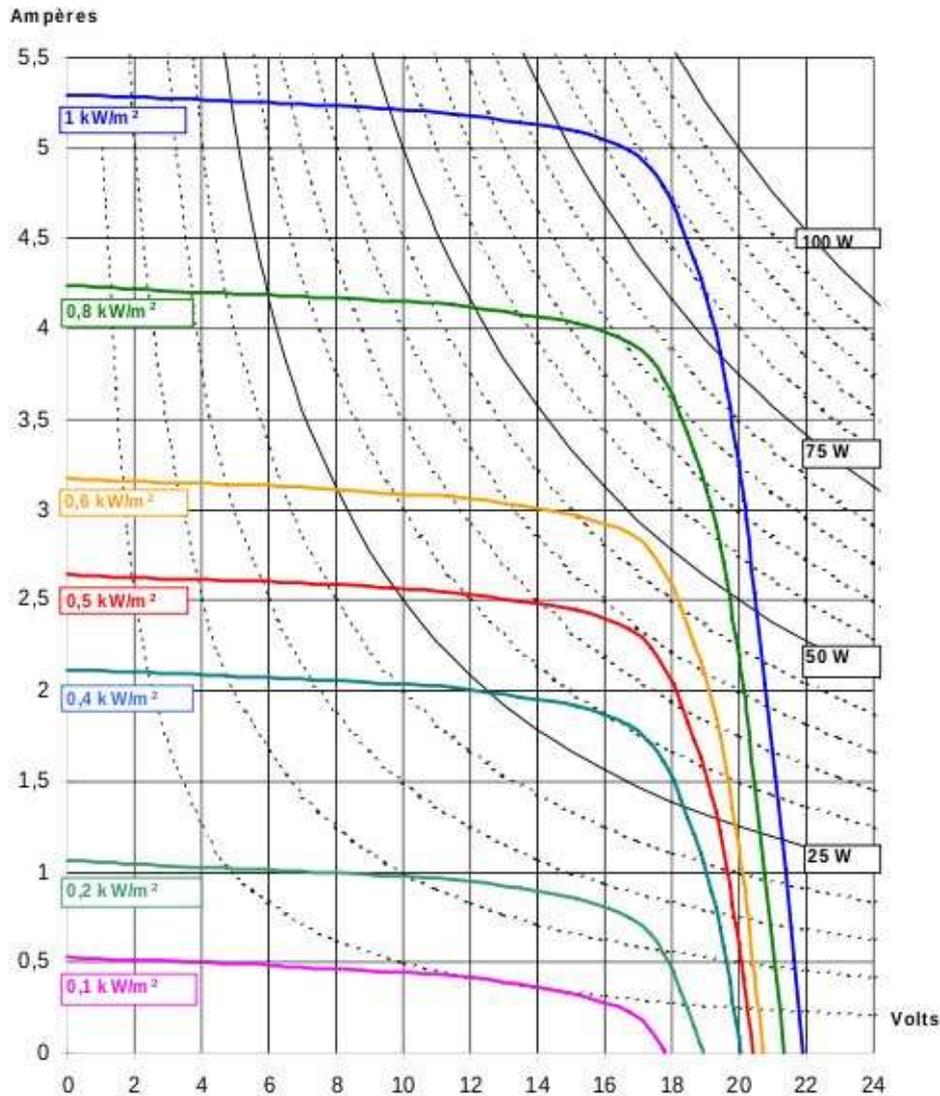
2- Exemple pratique : panneau photovoltaïque

Le panneau PW850 de Photowatt comporte 36 cellules montées en série.

$$\text{à vide, } U_{sv} = 36 \cdot 0,61V = 22V \quad (1000W/m^2, 25^\circ C \text{ et AM } 1,5)$$

Les caractéristiques $I=f(U)$ pour différents éclairagements sont données à la page suivante.

$I=F(V)$ à $T = 25^{\circ}\text{C}$ en fonction de l'irradiance E (kW / m^2), AM 1,5.



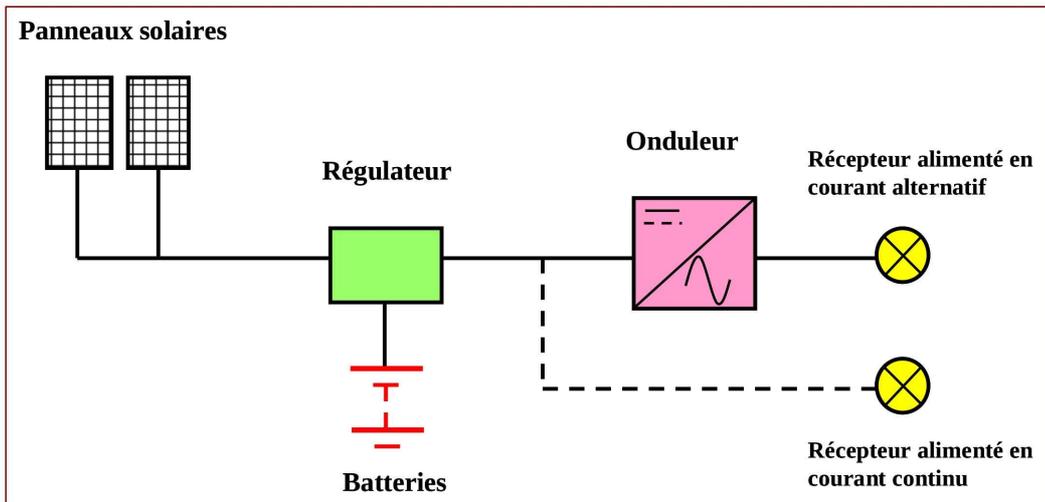
Parmi ces courbes, on remarque des courbes en pointillés qui représentent l'évolution de I en fonction de U à puissance constante : $I = P/U = \text{constante} / U$
Ces courbes permettent d'évaluer les puissances maximums pour chaque éclairement.

Exemple : à $1\text{kWc}/\text{m}^2$, $P_M = 85\text{ W}$

VII- 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 équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil.



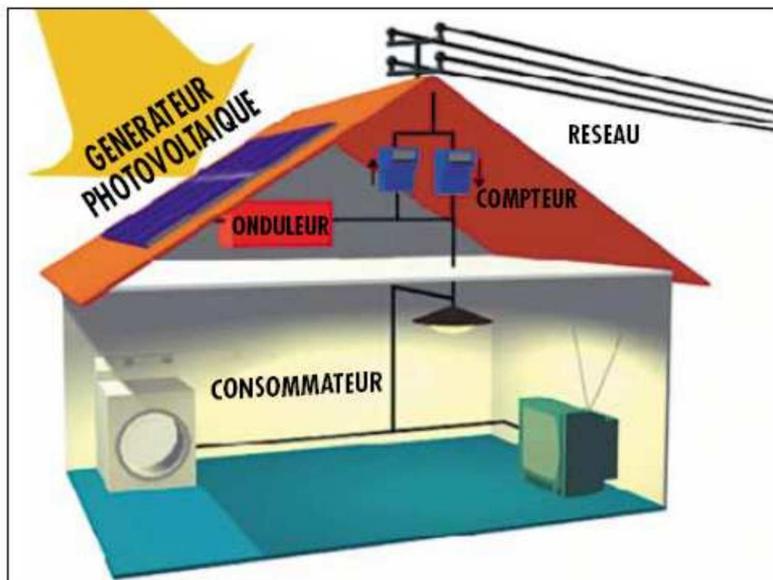
Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique selon les besoins de l'utilisateur.

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.

2- Site connecté au réseau

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



Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite.

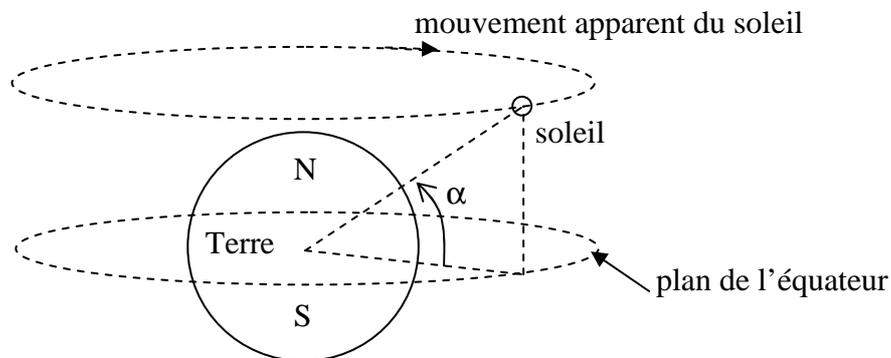
VIII- Energie solaire disponible et optimisation de l'orientation des panneaux photovoltaïques

1- Mouvement apparent du soleil et énergie solaire disponible

La terre fait un tour sur elle-même en 24h et effectue une révolution complète autour du soleil en 365 jours.

Vu de la terre (prise comme référentiel fixe), le mouvement apparent du soleil est un mouvement de rotation.

A ce mouvement, s'ajoute celui de la déclinaison cyclique du soleil. La déclinaison est définie comme l'angle entre l'axe soleil-terre et le plan de l'équateur. Cet angle est noté α sur la figure ci-dessous. Au cours d'une année, la déclinaison du soleil varie entre $+23^\circ$ (21 juin) et -23° (21 décembre).



2- Energie solaire disponible

Les variations cycliques du mouvement apparent du soleil se traduisent par des variations de l'énergie solaire disponible au cours de l'année. Par exemple, dans l'hémisphère sud, l'éclaircissement est le plus faible lorsque la déclinaison du soleil vaut $+23^\circ$.

A Nouméa, les variations de l'énergie solaire par unité de surface et par mois sont données dans le tableau suivant :

	Horiz. Glob kWh/m ² .ms
Janvier	202.0
Février	170.1
Mars	159.3
Avril	138.1
Mai	112.6
Juin	94.7
Juillet	109.3
Août	130.0
Septembre	162.3
Octobre	204.5
Novembre	203.7
Décembre	211.8
Année	1898.5

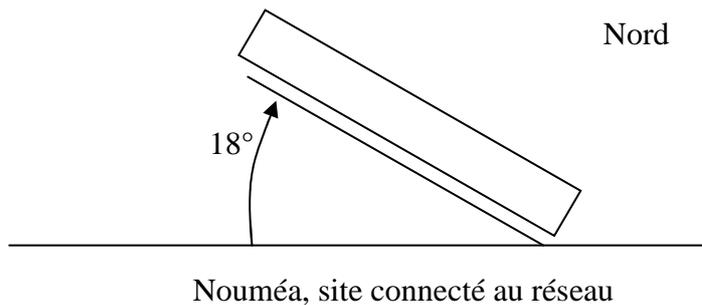
(les valeurs sont données pour des panneaux disposés horizontalement et un ciel sans nuages)

D'après ce tableau, on remarque que l'énergie solaire est minimum au mois de juin et maximum au mois de décembre.

3- Orientation et inclinaison des panneaux photovoltaïques fixes.

Dans l'hémisphère sud, il faut orienter les panneaux fixes vers le **nord** pour capter les rayons du soleil tout au long de l'année.

Cette orientation générale n'est pas suffisante. Il faut aussi préciser l'inclinaison optimum des panneaux par rapport à la surface du sol. A Nouméa, pour recueillir le maximum d'énergie cumulée sur une année, l'angle optimum est de **18°**. Ce cas correspond à un site raccordé au réseau.



Pour un site isolé, le but est de recueillir le maximum d'énergie en hiver. Dans ce cas, l'inclinaison optimum est de **35°** à Nouméa.

En pratique, les toitures qui supportent les panneaux sont rarement orientées plein nord avec une inclinaison optimum. Dans ce cas, l'énergie solaire captée est plus faible.