



## Etude d'une valise solaire

Arnaud Sivert

IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons

Beaucoup de sujets circulent sur Internet concernant l'énergie solaire et les panneaux photovoltaïques, ces techniques qui permettent de créer de l'électricité.

Vulgariser les connaissances sur ces thèmes, qui semblent pourtant communs aujourd'hui, n'est pas si aisé lorsque l'on s'affaire à la réalisation pratique d'un projet précis et concret...

En revanche, une chose est certaine : le soleil, tout là-bas au loin, est une source d'énergie exploitable !

L'objectif de ce Cours / TP est de connaître les avantages et les limites de ces panneaux solaires lorsque l'on souhaite les intégrer dans un système. Ce cours permettra par exemple d'étudier l'ordre de grandeur de la production d'électricité en fonction de la surface exposée des panneaux et permettra de faire des choix technologiques (hacheur, onduleur...).

### ★ QUELQUES RAPPELS :

#### PUISSANCE LUMINEUSE ET ECLAIREMENT

L'éclairement caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface.

- Il s'exprime en  $W/m^2$ .
- La grandeur associée à l'éclairement est notée **G**.
- Parfois, cette grandeur est aussi appelée **irradiance**.

#### PRINCIPE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium ([Diode](#)). 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.

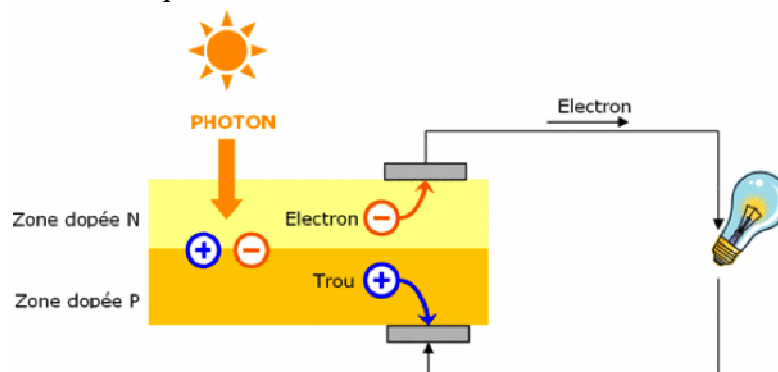


Figure 1 : fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

## CARACTÉRISTIQUES COURANT / TENSION

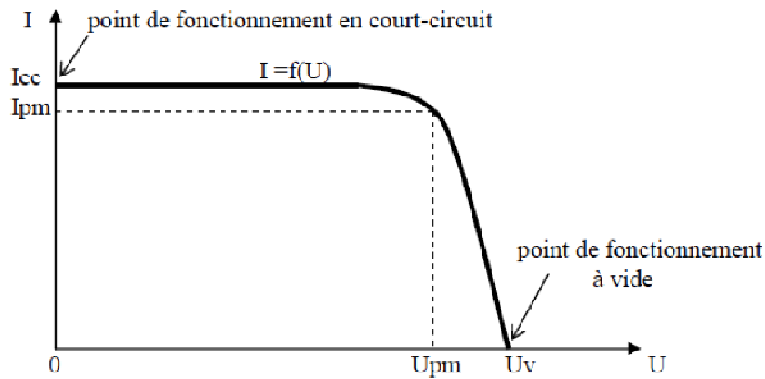


Fig 2 : A température et éclairement fixés, courbe courant / tension d'une cellule

**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 :  $I_{cc} = 3A$  et  $U_v = 0,57V$  pour une irradiance de  $G = 1000 \text{W/m}^2$  et une température  $\theta = 25^\circ\text{C}$ .

## DIFFERENTES TECHNOLOGIE DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

### 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.

**Avantages :**

- bon rendement, de 12% à 18%
- bon ratio  $Wc/m^2$  (environ  $150 \text{Wc/m}^2$ ) un gain de surface
- nombre de fabricants élevé

**Inconvénients :**

- coût élevé
- rendement faible sous un faible éclairement

### Silicium polycristalin (multicristalin) :

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

### Inconvénients :

- 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 éclairement

### 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".

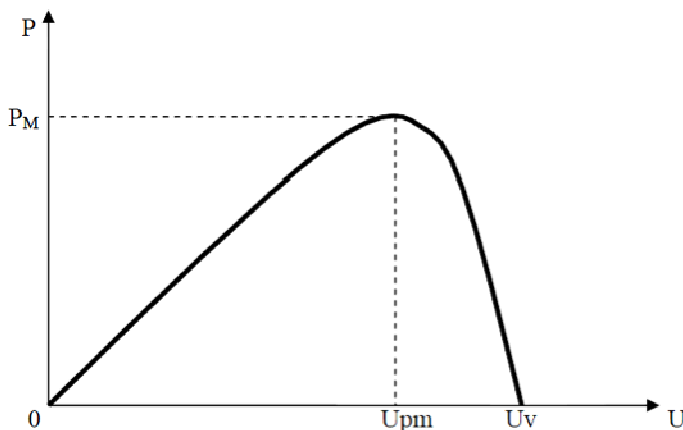
### Avantages :

- fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)
- un peu moins chère que les autres technologies
- intégration sur supports souples ou rigides.

### Inconvénients :

- rendement faible 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%)

## CARACTERISTIQUES 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 de la figure 3.

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

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

Figure 3 : A température et éclairement fixées, courbe puissance / tension d'une cellule

## INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET DE LA TEMPERATURE

A température constante, la caractéristique  $I = f(U)$  dépend évidemment fortement de l'éclairément : sur la courbe suivante, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairément  $G_1 > G_2$  alors que la tension à vide varie peu.

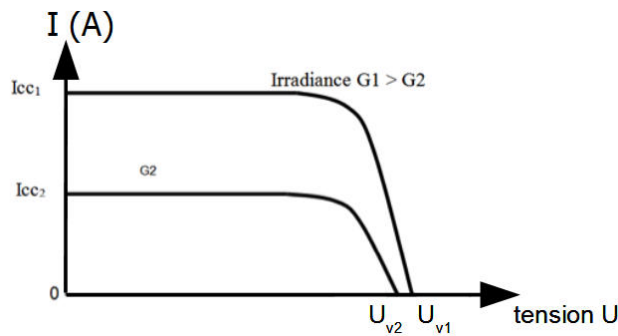


Figure 4 : courbe courant / tension d'une cellule pour 2 valeurs d'irradiances

A partir de la courbe précédente, on peut tracer les courbes de puissance  $P = f(U)$  pour les 2 éclaircissements. On remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclaircissement.

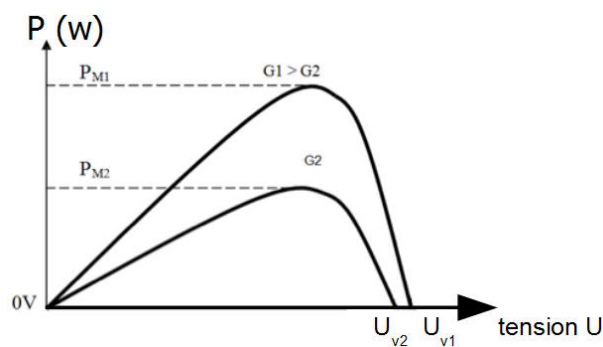


Figure 5 : courbe puissance / tension d'une cellule pour 2 valeurs d'irradiances

La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente.

### DÉFINITION DE LA PUISSANCE DE CRETE

Par définition, la **puissance de crête** représente la puissance maximum fournie par une cellule lorsque :

- l'éclaircissement  $G = 1000\text{W/m}^2$
- la température =  $25^\circ\text{C}$
- la 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'éclaircissement est souvent inférieur à  $1000\text{W/m}^2$  et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les  $25^\circ\text{C}$ .

### REGROUPEMENT SERIE OU PARRALLELE DE PANNEAUX OU CELLULES :

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

$$Us = n \cdot Uc$$

(avec  $U_c$  : tension fournie par une cellule).

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

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 :

$$I_s = n \cdot I$$

(avec  $I$  : courant fourni par une cellule).

## ETUDE DE L'AMORTISSEMENT DE PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES :

Dans le cas d'une installation sur un toit, il est possible d'utiliser des panneaux lourds capables de résister aux intempéries. Prenons l'exemple d'un de ce type de panneau avec les caractéristiques suivantes :

- Poids : 18 kg
- Surface : pour 1,5 m<sup>2</sup>
- Prix : 200 €
- Puissance : 200

Equipé d'un onduleur 2000 W/240 V, 1200 €.

Combien faut-il de surface de panneaux pour être compatible avec l'onduleur ?

Combien va coûter l'installation ?

Quelle sera l'énergie récupérée en 1 mois sachant que dans le cas le plus favorable la puissance maximale sera atteinte pendant 7 heures par jour ?

En combien de mois, y aura-t-il un retour de l'investissement si le taux de rachat est de 0,12 €/kWh ?

Même si la politique d'aide au rachat est de 0,36€/kWh, le retour à l'investissement passera de 53 ans à 17,2 ans. Des crédits d'impôts permettraient également de réduire encore le retour à l'investissement de 12 ans à 14 ans. En France (en 2014), le prix de l'électricité défini par l'état n'est pas excessif par rapport aux autres pays.

### **Il y a des enjeux géopolitiques sur la production d'électricité photovoltaïque :**

En effet, la Chine s'est imposée comme le leader mondial de la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques, assurant en 2013 70% de la production mondiale. Face à cette concurrence, l'Europe risque de perdre quelques 30 000 emplois, ce qui l'a poussée à augmenter ses droits de douane de 11,8% à 47% au mois de juin 2013.

L'Europe accuse notamment la Chine de trop subventionner les entreprises produisant des panneaux solaires, ce qui permet aux chinois de vendre en Europe des panneaux solaires à un prix inférieur à leurs coûts de production. Le coût de fabrication risque de fortement diminuer dans l'avenir alors que le prix de l'énergie augmentera certainement encore ; l'amortissement risque donc d'être rentable dans un futur proche.

## ★ TRAVAUX PRATIQUES : ETUDE D'UNE VALISE SOLAIRE

### Préambule :

Ce TP est une **initiation** à la technologie des panneaux photovoltaïques (PPv).

Certains aspects fonctionnels ont été volontairement "simplifiés" (linéarisation approchée des composants etc...) afin de donner un aperçu général d'un système équipé de PPv, de le resituer facilement dans son environnement et par rapport aux autres composants électriques (traitement, batterie, accumulateur...).

Nous vous présentons donc ici l'énoncé du TP tel qu'il est traité en présentiel, mais en version "dépliée" puisque pour chaque questions, des éléments de réponses vous sont proposés afin de vous aider à préparer "théoriquement" et en autonomie ce TP avant de réaliser de vraies mesures en séance de TP réelle, avec votre enseignant !

Il est donc évident qu'en dehors des calculs théoriques, les valeurs présentées dans les tableaux et sur les courbes sont extraites des "vraies" mesures moyennes obtenues lors des séances de TP en présentiel, et données à titre indicatif afin de visualiser les ordres de grandeurs auxquels nous devons nous attendre avec le type de matériel utilisé et décrit ci-dessous. Les courbes proposées et les valeurs données par les appareils permettent donc quasiment de "faire", de préparer dans de bonnes conditions, l'entièreté du TP en ligne.

Si l'installation de panneaux **photovoltaïques** sur le toit d'une maison reste encore coûteuse (en 2014) et difficile à amortir malgré une politique de rachat avantageuse de l'électricité, les panneaux solaires sont bien utiles pour alimenter des systèmes difficilement raccordables au secteur EDF (radar pédagogique, feux de signalisations provisoires, avertisseurs routiers, stations météo...).

L'utilisation de ces panneaux permet également d'exploiter des endroits où aucune source d'électricité n'est disponible afin d'assurer un minimum d'énergie pour recharger de petits systèmes de télécommunication par exemple et ainsi ne pas pas être isolé du monde.

C'est pourquoi nous allons étudier une valise solaire dont les caractéristiques sont développées ci-dessous :

- Surface totale 420x680 mm<sup>2</sup>
- Puissance totale 25 W
- 17 kg au total

La valise comprend deux panneaux solaires, **connectés en parallèle**, de 36 éléments chacun de 4 cm x 8 cm (36 x 0,5 V = 18 V).

#### **PANNEAU SOLAIRE :**

- tension & courant typique 17,5 V • 1,7 A
- courant de court-circuit : 1,9 A
- tension circuit ouvert : 21,5 V

Sous le panneau solaire, se trouvent :

- une batterie plomb 20 Ah 12 VDC typique, 6 éléments. 14,4 V en tension maximum.
- un convertisseur 12 VDC / 230 VAC 50 Hz 150 V.A
- il est possible de remplacer la batterie plomb par une batterie Li-ion 20 Ah 15VDC typique, 4 éléments, 16,4 V maximum.

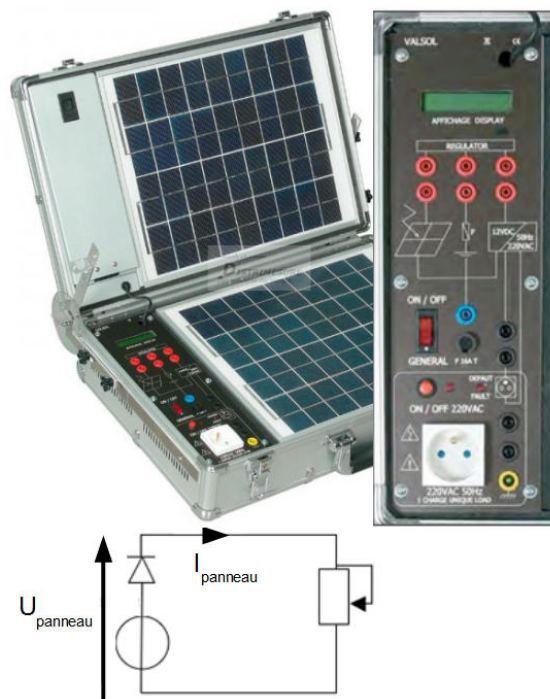
#### **TABLEAU DE COMMANDE :**

- un disjoncteur de protection contre les surintensités
- une prise femelle 230 VAC 50 Hz avec voyants marche et défaut
- un afficheur LCD à 2 lignes délivrant des messages concernant la batterie : température, % de charge, courant et tension de charge, courant et tension d'utilisation, batterie en sous charge, en surcharge, température excessive etc... ainsi que la puissance de sortie.

Nota : il s'agit d'indications, non de mesures précises.

**PROTECTIONS DES COMPOSANTS EN CAS DE :**

- surcharge de la batterie : quand sa tension atteint 16,5 V, le courant de charge est coupé automatiquement pour en préserver la durée de vie.
- décharge excessive de batterie : quand sa tension atteint 11,5 V alarme sonore ; en dessous de 10,5 V, la sortie est automatiquement déconnectée.
- élévation anormale de température de la batterie
- surcharge ou court-circuit sur la sortie du convertisseur



**★ QUESTIONNAIRE :**

**1) CARACTERISTIQUES TENSION/COURANT (CHARGE RESISTIVE) :**

Dans un premier temps, nous allons vérifier la caractéristique tension/courant d'un panneau photovoltaïque.

Pour cela, nous allons utiliser un rhéostat de 100 Ω afin de mesurer le courant et la tension des panneaux, et en déduire la puissance dans le rhéostat.

Etant donné qu'il n'y a pas de soleil dans la salle, un halogène de 500W le remplacera (attention le rendement de la puissance lumineuse d'un halogène est de 5 %).

Avec un halogène de 500 W...

Remplir le tableau ci-dessous :

V (Volt)							
I (Amp)	0A						
P (W)							

Calculer la puissance récupérable par deux panneaux solaires de rendement 20%, avec un halogène de rendement 5%.

Maintenant avec deux halogènes de 500 W...

Remplir le tableau suivant :

V (Volt)							
I (Amp)	0A						
P (W)							

Conclusion sur la puissance maximale en fonction de la puissance lumineuse ?

Avec les deux halogènes (1000 W), se régler à la puissance maximale.

Avec une feuille A4, cacher 16 éléments d'un des 2 panneaux solaires (mis en parallèle).

Que se passe-t-il ?

Toujours avec les deux halogènes (1000W), rester à la puissance maximale.

Avec une feuille A4, cacher 16 éléments sur les 2 panneaux solaires (mis en parallèle).

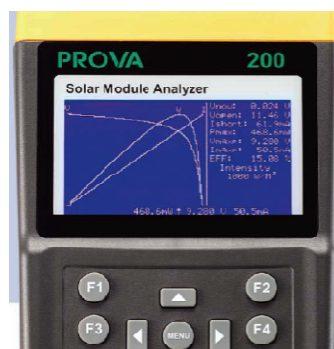
Que se passe-t-il ?

En restant au point maximal de puissance, bouger l'angle du panneau par rapport aux halogènes.

Que se passe-t-il ?

Il existe des analyseurs de panneaux solaires qui tracent en quelques secondes les caractéristiques courant/tension et puissance/tension des panneaux pour vérifier que toutes les cellules fonctionnent correctement en fonction de l'irradiance.

C'est par exemple avec le PROVA 200 (ci-dessous) que les courbes présentées précédemment ont été tracées.



## 2) CHARGEMENT D'UNE BATTERIE :

Dans un premier temps, les panneaux voltaïques sont connectés en parallèle sur la batterie.

En effet, les 2 panneaux en parallèle ne peuvent fournir un courant supérieur au courant de charge maximal de la batterie Plomb.

L'afficheur et l'électronique consomment 0,167 A sur la batterie (2W), ce qui représente 10% de la puissance des panneaux.



A partir des tableaux (1) et (2), déterminer le courant maximal que peuvent fournir les panneaux pour la tension de batterie Plomb de 12V ?

Tableau 1 :

V (Volt)	18,3	18	15,7	<b>14,45</b>	12	10	7
I (Amp)	0	0,1	0,25	<b>0,28</b>	<b>0,29</b>	<b>0,3</b>	<b>0,31</b>
P (W)	0	1,8	3,9	<b>4,1</b>	3,48	3	2,17

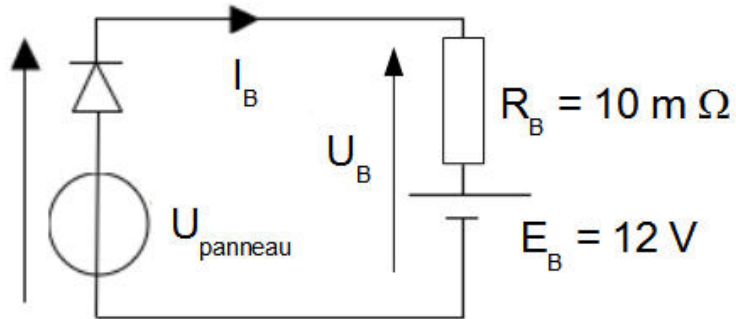
Tableau 2 :

V (Volt)	19,3	18,9	18,4	<b>16,24</b>	14,6	10,2	6
I (Amp)	0	0,1	0,3	<b>0,485</b>	<b>0,52</b>	<b>0,56</b>	<b>0,6</b>
P (W)	0	1,9	3,7	<b>7,9</b>	7,9	5	3,6

Avec les panneaux fournissant une puissance de 24W, quel sera le temps de recharge de la batterie 12V / 20 Ah ?

Tant que la tension des panneaux photovoltaïques est inférieure à la tension de la batterie, le courant de charge est nul à cause de la diode interne des panneaux solaires.

Indiquer l'équation du courant avec le schéma suivant :



Quel sera le courant si la tension du panneau est de 12,1V, avec la résistance du schéma précédent ?

## Brancher le panneau sur la batterie.

Remplir le tableau suivant :

Nombre halogène	Tension panneau (V)	Tension batterie	I(A)	Puissance (W)	Température panneau (°C)
0 rien allumé					
1 halogène					
2 halogènes (1000W)					
2 halogènes (16 éléments cachés A4)					
2 halogènes (16 éléments cachés 2*A4)					
Plein soleil					
Nuageux					

Dans les conditions précédentes, la puissance maximale des panneaux peut-elle être fournie ?

### 3) CONVERTISSEUR : OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE ENTRE LES PANNEAUX ET LA BATTERIE

Comment peut-on optimiser le transfert d'énergie entre les panneaux et la batterie ?

Des convertisseurs (*Hacheurs*) **PWM** (*Pulse Wave Modulation* ou *Modulation de Largeur d'Impulsion*) permettent de faire varier la puissance délivrée à la batterie en fonction de l'énergie solaire disponible.

Il existe différents types de régulations permettant d'optimiser le transfert d'énergie ; les *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*).

Plusieurs méthodes existent pour réaliser un système de *MPPT* :

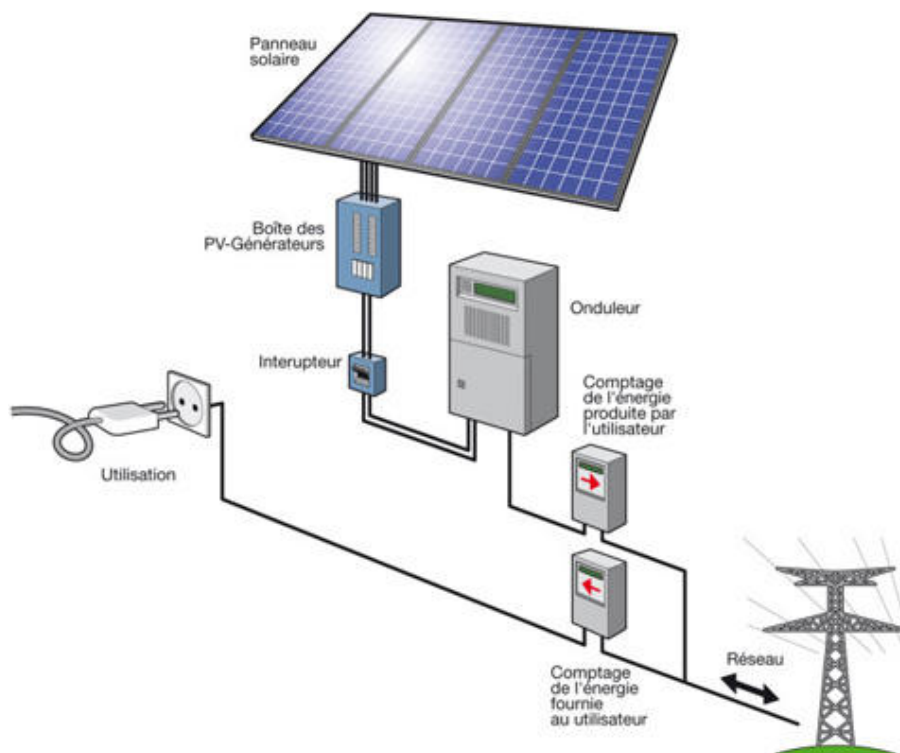
La plus évidente est la recherche par balayage de la puissance maximale afin de fournir en permanence, en pilotant le convertisseur, le maximum de puissance à la charge ; ici la batterie.

D'autres encore reposent sur des algorithmes dits "*Perturbations et Observations*" (PO). Cette fois le point de puissance maximale est recherché en suivant le schéma suivant : perturbation de la tension -> mesure de la puissance -> correction et maximisation de la puissance en augmentant la tension mais sans réduire le courant...

Ces convertisseurs permettent de gérer la charge de la batterie car il ne faut pas dépasser la tension de seuil des éléments de l'accumulateur et ne pas décharger à 100% une batterie.

Dans le commerce, de nombreux modèles de régulateurs sont proposés, permettant d'assurer un chargement de batterie pérenne à partir de panneaux solaires.

Les batteries coûtent relativement cher et ont une fiabilité réduite. Par conséquent, il vaut mieux utiliser directement un onduleur professionnel qui permet de répartir la puissance sur le secteur du particulier et sur le réseau ERDF.



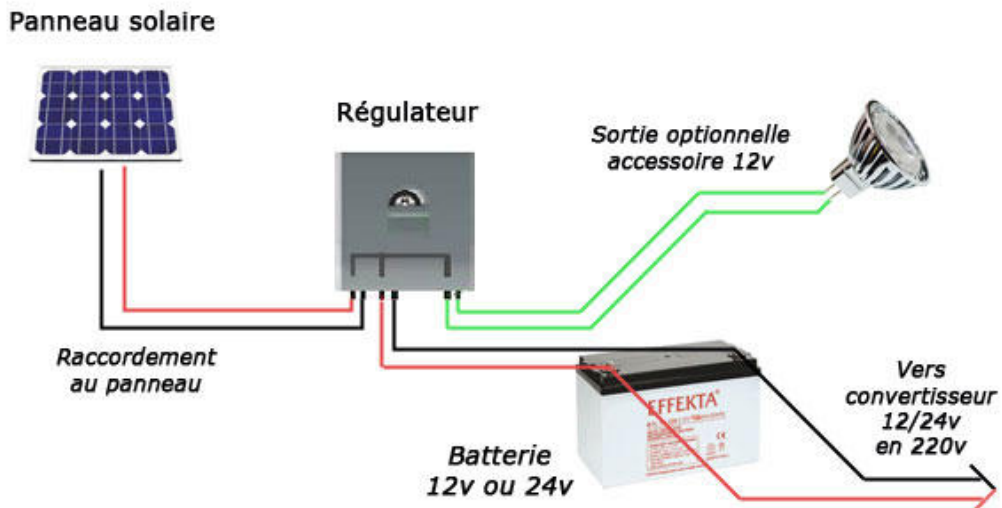
Source : Sun-Capital

Il est possible d'améliorer les transferts d'énergies depuis le panneau photovoltaïque en le fixant sur un bâti motorisé mobile, appelé *trackers*, qui peut suivre à chaque instant l'évolution de la position du soleil et se positionner par rapport à cet astre !

#### 4) ALIMENTATION STABILISEE :

##### Charge de la batterie d'une alimentation stabilisée.

Si la source d'énergie principale, le soleil, ne "brille" pas suffisamment et pendant un certain temps, si la batterie est en plus utilisée quotidiennement, un risque de décharge totale (100%) et donc de destruction est à craindre. Le système de régulation lui-même s'arrêtera, et faute d'alimentation suffisante, suivront l'afficheur de données et l'onduleur...



Source : Ase-Energie

Il est donc impératif de recharger la batterie à l'aide d'une alimentation extérieure ! Et ce, à courant constant jusqu'à la tension de seuil puis à tension de seuil constant.

Toutes les alimentations possèdent une source de tension réglable qui peut-être également limitée en courant.

Par conséquent, il faut régler l'alimentation à la tension de seuil de la batterie, limité le courant de charge avec la norme C/10 puis connecter l'alimentation sur la batterie.

Mettre la tension d'alimentation à 14.2 V à la place du panneau solaire...

Remplir le tableau ci-dessous :

I alimentation	Tension alimentation	Tension batterie	I (A) batte	Puissance (W)
0				
0,5				
1,5				
2				

Pourquoi il y a une chute de tension entre la batterie et l'alimentation ?

Que se passe-t-il si l'on n'utilise pas le régulateur ? En d'autres termes si l'alimentation est connectée directement sur la batterie ?

**Remarque 1** : il est difficile de connaître le taux de charge des batteries au Plomb et de celles de type Lipo-fer, car leur tension va redescendre à leur tension nominale après être chargé à 100%. Par contre, avec des batteries Lipo et li-ion, la tension reste fixe ce qui permet de déterminer le taux de charge.

**Remarque 2 :** les alimentations stabilisées ont un rendement très faible des que l'on passe au dessus de 100 W ; les alimentations à hacheurs seront alors utilisées. Ces alimentations ne seront pas étudiées ici.

## 5) ONDULEUR DE TENSION : DECHARGE DE LA BATTERIE

Nous allons cette fois étudier la décharge de la batterie à travers une charge électrique constante. Pour cela nous allons utiliser un onduleur de tension qui va convertir la tension **12V DC** en une tension **220 VAC** de petite puissance et avec un rendement de 80%.

**Si on utilise une lampe de 40 W/220 V comme charge et une batterie avec une tension de 13 V (20 Ah)**

Quels sont la résistance et le courant de la lampe ?

Quel serait le courant fourni par la batterie si le rendement de l'onduleur est de 80 % ?

La charge électrique est de 40W.

Remplir le tableau suivant :

Lampe	V <sub>lampe</sub> (V)	I <sub>lampe</sub> (A)	P <sub>lampe</sub> (W)	U <sub>batterie</sub>	I <sub>batterie</sub>	P <sub>batterie</sub> (W)	η (%)	t(H)
<b>Théorie 40W</b>								
<b>Pratique 40W</b>								

La charge électrique est maintenant un "lampe" :

- à LED de 10 W
- une simple résistance de 500 Ω

Remplir le tableau suivant :

Lampe	V <sub>lampe</sub> (V)	I <sub>lampe</sub> (A)	P <sub>lampe</sub> (W)	U <sub>batterie</sub>	I <sub>batterie</sub>	P <sub>batterie</sub> (W)	η (%)	t(H)
<b>Led 10W</b>								
<b>Résistance</b>								

## 6) SYNTHESE :

Les panneaux photovoltaïques permettent à un système d'être autonome en énergie, mais leurs mises en œuvre restent relativement chères. Il faut une grande surface, un nombre de m<sup>2</sup> important, pour avoir une puissance viable.

Ce système "panneaux solaire, batterie & onduleur" se retrouve sur :

- les camping-cars, les voiliers, les véhicules électriques...
- certaines maisons très éloignées des réseaux électriques...
- avec d'autres systèmes éoliens...

En revanche, le dimensionnement est relativement facile à mettre en œuvre à partir d'un cahier des charges clair et précis.