

## ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

### 1. RAPPEL DU PRINCIPE

Lorsqu'un matériau reçoit la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant cette lumière.

Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures sont arrachés :

- quand l'électron revient à son état initial, l'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique
- par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible.

Une partie de l'énergie cinétique des photons est donc transformée en énergie électrique.

C'est l'**effet photovoltaïque**.

L'autre partie est restituée sous forme thermique.

Les cellules photovoltaïques sont réalisées à partir de matériaux semi-conducteurs et en particulier le silicium qui constitue la majorité des cellules fabriquées.

On trouvera en annexe les différentes technologies et leurs performances. La partie technique en grisée ci-contre détaille le phénomène électronique mis en jeu.

### 2. RENDEMENT

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement solaire qu'elle reçoit.

L'énergie solaire moyenne reçue en France varie de 1100 kWh/m<sup>2</sup>/an à Lille et de plus de 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an à Marseille soit une énergie moyenne reçue en France de l'ordre de 1400kWh/m<sup>2</sup>/an.

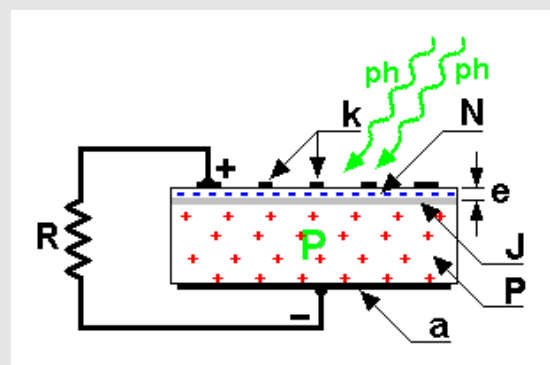
**Mais seule une faible partie de cette énergie est transformée en électricité.**

La figure 1 donne la production d'énergie électrique par an en fonction de la puissance installée, ce qui conduit à un rendement variant de 9,5 % dans le nord à 15,5 % dans le sud. Actuellement on considère que le rendement moyen en France est de l'ordre de 10 %.

Remarque : Le rendement dépend non seulement de l'implantation géographique, mais également de l'orientation des panneaux, de l'environnement du capteur et de la technologie employée. Le record actuel établi par le CEA-Léti et la société Soitec est de 44,7 % en

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N d'épaisseur *e* de l'ordre de quelques millièmes de mm.

Entre les deux zones se trouve une jonction J. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode *k* tandis qu'une plaque métallique *a* recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.



L'énergie disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction de l'énergie entrante et des pertes sous forme thermique :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - P_{\text{thermique}} \quad \text{où :}$$

$E_{\text{électrique}}$  : énergie disponible aux bornes de la cellule (tension/courant).

$E_{\text{lumineuse}}$  : énergie incidente (flux lumineux)

$P_{\text{thermique}}$  : pertes thermiques (par convection, rayonnement et conduction).

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction :

- des caractéristiques du rayonnement
- de la répartition spectrale
- de l'angle d'incidence
- de la quantité d'énergie reçue (surface et forme de la cellule, caractéristiques dimensionnelles)
- des conditions ambiantes de fonctionnement (le rendement est inversement proportionnel à la température).

Le rendement de la cellule est :

$$\eta = E_{\text{électrique}} / E_{\text{lumineuse}}$$

laboratoire.

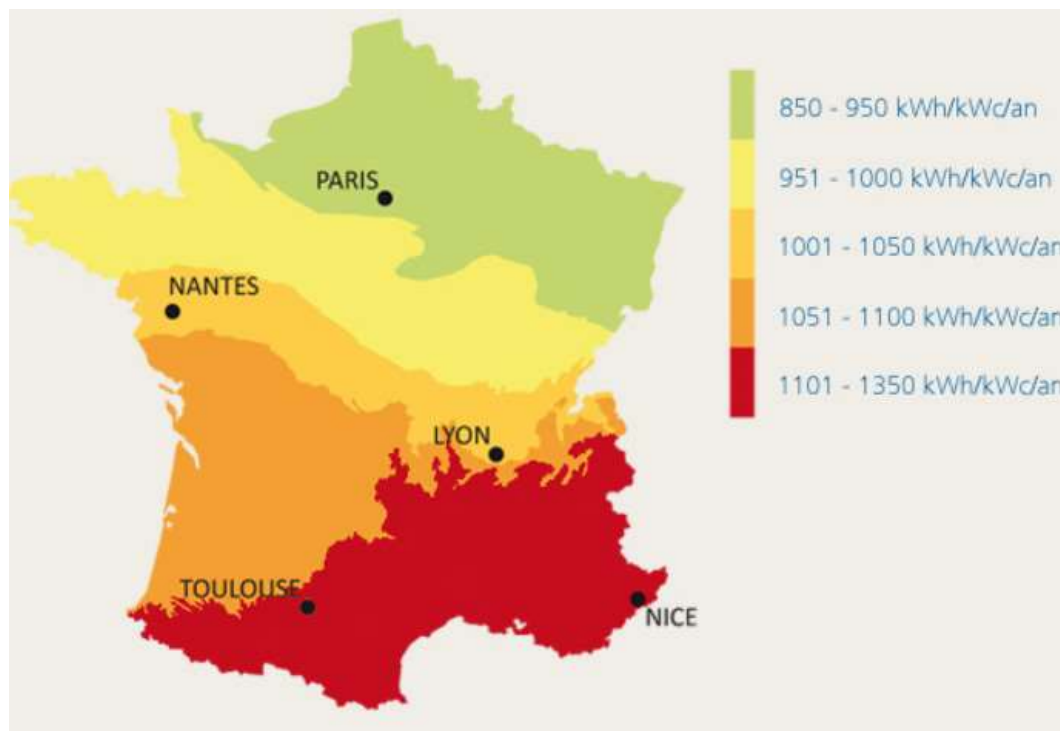


Figure 1 : Production électrique annuelle fonction de la puissance installée

### 3. BALANCE ÉNERGÉTIQUE ET RENTABILITÉ

La fabrication des cellules photovoltaïques est très énergivore. L'« Energy payback time », temps nécessaire à une cellule pour produire une énergie égale à celle dépensée pour sa fabrication, est de 2,5 à 5 ans suivant les technologies employées. On peut donc considérer **qu'elle ne fournira de l'énergie " propre " que pendant 75 % à 90 % de sa durée de vie.**

La rentabilité financière d'un capteur va dépendre essentiellement de la zone d'implantation.

En France, le flux solaire moyen varie de 1100 à 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an soit un flux solaire moyen journalier de 3,8 kWh/m<sup>2</sup>.

**La durée d'amortissement, tout compris, calculée sur le prix actuel de l'électricité est de presque 50 ans, pratiquement le double de la durée de vie des capteurs** (voir détail du calcul zone grisée ci-après).

Ceci signifie que ce type d'énergie ne peut pas être rentable sans une aide importante de l'état qui veut favoriser le développement des énergies renouvelables (subventions et prix de rachat).

L'aide de l'état pour le prix de rachat se retrouve sur la facture d'électricité de tout un chacun sous la rubrique **CSPE** Contribution au Service Public d'Electricité.

Comparons le coût global d'une installation avec l'équivalent en euro de la quantité d'énergie produite.

Un module photovoltaïque d'une surface d'environ 1 m<sup>2</sup> revient actuellement à environ 1000 € tout compris.

On retiendra pour l'évaluation, un flux solaire moyen journalier en France de 3,8 kWh/m<sup>2</sup>. Le module produira alors environ 380 Wh/m<sup>2</sup> sur la base d'un rendement de 10 %. Pour un coût de l'énergie du réseau public de 14,72 c€/kWh, la production moyenne d'un module est donc équivalente à 0,056 €/jour.

La durée d'amortissement sera donc de  $1000 / 0,056 = 17\ 850$  jours soit 49 ans.

Une telle installation ne peut donc pas être rentable sans une aide conséquente des pouvoirs publics.

### 4. PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE

Comme pour l'éolien, l'intermittence de la production (jour/nuit) et les variations du rendement (couverture nuageuse) pose des problèmes de régulation du réseau électrique et nécessite de faire appel à une production complémentaire du type centrales thermiques à gaz qui ont la souplesse nécessaire pour s'adapter aux variations de la production.

Deux filières de production d'électricité photovoltaïque sont actuellement développées :

- la production « individuelle », de faible puissance avec ou sans raccordement au réseau
- les parcs photovoltaïques de grande puissance

#### 4.1. LA PRODUCTION « INDIVIDUELLE AUTONOME »

L'intérêt principal de cette technique est son autonomie de fonctionnement. C'est la solution pour les installations mobiles ou isolées, chaque fois que la puissance demandée n'est pas trop importante.

A titre d'exemple, on peut citer les habitations de montagne ou éloignées des réseaux de desserte, les refuges, les télé-transmissions, la signalisation, le traitement de l'eau, les stations de pompage et naturellement le spatial.

Mais l'intérêt principal va se trouver dans les pays sous-équipés et bénéficiant d'un maximum d'ensoleillement. Ces dispositifs vont permettre d'offrir l'électricité et ainsi apporter un minimum de confort à des populations qui ont difficilement accès à un réseau électrique. Afin de permettre une autonomie électrique complète, ces installations doivent être complétées soit par une capacité de stockage adaptée au besoin (batteries électrochimiques), soit par une production annexe type générateur diesel.

#### 4.2. LA PRODUCTION « INDIVIDUELLE RACCORDÉE »

La technique consiste, pour un particulier, à injecter dans le réseau général, l'électricité produite par ses panneaux photovoltaïques et à racheter l'électricité nécessaire aux usages domestiques. Ce concept a été mis en place pour favoriser le développement des énergies renouvelables et satisfaire aux recommandations de l'Europe. Le schéma ci-contre donne le principe de fonctionnement d'une telle installation.

Le prix de base du rachat au 1/01/2014 pour les petites installations (0-9 kWc) avec intégration au bâti, est de 28,50 c€/kWh, ce coût est à comparer au prix de vente de l'électricité qui est de 14,72 c€/kWh.

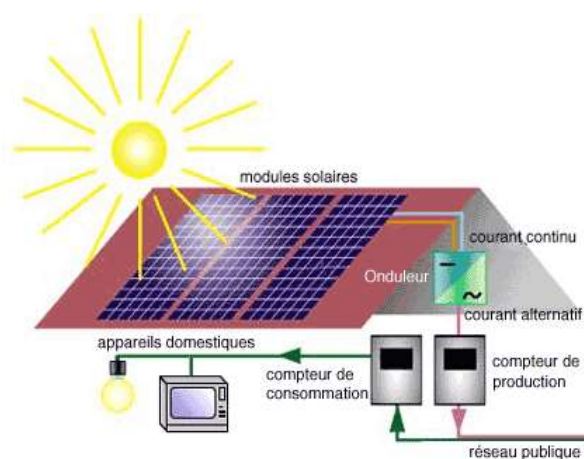


Figure 2 : Schéma d'une installation autonome

#### 4.3. LES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES DE GRANDE PUISSANCE

La puissance d'une centrale solaire photovoltaïque est proportionnelle à la surface de modules installés.

La plus grande centrale photovoltaïque urbaine du monde est opérationnelle depuis février 2013 à Bordeaux-lac.

60 000 panneaux (silicium monocristallin) couvrant une superficie de 20 hectares ont été installés sur les ombrières du parking du parc des expositions. La puissance installée est de 12 MWc.

Elle a été financée par EDF Energie nouvelle qui reverse en plus 300 000 € à la société propriétaire du terrain.



Figure 3 : Centrale photovoltaïque de Bordeaux-lac



Un deuxième type de centrale photovoltaïque a également été installée en Gironde à Martillac.

C'est une installation pilote de 100 kWc équipée de capteurs à suiveur solaire qui permettent de conserver un angle d'incidence de 90° par rapport au soleil et ainsi d'augmenter la production électrique de 30 % par rapport aux panneaux fixes.

Figure 4 : Capteurs Exotrack de la centrale de Martillac

## 5. DURÉE DE VIE, MAINTENANCE ET POLLUTION

La durée de vie des modules photovoltaïques est donnée pour 20 à 30 ans suivant les technologies employées. Dans les installations autonomes il faut également tenir compte de la durée de vie des matériels de régulation et des batteries comprise entre 5 et 8 ans, Le coût de remplacement représente une part importante des frais de maintenance.

Compte tenu des éléments entrant dans la réalisation de ces matériels (silicium ou germanium pour les capteurs, plomb, lithium, cadmium et acides pour les batteries), le recyclage de ces matériels est impératif en fin de vie.

## 6. AVENIR

Comme on l'a vu précédemment, les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles (atomes de fer, titane).

Pour pallier ce problème, les chercheurs font appel aux nanotechnologies pour créer la cellule solaire de troisième génération. La technique consiste à introduire des nanoparticules de silicium ou de germanium (5 nanomètres de diamètre) dans une fine couche de verre placée à la surface de la cellule pour que la lumière solaire soit mieux absorbée.

Les recherches s'orientent également vers l'introduction des nanoparticules dans des supports souples en plastique polymère qui peuvent être fabriqués selon un processus beaucoup plus simple. Ces cellules auraient l'avantage d'être flexibles et résistantes.

D'autres voies de recherche s'orientent vers des matériaux capables d'exploiter la lumière infrarouge, ce qui permettra un fonctionnement même par temps couvert et ainsi offrir un rendement de 30 %.

## 7. CONCLUSION

Que ce soit pour les installations individuelles ou les installations de puissance, le problème de cette production d'électricité reste lié aux caractères discontinus de l'ensoleillement et aléatoires des couvertures nuageuses.

Il est donc nécessaire, pour un plein emploi de l'énergie solaire photovoltaïque de prévoir une production annexe type turbine à gaz qui présente une grande souplesse d'utilisation mais génératrice de gaz à effet de serre.

Compte tenu des performances de ce type de production, ceci signifie que pour 10 % d'énergie solaire il faudrait faire appel à 90 % d'énergie complémentaire. Dans le bilan énergétique une trop grande part de photovoltaïque risque entraîner un gradient de puissance trop important entre les périodes de production et de non production.

Tout l'intérêt du photovoltaïque se trouve donc dans une énergie d'appoint ne nécessitant pas une fourniture continue.

Citons la production, par électrolyse, d'hydrogène qui pourra être utilisé directement comme carburant ou dans les piles à combustible pour recréer de l'électricité (voir [fiche GAENA N°36](#)) ou pour le pompage de l'eau qui est un autre moyen de stockage de l'électricité.

On peut également envisager des applications domestiques ou industrielles qui pourront se satisfaire de ce type de production séquentielle, recharge des véhicules électriques par exemple.

## Annexe

La technologie actuelle met à la disposition des utilisateurs plusieurs types de cellules utilisant différents matériaux photovoltaïques.

A titre d'exemples, le tableau ci-dessous en donne les principales caractéristiques :

Type de matériaux	Caractéristiques techniques	Avantages	Inconvénients
Cellules multi-jonction	Rendement en laboratoire : environ 40 %	Rendement inégalé	Pas d'application commerciale (aérospatiale)
Cellule photovoltaïque monocristalline	Rendement module commercial : 12 à 20 % Puissance crête d'environ 150 Wc/m <sup>2</sup>	Très bon rendement Durée de vie importante (+/- 30 ans)	Coût élevé
Cellule photovoltaïque polycristalline	Puissance d'environ 100 Wc/m <sup>2</sup> Rendement de 10%	Bon rendement Durée de vie importante (+/- 30 ans) Meilleur marché que le monocristallin	Rendement faible sous un faible éclairement.
Cellule sans silicium en couche mince CIS	Rendement module commercial : 9 à 11 %	Permet de s'affranchir du silicium Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité La cellule peut être construite sur un substrat flexible	Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
Cellule silicium amorphe en couche mince	Rendement record en laboratoire : environ 13,4 % Rendement module commercial : 5 à 9 % Puissance de 60 Wc/m <sup>2</sup> faible	Fonctionne avec un éclairement faible Bon marché par rapport aux autres types de cellules Moins sensible aux températures élevées	Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses Durée de vie courte de 10 ans.