

## ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

### RÉSUMÉ

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Il existe différents modes de production d'électricité photovoltaïque :

- **la production individuelle autonome** de faible puissance bien adaptée aux habitations et installations isolées (voir figure 1). Mais cette production doit être complétée par une production annexe pour pallier l'intermittence de l'éclairement solaire (batteries électrochimiques, groupe électrogène ...).
- **la production individuelle « raccordée »** destinée à être utilisée **en mode « autoconsommation »** où tout ou partie de l'électricité produite est consommée. Elle peut être valorisée de 3 manières :
  - ❖ **via une autoconsommation totale** qui consiste à consommer l'énergie produite en totalité, pour alimenter directement l'ensemble des appareils électriques ou électroménagers du logement ;
  - ❖ **via une autoconsommation partielle** avec revente du **surplus de production**, où l'électricité non consommée par le logement est envoyée sur le réseau de distribution générale ;
  - ❖ **via la revente totale** de la production d'électricité photovoltaïque. Dans ce cas précis, on ne parle pas d'autoconsommation.
- **la production de grande puissance.** La puissance est proportionnelle à la surface des capteurs installés. Les plus puissantes centrales peuvent faire plus de 100 MWc<sup>1</sup> (voir figure 2). Mais compte tenu de l'intermittence de la production se pose alors, pour ces centrales, la gestion de réseau électrique et l'adaptation de la production à la demande.

Il existe une variante d'autoconsommation, qu'elle soit totale ou partielle, qui consiste à **stocker** le surplus d'énergie non consommée dans des batteries chimiques pour permettre une meilleure gestion de la consommation d'électricité.

De même, parmi les différents modes de production d'énergie solaire évoqués ci-dessus on distingue également deux types d'autoconsommation :

- **L'autoconsommation individuelle** : un producteur consomme lui-même et sur un même site tout ou une partie de l'électricité produite par son installation, instantanément ou après une période de stockage.



Figure 2 : Centrale de puissance (Toul-Rosières)



Figure 1 : Installation autonome (Commune de Belleville en-Beaujolais)

- **L'autoconsommation collective** : un ou plusieurs producteurs délivrent de l'électricité photovoltaïque à plusieurs consommateurs finaux. Ce type de production se développe de plus en plus.

<sup>1</sup> Wc = Watt crête. Puissance maximale fournie par le capteur dans les conditions optimales d'ensoleillement.

## 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 900 kWh/kWc/an à Lille et de plus de 1200 kWh/kWc/an à Marseille soit une énergie moyenne reçue en France de l'ordre de 1100 kWh/kWc/an.

**Mais seule une faible partie de cette énergie est transformée en électricité.** La figure 3 en page suivante 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 12 %.

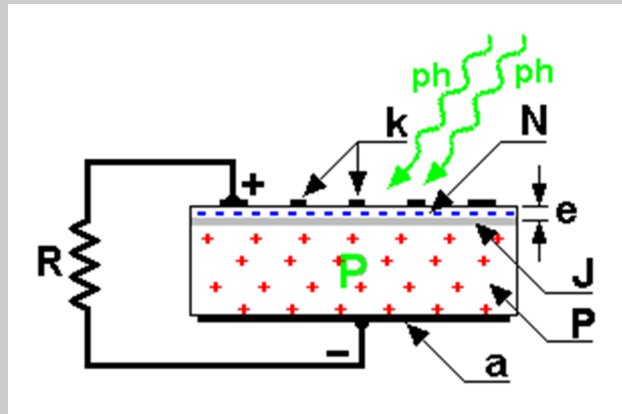
Remarque : Le rendement dépend non seulement de l'implantation géographique, mais également de l'orientation des panneaux, de l'environnement du capteur et de la technologie employée. Le record actuel établi par le CEA-Léti et la société Soitec est de 44,7 % en laboratoire.

## 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.**

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 :

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

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

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

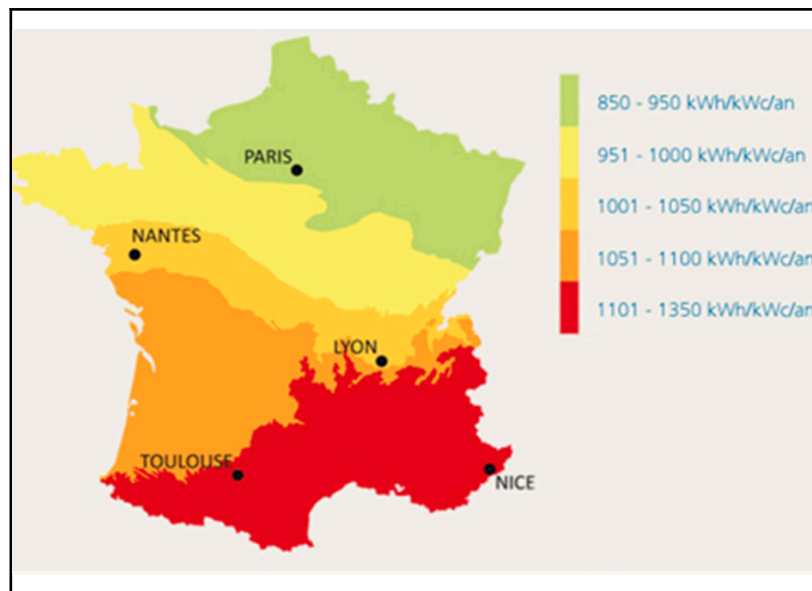
$P_{\text{thermique}}$  : pertes thermiques (par convection, rayonnement et conduction).

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

- des caractéristiques du type de 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 :

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



**Figure 3 : Production électrique annuelle fonction de la puissance installée**

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

En France, le flux solaire moyen varie de 900 à 1300 kWh/m<sup>2</sup>/an soit un flux solaire moyen journalier de 3,8 kWh/kWc. **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.**

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 retrouvait sur la facture d'électricité de tout un chacun sous la rubrique **CSPE** (Charge du Service Public de l'Electricité). Cette aide est maintenant supportée par la **TIPCE** (Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques).

## 4. BALANCE ÉNERGÉTIQUE ET RENTABILITÉ

Comme pour l'éolien, l'intermittence de la production et les variations du rendement (couverture nuageuse) posent des problèmes de régulation du réseau électrique et nécessite de faire appel à une production complémentaire du type centrales thermiques à gaz et hydrauliques qui ont la souplesse nécessaire pour s'adapter aux variations de la production. Deux filières de production d'électricité photovoltaïque sont actuellement développées :

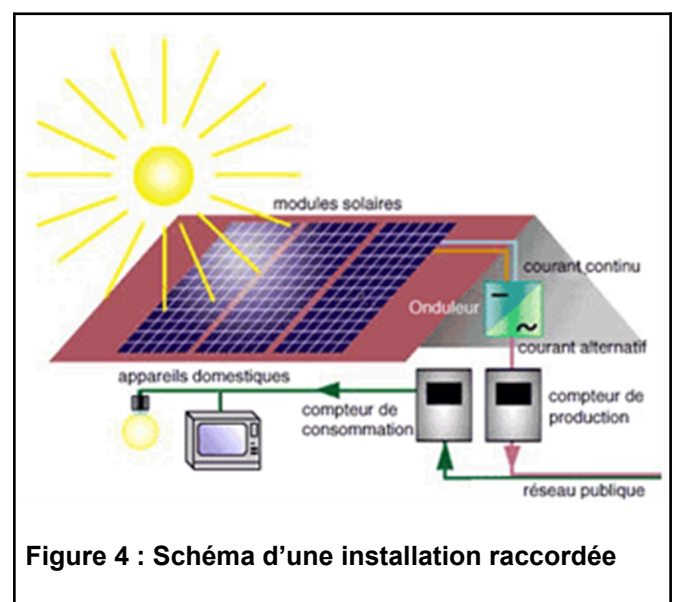
- la production « individuelle » ou « collective » de faible puissance avec ou sans raccordement au réseau,
- les parcs photovoltaïques de grande puissance.

### 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.

À titre d'exemple, on peut citer les habitations de montagne ou éloignées des réseaux de desserte, les refuges, les télétransmissions, 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.



**Figure 4 : Schéma d'une installation raccordée**



## 4.2. LA PRODUCTION « INDIVIDUELLE » RACCORDÉE

Ce type d'installation peut être conçu avec ou sans autoconsommation :

- sans autoconsommation toute l'électricité produite est injectée sur le réseau,
- avec autoconsommation l'électricité produite est en priorité consommée, seul le surplus éventuel est injecté sur le réseau. Ce concept a été mis en place pour favoriser le développement des énergies renouvelables et satisfaire aux recommandations de l'Europe, il réduit les impacts sur le réseau de distribution. La figure 2 donne le principe de fonctionnement d'une telle installation. Ce type d'installation peut être complété par un dispositif de stockage qui permet de minimiser les injections sur le réseau

## 4.3. LES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES DE GRANDE PUISSANCE

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

Une des premières centrales photovoltaïques urbaines en France 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. Cette centrale a été financée par EDF Énergies Nouvelles qui reverse en plus 300.000 € à la société propriétaire du terrain.

En 2022, la puissance de cette centrale a été doublée et comporte désormais 135 000 panneaux solaires occupant une superficie de 60 hectares.

**Figure 5 : Centrale photovoltaïque de Bordeaux-Lac ►**



D'autres réalisations peuvent être citées :

• **La centrale de Cestas** en Gironde qui a été inaugurée en 2015. Elle dispose de 985 000 panneaux solaires pour une puissance globale de 300 MWc. La société NOEN est propriétaire du sol et porteuse du projet. Elle a confié l'exploitation et la maintenance du site à la société Clemessy.

• **la centrale de Toul-Rosières** en Meurthe et Moselle qui a été raccordée au réseau en mai 2022. D'une puissance de 115 MWc, cette centrale est dotée de 1,4 millions de panneaux photovoltaïques de 120 x 60 cm, couvrant une superficie de 120 hectares. Elle a été conçue, développée et réalisée par EDF Énergies Nouvelles qui en assurera l'exploitation et la maintenance pour une période initiale de 20 ans.

**Figure 6 : Centrale de Cestas en Gironde ►**



**Figure 7 : Centrale de Hansainvest en Saxe**



**Figure 8 : Centrale de Toul-Rosières en Meurthe et Moselle**

## 5. DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

On distingue quatre grandes familles de cellules photovoltaïques. Leurs rendements sont en perpétuel progrès (voir également Annexe) :

### • Les cellules au silicium cristallin

Le silicium est extrait de la silice, dont une des formes est le quartz, très abondant dans les sables. Les cellules au silicium constituent plus de 95 % du marché et leur rendement moyen, pour les produits commerciaux, va de 16,5 % à 22 % selon leur technologie.

Avec un traitement à froid, le silicium est formé de plusieurs cristaux (polycristallin). Il est facile à produire et atteint un rendement dépassant 22 % en laboratoire. Fondu, le silicium peut être reconstitué en un grand cristal (monocristallin), avec un rendement jusqu'à 26,6 % en laboratoire. Le prix de ces cellules silicium est devenu très compétitif avec d'autres solutions de production d'électricité ces dernières années. Leur rendement est cependant assez faible.

### • Les cellules en couches minces

Au lieu de couper le silicium en fines plaquettes d'environ 200 microns, il est possible de déposer des matériaux semiconducteurs en couches d'une épaisseur de quelques microns sur un substrat, par exemple du verre ou du plastique. On peut utiliser du tellure de cadmium ou du CIGS (cuivre / indium / gallium / sélénium). Les rendements en laboratoire sont proches de ceux du silicium (22,1 % et 23,3 % respectivement). Le silicium peut également être utilisé en couches minces s'il est sous sa forme « amorphe » (non cristallisée).

### • Les cellules organiques

Fondées sur des molécules ou des polymères de la chimie organique et non plus sur des semi-conducteurs minéraux comme les précédentes, elles commencent à avoir des applications. Leurs rendements sont encore faibles et la stabilité à long terme n'est pas suffisante mais ces cellules pourraient avoir un très bas coût de production. On rencontre aussi des cellules à pigments photosensibles inspirées de la structure végétale, appelées cellules à colorants.

### • Les pérovskites

Les recherches précédentes sur le photovoltaïque organique (OPV) ont conduit à la découverte d'un nouveau type de cellules dites pérovskites. Elles sont fondées sur un matériau hybride avec une partie organique et une partie inorganique. Leurs rendements en laboratoire atteignent déjà celui des autres technologies (le record est 23,7 %).

Même si elles nécessitent encore beaucoup de recherches avant industrialisation car elles présentent des problèmes d'instabilité, elles ont de nombreux avantages : légères, souples, avec la possibilité d'être manipulées sous forme d'encre pour de grands revêtements, elles ont surtout un coût de fabrication peu élevé.

## 6. 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. Elle est généralement 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.

## 7. PERSPECTIVES

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 %.

## 8. 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 d'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 argumentaire GAENA "L'hydrogène"](#)) 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.

## 9. SOURCES

- [1] Connaissance des énergies – Découvrir & comprendre – Les cellules photovoltaïques <https://www.cea.fr>
- [2] Connaissance des énergies – Energie solaire photovoltaïque – Fonctionnement, enjeux...  
<https://www.connaissancedesenergies.org>
- [3] Cellule photovoltaïque – Principe de fonctionnement [planete-energie.com](http://planete-energie.com)

La technologie actuelle met à la disposition des utilisateurs plusieurs types de cellules utilisant différents matériaux photovoltaïques. À 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 (mais utilisée en aérospatial)
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 éclairage.
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 éclairage 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.