

**Ton van der Wekken**

Kema Consulting

Septembre 2010



# Production décentralisée & énergies renouvelables

---

fr.leonardo-energy.org

## Table des matières

<b><u>1. Introduction</u></b>	<b>4</b>
1.1 Définition du sujet .....	4
1.2 Le phénomène physique photovoltaïque .....	4
1.3 Les applications photovoltaïques.....	6
1.4 Applications pour le photovoltaïque et opportunités .....	8
1.5 Statut actuel du PV solaire.....	9
1.6 Fabricants .....	11
1.7 Tendances (marché) .....	11
<b><u>2. Technologie PV</u></b>	<b>12</b>
2.1 Pertes dues au voilage de la lumière incidente .....	13
2.2 Technologie.....	13
2.3 Développements futurs .....	16
<b><u>3. Éléments de coûts et bénéfices</u></b>	<b>17</b>
3.1 Coûts des systèmes PV.....	17
3.2 Bénéfices d'un système PV .....	18
3.3 Coûts futurs .....	18
3.4 Taxes et aides .....	19

# Installations photovoltaïques

---

fr.leonardo-energy.org

<b>4.</b>	<b>Politiques et législations</b>	<b>19</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>6.</b>	<b>Références et bibliographie</b>	<b>21</b>

## 1. Introduction

### 1.1 Définition du sujet

Les installations de production d'énergie d'origine solaire peuvent être séparées en deux catégories : les installations solaires photovoltaïques (PV) pour la production d'électricité et les chauffe-eau solaires pour la production d'eau chaude. Ce guide ne traite que l'énergie solaire photovoltaïque.

Lorsque l'on fait référence à l'énergie solaire, on se réfère le plus souvent au phénomène de production d'électricité. L'électricité solaire est utilisée dans de nombreuses applications, dont les plus connues sont l'alimentation des calculatrices de poche, des éclairages publics urbains déconnectés du réseau d'alimentation, des téléphones d'urgence situés le long des autoroutes alimentés par un ou plusieurs modules PV.

L'énergie solaire est connue du grand public depuis les années 1950/1960 grâce aux programmes spatiaux américains et russes et, dans une moindre mesure, des pays européens. Les satellites et les capsules spatiales étaient en effet équipés de panneaux solaires pour alimenter les installations électriques. Depuis, les applications PV sont progressivement passées du domaine extra-terrestre au domaine terrestre. Les applications les plus répandues concernent aujourd'hui les systèmes domestiques et autres non raccordés au réseau de distribution d'électricité, notamment pour assurer l'alimentation de maisons individuelles et de villages isolés du réseau. Dans la plupart des cas, un dispositif de stockage de l'énergie s'avère nécessaire (le plus souvent par la mise en œuvre de batteries plomb-acide). La production d'énergie PV est aussi souvent dédiée à l'alimentation d'applications spécifiques telles que les pompes à eau, les réseaux de communication à distance, les dispositifs de protection et de sécurité, etc. à des endroits où le réseau électrique n'est pas disponible.

Grâce à la dynamique des applications non raccordées au réseau et de l'attention croissante portée aux énergies renouvelables, on observe, depuis le début des années 1980, une tendance croissante à la connexion des systèmes PV au réseau de distribution et au déplacement des champs d'application des régions rurales et peu développées vers les régions urbaines équipées de réseaux de distribution finement maillés.

Ce guide ne traite que des systèmes PV connectés au réseau de distribution électrique.

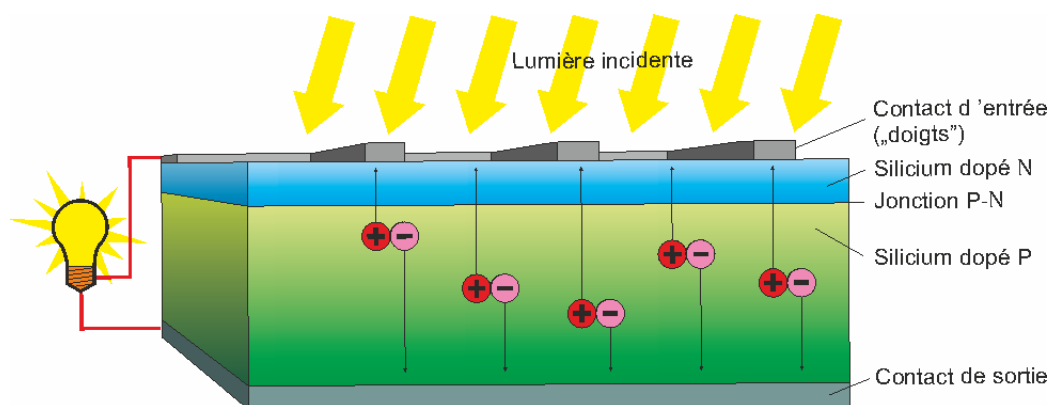
### 1.2 Le phénomène physique photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" ayant pour particularité de convertir la lumière du soleil en électricité.

# Installations photovoltaïques

Le matériau le plus connu et le plus utilisé pour la fabrication des cellules PV est le silicium (Si) sous forme de cristaux. Pour les applications extraterrestres, un matériau plus cher et plus rare, mais offrant un bien meilleur rendement, est utilisé : l'arsenic de gallium (GaAs). Le rendement énergétique du GaAs est bien plus grand que celui des cristaux de silicium.

Les semi-conducteurs ont pour propriété physique de ne contenir qu'un nombre réduit d'électrons libres comparativement aux métaux. L'absorption de la lumière solaire par les matériaux semi-conducteurs entraîne la libération des électrons de leur position prisonnière dans la structure atomique. Les électrons sont alors libres de circuler dans le matériau. Ce phénomène particulier tient du comportement dual de la lumière à la fois ondulatoire mais aussi quantifiable énergétiquement sous forme de paquets d'énergie dits photon. Si l'énergie d'un photon est suffisamment importante, elle peut suffire à libérer un électron de la structure atomique. La conséquence directe de la libération d'un électron chargé négativement est la création d'un trou chargé positivement. Il y a création d'énergie si l'électron libéré est suffisamment éloigné de sa position initiale afin de minimiser le risque de recombinaison de l'électron chargé négativement et du trou chargé positivement.



**Figure 1 : schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Afin de séparer de façon permanente les électrons des « trous », on associe au silicium une membrane de séparation. Cette membrane est située entre deux couches de silicium : l'une dopée au phosphore (type n) et l'autre dopée au bore (type p) [réf. 3]. L'ajout d'atomes de phosphore entraîne une surabondance d'électrons dans la matière alors que l'ajout d'atomes de bore entraîne un déficit d'électrons. Bien que le matériau présente, dans ces conditions, une face chargée positivement et une face chargée négativement, l'ensemble est bien neutre électriquement. Le déséquilibre du nombre d'électrons de part et d'autre de la membrane a pour effet de générer un champ électrique entre les couches dopées (n) et (p). Lorsque la lumière du soleil frappe le silicium, l'énergie des photons a pour effet de libérer les électrons de la structure atomique, le champ électrique est alors responsable de la séparation des électrons chargés négativement et des « trous » chargés positivement.

La couche de silicium dopée et éclairée par la lumière du soleil se comporte alors comme une batterie avec un pôle positif et un pôle négatif. Le niveau de tension entre les

pôles positif et négatif dépend du niveau de dopage. Pour les cellules PV au silicium, cette différence de potentiel est le plus souvent de l'ordre d'environ  $\frac{1}{2}$  Volt. De même que pour les batteries d'accumulateur, le niveau de tension peut être augmenté en connectant des cellules PV en série, et la capacité globale peut être augmentée en connectant les cellules PV en parallèle.

Le plus souvent désigné par le terme "cellules solaires", les cellules PV individuelles sont des dispositifs de production d'électricité fabriqués à partir de matériau semi-conducteur. Les cellules PV existent en différentes tailles et différentes formes, mais les plus répandues sont les cellules connectées en série dans les modules photovoltaïques. Un module d'une surface de 1 m<sup>2</sup> contient approximativement 60 cellules. Plusieurs modules peuvent ensuite être connectés entre eux pour former un système. Par exemple, quatre modules sont nécessaires pour une installation sur le toit incliné d'une résidence. En plus des modules PV, il est nécessaire de mettre en œuvre un onduleur afin de convertir le courant continu (DC), produit par les modules PV, en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau de distribution électrique local.

Le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules PV est le silicium sous différentes formes : monocristallin, polycristallin ou couches fines amorphes.

### **1.3 Les applications photovoltaïques**

Les spécificités du photovoltaïque sont telles que les applications associées diffèrent beaucoup des applications standards des autres sources d'énergie renouvelable telles que l'hydro-électricité, l'éolien, la biomasse ou la cogénération. En effet, ces sources d'énergie renouvelables permettent des applications plus ou moins comparables à celles des énergies fossiles traditionnelles. Les éléments clés à prendre en compte afin d'associer à une application donnée une source de production d'énergie adaptée sont : la taille (nombre de MW installés), la quantité d'énergie récupérable en sortie, la rentabilité de l'ensemble et la présence éventuelle d'un réseau de distribution moyenne ou haute tension à proximité avec une capacité de transport suffisante. Les puissances installées des projets petit hydro, éolien ou biomasse sont communément de l'ordre de 3 à 10 MW et certains sites atteignent même des puissances plus élevées (25 MW ou plus).

Le photovoltaïque offre un intérêt tout particulier dans le domaine du bâtiment avec connexion au réseau de distribution, notamment dans le cadre du BIPV (Building Integrated PV : le photovoltaïque intégré au bâtiment). La taille de ce type d'installation varie de 200 Wc à 5 kWc environ et est le plus souvent intégrée à l'infrastructure existante ou à la structure du bâtiment, qu'il soit résidentiel, tertiaire (bureaux) ou industriel. Les systèmes PV montés sur toiture, par exemple, sont considérés comme faisant partie intégrante de la structure du bâtiment. Dans la plupart des cas, l'électricité produite par l'installation PV est transportée vers le réseau de distribution électrique du bâtiment. Cela implique que lorsque l'installation PV produit de l'énergie, une partie au moins des équipements alimentés électriquement le sont par le système PV sans recours à l'utilisation du réseau. Le surplus de production est alors restitué au réseau.

# Installations photovoltaïques

Avantages BIPV	Inconvénients BIPV
Pas de procédures d'obtention de permis longues et laborieuses.	Systèmes de relativement petites tailles.
Permet de mettre en évidence la sensibilité des occupants ou du propriétaire du bâtiment concerné à l'utilisation rationnelle de l'énergie et, de façon plus générale, aux considérations environnementales.	Non rentables sans avantages fiscaux particuliers.
La production est au plus proche de la consommation (au sein du même bâtiment).	Selon le type de comptage : nécessité de souscrire à un nouveau contrat pour restituer l'énergie au réseau.
Peut être utilisé pour de multiples usages : en plus de la production d'énergie, l'installation PV fait partie du bâtiment en tant qu'élément architectural.	En cas de réduction budgétaire, le PV est l'un des premiers éléments à être supprimé.
Potentiel marché élevé (la plupart des toits des bâtiments peuvent être équipés).	

**Tableau 1 : avantages et inconvénients du BIPV**

Une autre application du PV, moins répandue que les exemples donnés précédemment, est la production d'énergie par le biais d'installations implantées au sol. Ces installations sont comparables aux parcs éoliens : une surface au sol non exploitée et disponible est utilisée à des fins de production d'électricité PV à moyenne ou grande échelle.

Le procédé de développement est comparable au développement d'usine de production basée sur les énergies fossiles ou d'autres types d'énergie renouvelable (éolien ou biomasse) : sélection et achat de la terre, études de faisabilité, procédures d'obtention de permis, financement et maîtrise d'œuvre du projet, connexion au réseau et, enfin, la phase de construction.

Face aux autres énergies renouvelables, les systèmes PV au sol présentent un certain nombre d'inconvénients :

- une surface d'environ 10 000 m<sup>2</sup> est nécessaire par MWc installé ;
- les coûts d'installation au MWc sont très élevés ;
- les procédures de développement et d'obtention de permis ne présentent pas d'avantages particuliers comparativement aux autres énergies renouvelables.

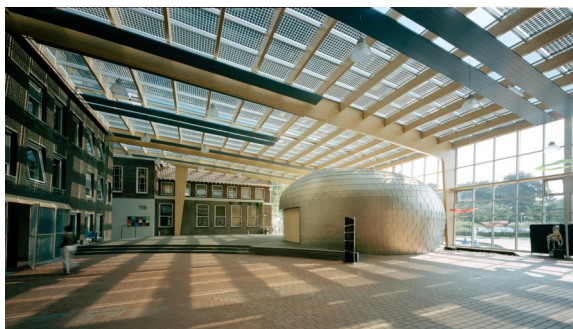
Bien entendu, les avantages du solaire photovoltaïque s'appliquent aux installations au sol : pas de pollution de l'air ni de pollution sonore, pas d'émission de gaz à effet de serre, pas de nuisances visuelles pour le voisinage.

# Production décentralisée & énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

L'avantage indéniable que présente le PV face à l'éolien ou à la biomasse est d'ordre esthétique. Comparativement aux autres sources d'énergie renouvelable, l'aspect visuel des panneaux PV est plus agréable et offre donc de multiples opportunités architecturales.

La surface occupée par un module PV est importante, de l'ordre de 1 m<sup>2</sup> pour une puissance installée de 100 Wc environ, et peut être considérée comme un élément standard de construction.



**Figure 2a : intégration du photovoltaïque dans le bâtiment : modules semi transparents constituant un toit vitré (réf. 5)**



**Figure 2b : système photovoltaïque au sol**

## 1.4 Applications pour le photovoltaïque et opportunités

L'énergie solaire est mondialement considérée comme étant la source d'énergie la plus durable pour le futur. La capacité cumulée de tous les systèmes PV dans le monde atteint à ce jour 4 000 MW, dont la moitié est installée en Europe. Les domaines d'application du PV sont nombreux et conviennent particulièrement aux systèmes isolés, aux applications spatiales, aux systèmes de production d'énergie au sol à grande échelle, ainsi qu'à de nombreuses applications dans le domaine de la construction, ou encore pour l'alimentation d'outils personnels ou d'autres gadgets domestiques. La capacité totale de production d'énergie par le PV a plus que triplé depuis l'an 2000. Cette croissance importante a principalement eu lieu dans le domaine des applications connectées au réseau de distribution.

Environ 15 % de la capacité totale PV est dédiée aux applications non connectées au réseau, bien que ce pourcentage varie fortement selon les pays. L'énergie solaire s'applique donc majoritairement aux applications bénéficiant d'une connexion au réseau. Dans le domaine du bâtiment en particulier, où les systèmes PV sont de petite ou moyenne taille, la solution la plus économique consiste à se raccorder en aval du dispositif de comptage.

La valeur de l'énergie produite par un système PV comprend non seulement les

# Installations photovoltaïques

fr.leonardo-energy.org

économies réalisées sur les quantités d'énergie achetées au distributeur local, mais aussi le tarif de rachat de l'énergie produite et les économies réalisées sur les frais d'acheminement, de gestion, de profit et, dans certains cas, sur la TVA. Le surplus d'électricité produite peut être réinjecté dans le réseau sur la base d'un tarif négocié avec l'opérateur du réseau électrique.

Les applications dédiées à la production d'énergie solaire PV sont aujourd'hui variées, mais sont longtemps restées cantonnées à l'installation de panneaux PV sur les toitures. Aujourd'hui, de nouvelles applications sont apparues telles que les écrans solaires ou l'utilisation de modules photovoltaïques comme éléments constitutifs brise-soleil des façades de bâtiment, ou encore comme éléments des barrières sonores sur le long des autoroutes.



**Figure 3a : élément PV intégré à une barrière sonore [réf. 5]**



**Figure 3b : élément PV intégré à un écran solaire [réf. 5]**

## 1.5 Statut actuel du PV solaire

A la fin de l'année 2005, la capacité totale installée dans le monde représentait 3 700 MWc dont 90 % raccordés au réseau, soit une augmentation de 40 % en comparaison avec 2004. Il convient de noter que ces statistiques ne concernent que les pays membres IEA-PVPS ; toutefois, la contribution des autres pays est considérée comme négligeable [réf. 4].

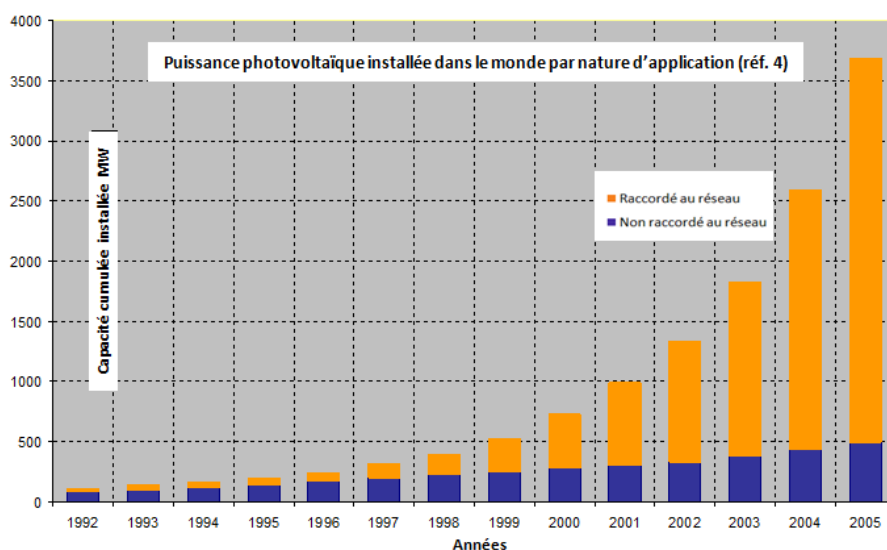
La croissance annuelle du marché photovoltaïque mondial d'ici à 2009 est estimée à 25 ou 30 %, puis à 35 % entre 2010 et 2020.

Le Japon et l'Allemagne dominent le marché à fin 2005, avec 1 500 MWc installés dans les deux pays représentant ainsi 40 % du marché chacun. Le troisième pays sur la liste est les Etats-Unis avec 500 MWc installés fin 2005.

En dehors de l'Allemagne qui s'apprête à prendre la place de leader mondial devant le Japon, les pays européens ont beaucoup de retard.

# Production décentralisée & énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org



**Figure 4 : capacité PV cumulée installée dans le monde [réf. 4]**

La puissance cumulée installée dans les pays européens leaders est listée dans le tableau 2 [réf. 4].

Pays européens	Puissance PV cumulée installée		
	2003 [MWc]	2004 [MWc]	2005 [MWc]
Autriche	16,8	21,1	24,0
France	21,1	26,0	33,0
<b>Allemagne</b>	<b>431</b>	<b>794</b>	<b>1 429</b>
Italie	26,0	30,7	37,5
Pays-Bas	45,9	49,1	50,8
Royaume-Uni	5,9	8,2	10,9
<b>Espagne</b>	<b>27,0</b>	<b>37,0</b>	<b>57,4</b>
Suisse	21,0	23,1	27,1

**Tableau 2 : capacité PV installée dans les pays européens leaders**

Comme cela est représenté dans le tableau ci-dessus, l'Allemagne est le pays européen ayant installé la majorité des systèmes photovoltaïques en Europe. L'Espagne est aussi un acteur important avec 20 MWc installés en 2005.

## 1.6 Fabricants

Nous ferons, dans ce paragraphe, la distinction entre cellules PV et modules PV. Les cellules PV fabriquées à partir de cristaux de silicium sont les composants de base de la production électrique solaire. Un module PV est une association de plusieurs cellules PV connectées en série et présentées sous une forme exploitable. Les modules PV sont disponibles sur le marché pour des dimensions allant de 0,7 x 1,0 à 1,0 x 1,3 m<sup>2</sup>.

Jusqu'en 2005, la croissance annuelle de fabrication des modules et cellules PV était corrélée avec l'augmentation de puissance PV installée. En 2005, la fabrication mondiale de cellules a augmenté de plus de 40 %. Pour la première fois, les fabricants leaders du marché, mais aussi les petits fabricants, ont vu leur production doublée en 2005. Les cristaux de silicium utilisés pour les semi-conducteurs servant à la fabrication des micro-processeurs sont les mêmes que pour la fabrication des cellules PV. La forte demande dans le domaine de l'industrie des micro-processeurs a entraîné une augmentation des prix et une pénurie d'approvisionnement.

Avant 2003, l'entreprise BP Solar était leader du marché mais a été supplantée depuis par des entreprises japonaises détenant 50 % du marché de la fabrication des cellules et modules PV. Les entreprises européennes, principalement allemande et espagnole, détiennent 20 % du marché mais progressent plus vite que leurs concurrents japonais. Les Etats-Unis représentent le troisième plus gros marché mondial. En 2005, alors que le marché européen augmentait de 44 % et le marché japonais de 36 %, le marché américain n'a progressé que de 10 %. La production dans le reste du monde est aussi en expansion : certaines entreprises comme BP Solar ont investi dans des usines de production en Australie et en Inde.

Aujourd'hui, le fabricant leader de cellules PV est Q-cells dont la production a plus que doublé en 2005. Deux autres fabricants allemands : Schott Solar et Sunway ont aussi fortement augmenté leur production en 2005. Les quatre premiers fabricants mondiaux sont tous d'origine japonaise : Sharp, Kyocera, Mitsubishi et Sanyo.

## 1.7 Tendances (Marché)

Du fait de la pénurie de cristaux de silicium en 2005, de nombreux projets ont été ajournés ou même annulés. Il résulte de cet état de fait que les fabricants de cellules solaires ont développé un intérêt croissant pour les modules photovoltaïques en couche mince et pour les concentrateurs photovoltaïques. Les modules en couche mince sont moins gourmands en silicium rare et, bien que les concentrateurs nécessitent aussi l'utilisation de silicium, le rendement est meilleur.

Autre avantage des couches minces (ou films) PV est leur malléabilité et la possibilité de s'adapter à toute forme de surface, ce que les modules classiques ne permettent pas. Les films PV peuvent, par exemple, être intégrés à des textiles ou à des rouleaux de matériaux synthétiques pour les toitures.

# Production décentralisée & énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

Une autre tendance est l'utilisation de système de repérage et d'orientation pour les installations de production d'électricité d'origine photovoltaïque au sol permettant une utilisation plus efficace des modules PV. Ce type de dispositif n'est rentable que pour des installations à forte puissance (de 20 à 30 kWc).

## 2. Technologie PV

Avant de rentrer dans les détails, nous allons donner quelques éléments introductifs et chiffres concernant les cristaux et les couches minces – aussi appelés amorphes – des systèmes PV silicium.

En règle générale, les professionnels du domaine PV ne parlent pas de Watt installés pour un système mais de Watt crête (Wc).

Les niveaux solaires d'irradiation en Europe du nord et en Europe centrale sont de l'ordre de 1 000 W/m<sup>2</sup> à l'exception de la Scandinavie du Nord, et de l'ordre de 1 600 à 1 700 W/m<sup>2</sup> en Europe du Sud. La puissance installée pour les modules à cristaux de silicium est de l'ordre de 100 à 110 Wc/m<sup>2</sup> et de 50 à 60 Wc/m<sup>2</sup> pour les couches minces.

En Europe, l'orientation optimale des modules PV est le sud avec un angle d'inclinaison de 35° par rapport à l'horizon.

Pour le silicium cristallin et amorphe, les rendements moyens et les productions moyennes annuelles sont rapportées dans le tableau ci-dessous. En conditions de laboratoire, il est possible d'obtenir de bien meilleurs rendements.

Matériau de fabrication de la cellule	Rendement de la cellule [%]	Rendement du système [%]	Production annuelle [kWh/m <sup>2</sup> ]
Monocristallin (m-Si)	17	13,5	85 - 90
Polycristallin (p-Si)	15	12	80 - 85
Couche mince (a-Si)	8	6,5	50 - 60

**Tableau 3 : caractéristiques et performances des cellules silicium**

En moyenne, le rendement du système global est de l'ordre de 80 % du rendement de la cellule, du fait des pertes dans les câbles et dans l'onduleur, de la non optimisation des dessins de cellules et de la dérive du spectre lumineux solaire de ces conditions standards.

## 2.1 Pertes dues au voilage de la lumière incidente

Les pertes dues au voilage de la lumière incidente ne sont pas proportionnelles au nombre de cellules ou de modules ombragés de l'ensemble du système. La procédure la plus usuelle consiste à connecter un certain nombre de modules en série, constituant ainsi une ligne, et de connecter les extrémités de cette ligne aux bornes de connexion en entrée de l'onduleur. Le problème qui se pose est que les cellules ombragées se comportent alors comme une résistance dans laquelle l'énergie fournie par les autres cellules de la ligne (exposées au soleil) est consommée sous la forme de chaleur par effet joule. Ce phénomène a pour effet d'augmenter localement la température dans les cellules ombragées du système. Des cycles répétés d'augmentation locale de la température ont pour effet de réduire de façon conséquente la durée de vie des cellules.

Le principe premier à respecter lors de la conception et mise en place d'un système PV est donc de garantir l'absence de voilage de la lumière sur une partie du système. Les cheminées ou autres saillies de toitures sont des exemples types d'obstacles à la lumière pouvant entraîner ce type de pertes.

La plupart des fabricants de modules PV proposent aujourd'hui des produits intégrant des diodes de bypass afin d'éviter qu'un module en partie ombragé ne dissipe l'énergie produite par les autres modules de la ligne.

## 2.2 Technologie

Un système PV est composé des principaux composants suivants :

- cellules photovoltaïques
- modules photovoltaïques
- boîtier de connexion et câbles
- système de contrôle et onduleur
- structure de support

### Cellule photovoltaïque

Les modes de fabrication des cellules les plus communs se font à partir de silicium mono ou polycristallin. Le rendement des cellules monocristallines est sensiblement plus élevé que celui des cellules silicium multi ou polycristallines. Le silicium monocristallin est produit en lingot à partir de cristaux tous identiques, alors que la fabrication du polycristal commence par une phase de mélange en fusion suivi par un procédé de solidification respectant une orientation de structure cristalline prédéfinie et résulte en plusieurs blocs multi cristallin.

# Production décentralisée & énergies renouvelables

---

fr.leonardo-energy.org

Pour la fabrication des cellules PV, les lingots ou les blocs de silicium sont découpés en fines tranches. Les dimensions types des cellules PV sont de 10 x 10 et de 12,5 x 12,5 cm<sup>2</sup>. Les cellules multi cristallines ont une couleur caractéristique bleu acier alors que les cellules monocristallines sont de couleur anthracite. Un écran en aluminium est ensuite appliqué sur la surface.

## **Modules PV**

Le module PV est le bloc élémentaire de tout système PV. Un module PV est composé de plusieurs cellules interconnectées entre elles et conditionnées dans un ensemble protégé par une vitre transparente et une protection étanche.

Les modules peuvent ensuite être montés ensemble sous la forme de cadres. Un module PV contient typiquement entre 48 et 72 cellules connectées en série. Les dimensions types d'un module sont 0,8 x 1,2 et 0,8 x 1,6 m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une puissance de 80 à 150 Wc.

## **Boîtier de raccordement**

La plupart des systèmes PV sont composés de plusieurs modules. Les modules sont connectés en série et/ou en parallèle afin d'obtenir le meilleur compromis courant/tension. Plusieurs modules connectés en série représentent une ligne, et plusieurs lignes connectées en parallèle forment une grille. Pour connecter les modules en série ou en parallèle, la plupart des modules sont équipés de boîtiers de jonction sur la partie arrière.

## **Onduleur**

Les cellules PV, et à fortiori les modules PV, sont des générateurs de tension continue, alors que le réseau de distribution fonctionne en tension alternative. La conversion DC/AC aux caractéristiques tension/fréquence du réseau est réalisée grâce à un onduleur. Les onduleurs dédiés aux applications photovoltaïques intègrent certaines fonctionnalités de contrôle permettant d'optimiser la puissance de sortie. Ces fonctionnalités sont dites de « recherche du point nominal de fonctionnement » (ou encore recherche du point de puissance maximale). La puissance est égale au produit de la tension par le courant :  $P = V \times I$ . La fonctionnalité de recherche du point de fonctionnement optimal consiste à modifier en temps réel l'impédance de la charge (dans ce cas l'onduleur) afin de garantir une puissance de sortie maximale.

Par le passé, un seul onduleur était utilisé pour un module PV ou même pour un système PV entier. Les pratiques ont aujourd'hui changé et il est fréquent d'installer un onduleur par ligne, voire même par module. Les modules équipés de leur propre onduleur sont dits « modules AC ».

## **Structure de support**

Les installations PV dédiées au bâtiment ou à la production d'énergie au sol sont très nombreuses et chacune requiert un mode d'intégration spécifique ou une structure de support. Une gamme étendue de produits a été développée pour faciliter l'installation des modules PV. Dans le domaine du bâtiment particulièrement, les structures de support et de montage ont été conçues pour permettre une intégration parfaite au bâtiment et

# Installations photovoltaïques

fr.leonardo-energy.org

contribuer ainsi à la valeur architecturale et esthétique. Des structures de support spécifiques sont disponibles pour les façades, les toits inclinés, les toits plats et même sous la forme de tuiles pour remplacer les tuiles standards.

Un exemple de conception d'une installation de 5 kWc montée sur toit est donné tableau 4.

<b>Orientation</b>	<b>Pente du toit, 45°, orientation sud ou sud ouest Installation sur le toit d'une résidence familiale ordinaire</b>
Structure de support	Intégré à la couverture du toit au-dessus de la charpente Mesures pour conserver l'étanchéité du toit Profilés de support (aluminium) montés sur la charpente Fixations pour attacher les modules au support
Caractéristiques des modules	Dimensions approximatives 0,8 x 1,6 m <sup>2</sup> Puissance maximale 150 Wc 72 cellules silicium multicristallines 12,5 x 12,5 cm <sup>2</sup> Cadre aluminium MPPT entre 28 et 35 Vdc Rendement du module 13 %
Boîtier de raccordement	A l'arrière de chaque module Diodes de bypass incluses pour s'affranchir des pertes par voilage
Caractéristiques de l'onduleur	Utilisation possible en intérieur ou en extérieur Puissance maximale 2 500 W MPPT entre 220 et 300 Vdc Raccordement possible de 2 lignes au moins Tension de sortie 230Vac à 50 Hz Rendement à 95 %
Agencement du système	32 modules (4x8) Dimensions approximatives 6,4 x 6,4 m (41 m <sup>2</sup> ) Puissance installée 4 800 Wc 4 lignes en parallèle, 8 modules par ligne connectés en série 2 onduleurs de 2 500 W, 2 lignes par onduleur
Production	3 500 kWh par an Le bâtiment est quasiment équilibré électriquement sur l'année
Raccordement électrique du système PV	Deux connexions électriques séparées de 2 500W Deux dispositifs de comptage, l'un pour les équipements ménagers et l'autre pour comptabiliser l'énergie restituée par le système PV ; certains dispositifs de comptage offrent la double fonctionnalité
Durée de vie	Modules et structure de support : 30 ans Etanchéité de l'ensemble : de 20 à 25 ans Onduleurs : de 10 à 15 ans
Éléments financiers	Investissement total : 30 000 €
Durée simple de retour sur investissement :	43 ans à 0,20 €/kWh, tarif de rachat standard 17 ans à 0,50 €/kWh tarif de rachat élevé (aides)

**Tableau 4 : exemple d'installation PV polycristalline de 5 kWc montée sur toit en Europe du Nord ou Centrale**

## 2.3 Développements futurs

Les cellules couche mince sont fabriquées par dépôt de couches extrêmement minces de matériaux photosensibles sur des supports peu onéreux tels que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les cellules couche mince offrent la possibilité de réduire les coûts du fait de l'économie réalisée sur la quantité de matériau semi-conducteur et les pertes associées, et aux plus faibles quantités d'énergie mise en œuvre pour produire les cellules. Le contexte actuel de pénurie de silicium favorise fortement le développement des cellules couche mince. Trois types de matériaux sont aujourd'hui disponibles pour la fabrication des cellules : le silicium amorphe (a-Si), un mélange à base de cuivre, d'indium et de sélénium (CIS), et un mélange (CIGS) fait à partir des mêmes matériaux que le CIS auquel on a ajouté un alliage de l'indium au gallium, ce qui lui confère de meilleures propriétés, et enfin le tellure de cadmium (CdTe).

Le silicium amorphe est le matériau le plus communément utilisé. Le rendement d'une cellule a-Si atteint 7-9 %. Le rendement médiocre des films photovoltaïques implique une puissance installée au m<sup>2</sup> relativement faible (i.e. de 50 à 60 Wc/m<sup>2</sup>) alors que les modules au silicium cristallin permettent d'obtenir les mêmes puissances pour des surfaces deux fois plus petites. Dans les faits, on observe que les projets silicium cristallin sont favorisés par rapport aux projets films fins puisque la plupart du temps, la surface disponible est limitée.

Le rendement relativement médiocre des films fins peut être amélioré grâce à la mise en œuvre de plusieurs couches superposées (deux ou trois). Chacune des couches possède des caractéristiques physiques différentes et ne réagissent pas aux mêmes gammes de fréquences du spectre solaire. Les rendements de panneaux PV de ce type avec trois couches superposées peuvent être de l'ordre de 13 %. Il existe aussi d'autres types de films fabriqués à partir de matériaux tels que le silicium micro cristallin ( $\mu$ -Si), le tellure de cadmium (CdTe) et un mélange de cuivre, d'indium et de sélénium (CIGS).

Outre les panneaux photovoltaïques à base de cristaux de silicium ou sous forme de films fins, il existe aussi des panneaux fabriqués à partir de deux autres types de cellules à haut rendement : les concentrateurs PV à haut rendement et les technologies solaires sphériques. La technologie des concentrateurs (CPV) consiste à utiliser un agencement de miroirs et de lentilles dans le but de concentrer le plus de lumière sur la cellule PV. Les concentrateurs Pv ont un rendement de l'ordre de 20 % ou plus. L'inconvénient majeur de ce type de technologie est la l'obligation de respecter un alignement parfait des cellules avec la lumière incidente du soleil, ce qui nécessite la mise en place d'un dispositif de repérage et d'alignement très coûteux et difficile à mettre en œuvre dans le domaine du bâtiment.

La technologie solaire sphérique utilise des perles de silicium positionnées sur une feuille d'aluminium constituant ainsi une matrice. Cet agencement permet des économies importantes sur le silicium utilisé. Les cellules solaires sphériques ne sont apparues que récemment sur le marché et ont un rendement de l'ordre de 11 %.



Figure 5a : modules a-si montés sur toit [réf. 5]



Figure 5b : concentrateur PV

## 3. Éléments de coûts et bénéfices

### 3.1 Coûts des systèmes PV

Depuis 1995, on observe une réduction progressive des coûts des systèmes PV due en partie à l'accroissement des rendements de ce type de technologie mais aussi par économie d'échelle réalisée grâce à la mise en place de systèmes de production de plus forte puissance.

Dans les années 1990, le coût approximatif d'un système PV installé en Europe était de l'ordre de 15 €/Wc. Dix ans plus tard, ce coût est ramené à 5 €/Wc. La récente pénurie de silicium a entraîné une augmentation des coûts, faiblement compensée par la chute des prix des onduleurs.

En 2005 et 2006, le coût clé en main d'un système PV d'une puissance inférieure à 10 kWc est de l'ordre de 6 à 6,5 €/Wc et pour les systèmes de puissance plus importante de l'ordre de 5,5 à 6 €/Wc.

Pour un système PV de taille moyenne, la décomposition des coûts est la suivante (tableau 5) :

Composants PV	Coûts [€/Wc]
Modules	4,0 – 4,5
Onduleur	0,5 – 1,0
Balance de système (BOS)	1,0
<b>TOTAL</b>	<b>5,5 – 6,5</b>

Tableau 5 : décomposition des coûts d'un système PV

La balance de système fait référence au système complet sans les modules. Toutefois, dans la décomposition présentée ci-avant, la balance de système regroupe l'ensemble du système sans les modules ni les onduleurs.

## 3.2 Bénéfices d'un système PV

Le coût de l'électricité d'origine solaire est approximativement de 0,5 €/kWc en Europe Centrale et en Europe du Nord, et de 0,4 €/kWc en Europe du Sud. Malheureusement, le tarif de rachat est beaucoup plus faible dans la plupart des autres pays européens. Par ailleurs, les autres énergies renouvelables ont des tarifs de rachat de l'ordre de 0,1 €/kWc, ce qui implique que les temps de retour sur investissement des systèmes PV sont plus longs que les durées de vie.

Il en résulte donc que, si les aides allouées à la production d'électricité d'origine PV ne sont pas suffisantes pour mettre en place un projet économiquement viable, d'autres applications doivent être envisagées. Le domaine du bâtiment est particulièrement adapté en ce sens qu'il offre des fonctionnalités supplémentaires à la seule production d'électricité :

- partie intégrante du bâtiment : toiture, écran solaire, élément de façade, etc.
- fonction esthétique ou architecturale, voûte, façade, ou rideau
- reflète une image, une conscience environnementale d'une entreprise, d'un propriétaire ou d'un occupant

## 3.3 Coûts futurs

Dans les années 1990 et au début des années 2000, le coût clé en main des systèmes PV a chuté de 7 à 10 % en un an et ce, à cause de la chute des coûts de production et à l'économie d'échelle ainsi réalisée. Cette tendance a été contrariée en 2004-2005 par une pénurie de cristaux de silicium dans l'industrie des semi conducteurs.

Les espoirs du secteur PV solaire repose sur les films PV nécessitant moins de matériaux coûteux et rares. Toutefois, du fait du mauvais rendement de ce type de technologie, le coût au Wc est comparable au panneau à cristaux de silicium.

Dans les années à venir, le coût du silicium cristallin devrait se stabiliser, voire même diminuer à hauteur de 5 % / an. Les économies dans le domaine PV sont attendues via l'amélioration des rendements des modules à couche mince. D'importantes améliorations des rendements des cellules ainsi que l'augmentation des volumes de production, et les économies liées au facteur d'échelle associées, devraient permettre une réduction importante des temps de retour sur investissement. Des réductions de coûts de l'ordre

de 10 % devraient être possibles. Toutefois, même si ces hypothèses s'avéraient réalisables, les temps de retour sur investissement seraient encore d'une dizaine d'années sans aides extérieures.

Il en résulte que le coût de projets de production d'énergie renouvelable, et particulièrement des projets PV, sans bénéficier d'aides extérieures et selon le prix de rachat de l'électricité produite, devra être de l'ordre de (ou inférieur à) 1 €/Wc installé pour que les projets soient rentables.

### **3.4 Taxes et aides**

A ce jour, le solaire photovoltaïque n'est pas une technologie rentable de production d'électricité. Les aides provenant des autorités locales, des services publics et des gouvernements nationaux et de l'Union Européenne sont donc essentielles pour promouvoir les applications PV à grande échelle.

La raison principale justifiant la mise en place d'aides est que l'énergie PV est une énergie propre ne dégageant pas de gaz à effet de serre ou autre type de pollution.

En Allemagne et en Espagne, les aides ont permis la mise en place de nombreuses installations PV raccordées au réseau de distribution. En Allemagne, le tarif de rachat est de 0,55 €/kWh pour les petites installations (principalement dans le domaine du bâtiment) et de 0,45 €/kWh pour les usines de plus forte puissance (installations PV au sol). En Espagne, pour des installations jusqu'à 100 kWc, le tarif de rachat est de 0,4 €/kWh environ et de moitié pour les installations de puissance plus élevée. En France, de telles aides existent.

Les autres pays européens n'ont pas de tarif de rachat spécifiques pour le PV ou les aides mises en place ne sont pas suffisantes pour rendre ce type de projet rentable.

## **4. Politiques et législation**

La Commission européenne a voté l'ambitieux projet d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie. Le document principal faisant état des politiques européennes en la matière est le livre blanc concernant les énergies renouvelables de novembre 1997 [réf. 1]. L'objectif est d'atteindre 12 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables d'ici 2010. Le livre blanc recommande à ces fins une puissance de 3 000 MWc provenant d'installations PV raccordées au réseau. L'Association Européenne des Industries Photovoltaïques (EPIA) a revu ce chiffre à la hausse et recommande une puissance de 4 000 MWc [réf. 2] au regard de la capacité installée actuelle.

En règle générale, l'Union européenne soutient et contribue au développement de la législation dans le but de promouvoir l'exploitation des sources d'énergie renouvelable grâce à la mise en place d'objectifs, d'obligations et de programmes d'aides financières.

## 5. Conclusion

Ce guide ne traite que de l'énergie PV solaire pour la production d'électricité. Bien qu'encore très réduite, il est admis que l'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus viable pour le futur.

Les champs d'application du PV sont très variés et peuvent être appliqués aux systèmes indépendants, aux applications spatiales, aux systèmes de fortes puissances installés au sol, à diverses applications dans le domaine du bâtiment, et à des applications pour des équipements électroménagers ou autres gadgets.

La façon la plus usuelle d'utiliser l'énergie produite est d'alimenter le réseau de distribution. L'intérêt du raccordement au réseau est particulièrement vrai pour les applications du bâtiment et l'on parle alors de PV intégré au bâtiment (BIPV).

En Europe, le potentiel offert par le BIPV est immense : toitures des usines, des bureaux et des immeubles, particuliers, etc. Un autre intérêt du BIPV réside dans le fait que l'utilisation de l'électricité se fait au plus proche du point de production, ce qui permet d'éviter les pertes en ligne.

La plupart des cellules et modules PV sont produits à partir de cristaux de silicium. Ces dix dernières années, le coût des systèmes PV a diminué d'à peu près 70 % (de 15 €/Wc au début des années 1990 à 5 €/Wc au début des années 2000). Le coût a récemment augmenté de 10 à 20 % du fait de la pénurie en cristaux de silicium.

Les espoirs dans le domaine reposent aujourd'hui sur les films fins amorphes, nécessitant moins de silicium et offrant ainsi de meilleures perspectives pour le futur.

Les installations PV raccordées au réseau ne sont pas rentables de nos jours et des aides sont nécessaires pour promouvoir les applications à grande échelle de l'électricité d'origine solaire.

## 6. Références et bibliographie

- [1] Energy for the future : Renewable sources of energy – White paper for a community strategy and action plan, COM (97) 599 final, 27 Nov. 1997, European Commission
- [2] Renewable energy in European Union Policies, G. Hanreich, European Commission DG TREN, 2002
- [3] From sunray to solar power (In Dutch: “Van Zonnestraal tot zonnestroom”), ECN, The Netherlands, 2006
- [4] Website [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org), statistics on PV by the International Energy Agency, working group PV Power Systems, 2006
- [5] Photographs by courtesy of SenterNovem, Dutch agency of Ministry of Economic Affairs on sustainable development and innovation