

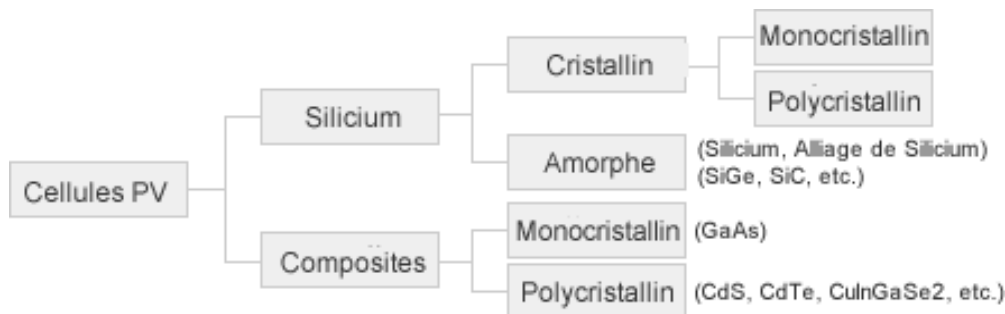
**Introduction :** Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

## **2- LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE**

La première *cellule photovoltaïque (ou photopile)* a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.



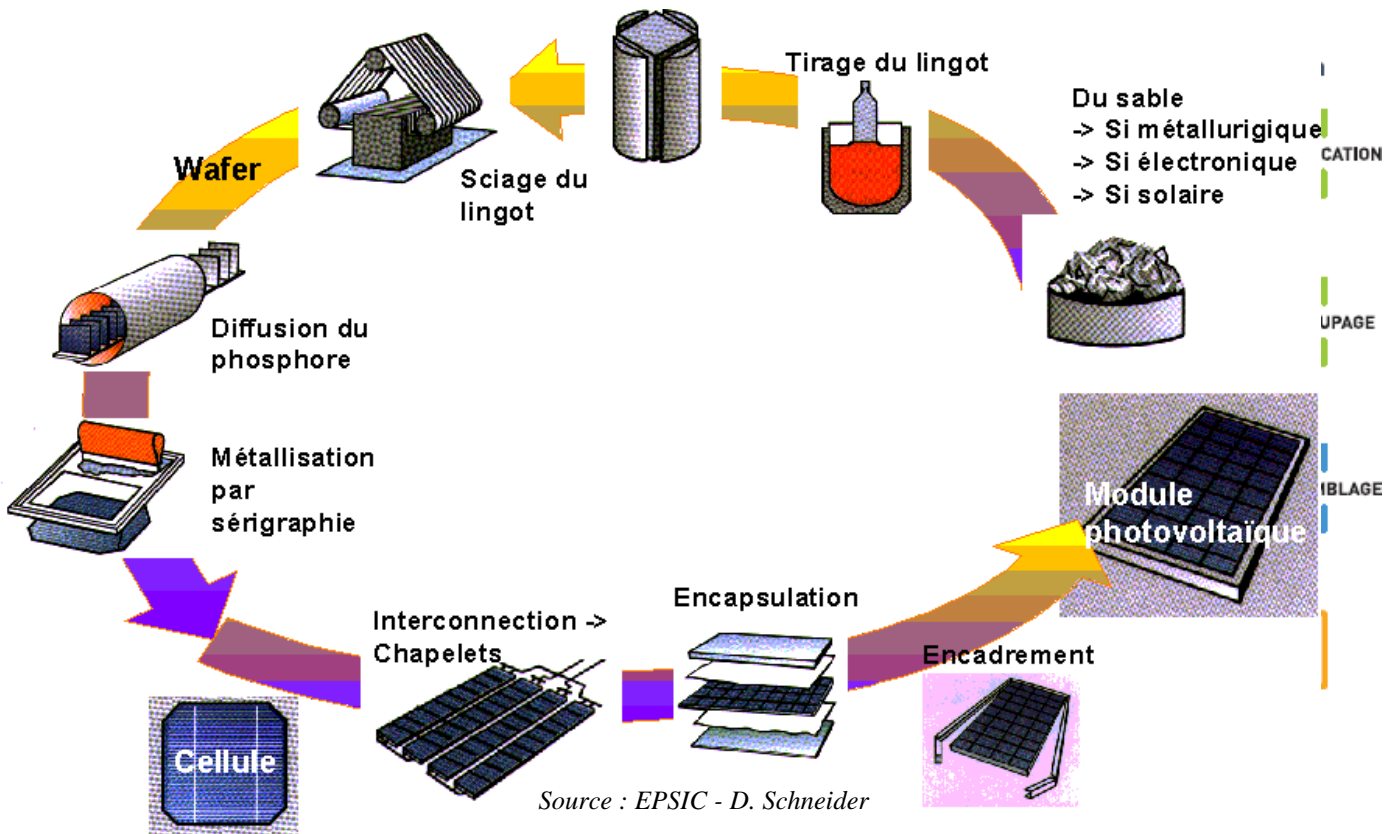
### **Les différentes technologies**



Il existe un grand nombre de technologies mettant en oeuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

*Les modules photovoltaïques au silicium*  
 Processus de fabrication :

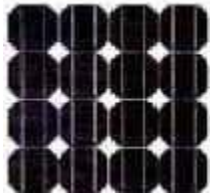


Le [silicium](#) est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzueux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes ([wafers](#)). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

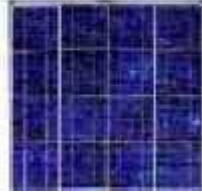
La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.



Les cellules monocristallines et polycristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total. La pénurie actuelle (2006) de silicium de qualité, a créé une tension sur le marché et une augmentation du prix des cellules.



Les panneaux PV avec des **cellules monocristallines** sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.



Les panneaux PV avec des **cellules polycristallines** sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans. *Un **cristal** est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.*



Les modules photovoltaïques **amorphes** ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surface à bas coût en utilisant peu de matière première. *Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphes.*

Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (29 et 51% de la production mondiale).

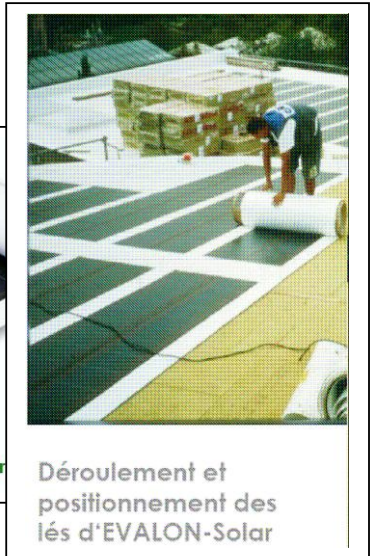
### ***Les autres modules photovoltaïques composites et organiques***

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques unes d'entre-elles.

#### **Thin film au silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium)**

Le thin film met en oeuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents. Les cellules thin film sont plutôt utilisées pour des applications "courant faible". Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température. Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules CIS qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.

## Les cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique ; Technologie Flexcell



### Comparatif des différentes technologies

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium mono cristallin</b>	12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Très performant</li> <li>* Stabilité de production d'W</li> <li>* Méthode de production coûteuse et laborieuse.</li> </ul>	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
<b>Silicium poly cristallin</b>	11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Adapté à la production à grande échelle.</li> <li>* Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.</li> </ul>	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.</li> <li>* Fonctionnement si faible luminosité.</li> <li>* Fonctionnement par temps couvert.</li> <li>* Fonctionnement si ombrage partiel</li> <li>* La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</li> </ul>	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
<b>Composite mono cristallin (GaAs)</b>	18 à 20% <i>(27.5% en laboratoire)</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>* Lourd, fissure facilement</li> </ul>	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
<b>Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)</b>	8% <i>(16% en laboratoire)</i>		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

---

### *Les modules PV double face*

Certain fabricants proposent des panneaux solaires **comportant des cellules solaires sur les deux faces, sur la face avant exposée au soleil et sur la face arrière du panneau**. Les cellules sont en général montées sur une vitre, encapsulées dans un cadre aluminium. Ces panneaux sont adaptés aux sites ayant des albédos importants des lacs, mers, les déserts, les surfaces enneigées. La puissance du module double face est le double de la puissance du même module simple face mais l'énergie moyenne annuelle produite par le module double face n'est que supérieure que de 10 % plus élevée à celle produite par le même module simple face (le coût d'investissement par contre a presque doublé !!).

*Albédo* : capacité d'une surface à réfléchir la lumière notamment celle du soleil. (on l'exprime par un chiffre compris entre 0 et 1 ; 1 pour un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue ).