

L'énergie solaire

Enjeux et perspectives

Contexte français

Systèmes et composants

**Vue d'ensemble**

Modules photovoltaïques

Onduleurs

Raccordement au réseau

Normes, guides et sécurité

Exploitation

Métiers et formations

Galerie de réalisations



Particuliers

Collectivités territoriales

Entreprises

Exploitants agricoles

Copropriétés

**Investir collectivement****Dans la rubrique "Vue d'ensemble" :**

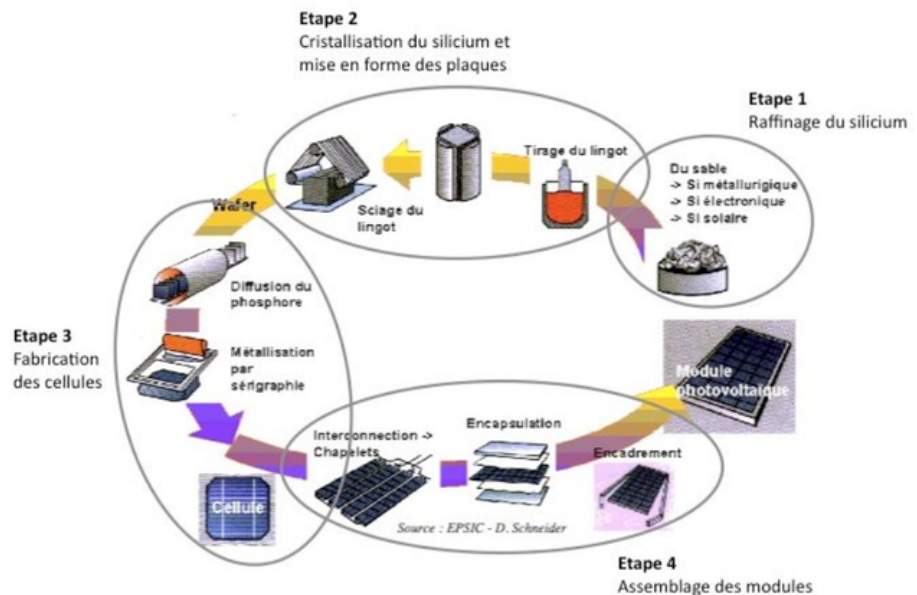
- Rendement d'un système photovoltaïque
- Points clés pour une installation plus performante
- Outils logiciels pour la conception
- **Techniques de fabrication des systèmes**

## Techniques de fabrication des systèmes

Le processus de fabrication standard des systèmes photovoltaïques présente plusieurs étapes. **Les explications qui suivent valent pour la filière silicium cristallin.** En 2011, 88% du marché photovoltaïque était en effet encore basé sur les technologies du silicium cristallin. Chacune de ces étapes est décrite plus en détail dans le document "**systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental**".

**Sommaire :**

- **Etape 1 : Raffinage du silicium**
- **Etape 2 : Cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques**
- **Etape 3 : Fabrication des cellules**
- **Etape 4 : Assemblage des modules**
- **Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque**
- **Liens utiles**



Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques

source : EPSIC - D.Schneider

### Etape 1 : Raffinage du silicium

En 2010, la production de silicium polycristallin a été de 145 000 tonnes, dont 83% pour l'industrie solaire (source US Geological Survey). (Attention : on utilise souvent abusivement le terme polycristallin pour parler des modules multicristallins, or le silicium polycristallin n'intervient qu'au début pour ensuite être transformé en silicium monocristallin ou multicristallin). Sur la base d'un besoin de 15t/MWc, l'industrie photovoltaïque a produit 8 GWc de panneaux photovoltaïques à base de silicium cristallin. L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes :

- La transformation du quartz en silicium de **grade métallurgique** ou **MG-Si**.

Elle est réalisée dans un four à arc, outil typique de l'industrie métallurgique. La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99%.

- La purification du silicium métal en silicium de **grade solaire** ou **SoG-Si**, d'une pureté de 99,9999%.

Elle est réalisée par le procédé Siemens, hérité de l'électronique et utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium polycristallin ou poly-Si. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques. Le procédé Elkem notamment, sont explorées.

## Etape 2 : Cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques

A ce stade et jusqu'à la fabrication du module sont mis en jeu des savoir-faire propres à l'industrie photovoltaïque.

Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium.

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement par le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot.

Pour la cristallisation, trois grandes voies sont possibles, selon le choix technologique fait par le fabricant.

- Le tirage Czochralski, pour donner des lingots cylindriques de **silicium monocristallin (sc-Si)**.



Lingots de silicium monocristallin  
source:Hespul

Le silicium monocristallin est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski ou CZ. Les cellules finales du silicium monocristallin ont un des meilleurs rendements (15%), mais pour une plus grande dépense énergétique à cette étape.

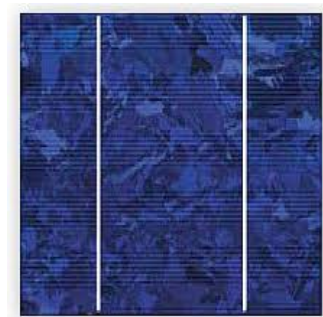
- La solidification directionnelle donne des briques de **silicium multicristallin (mc-Si)**.

Le silicium multicristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore, et le rendement final des cellules est d'environ 12%.

**Le sciage des plaques (mc-Si et sc-Si) :** Les lingots monocristallins et les briques multicristallines sont après la première étape découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 µm. L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension. Il faut souligner une perte importante de matériau lors du sciage (30 à 40% non recyclé). Sur les schémas, on remarque que les coins du silicium monocristallin sont arrondis car la plaque est découpée dans un lingot cylindrique.

- Le tirage de ruban pour donner du **silicium multicristallin** en ruban.

Cette dernière option technologique combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte matière. Il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium sur un support plan ou tubulaire à partir d'un bain de silicium fondu.



Plaque de silicium multicristallin

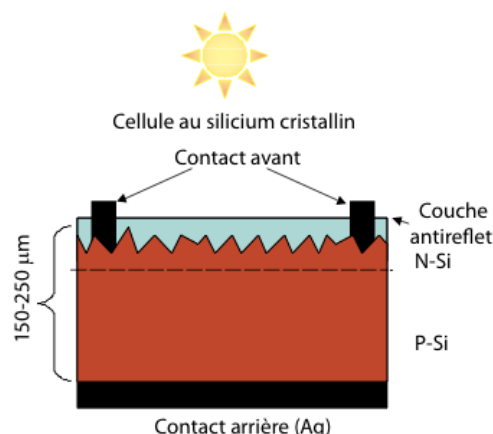


Plaque de silicium monocristallin

## Etape 3 : Fabrication des cellules

Une fois les plaques découpées vient la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de **semi-conducteur** du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

La plaque doit être de l'ordre d'une centaine de microns pour absorber les photons incidents. La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium et joue aussi le rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. La zone avant est dopée n+. Une couche anti-reflet est déposée dessus.



**Cellule au silicium cristallin**

Source : Découverte n°344-345 janvier-février 2007

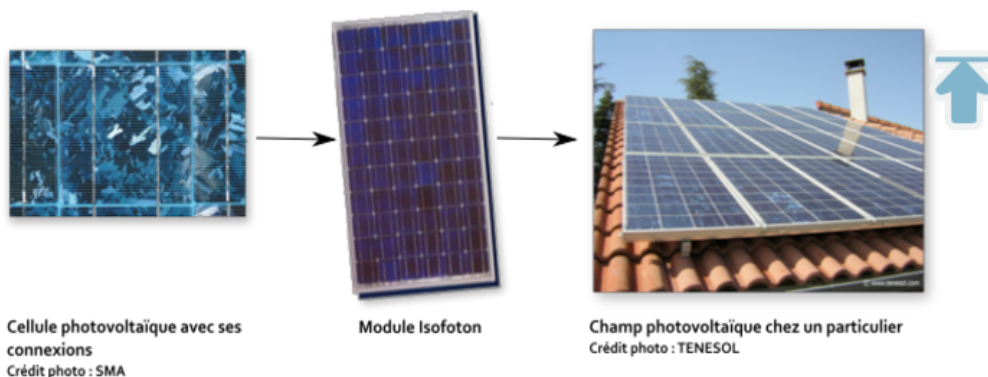
**Etape 4 : Assemblage des modules**

La fonction des modules est de protéger les cellules du milieu extérieur et de faciliter leur mise en œuvre, tout en limitant le plus possible les pertes optiques et les baisses de rendement dues à l'échauffement des cellules en fonctionnement.

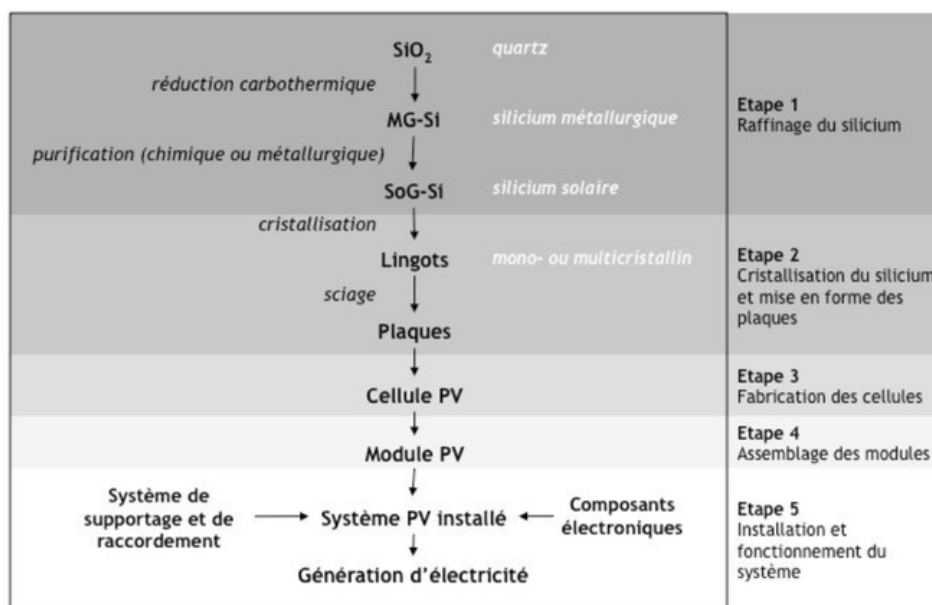
1. Les cellules sont tout d'abord raccordées en plusieurs chaînes pour former une matrice finale.
2. L'encapsulation de la matrice est réalisée par laminage à chaud : les feuillets sont montés en température et pressés sous vide. Le film d'EVA placé entre le verre (face avant) ou le tedlar (face arrière) et les cellules assurent la cohésion de l'ensemble.
3. Selon les cas le module est encadré. Il est ensuite équipé d'une boîte de jonction permettant son raccordement électrique.
4. Les modules sont enfin soumis à un test sous lumière artificielle calibrée afin de mesurer leurs caractéristiques électriques réelles.

**Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque**

Le système intégré en toiture comprend également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.



Les différentes étapes sont finalement celles-ci :



Étapes dans la fabrication d'un système photovoltaïque

Source : Hespul

**Liens utiles****Publications :**

- **Les technologies du photovoltaïque - SER - 2012** (PDF - 1.3 Mo)
- **Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental** (PDF - 1.8 Mo)

Dernière mise à jour : 23 août 2012