

# La fabrication des cellules photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé **effet photovoltaïque** qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

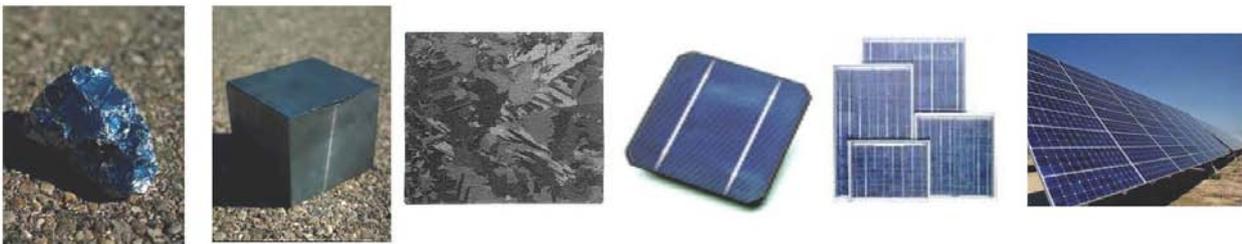
- Les cellules dites  **cristallines (poly et mono)**
- Les cellules dites  **couches minces**

Le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui est le silicium. Nous évoquerons donc uniquement le silicium dans cette présentation, mais d'autres semi-conducteurs existent tel que le sélénium, le tellure de cadmium, etc.

## La fabrication des cellules photovoltaïques en 4 étapes :

1. [La silice: matière première d'une cellule photovoltaïque](#)
2. [Extraction purification du silicium photovoltaïque](#)
3. [Obtention des lingots de silicium](#)
4. [Obtention des wafers photovoltaïques](#)
5. [Le dopage et jonction P-N](#)

### ■ De la silice au silicium...



Silicium purifié    Lingot    Wafer    Cellule    Module    Systèmes

Procédé chimique  
de purification

Moulage  
Sciage

Traitement  
De surface

Lamination

## 1. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque



La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique  $\text{SiO}_2$ . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre.

La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),
- Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites) (Les *roches métamorphiques* sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.
- Les roches magmatiques.



L'extraction de la silice s'effectue dans des carrières de silice.

En 2010, la production annuelle des carrières de silice en France s'élève à environ 8 millions de tonnes.



La photo ci-contre est une carrière de silice en Haute-Savoie (France).



La photo ci-contre est une carrière de sable silice à Fontainebleau (France). Considérés comme un des meilleurs gisements mondiaux de sables siliceux, avec celui de Mol en Belgique, ces sables s'étendent de Nemours à Etampes et Dourdan sur près de 50 km.

Il y a 33 millions d'années, la mer envahit la région parisienne et dépose 60 m de sable dans la région d'Etampes : ce sont les sables de Fontainebleau.

Les gisements fournissent des sables fins blancs de très grande pureté (97 à 99 % de silice).

# La fabrication des cellules photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé **effet photovoltaïque** qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

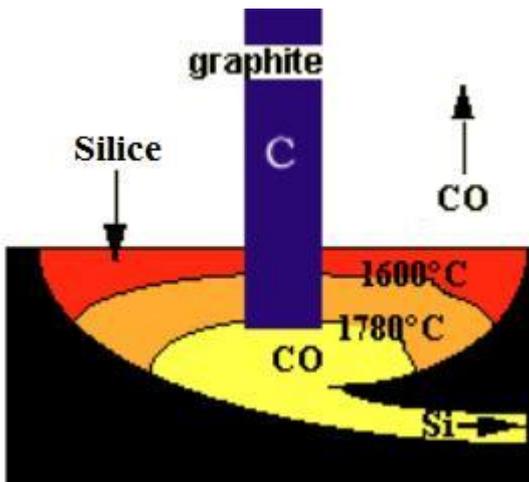
- Les cellules dites **cristallines**
- Les cellules dites **couches minces**

## 2. Extraction et purification du silicium

### Extraction du silicium à partir de la silice

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium (Si) est donc extrait de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :  $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}$

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.



En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %.

Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

### Purification du silicium



Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium.

Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 % :

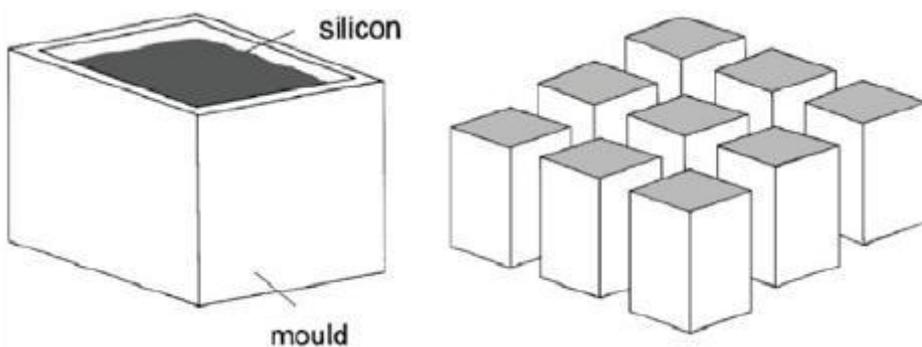


### 3. Obtention des lingots de silicium

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issue de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

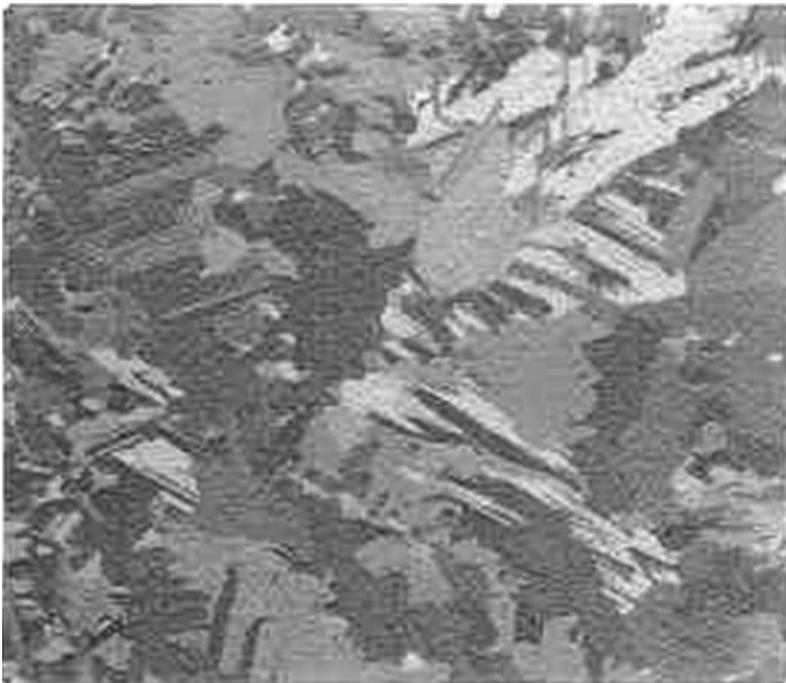
#### • *Le silicium polycristallin*

Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergivore.



Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures.

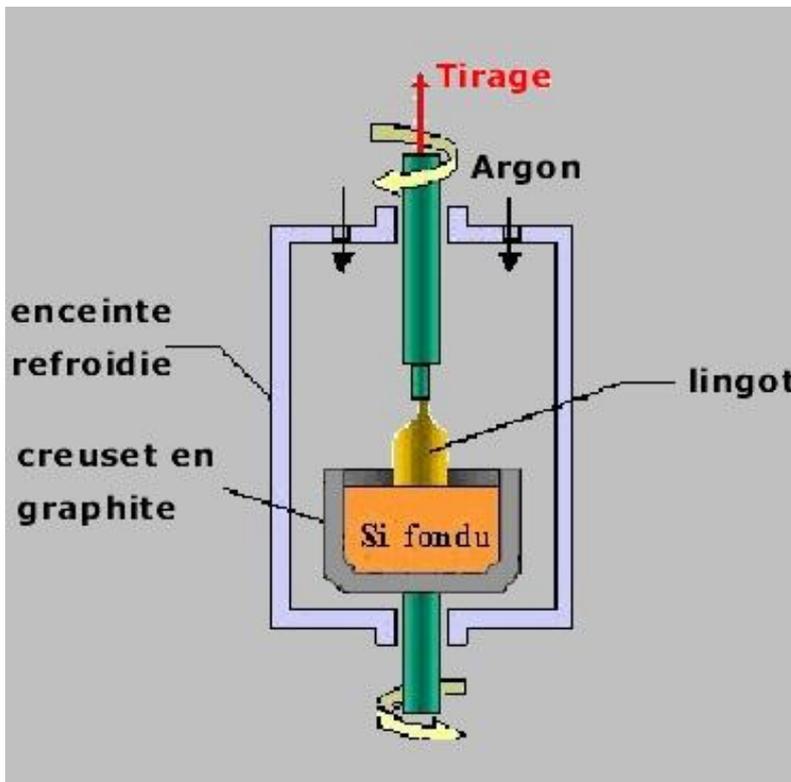
On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.



Le silicium polycristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes.

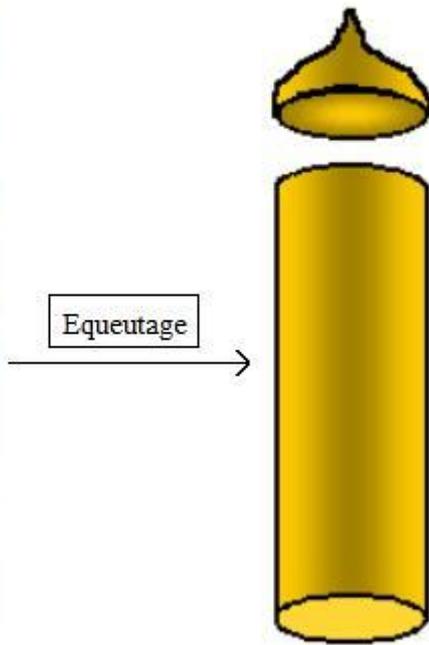
#### • *Le silicium monocristallin*

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse.



Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise.

Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique.



L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production.

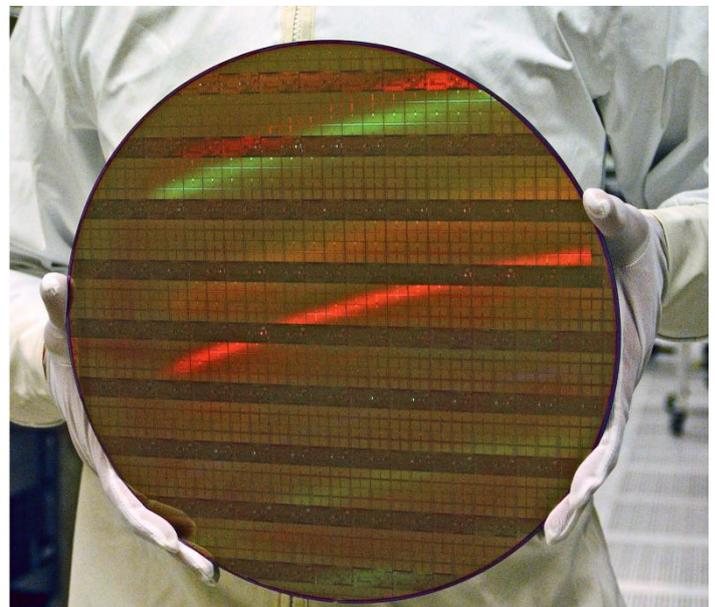
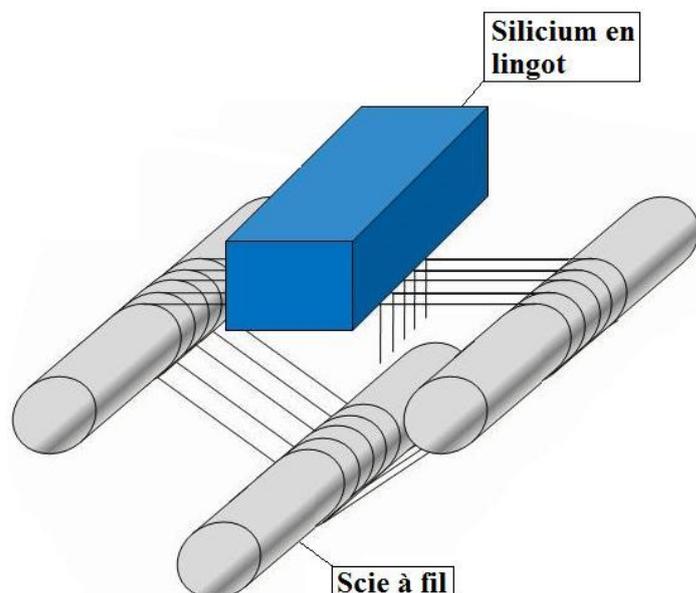
Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire.

#### 4. Obtention des wafers photovoltaïques

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil.

Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300  $\mu\text{m}$ ), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200  $\mu\text{m}$  à 240  $\mu\text{m}$ , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310  $\mu\text{m}$  à 350  $\mu\text{m}$ ).

Avec une scie à fil, il faut donc 570  $\mu\text{m}$  de silicium pour produire une tranche de 350  $\mu\text{m}$ . L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques.



## 5. Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage.

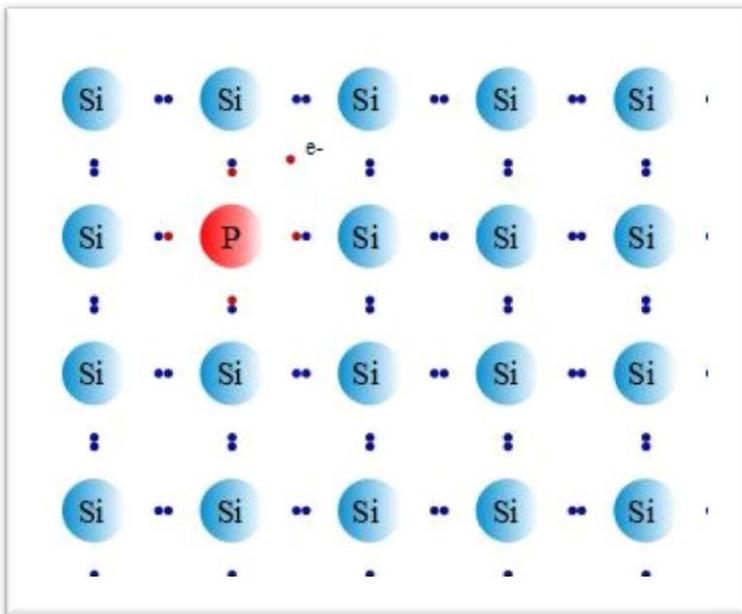
### Qu'est-ce que le dopage ?

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque".

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

### Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.



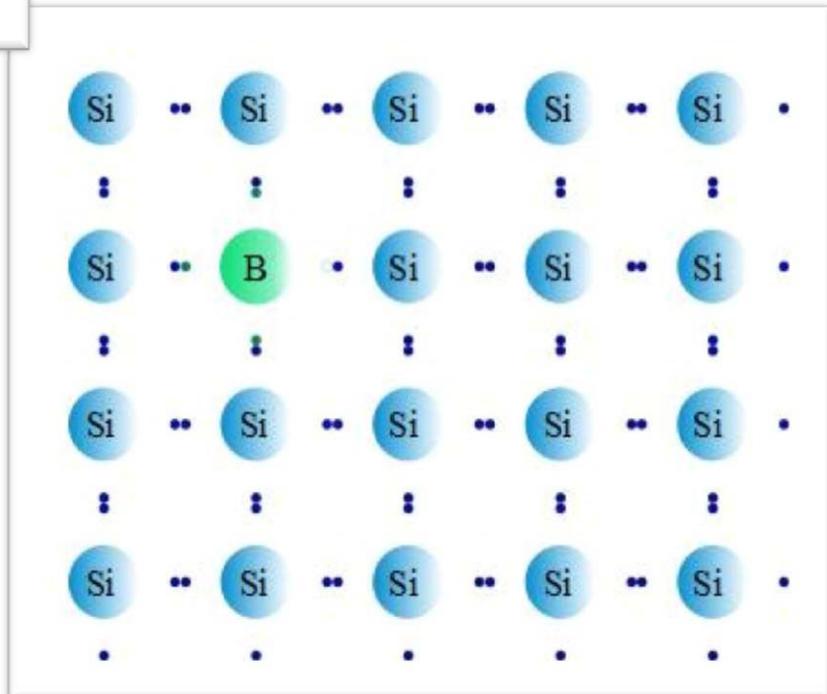
### Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou :

Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

### Les 3 méthodes de dopages :

- LA DIFFUSION - On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.
- LE CROISSANCE EPITAXIALE - Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200 °C.
- LE BOMBARDEMENT IONIQUE - Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un



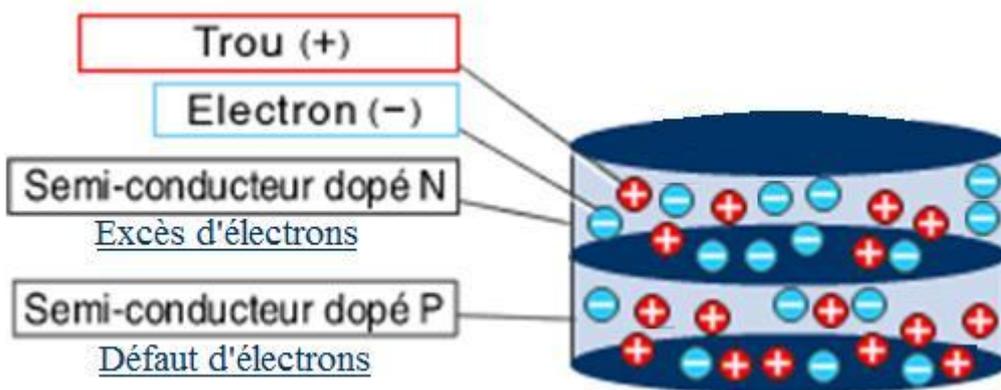
contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente.

La filière photovoltaïque utilise majoritairement le dopage par diffusion.

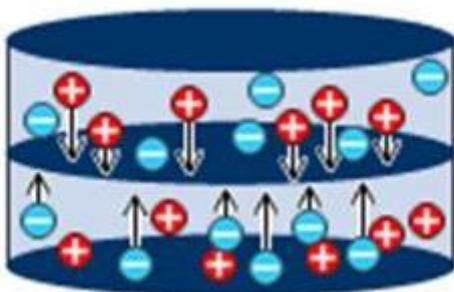


Dans le processus de fabrication d'une cellule photovoltaïque, les wafers, obtenus par sciage des lingots de silicium purifié, subiront soit un dopage de type N soit un dopage de type P.

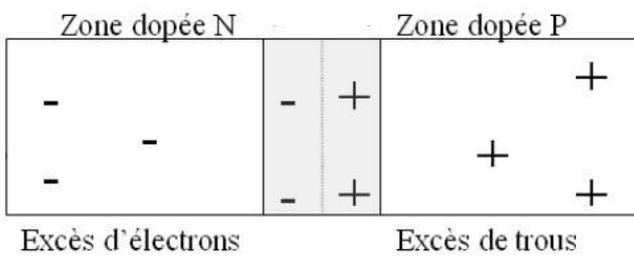
La suite du procédé est d'associer un wafer dopé N avec un wafer type P :



Les électrons en excès de la région dopé N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.

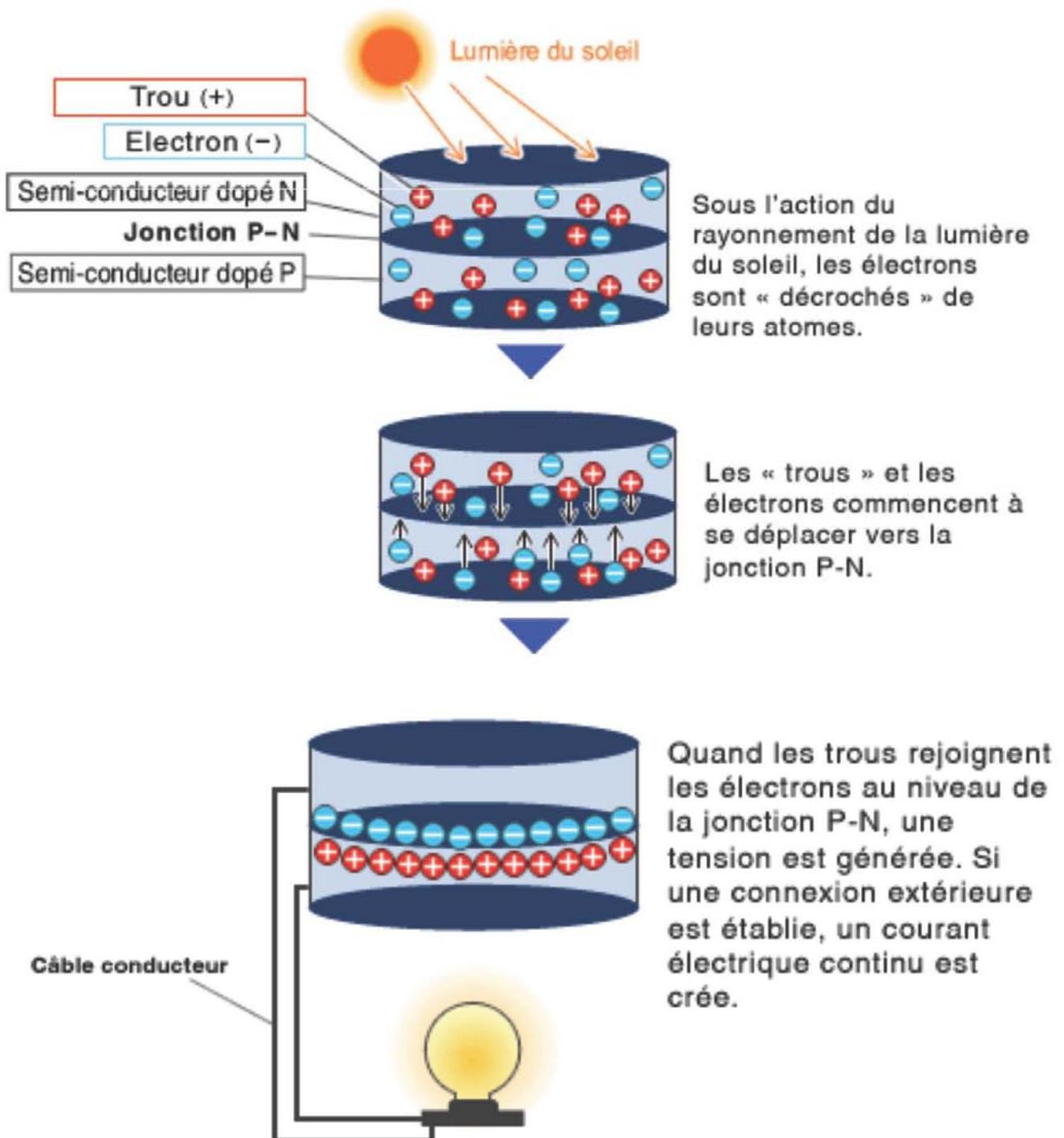


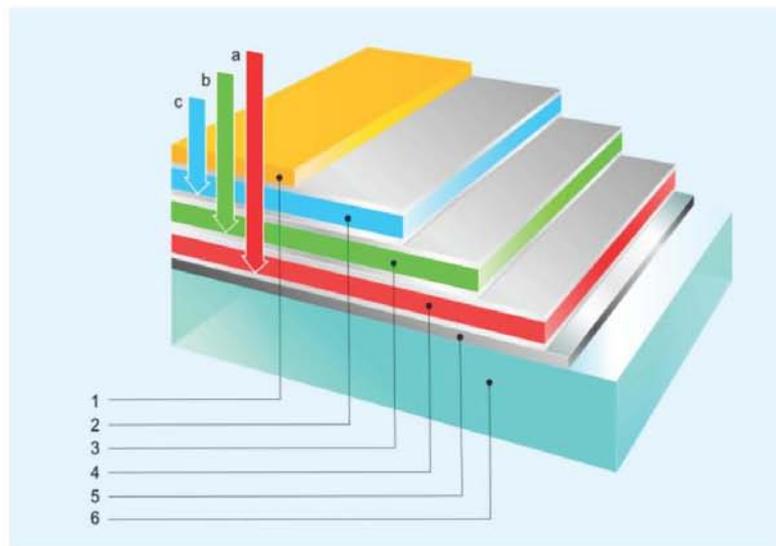
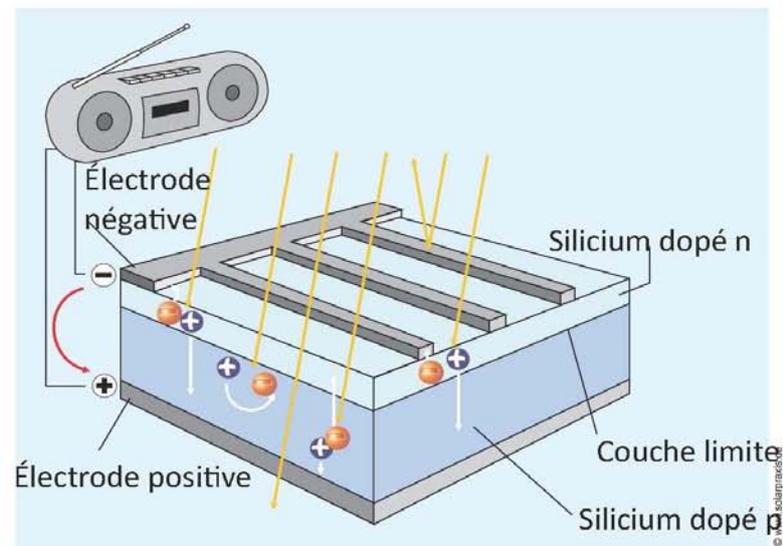
Les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches.



Cela a pour effet de créer un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de la zone centrale. Cette zone devient un isolant et s'appelle **la jonction P-N**.

Le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. De ce fait, lorsque la zone dopée N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron diffuse à l'extrémité de la zone N, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone P. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se crée, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée N posée sur une tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée N correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire.





## Exemples de cellules cristallines

### Monocristallin



### Polycristallin



Tailles les plus courantes :

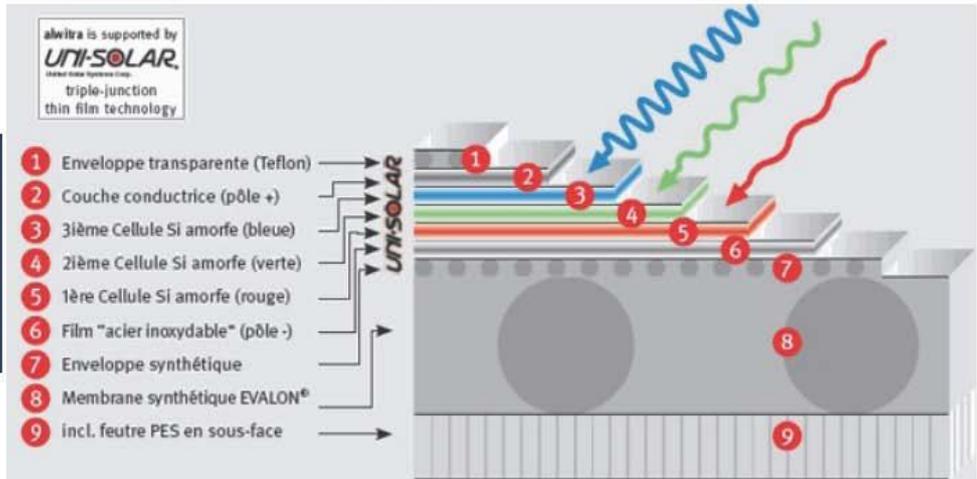
4'' = 101 mm

5'' = 125,5 mm

6'' = 155,5 mm



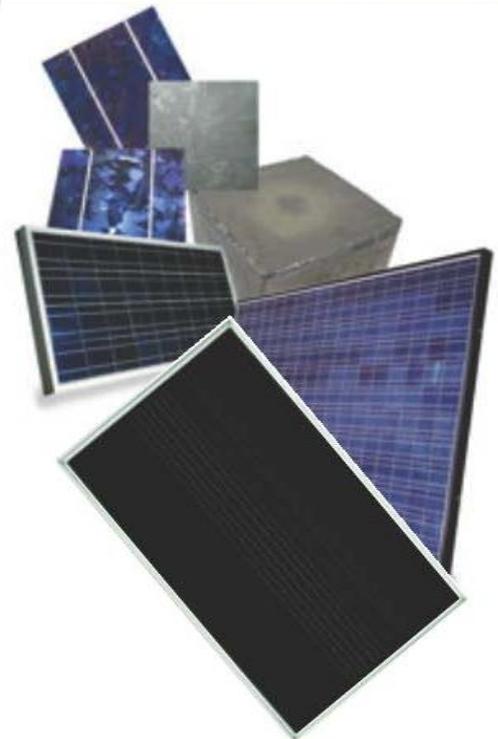
La surface n'est pas standardisée



| Technologie de cellule | Rendement actuel en laboratoire (2008) | Rendement actuel (2008) |
|------------------------|--|-------------------------|
| m Si monocristallin    | 24,7 %                                 | 13 à 17 %               |
| p Si polycristallin    | 19,8 %                                 | 9 à 15 %                |
| a Si amorphe           | 13 %                                   | 4 à 9 %                 |

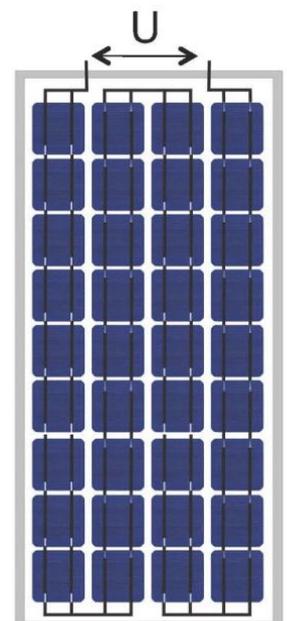
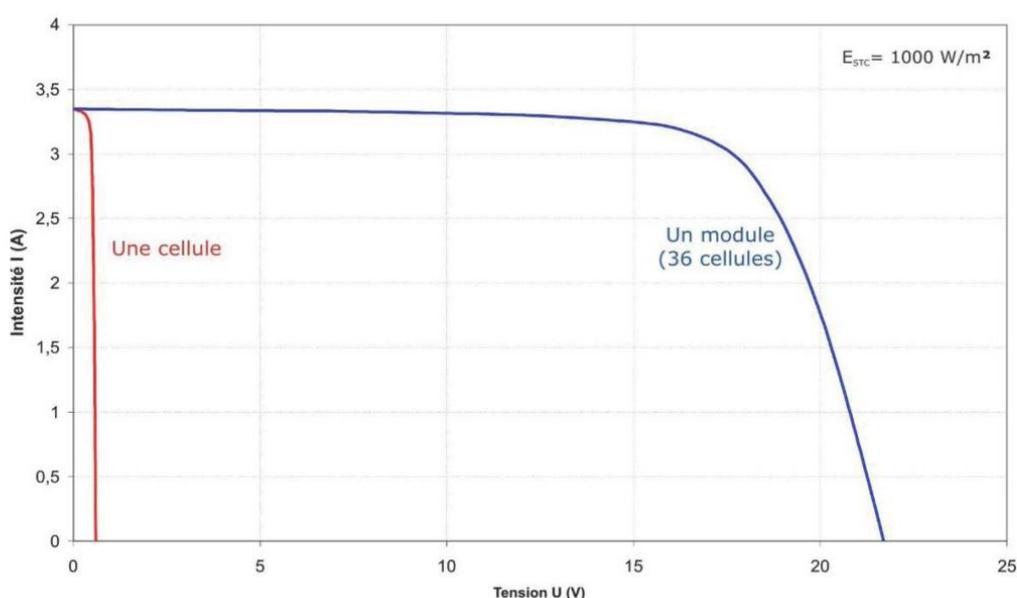
Identique ici à la Réunion

1. Les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur  
 ➔ nécessité de protection mécanique
2. La tension et la puissance d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes  
 ➔ nécessité de les coupler

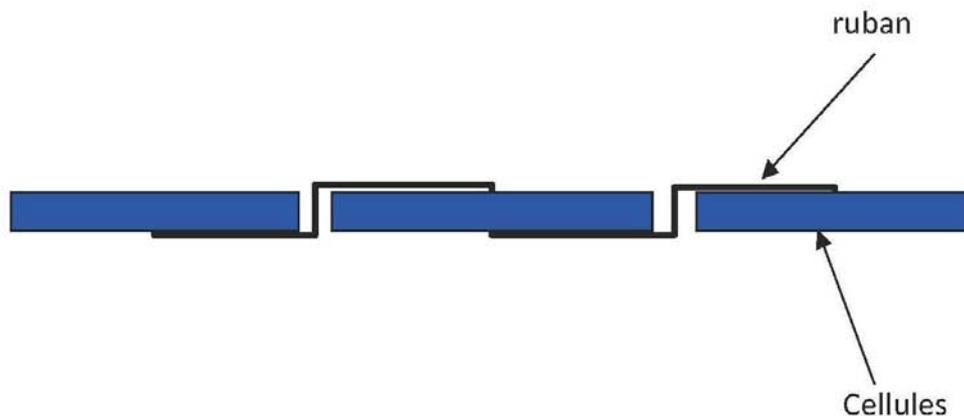


D'où constitution de **modules** photovoltaïques

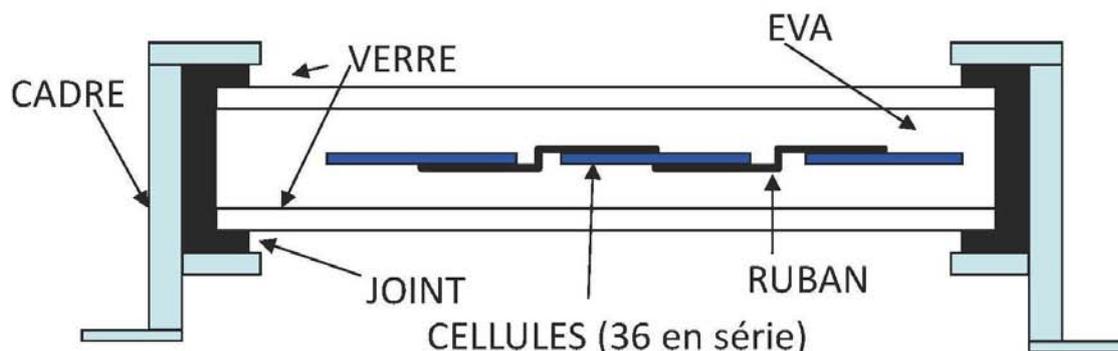
- Montage en série des cellules photovoltaïques
  - La mise en série des cellules permet d'augmenter la tension tout en conservant le courant d'une cellule (nécessité d'appariage des cellules)

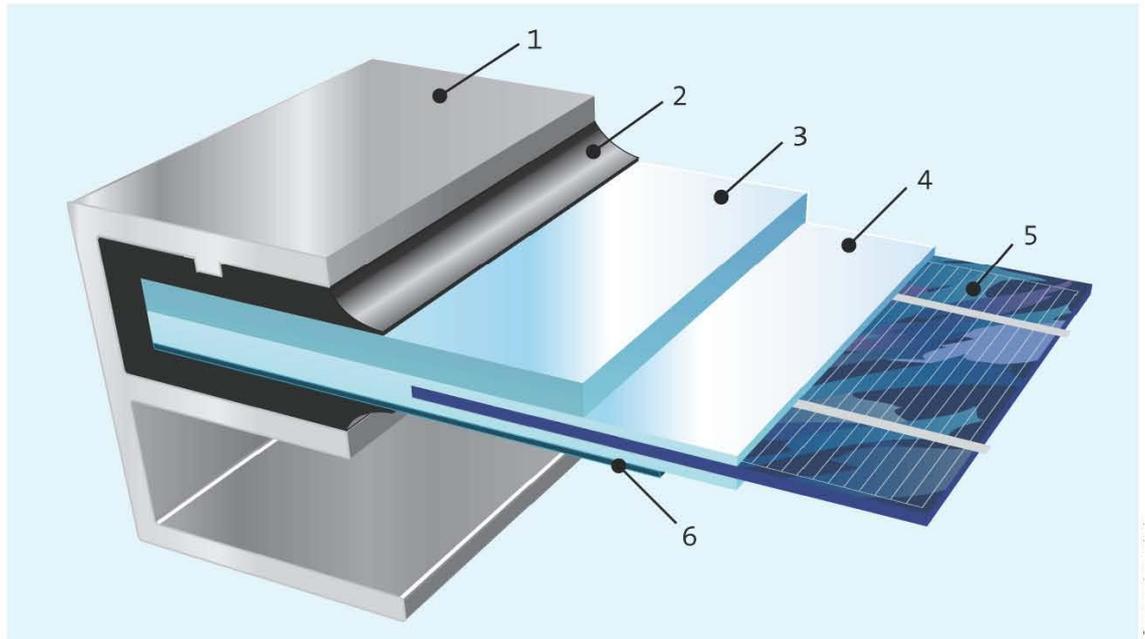


- Câblage des cellules photovoltaïques
  - Les cellules sont connectées entre elles par de fins rubans métalliques (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)



- Encapsulation des cellules mises en série
  - Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA: Ethylène Acétate de Vinyle)
  - Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec un joint périphérique pour permettre la dilatation
  - Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
  - La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR





- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Cadre en aluminium | 4. Support EVA         |
| 2. Joint d'étanchéité | 5. Cellule cristalline |
| 3. Verre              | 6. Film Tedlar         |



### ■ Connexion

- La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires y sont raccordés



Voir rôle des diodes dans le chapitre « sécurité des personnes et des biens »



- Pour les câbles inter-modules, de groupes et principaux
  - Câbles unipolaire équivalent classe II - PV 1000-F (cf. guide UTE C 32-502)  
Stabilité aux UV – Tenue aux intempéries –
  - Tension : 1,15 Vco minimum, en pratique niveaux de tension: 600 à 1000V
  - Tenue en température :
    - 70°C température ambiante pour courant max
    - 90°C à l'âme
  - Connecteurs spécifiés pour courant continu et dimensionnés à l'identique des câbles
  - Étiquette signalant « ne pas déconnecter en charge »
  - Protection contre les contacts directs
  - Tenue aux intempéries (température, UV, étanchéité IP54,...)





## La constitution d'un module photovoltaïque

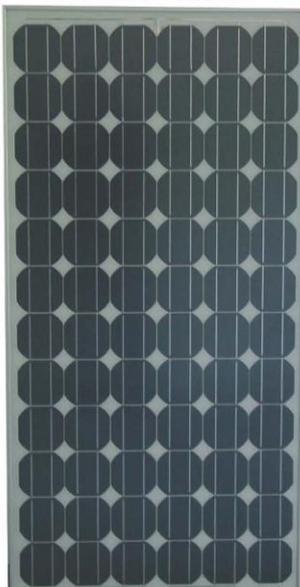


## Différents modules photovoltaïques au silicium

### ■ Conformité :

**CEI 61215**

**Monocristallin**

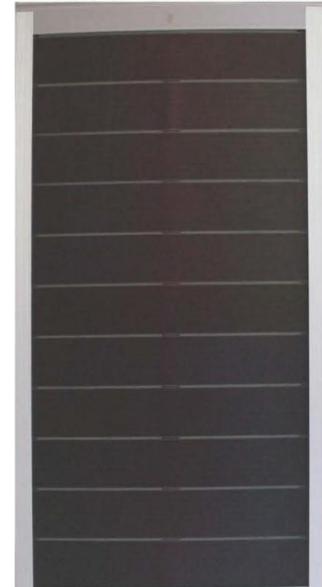


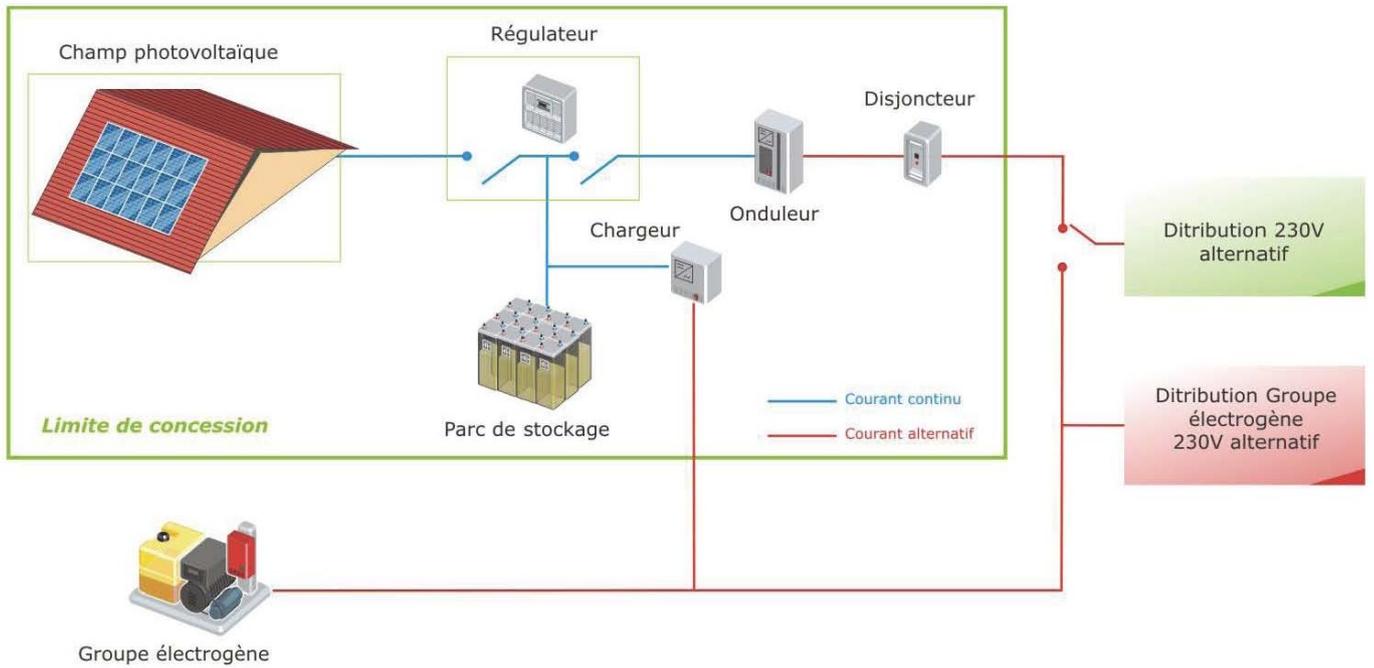
**Polycristallin**



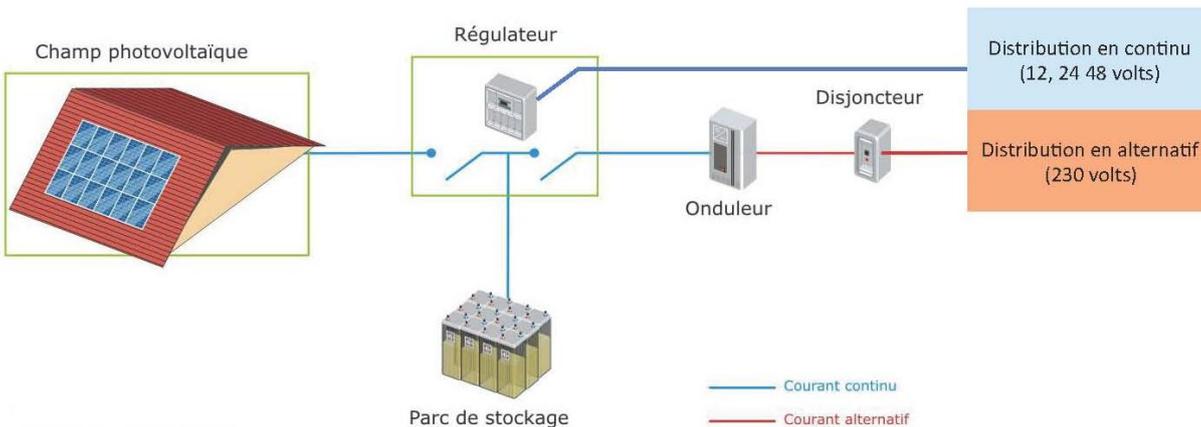
**CEI 61646**

**Couches minces**





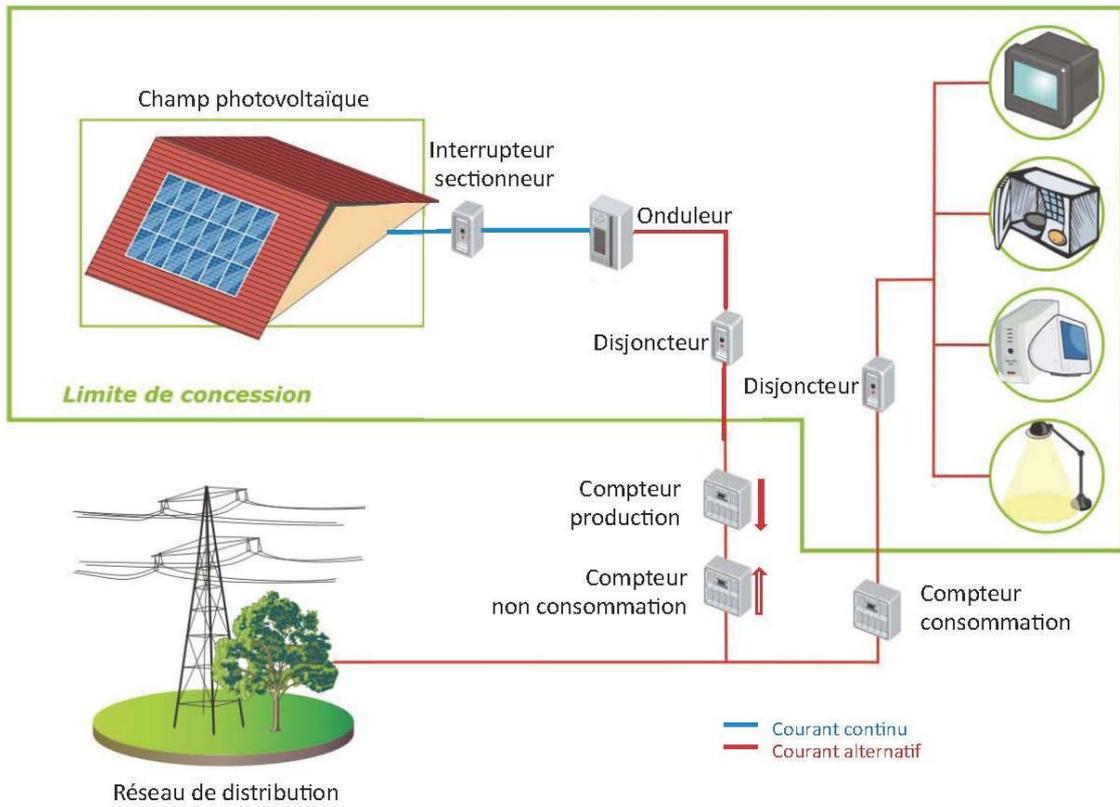
- Applications principales : Électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.





# Les systèmes PV raccordés réseau

## Vente totale



# Les systèmes PV raccordés réseau

## Vente du surplus

