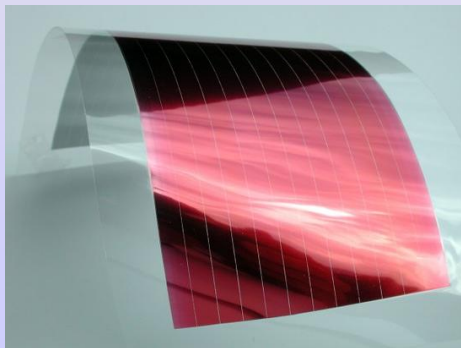
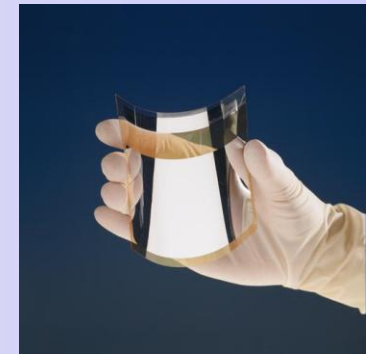


TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES



Histoire de l'effet photovoltaïque

1839 : effet photovoltaïque découvert par Edmond Becquerel

1877 : première cellule PV au sélénium

1922 : Einstein obtient le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'effet photo-électrique

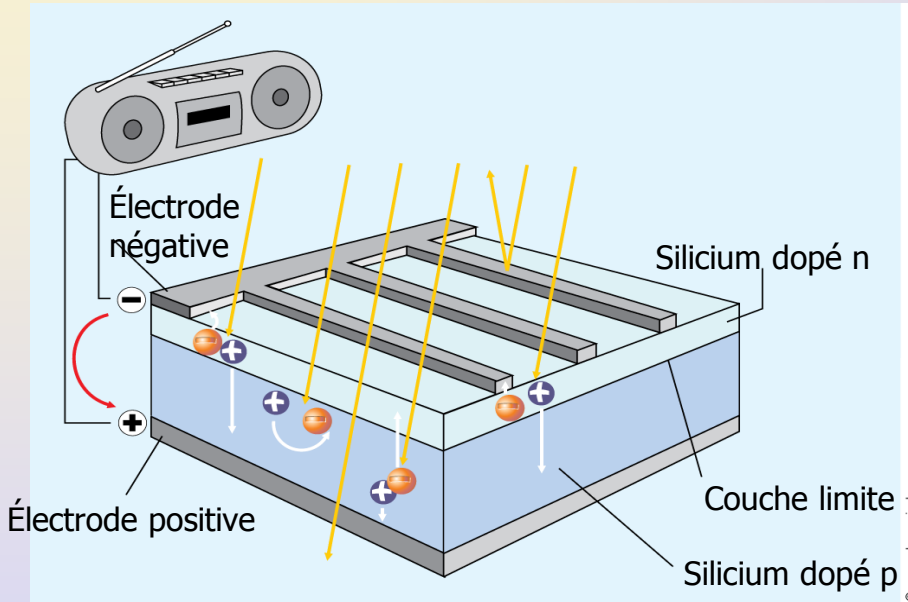
1954 : premières cellules PV au silicium (rendement 4,5 % à 6%)

1955 : première commercialisation
de cellules PV 14 mW.

1958 : satellite avec cellules PV



Principe de fonctionnement d'une cellule de silicium



Dopage du silicium

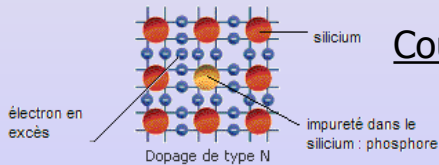
Insertion dans la structure cristalline du silicium d'impuretés soigneusement choisies pour leurs propriétés atomiques et cristallines



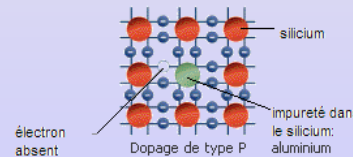
Les impuretés se substituent à quelques atomes du matériau de base



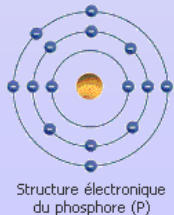
Concentration en électrons libres



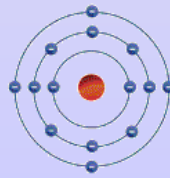
Couche de silicium dopée N



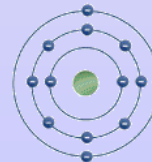
Couche de silicium dopée P



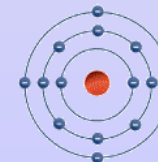
Structure électronique du phosphore (P)



Structure électronique du silicium (Si)

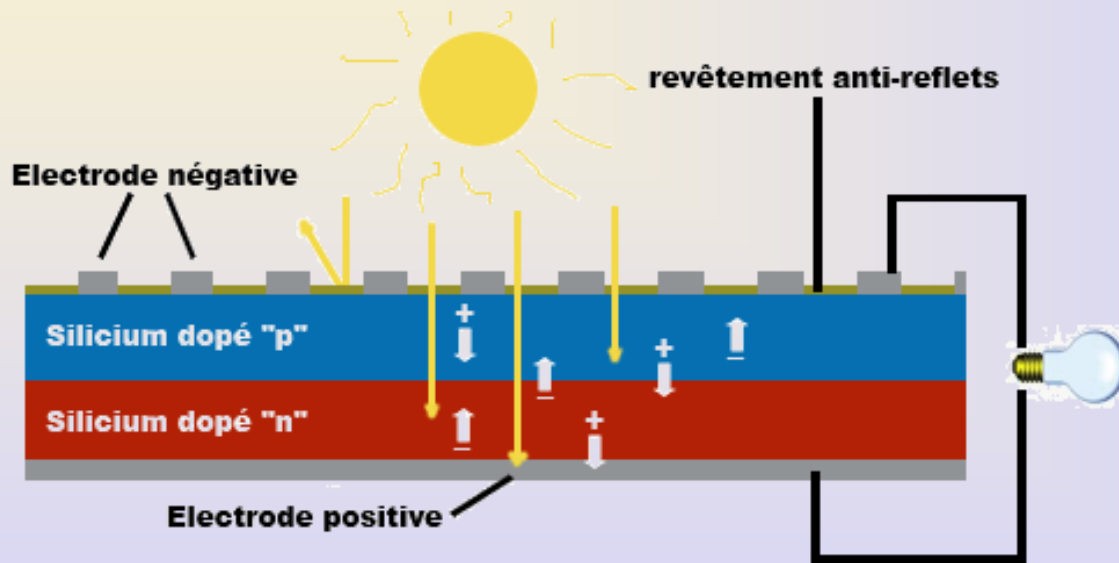


Structure électronique de l'aluminium (Al)



Structure électronique du silicium (Si)

Effet photovoltaïque d'une cellule de silicium



Les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction dans le silicium dopé



L'énergie libérée des électrons (charge N) et des trous (charge P)



Courant électrique généré si le circuit entre la jonction n et la jonction p est fermé

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Une cellule photovoltaïque peut être considérée comme une génératrice de courant.

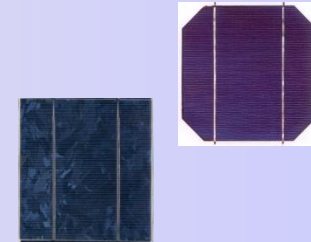
Différentes technologie de cellules

1ère génération (90%) : silicium cristallin

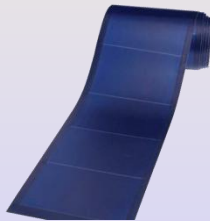
Mono c-Si : silicium monocristallin

Poly c-Si : Silicium polycristallin

Ribbon c-Si : Silicium cristallin en ruban



2ème génération (10%) : couches minces



a-Si : Silicium Amorphe

CdTe : Tellure de Cadmium

CIS, CIGS : Cuivre Indium/Gallium diselenide/disulphide

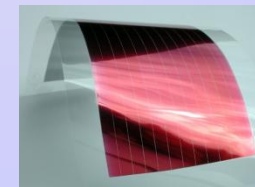
a-Si/mono c-Si : Cellules mixtes (ou tandem)

3ème génération : nouvelles technologies

Cellules à concentration

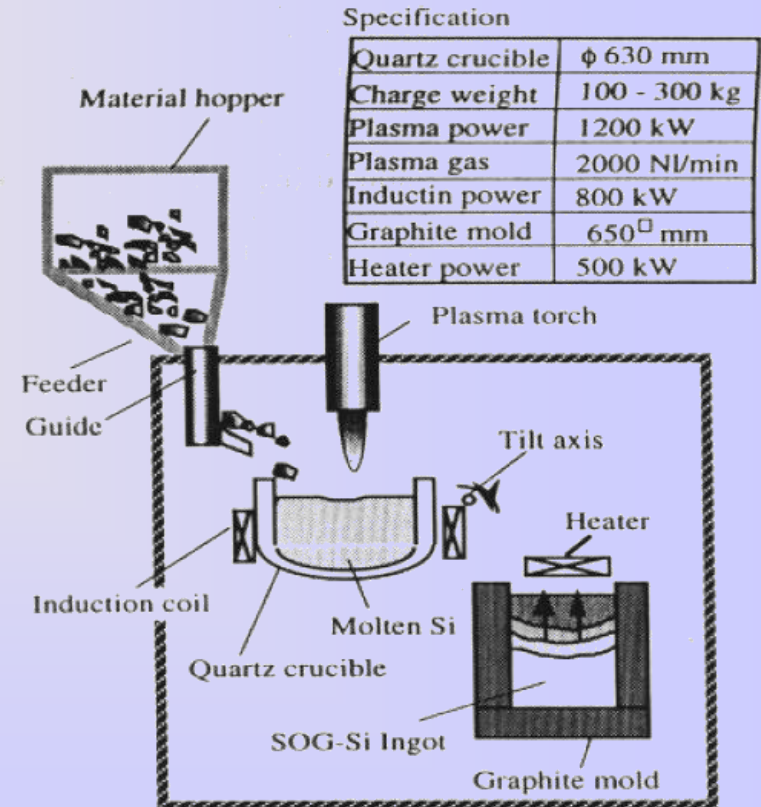
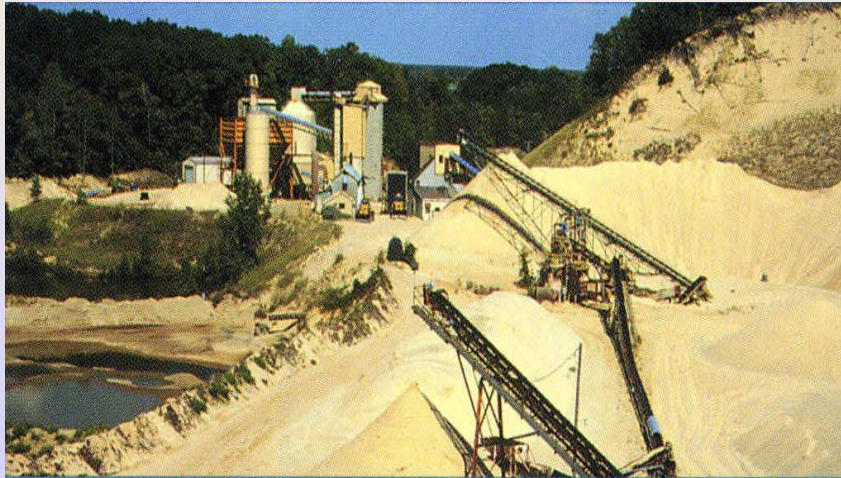
Cellules organiques

Nanomatériaux



Le silicium (extraction et purification)

Deuxième élément de la croûte terrestre sous forme oxydée (sable, silice, quartz)



Silicium de qualité métallurgique : pureté de 99%

Silicium de qualité solaire : pureté de 99,99 %

Silicium de qualité électronique : pureté de 99,9999%

Production de cellules Mono c-Si et Poly c-Si

Cellules
mono-cristallines



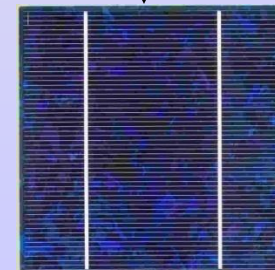
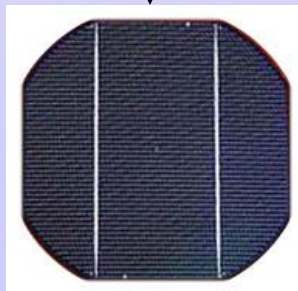
Cellules
multi-cristallines



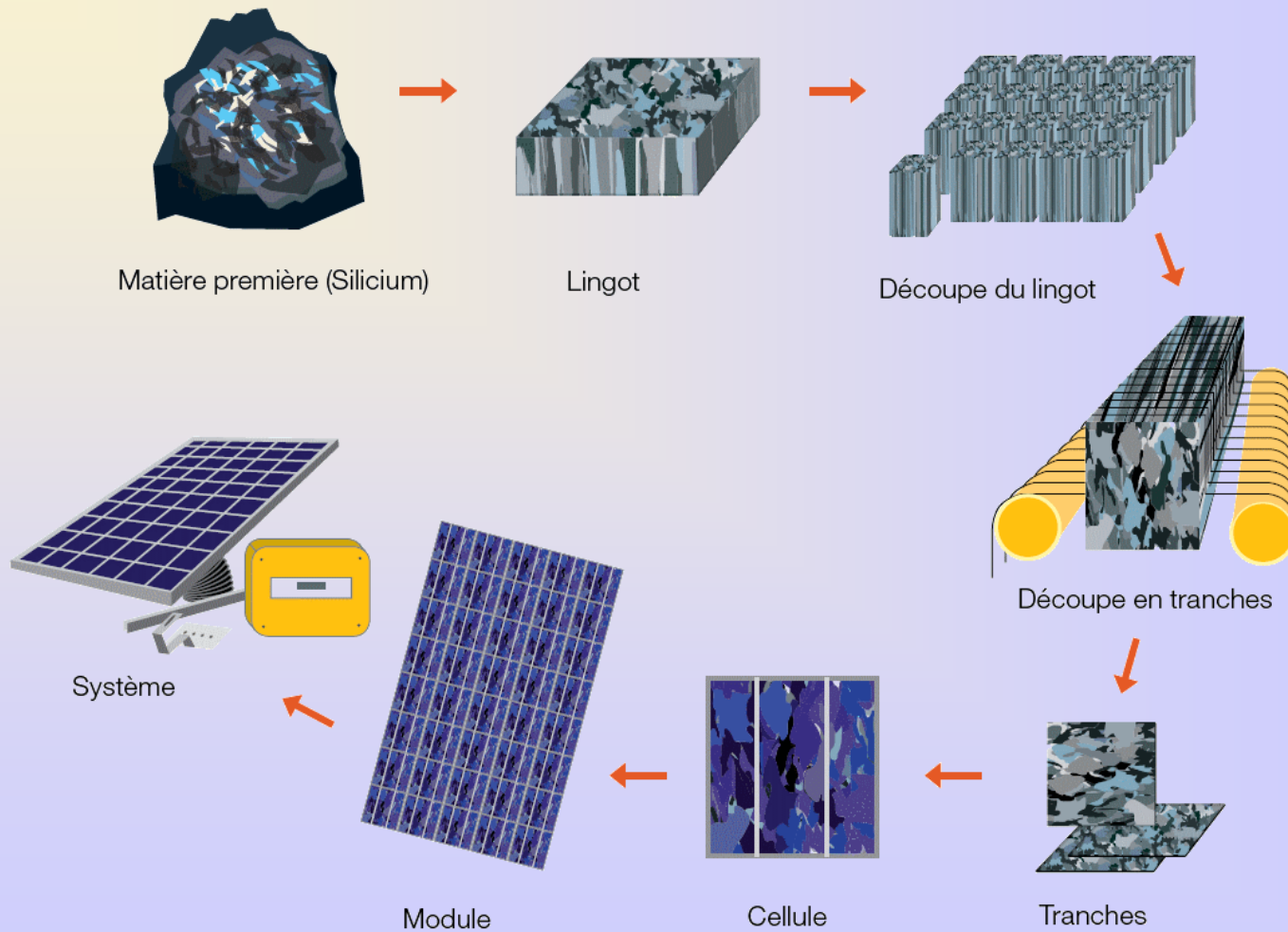
Croissance d'un lingot
Méthode Czochralski
ou **zone flottante FZ**



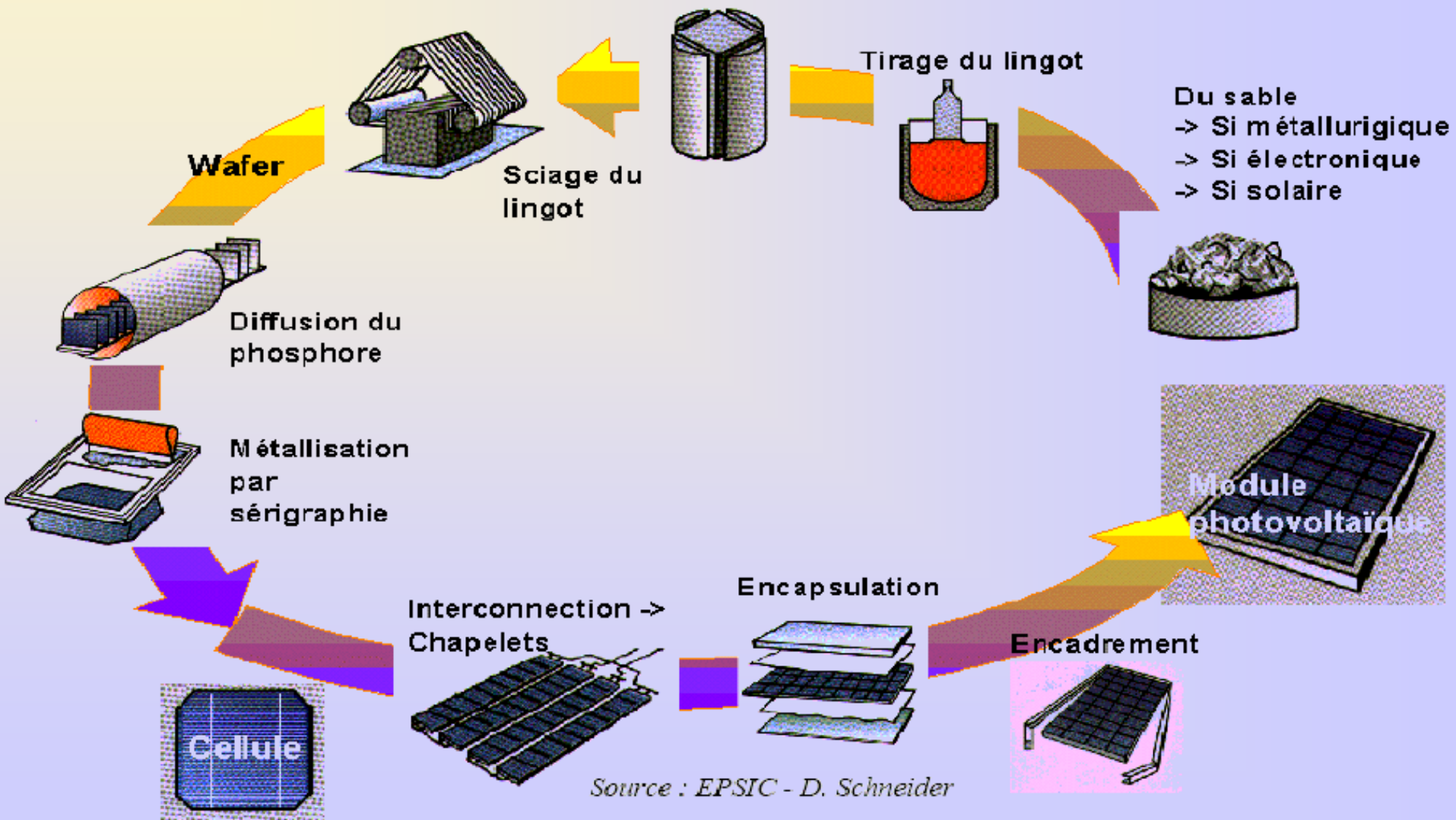
Moulage d'un lingot
Méthode POLYX



Procédé de fabrication poly c-Si



Procédé de fabrication mono c-Si



Taille des cellules cristallines



- **Cellules 4 pouces**
- **100 mm x 100 mm**
 - **1 – 1,6 Wc**

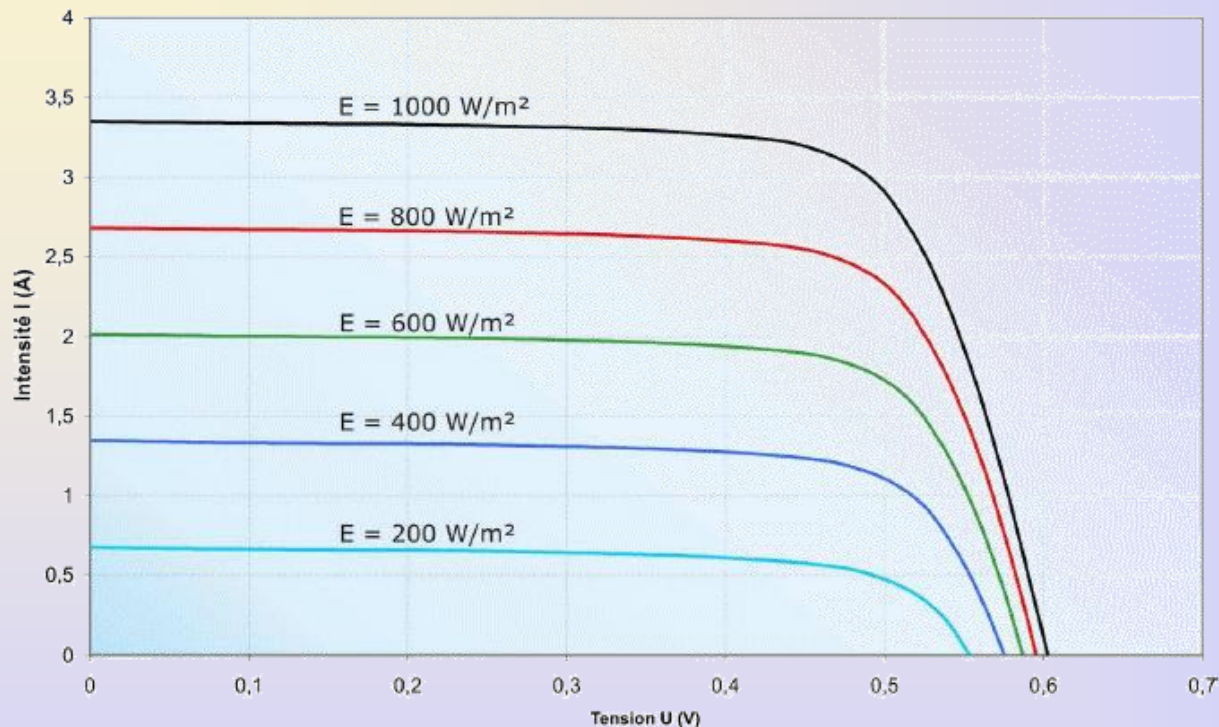


- **Cellules 5 pouces**
- **125 mm x 125 mm**
 - **1,8 – 2,5 Wc**



- **Cellules 6 pouces**
- **150 mm x 150 mm**
 - **2,5 – 3,5 Wc**

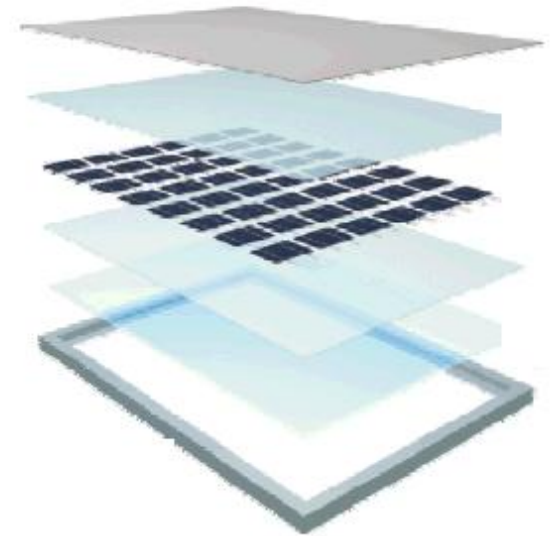
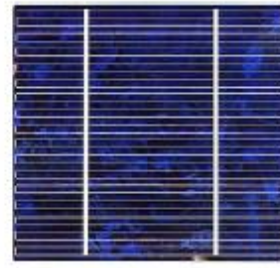
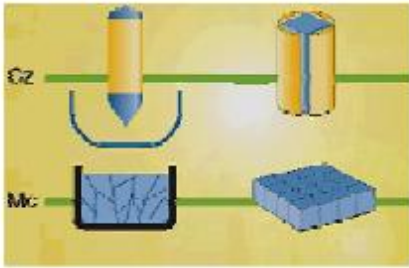
Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule



L'intensité maximale du courant produit dépend de la surface de la cellule et de la valeur de l'éclairement

La tension produite par la cellule dépend peu de l'éclairement mais diminue de façon sensible lorsque la température augmente.

Etat de l'art: poly-Si et mono-Si



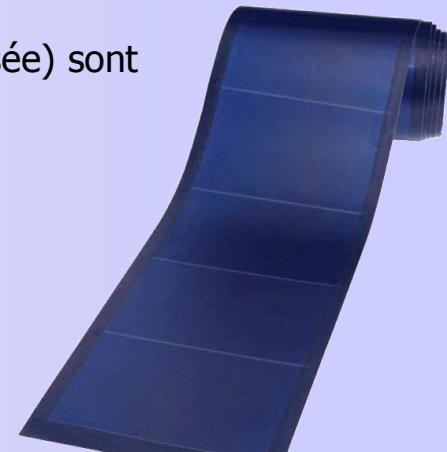
- Efficacité du module? ■
- Sensibilité à la température? ■
- Poids? ■
- Esthétique? ■
- Sensibilité au diffus? ■
- Consommation des ressources (Matériaux, énergie...)? ■
- €/W ou potentiel de réduction? ■

Couches minces

La technologie « couche mince » (Thin Film) désigne un type de cellule (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de quelques μm sur un substrat (verre, plastique souple ou métal) par un procédé de vaporisation sous vide.

Quatre types de modules en couches minces (en fonction de la matière active utilisée) sont actuellement disponibles dans le commerce :

- Silicium amorphe (a-Si)
- Tellure de Cadmium (CdTe)
- Cuivre Indium/Gallium Diselenide/disulphide (CIS, CIGS)
- Cellules mixtes –ou tandem- (a-Si/m-Si)
- Cellules multi-jonction

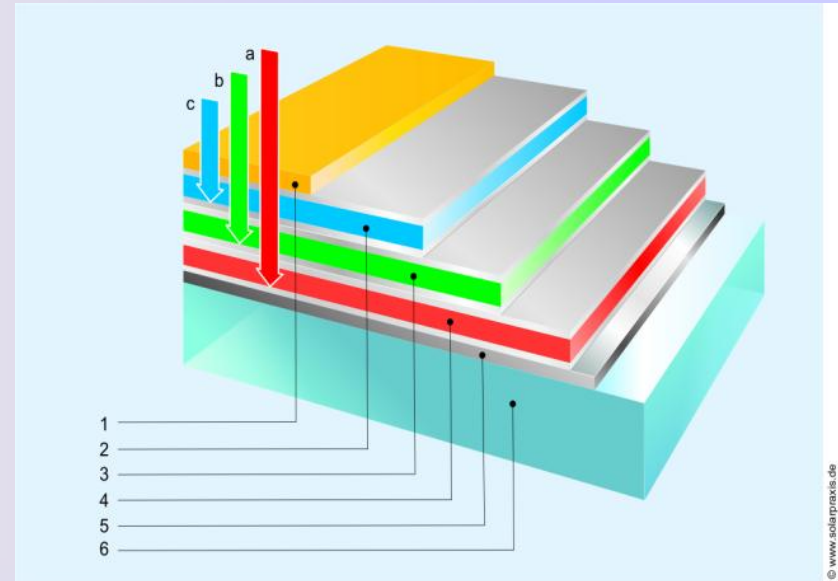
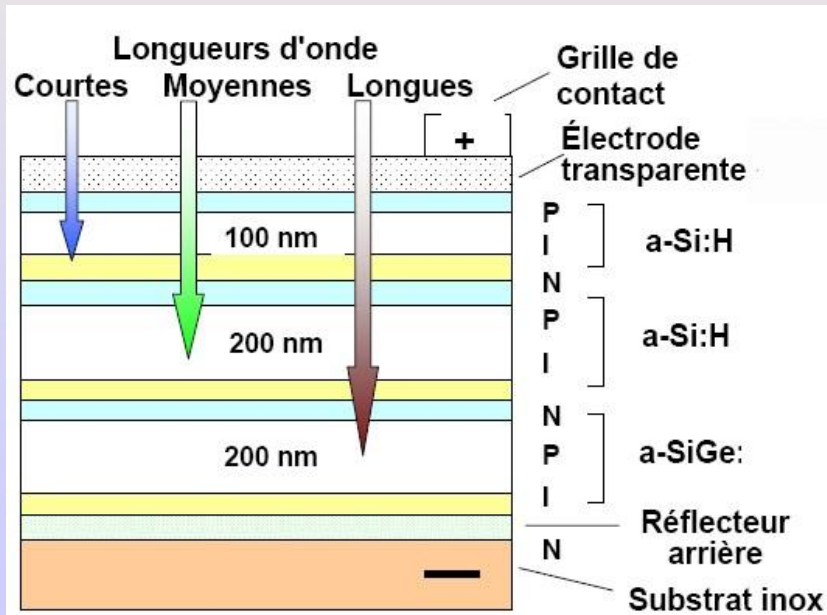


Coûts de production du procédé des couches minces inférieurs à ceux de la technologie cristalline (nécessite moins de matière première)

Rendements généralement moins élevés (entre 5% et 13%)

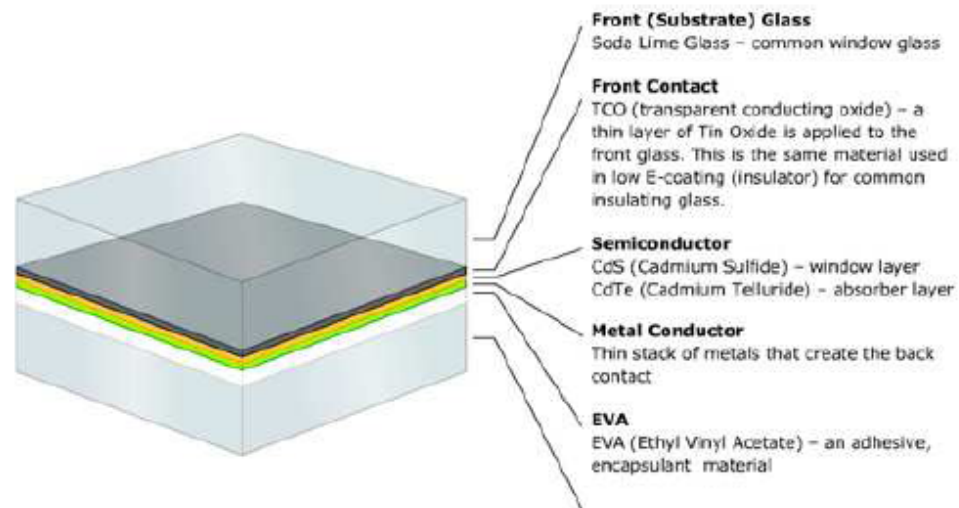
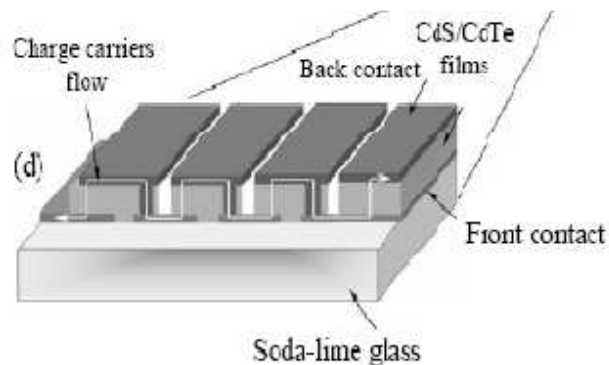
Silicium amorphe

- Bonne réponse en diffus
 - Faible sensibilité à la température (-0,21%)
 - Faible sensibilité aux ombrages
 - Possibilité de modules souples
 - Faible rendement
- 5 à 8% en couche mince**
10% en multicouches

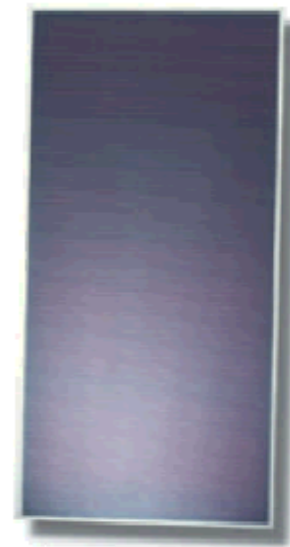


Etat de l'art: CdTe

CdTe (First Solar)

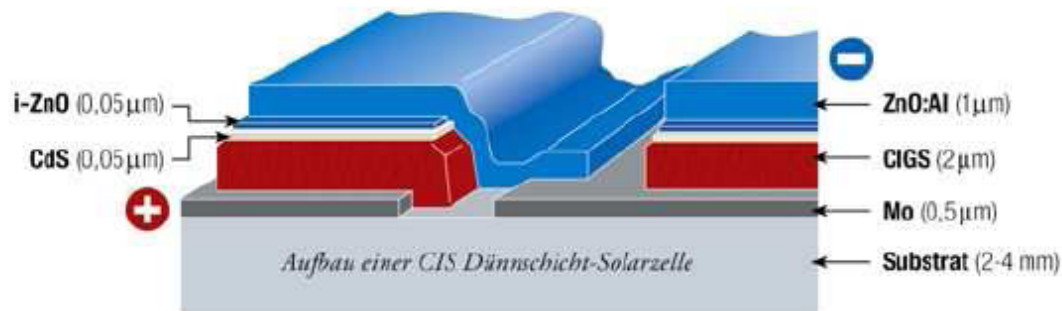


- Films de CdTe déposé par « Closed Space Sublimation » sur du verre.
- **Efficacité moyenne:** 9.7%.
- **Température:** très peu sensible.
- Verre/Verre → **Lourd.**
- **Esthétique:** apparence uniforme noire.
- **Diffus:** bonne efficacité
- **Ressource:** peu consommateur.
- **Coûts:** bon potentiel de réduction.
- **Recyclage** inclus!



Etat de l'art: CIGS

CuIn(Ga)Se₂ (Würth Solar)



- Films de CuIn(Ga)Se₂ déposé par Sputtering sur du verre.
- **Efficacité moyenne**: 11.1%.
- **Température**: peu sensible.
- Verre/Verre → **Lourd**.
- **Esthétique**: apparence uniforme noire.
- **Ressource**: peu consommateur.
- **Coûts**: fort potentiel de réduction et d'augmentation de l'efficacité.
- **Forme et taille** facilement modifiable.



Technologies de 3ème génération

Encre à nanoparticules

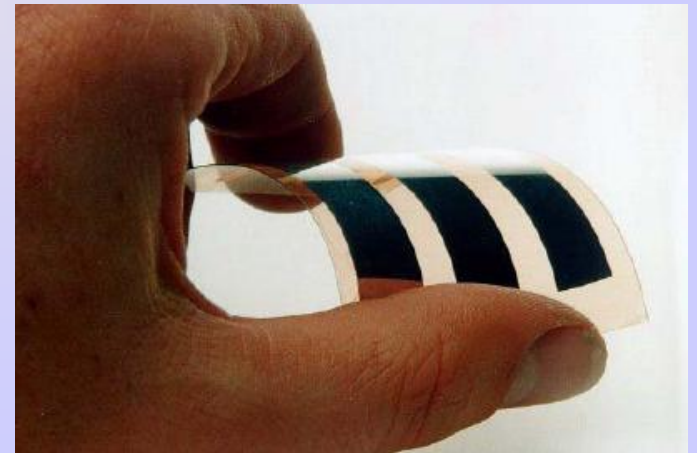
Techniques d'imprimeries.

- Process « Roll to Roll ».
- Substrat bas coût.
- Energy Payback Time < 2 mois...

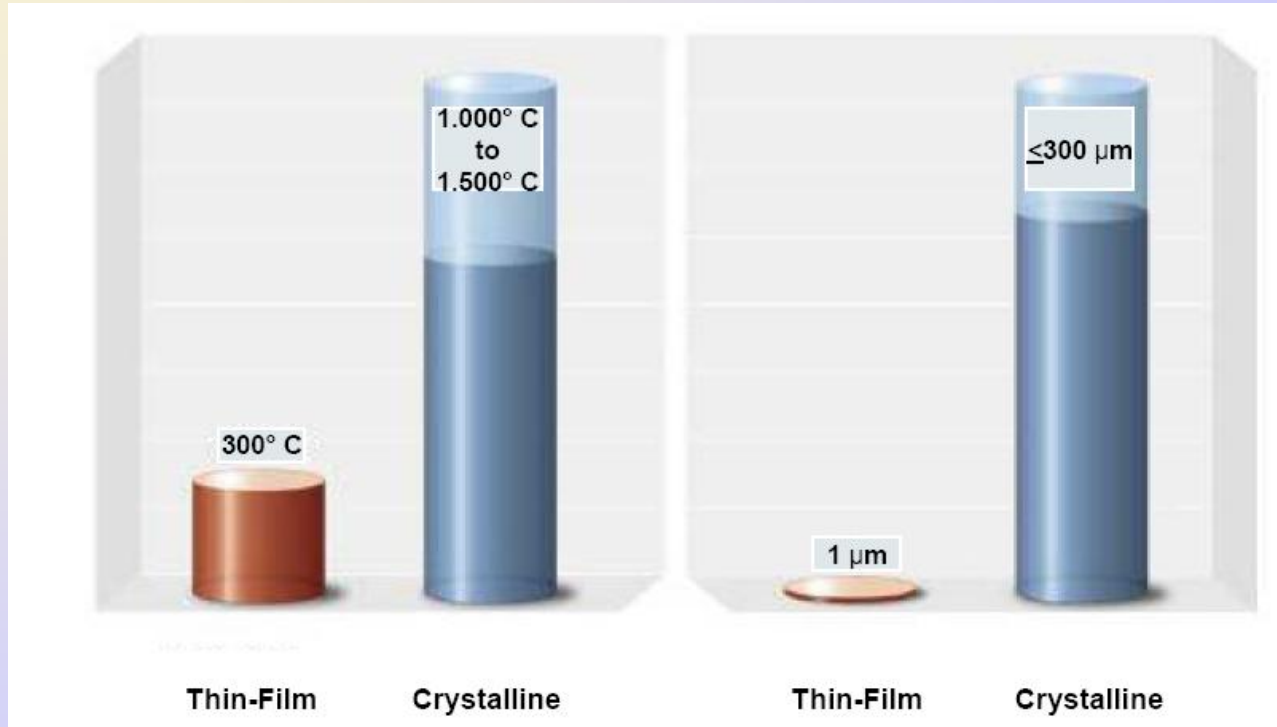


Cellules organiques (polymères)

- Matériaux et substrats bas coût.
- Process « Roll to Roll ».
- Energy Payback Time < 2 mois...
- Durée de vie insuffisante
- Efficacité faible



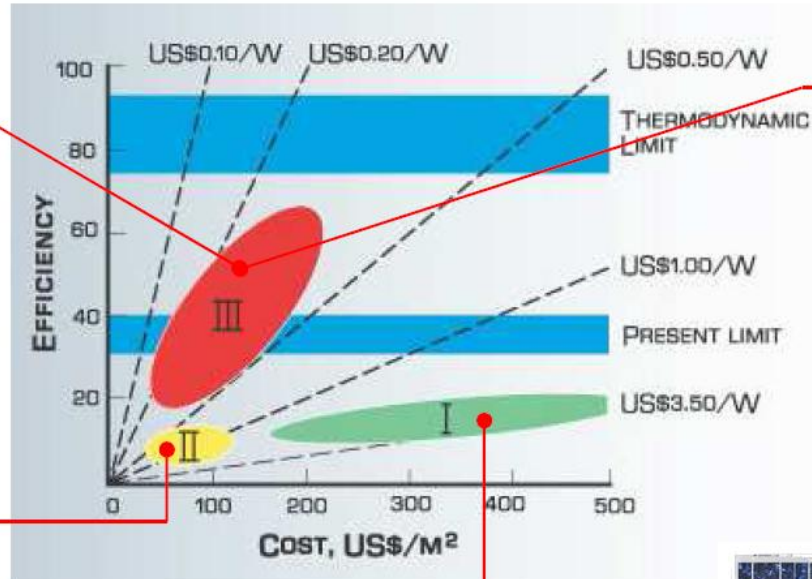
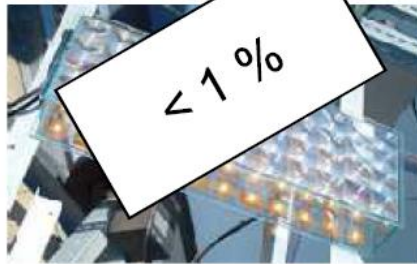
Comparatif des différentes technologies PV



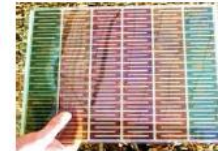
Principales technologies commercialisées

Nouvelles technologies:

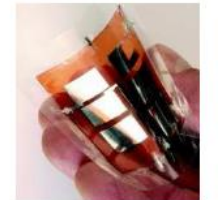
- Multijonctions
- Spatial, concentration.



• Dye



• Organique



Couches minces:



CdTe



Silicium amorphe



CIGS

Silicium:

- Mono-Si
- Poly
- Ribbo

91%

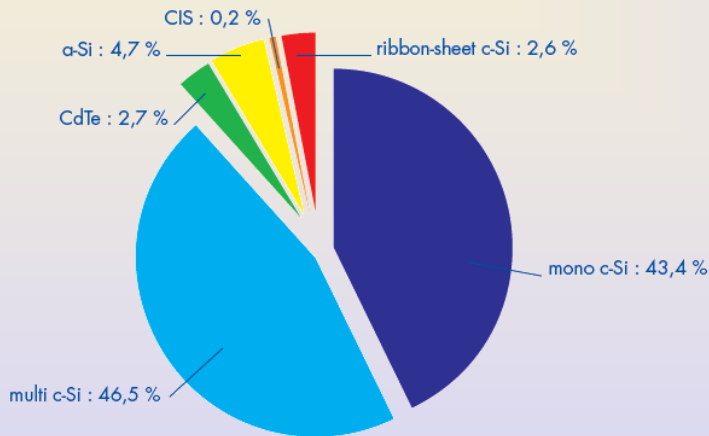


Silicium polycristallin

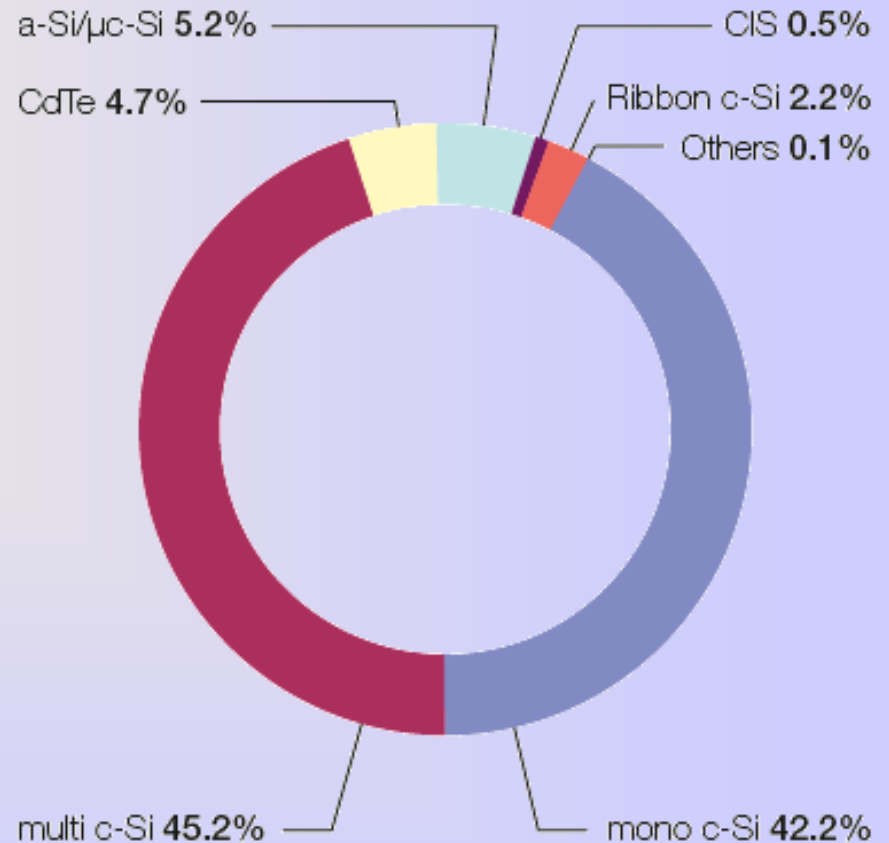
WEPION - 05/11/07

Répartition des technologies PV

Répartition des différentes technologies de cellules - 2006



Source: Photon International



Répartition des technologies de cellules en 2007

Source : Solar Generation V - 2008

Technologies silicium

| Technologie | Méthode de fabrication | Rendement % | Avantages | Inconvénients | Part de marché (2007) |
|-------------------------|---|-------------|---|--|-----------------------|
| Mono-cristallin | Croissance d'un lingot puis découpe de tranches | 12-16 | Bon rendement par cellule | Coût de fabrication élevé (2,5€/Wc) Perte de matériel en cours de fabrication (découpe) | 42% |
| Multi-cristallin | Moulage lingot puis découpe de tranches | 11-14 | Cellules carrées Bon rendement par superficie | Coût de fabrication élevé (2€/Wc) Perte de matériel en cours de fabrication (découpe) | 45% |
| amorphe | Dépôt de silicium sur un substrat | 5-8 | Facile à fabriquer Résistant aux variations de température Souple Coût de fabrication faible (0,5€/Wc) | Rendement faible Jusqu'à 10% en multicouches | 5% |

Autres technologies

| Technologie | Stade de développement | Rendement (%) | Avantages |
|--|---------------------------|--------------------|--|
| Diséléniure de cuivre-indium (CIS) | Production industrielle | 10-12% 18% labo | Couche mince, bonne résistance aux augmentations de température |
| Tellure de Cadmium (CdTe) | Production industrielle | 9-10% 17% labo | Couche mince, bonne résistance aux augmentations de température |
| Arséniure de gallium, antimoniure de gallium (GaAs) | Recherche | 25-31% labo | Cellule en tandem avec plusieurs couches pour des longueurs d'onde différentes |
| Arséniure de gallium | Applications aérospatiale | 25% labo | |
| Cellules organiques | Recherche | 5-8% labo | |

Règles de recyclage

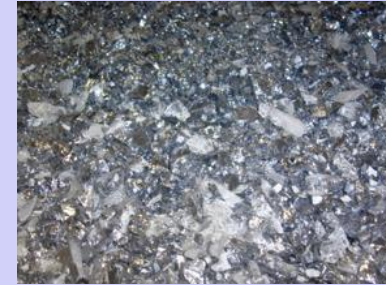
Recyclage des modules photovoltaïques à base de silicium cristallin

Séparation des différents éléments du module photovoltaïque (cellules PV, verre, métaux) par traitement thermique

Le plastique, la colle, les joints, les gaines de câble ou la boîte de connexion sont brûlés par le traitement thermique

Cellules PV recyclées fondues et intégrées dans le process de fabrication des lingots de silicium.

Objectif de fabrication : permettre l'amélioration du procédé de séparation des différents composants (appelé "désencapsulation")



Silicium broyé

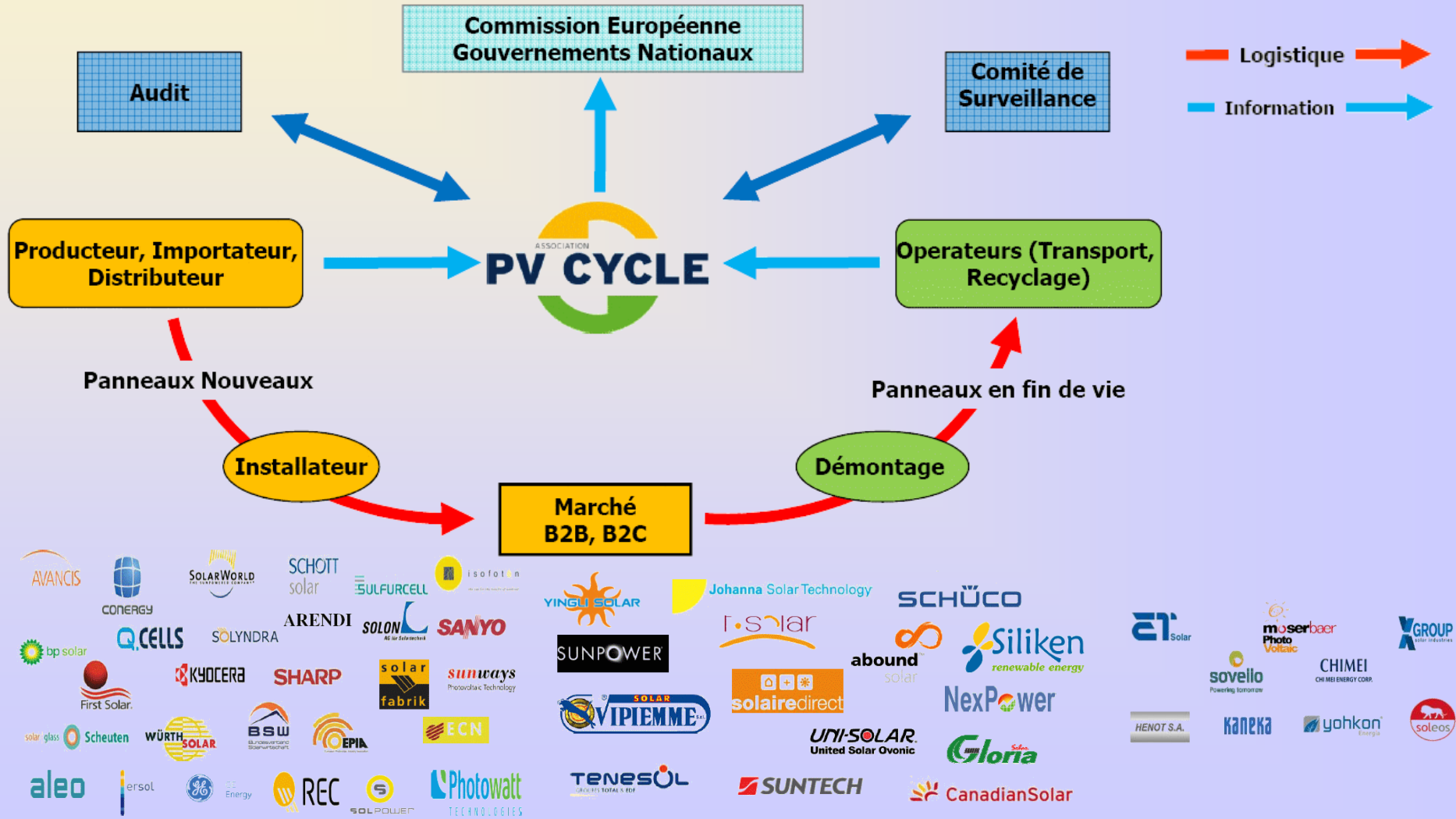


Recyclage des modules photovoltaïques en couches minces

Technologies couches minces (CdTe, CIS, CIGS...) différentes les unes des autres

Certaines sont composées à base de matériaux toxiques qui doivent être traitées avec une attention particulière (cadmium par exemple, recyclage gratuit par certains fabricants de modules)

Schéma PV CYCLE



Points à retenir

Une dizaine de technologies différentes commercialisées

Choix suivant l'application, l'environnement et le coût

Silicium cristallin : bon rendement
comportement dégradé avec l'élévation de la température ou un éclairage faible
quantité importante de silicium

Couches minces : rendements moyens
comportement peu dégradé avec l'élévation de la température
bon comportement avec un éclairage faible
peu de matière première
énergie grise plus faible que pour le silicium cristallin

Technologie photovoltaïque en constante évolution

Pour aller plus loin

Photowatt : www.photowatt.com

Bpsolar : www.bpsolar.fr

Tenesol : www.total-energie.fr

Encre à nanoparticules : <http://www.nanosolar.com/technology/production-process>

a-Si triple jonction : <http://www.soprasolar.com>

CdTe : <http://www.firstsolar.com/fr/index.php>

Trackers : <http://www.pvtrackers.com>

Cellules organiques : <http://www.solarmer.com>

CIGS : <http://www.miasole.com>

Cellules c-SI PLUTO : <http://www.suntech-power.com>

Ruban c-Si : <http://www.evergreensolar.com>

Couches minces sur tissu : <http://www.filsolar.com>

MODULES ET CHAMPS PHOTOVOLTAÏQUES



Constitution d'un module PV

Les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur

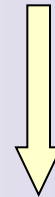


Nécessité de protection mécanique

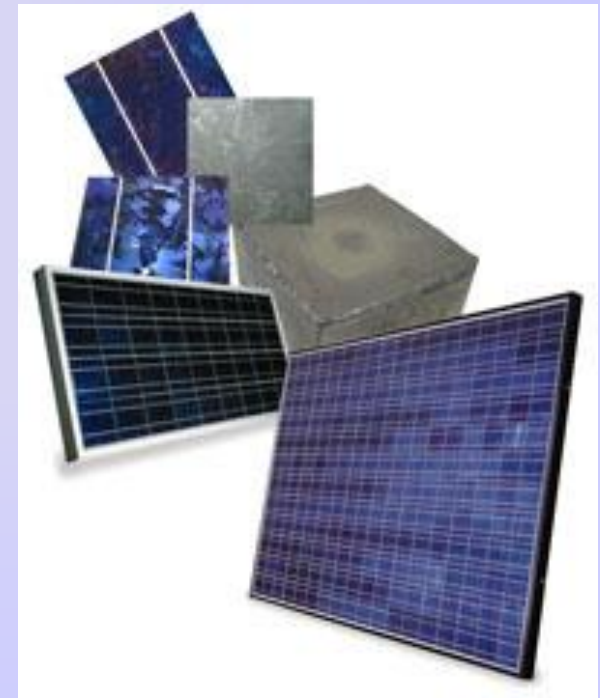


Modules photovoltaïques

La tension et la puissance d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes

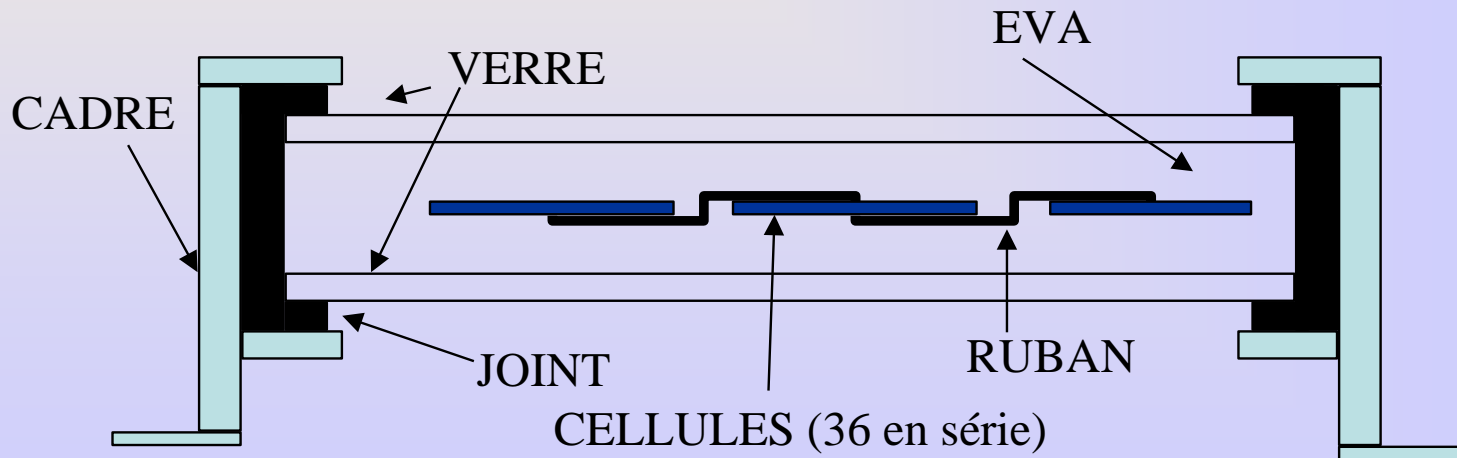


Nécessité de coupler les cellules

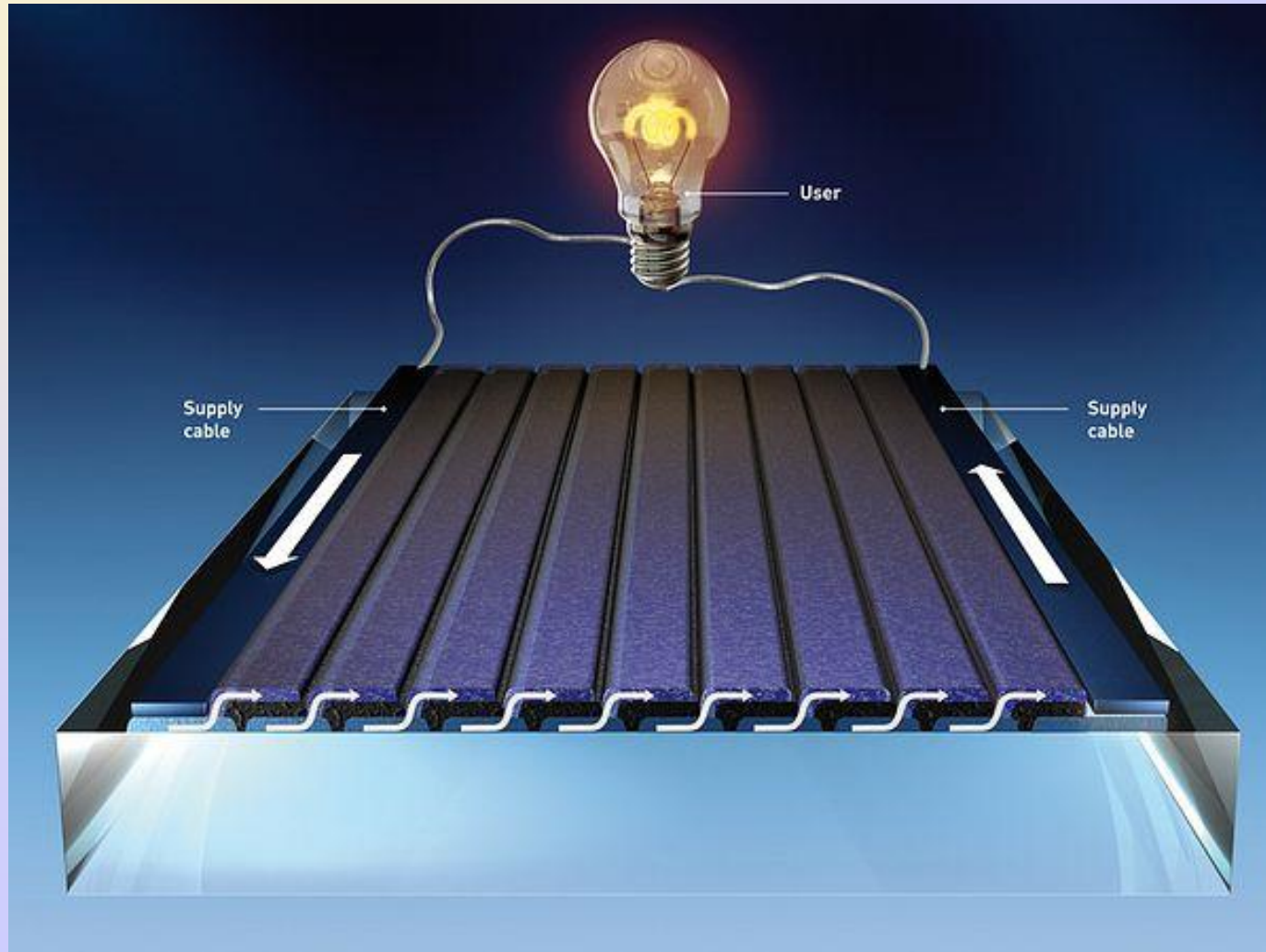


Encapsulation de cellules mises en série (c-Si)

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA)
- Un cadre en aluminium permet la fixation
- Un joint périphérique permet 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 en polymère



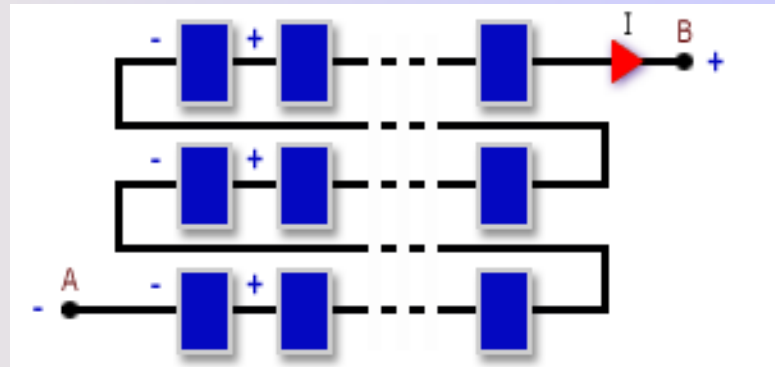
Coupe d'un module PV en couches minces



Couplage des cellules PV

La mise en série de cellules permet d'obtenir une tension plus élevée (même courant pour toutes les cellules).

La mise en parallèle de groupes de cellules en série permet d'obtenir un courant d'intensité plus grande.



Dans un groupement série, en cas de déséquilibres d'éclairage (cellules ombragées par exemple) la cellule de plus faible impose son courant à l'ensemble du groupement.



Surtension inverse due aux autres cellules



Fonctionnement de la cellule moins éclairée en récepteur en dissipant une puissance importante



Destruction possible de la cellule si la contrainte thermique est trop grande ou si la tension d'avalanche est dépassée

Mise en place de diode de protection connectée en parallèle d'un groupement élémentaire de cellules PV (diode bypass)

Caractéristiques d'un panneau poly c-Si



Module Photowatt PW500 50W 12V

Module haute fiabilité

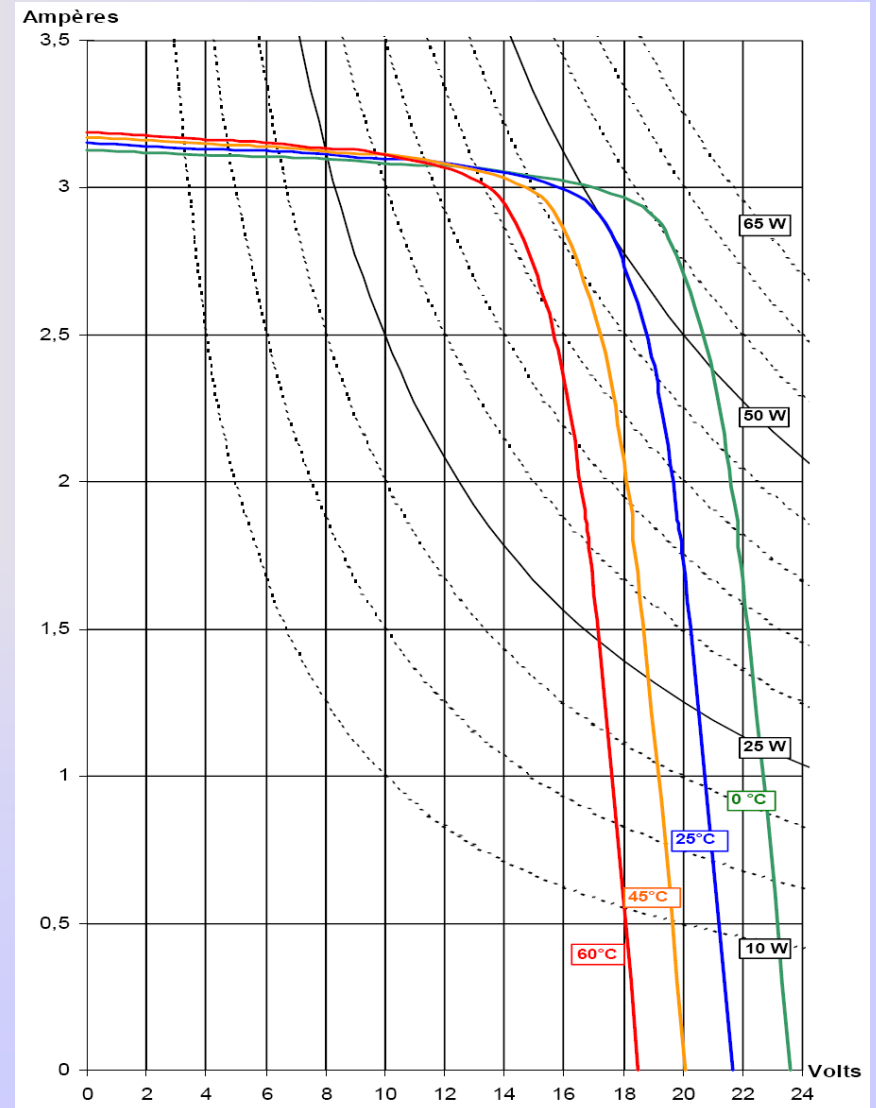
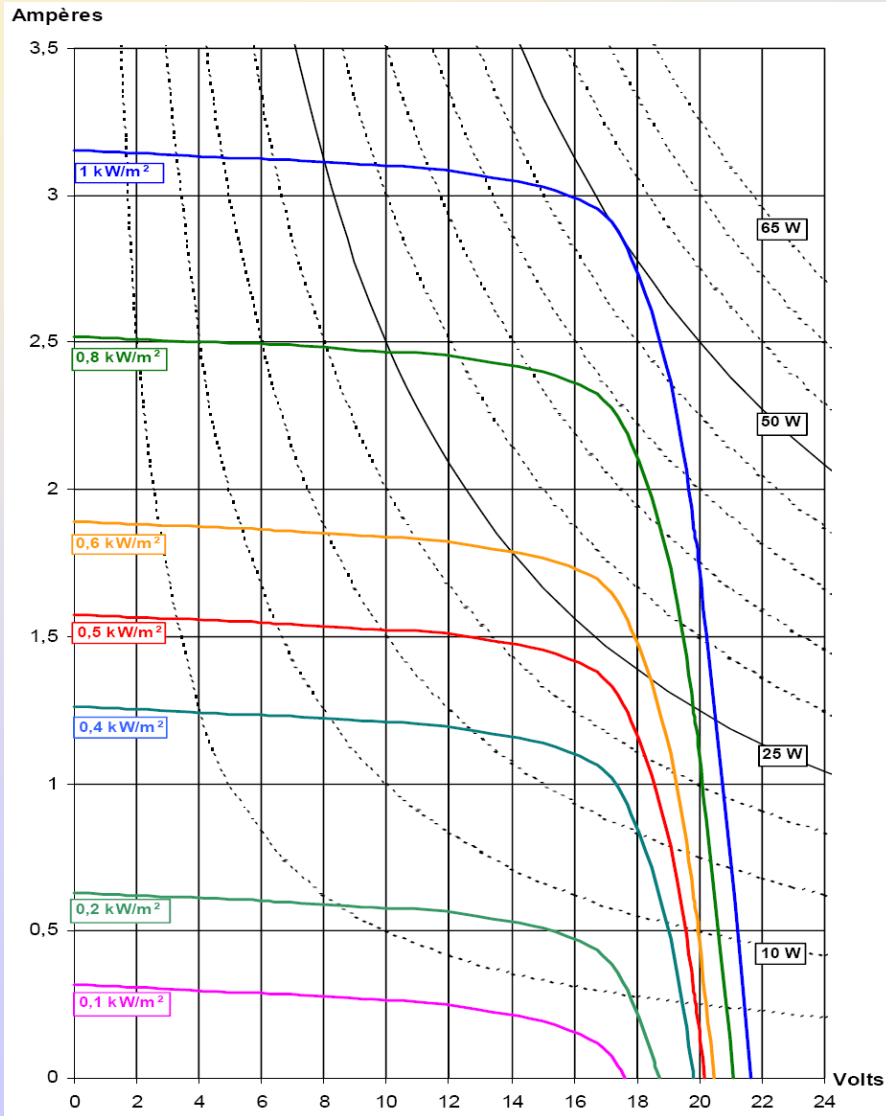
4x9 cellules polycristallines 4 pouces (101,50 x 101,50 mm)

Garantie puissance : 25 ans*

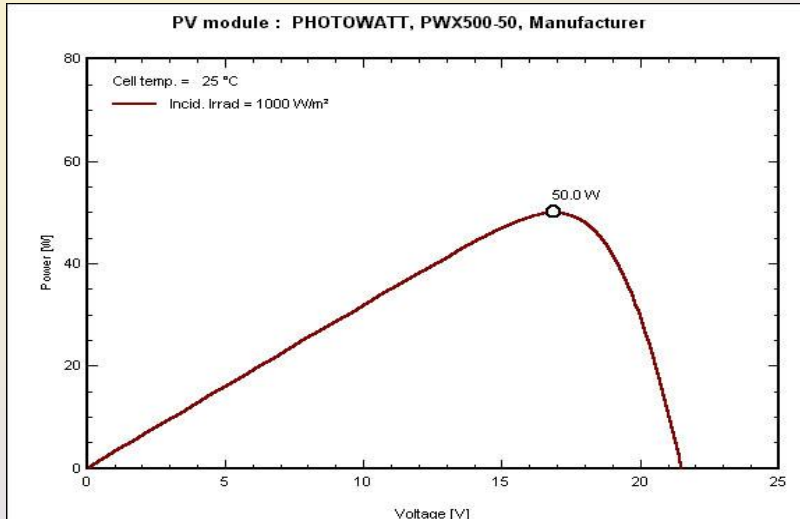
| EMBALLAGE | | |
|---------------------------------------|---------|--------------------|
| Poids du module | Kg | 5,5 |
| Taille du module | mm | 1007 x 462 x 24,5 |
| Type d'emballage | modules | 6 par cartons |
| Taille de l'emballage | mm | 1110 x 490 x 180 |
| Poids emballé | Kg | 35 |
| Taille max d'une palette (34 modules) | mm | 1150 x 1050 x 1600 |
| Poids maximum d'une palette | Kg | 570 |

| PW500 | | Configuration 12 V | | |
|---|---|--|------|------|
| Puissance typique | W | 45 | 50 | 55 |
| Puissance minimale | W | 40,1 | 45,1 | 50,1 |
| Tension à la puissance typique | V | 16,9 | 17,2 | 17,3 |
| Intensité à la puissance typique | A | 2,65 | 2,9 | 3,2 |
| Intensité de court circuit | A | 2,95 | 3,1 | 3,45 |
| Tension en circuit ouvert | V | 21,6 | 21,6 | 21,7 |
| Tension maximum du circuit | V | 600V DC | | |
| Coefficients de température | | $\alpha = +0,95 \text{ m A/}^\circ\text{C}$; $\beta = -79 \text{ m V/}^\circ\text{C}$; $\gamma \text{ P/P} = -0,43 \text{ \% /}^\circ\text{C}$ | | |
| Spécifications de puissance à 1000 W/m² : 25°C : AM 1,5 | | | | |

Effet de l'ensoleillement et de la température



Puissance et MPP



Pour s'assurer que les cellules travaillent à leur puissance maximale, il faut veiller à ce que la charge impose ce point de fonctionnement optimal.

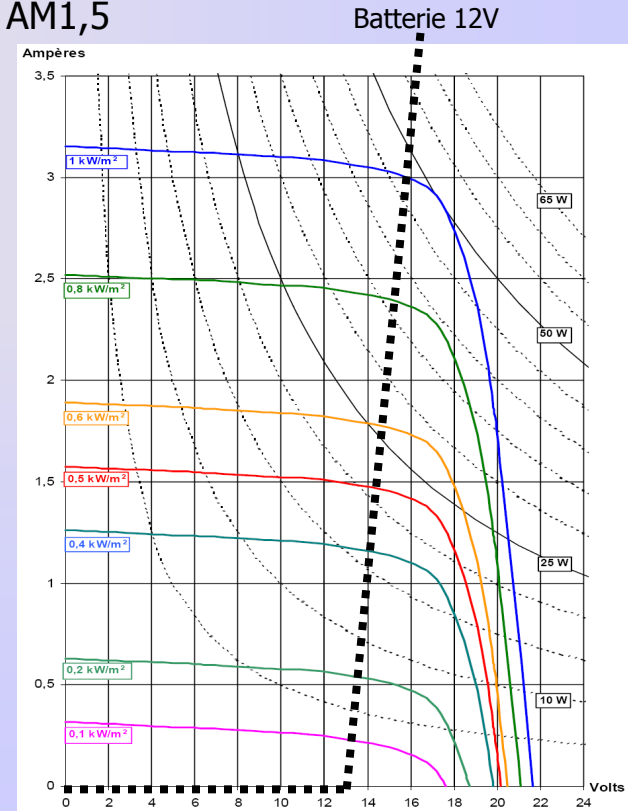
Dans le cas d'une charge de type « batterie », c'est elle qui fixe la tension, dès lors la tension de la batterie sera choisie en conséquence (origine de l'appellation des tensions des panneaux). La puissance fournie ne sera pas toujours à puissance maximale.

Si on désire récupérer le maximum de puissance d'un module photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un adaptateur de charge (maximum power tracker). Ce dispositif électronique impose le point de fonctionnement des modules afin que la puissance fournie soit toujours à puissance maximale.

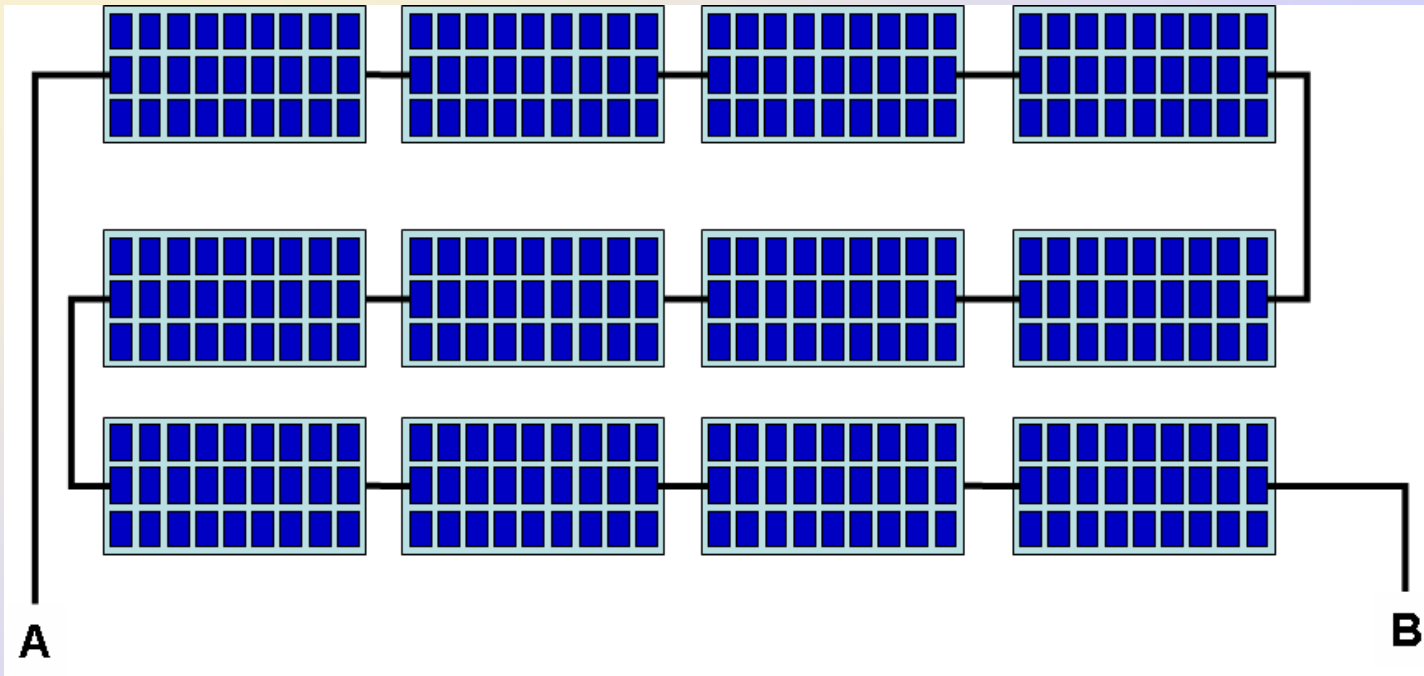
Puissance crête (Wc ou Wp) :

Puissance électrique délivrée dans les conditions standard (stc)

- Eclairage solaire de 1kW/m²
- Température des cellules PV de 25°C
- Masse d'air AM1,5



Champ photovoltaïque



Soit un champ photovoltaïque composé d'une chaîne de 12 modules PV

Caractéristiques d'un module PV : $V_{co} = 21,6V$ $U_{mpp} = 17,2 V$ $I_{mpp} = 2,9 A$

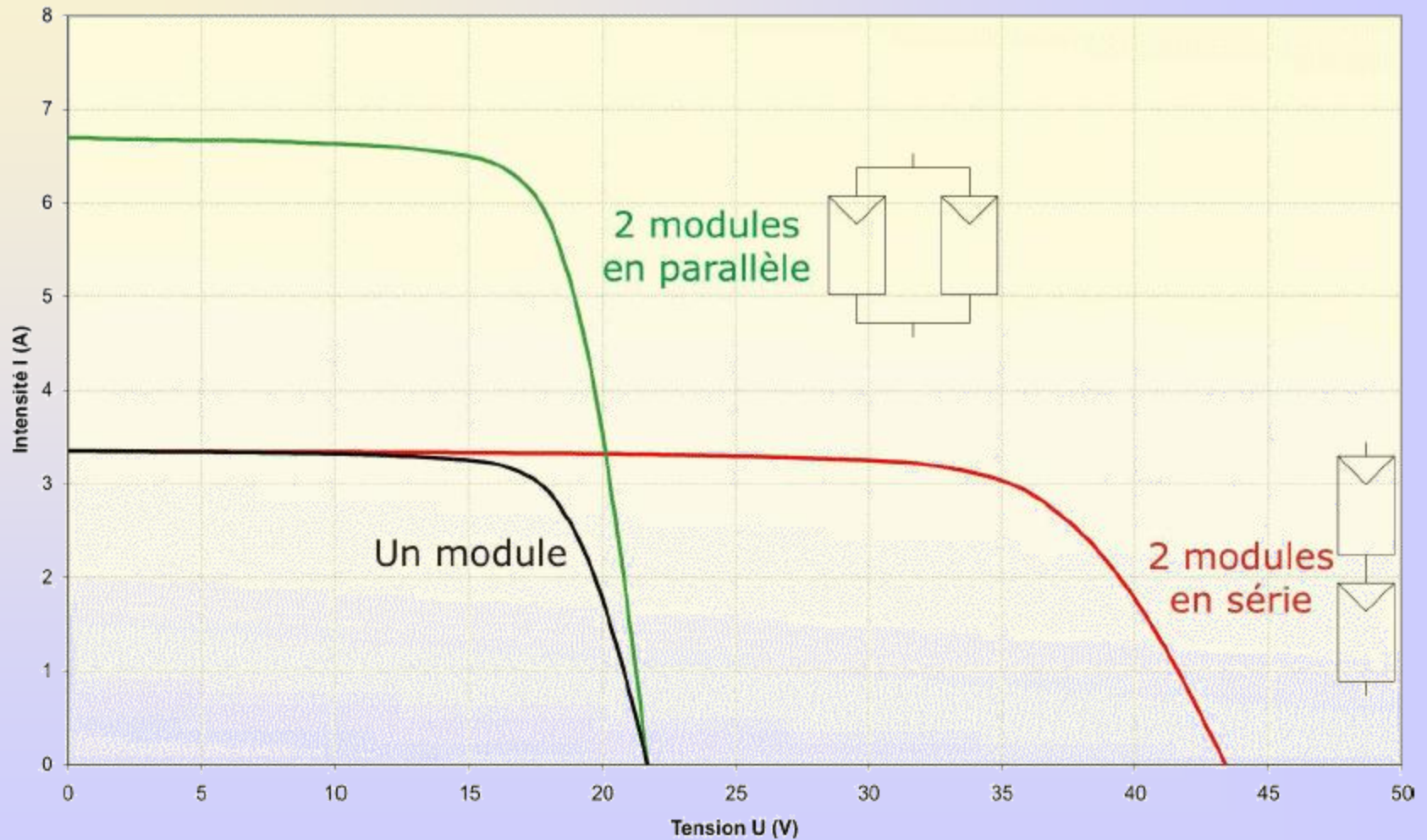
U_{AB} à vide =

U_{AB} à puissance maximale =

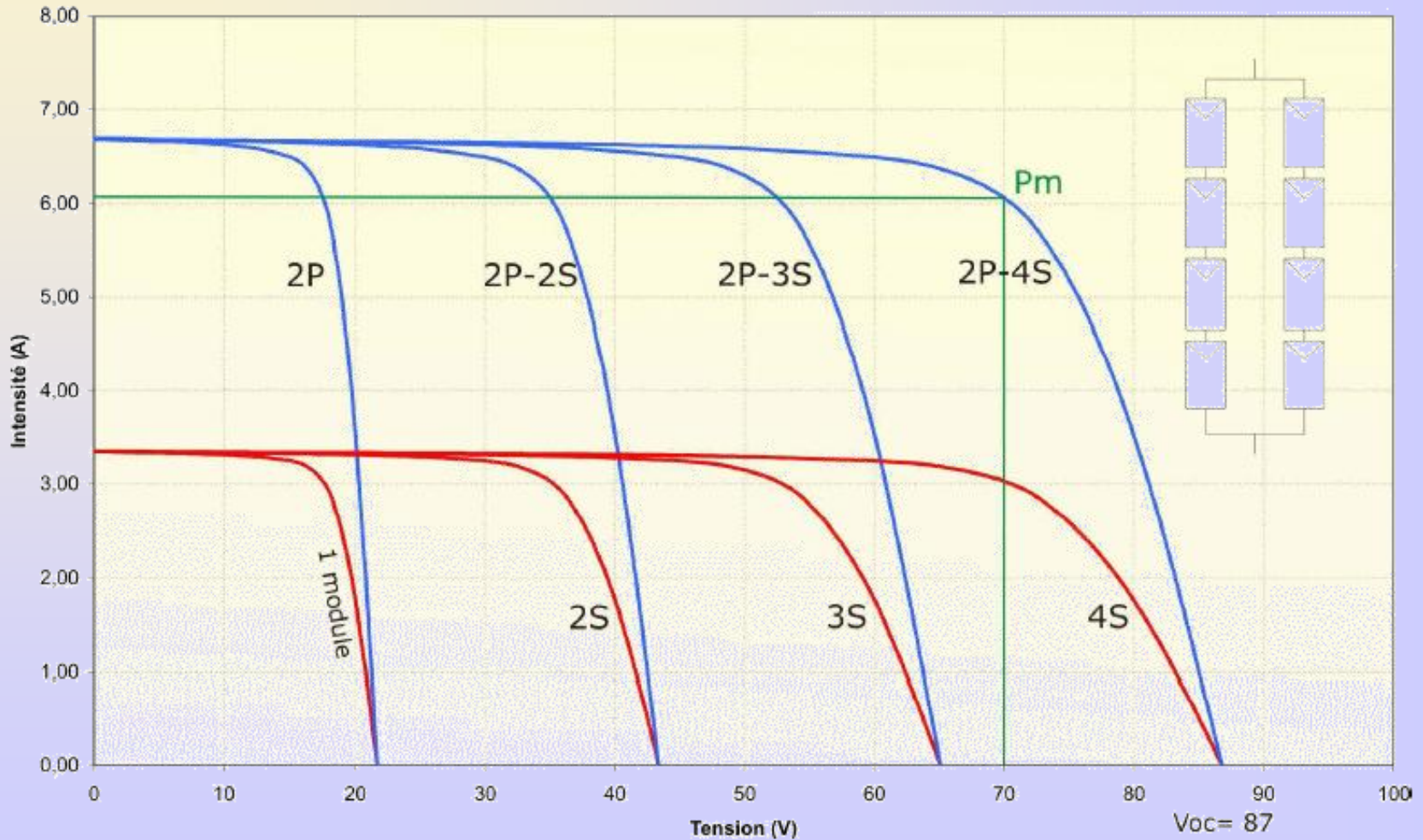
I à puissance maximale =

Puissance maximale =

Courbes $I=f(U)$ de 2 modules



Courbes I=f(U) de 8 modules

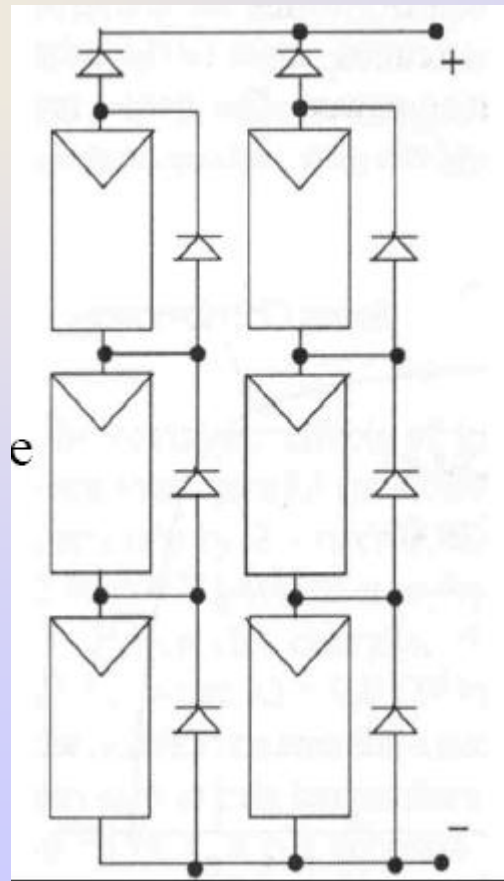


Diodes de protection bypass

Objectif : limiter la tension inverse à une valeur acceptable (point de vue thermique ou avalanche)

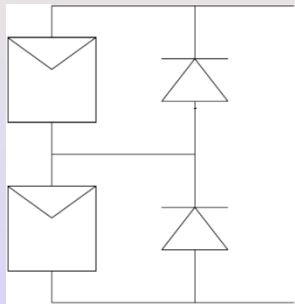
les diodes bypass ne conduisent qu'en situation de déséquilibre et limitent la perte de puissance

la caractéristique $I=f(V)$ est néanmoins modifiée

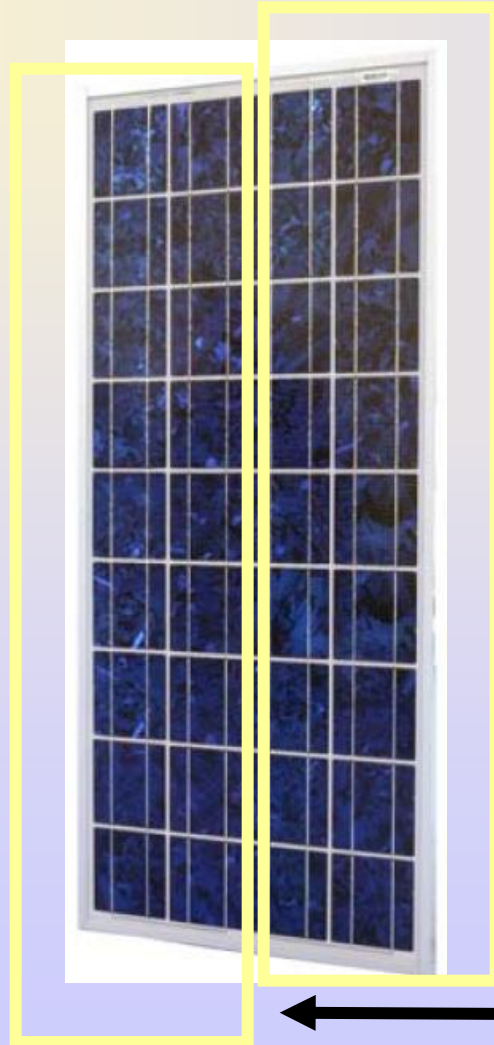


Pour limiter le nombre de diodes de protection (soucis économique), une seule diode par groupe de 24 cellules environ

Utilisation des diodes bypass du panneau PW500



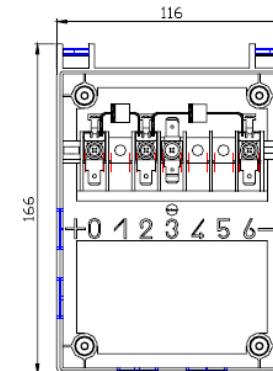
Panneau PW500



JBOX

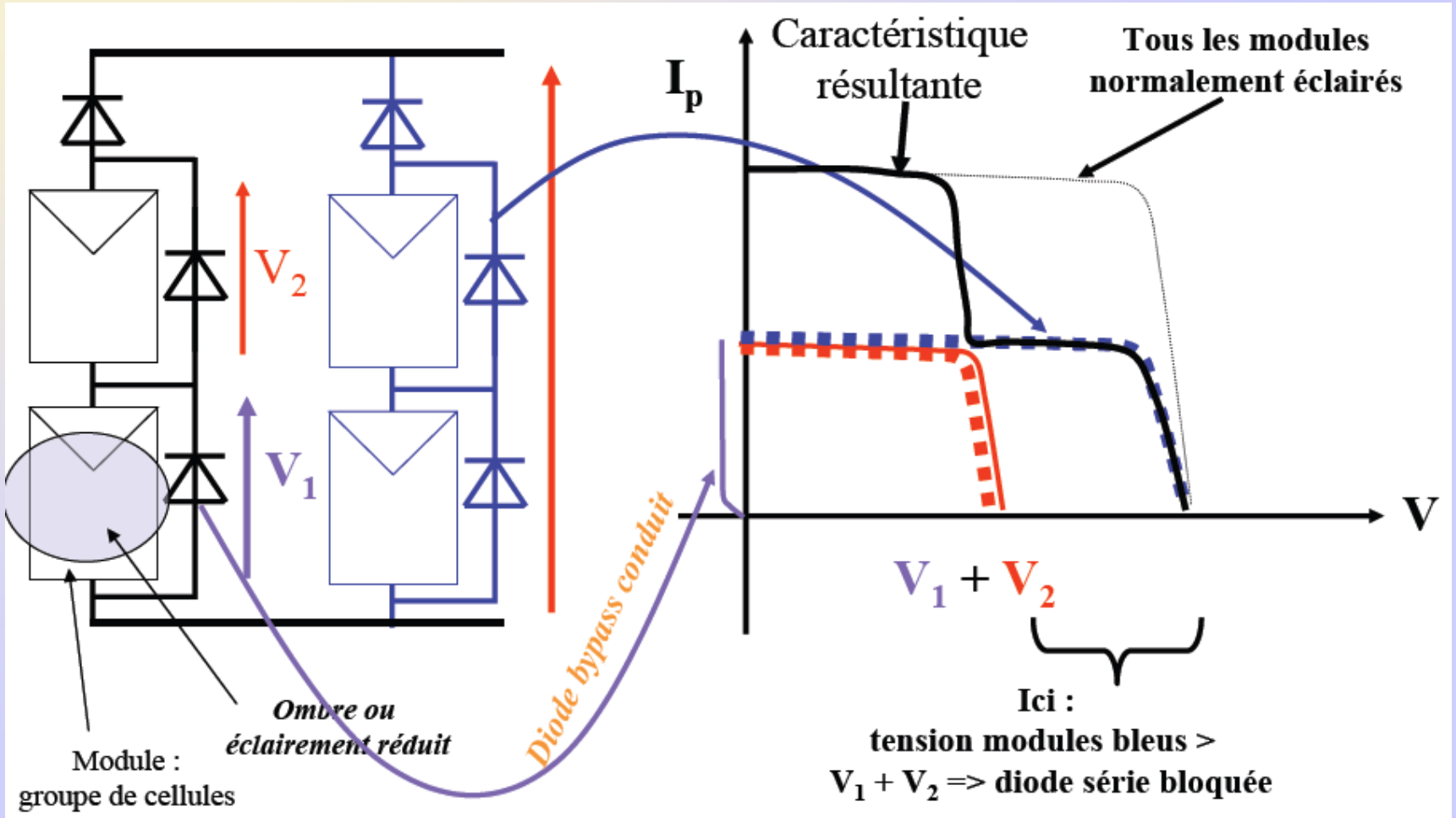


Boite universelle de raccordement permettant une section de câble de 1,5mm² à 4mm² (AWG11 à AWG16)



Ce module peut-être équipé, en option, de 2 diodes anti-retour (1 diode pour 18 cellules)

Fonctionnement avec diode bypass



Modules intégrés au bâti



« Tuiles solaires »



Brise-soleil



Modules non intégrés au bâti



Points à retenir

Puissance crête : Puissance instantanée maximale délivrée par un module sous conditions standardisées exprimée en Wc (1 kWc = 1 000 Wc, 1 MWc = 1 000 kWc)

Conditions standards de test :

- Eclairement de 1000 W/m²
- Air-masse de 1,5 (AM1,5)
- Température de 25°C

Rendement d'un module :

$$\eta_{STC} = \frac{P_{crête}}{1000.S}$$

Rôle des diodes bypass

Protection des personnes côté DC