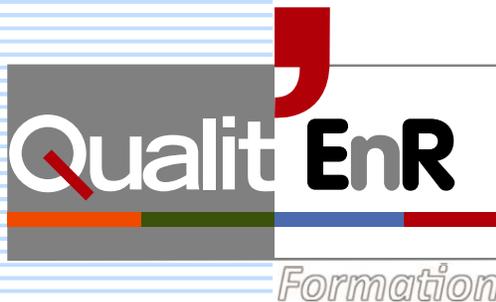




## Formation

Cellules, modules et  
systèmes photovoltaïques



*Installation photovoltaïque raccordée au réseau  
(compétence électrique)*

*Version janvier 2012*

**Cristallin : 300 $\mu$ m**

- Silicium polycristallin (p-Si)
- Silicium monocristallin (m-Si)

**Couches minces :  
1 à 3  $\mu$ m**

- Silicium amorphe (a-Si)
- Couche mince de diséléniure de cuivre et d'indium CIS
- Tellure de cadmium Cd Te

Pour la fabrication de ce type de cellules photovoltaïques, on utilise des cristaux de silicium sous forme monocristalline ou poly cristalline.



## 2 procédés de fabrication

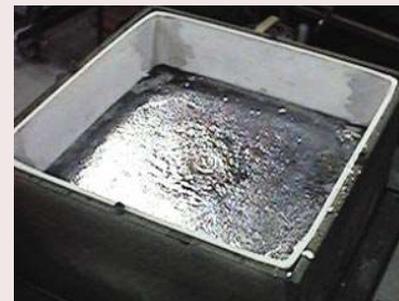
### Silicium monocristallin



Obtenu par tirage ou par fusion par zone.  
Une plaquette de silicium monocristallin est composée d'un seul grain.  
La technologie monocristalline, plus chère, utilise des barres.

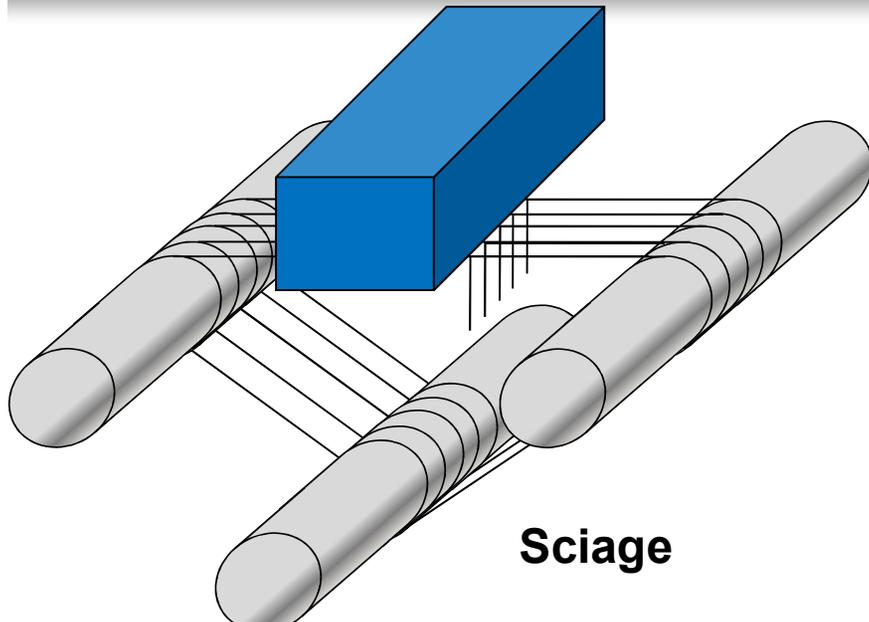


### Silicium poly cristallin



Obtenu par fonte des cristaux de silicium. Son taux de rendement est légèrement inférieur mais il est beaucoup moins cher à l'achat.

# Filière Silicium Cristallin



**Sciage**

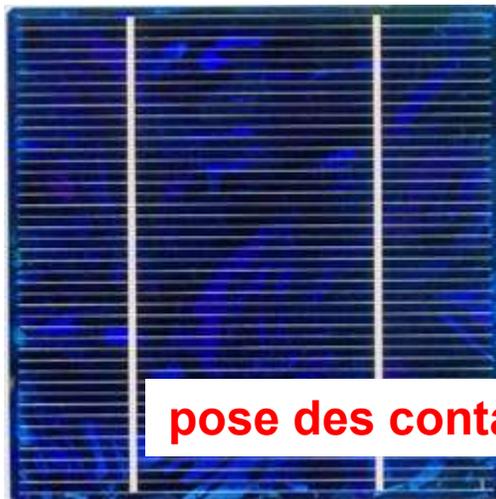


Photowatt Technologies



**Dopage  
des  
tranches**

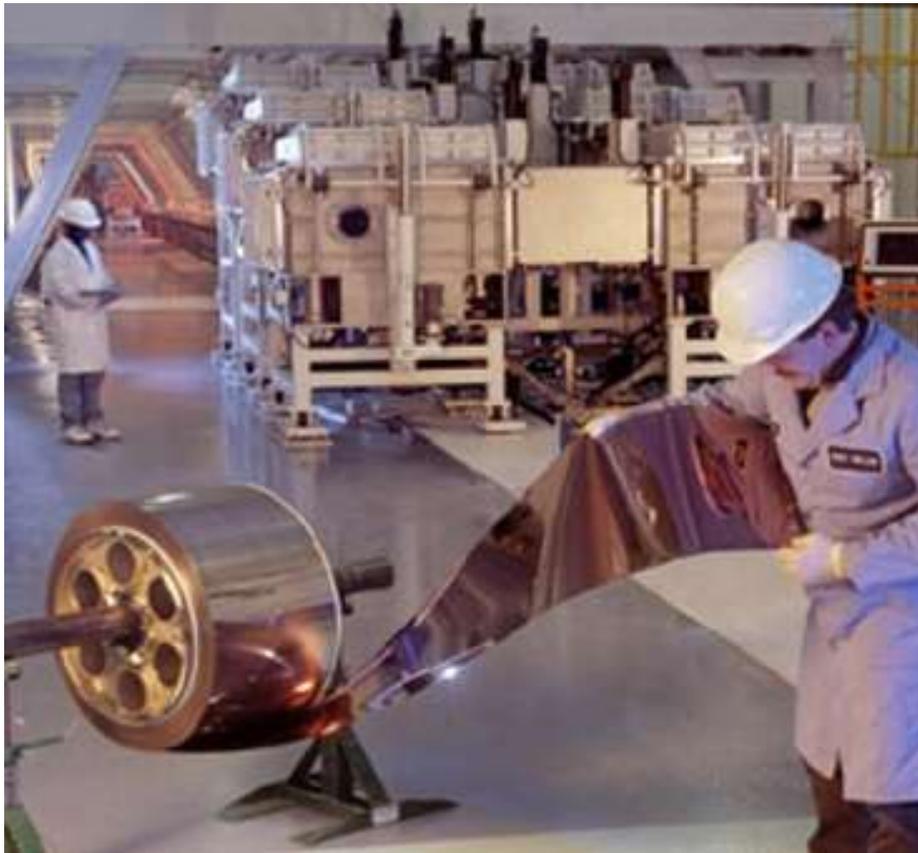
**Four à diffusion  
800 °C**



**pose des contacts métalliques**



**Contrôle et tri des cellules**



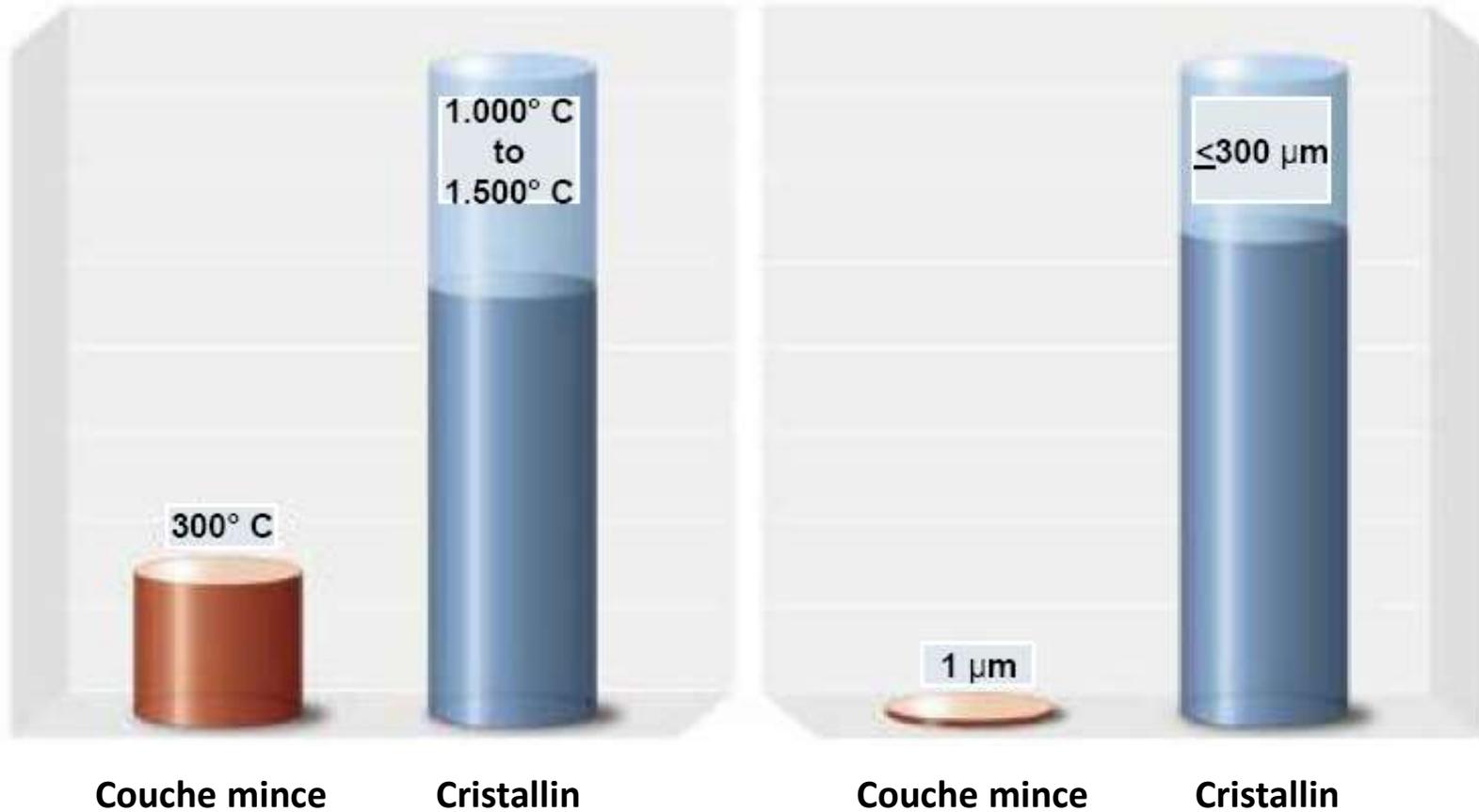
## La fabrication de cellules au silicium amorphe .

Le silicium est produit directement sur le support à partir du gaz silane (qui apporte la matière). L'adjonction des dopants est réalisé par ajout de gaz phosphine, borane ou silane.

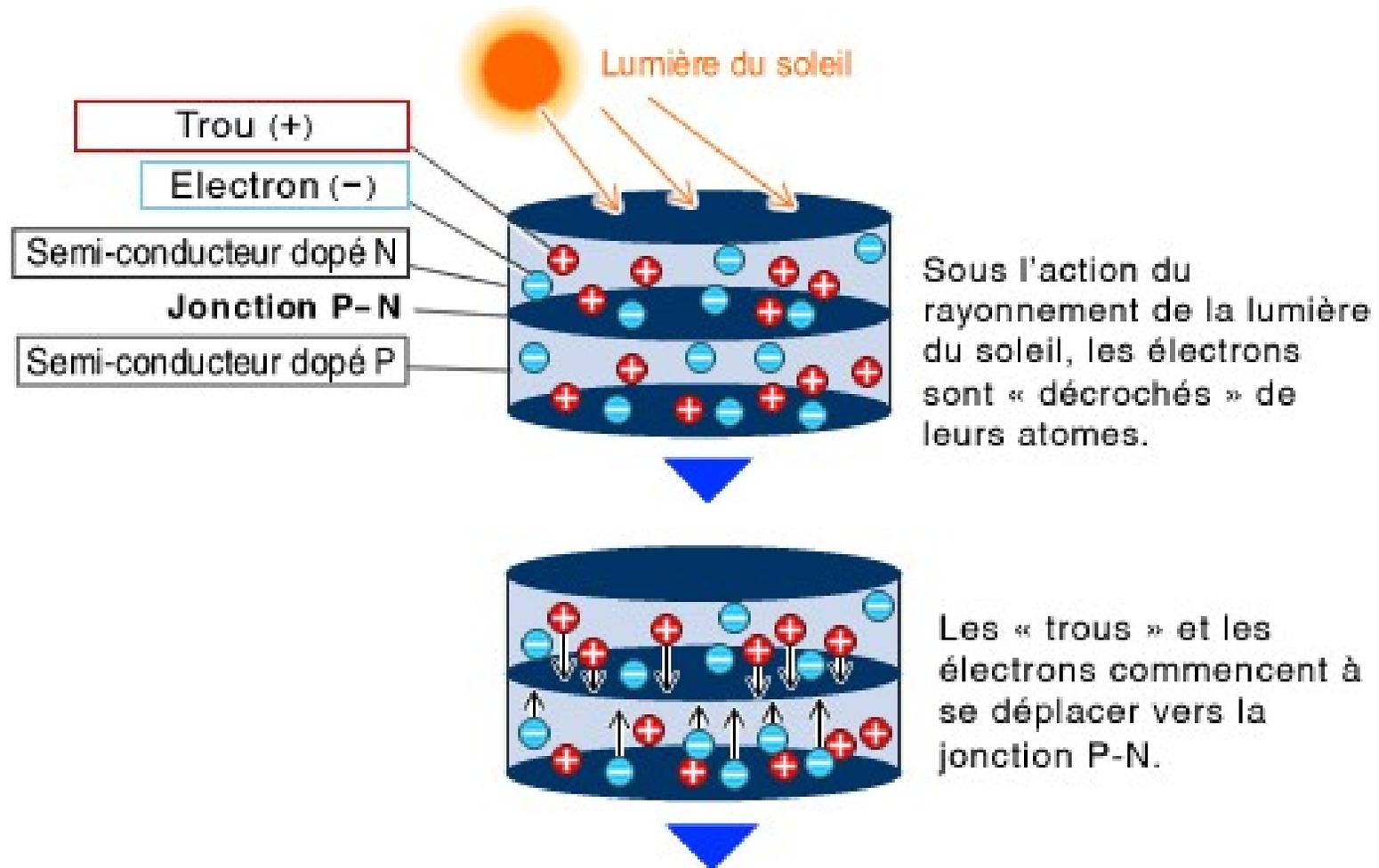
## La dépose de l'électrode par évaporation

L'électrode (généralement de l'aluminium) est déposée par évaporation.

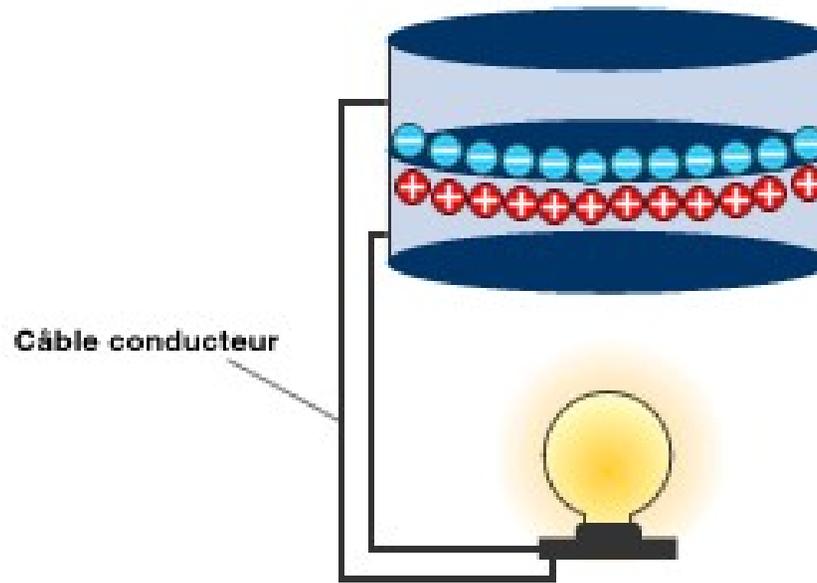
# Consommation d'énergie et de matériaux pour les couches minces et le cristallin



# L'effet photovoltaïque



# L'effet photovoltaïque

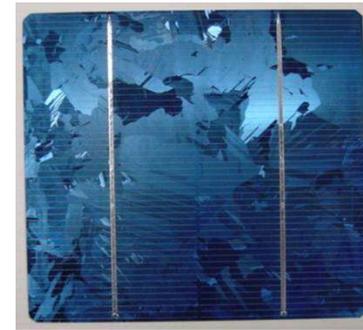


Quand les trous rejoignent les électrons au niveau de la jonction P-N, une tension est générée. Si une connexion extérieure est établie, un courant électrique continu est créé.

## Monocristallin



## Polycristallin



Tailles les plus courantes :

4'' = 101 mm

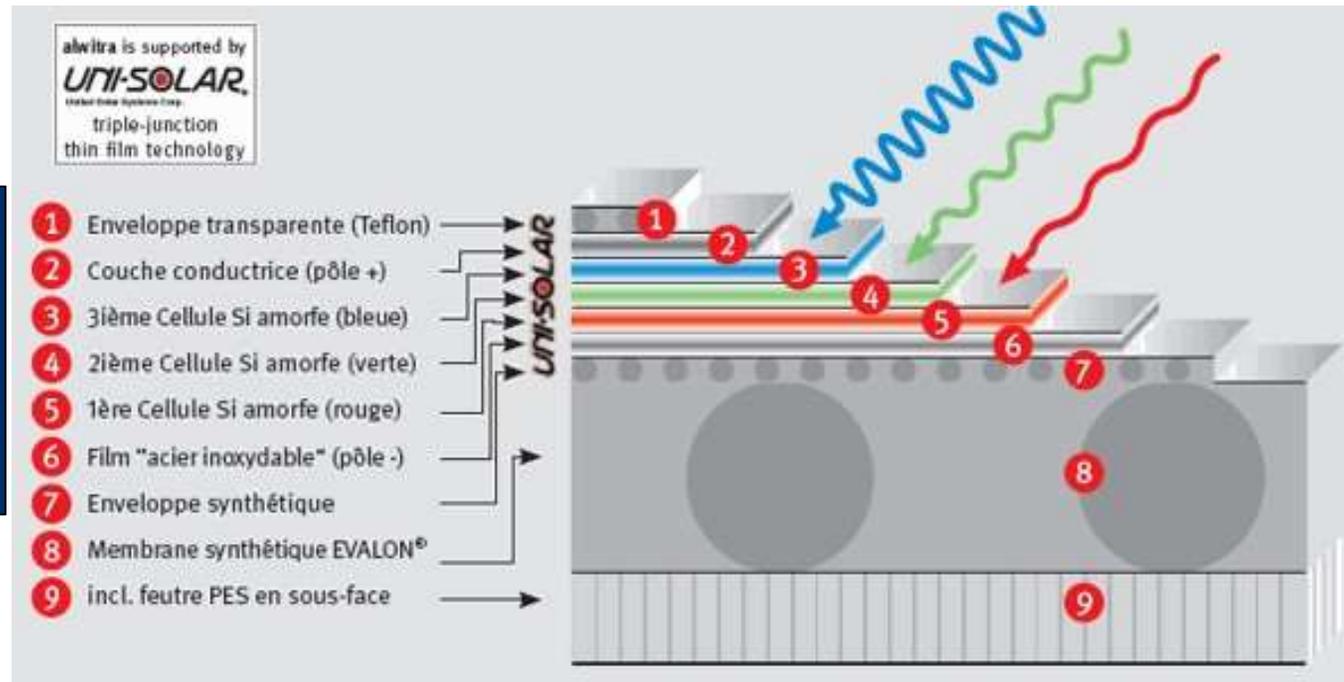
5'' = 125,5 mm

6'' = 155,5 mm

# Exemples de cellules couches minces



La surface n'est pas standardisée



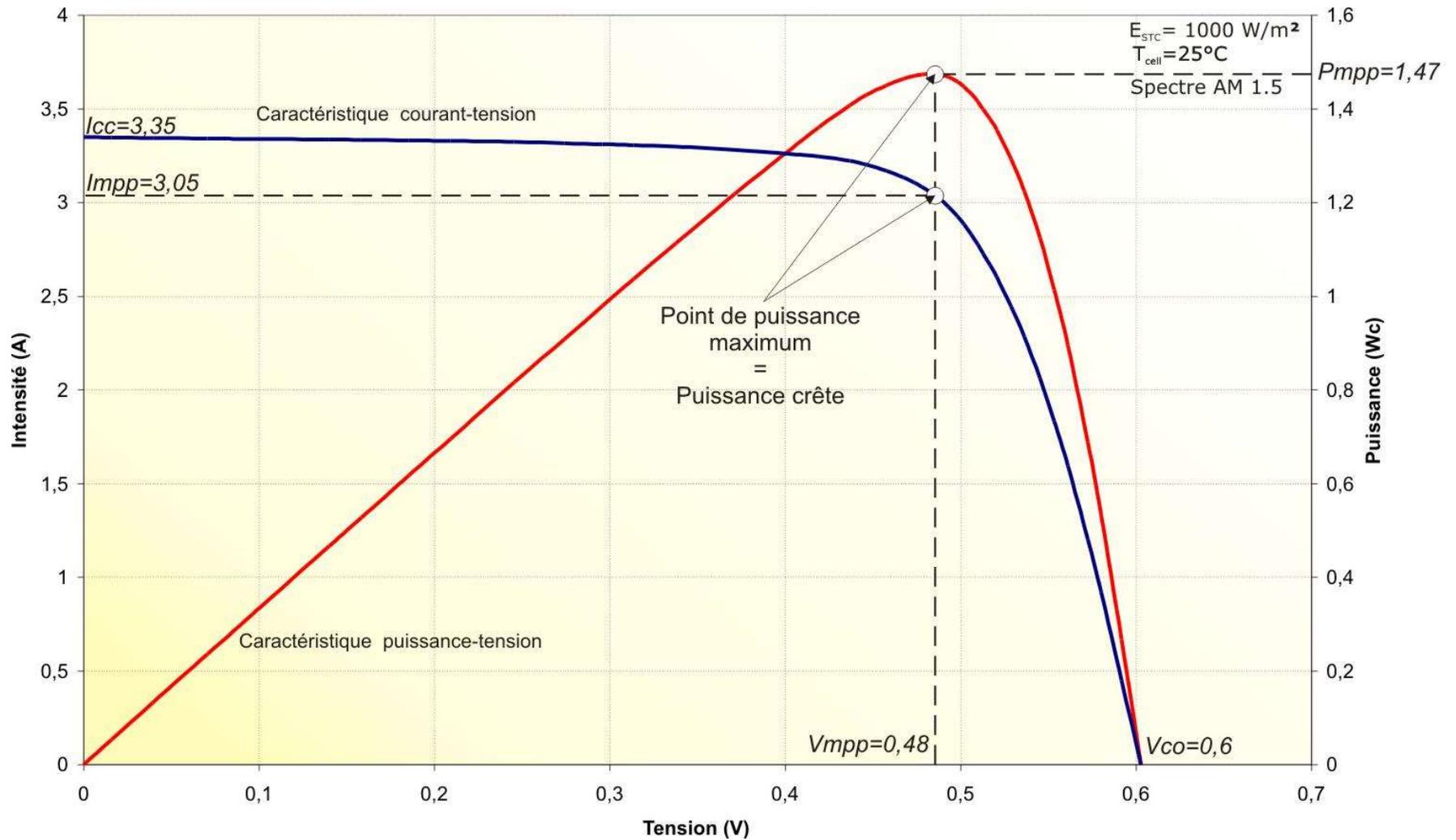
# Rendement d'une cellule



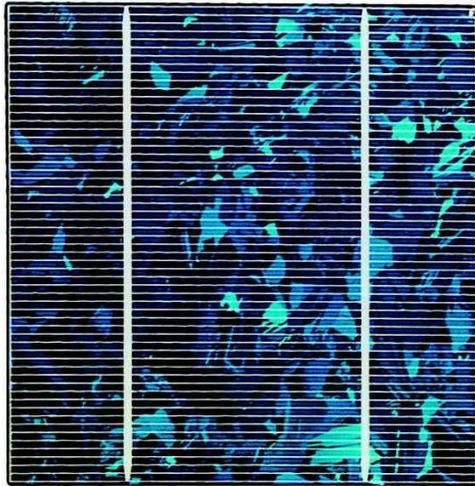
Technologie de cellule	Rendement actuel en laboratoire (2008)	Rendement actuel (2008)
m Si monocristallin	24,7 %	13 à 17 %
p Si polycristallin	19,8 %	9 à 15 %
a Si amorphe	13 %	4 à 9 %

- U : tension (Volt - V)
- I : courant (Ampère - A)
- P : puissance (Watt - W)
- P<sub>c</sub> : puissance d'une cellule, d'un module, d'un système mesurée dans les Conditions Standard de Test (Watt-crête - W<sub>c</sub>)
- Les Conditions Standard de Test – STC :
  - Eclairage énergétique = 1 000 W/m<sup>2</sup>
  - T<sub>cellule</sub> = 25 °C
  - A.M = 1,5
- En courant continu :
  - Puissance :  $P = U \times I$  (en W ; Watt)
  - Energie :  $E = U \times I \times t$  (en Wh ; Wattheure)
- En courant alternatif (monophasé)
  - Puissance active :  $P = U \times I \times \cos \phi$  (W ; Watt)
  - Puissance apparente :  $S = U \times I$  (en VA)
  - Energie :  $E = U \times I \times \cos \phi \times t$  (en Wh ; Wattheure)

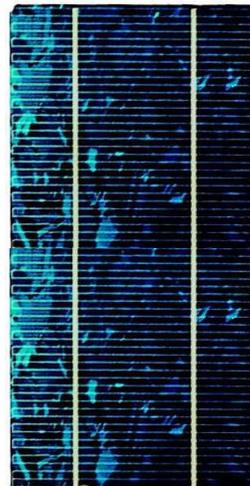
# Caractéristique courant tension puissance d'une cellule



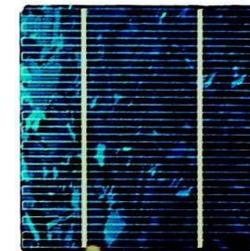
## Différentes tailles de cellules en polycristallin



101 x 101



101 x 50,5



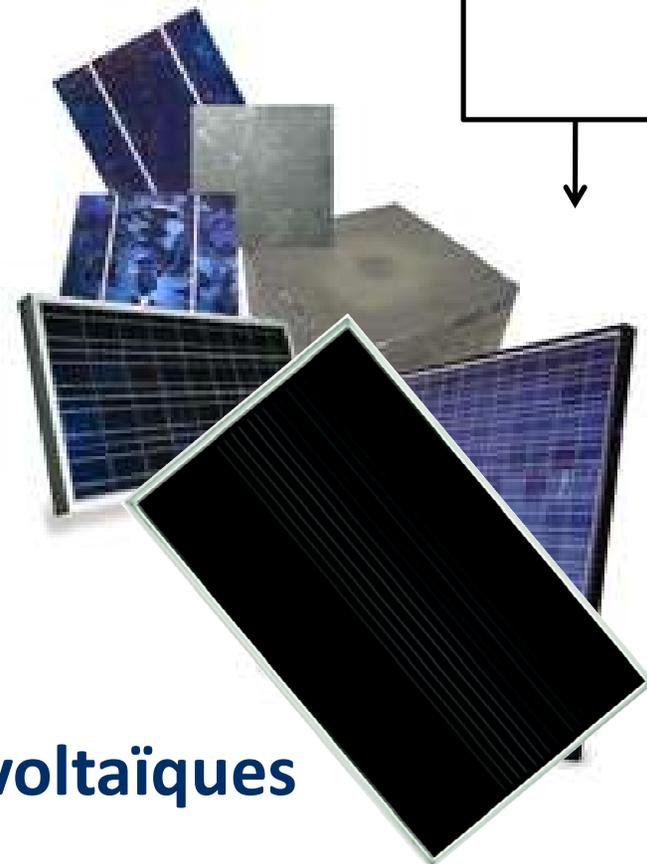
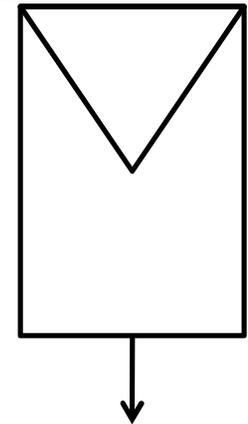
50,5 x 50,5

Performance à 1 kW/m <sup>2</sup> et 25°C			Cellule	½ cellule	¼ cellule
Valeurs typiques, cellule nue					
Tension circuit ouvert	V <sub>co</sub>	(V)	0,6	0,6	0,6
Courant de court-circuit	I <sub>cc</sub>	(A)	3	1,5	0,75
Puissance Max. (env. 10%)	P <sub>mpp</sub>	(W)	1,3	0,65	0,32
Tension à puissance Max	V <sub>mpp</sub>	(V)	0,47	0,47	0,47
Courant à puissance Max	I <sub>mpp</sub>	(A)	2,7	1,36	0,68

## La constitution d'un module photovoltaïque

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

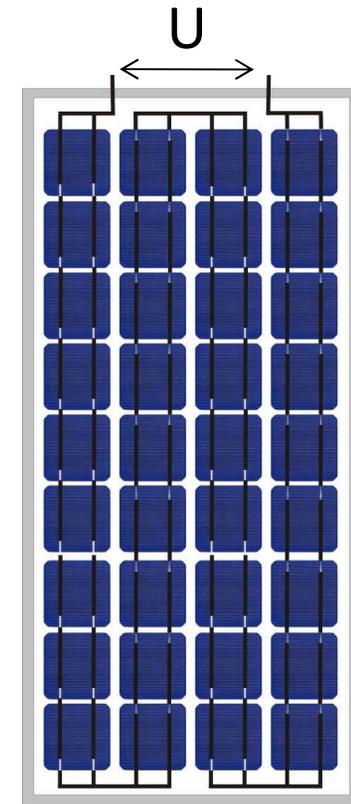
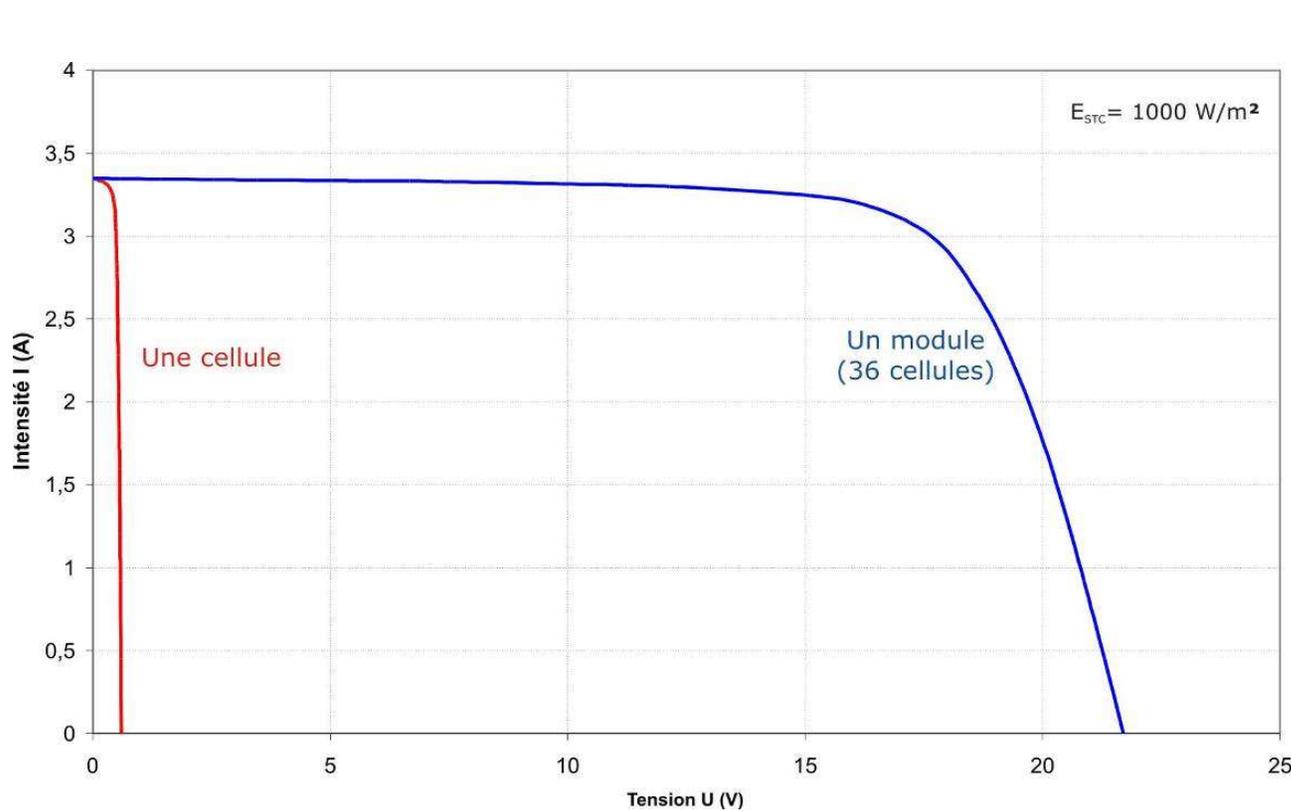
Symbole



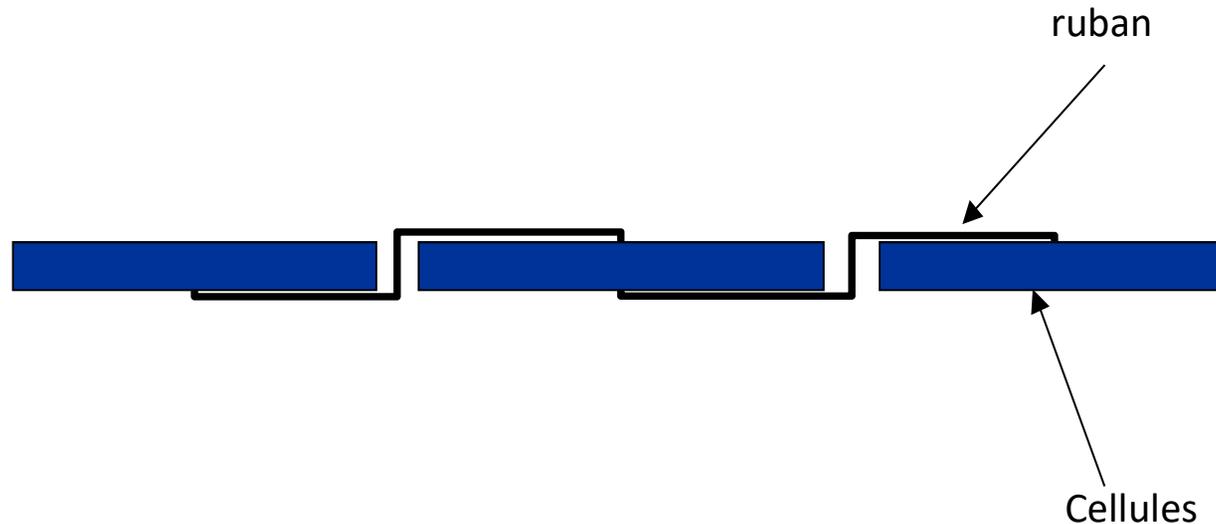
D'où constitution de **modules** photovoltaïques

# La constitution d'un module photovoltaïque

- 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'appairage des cellules)

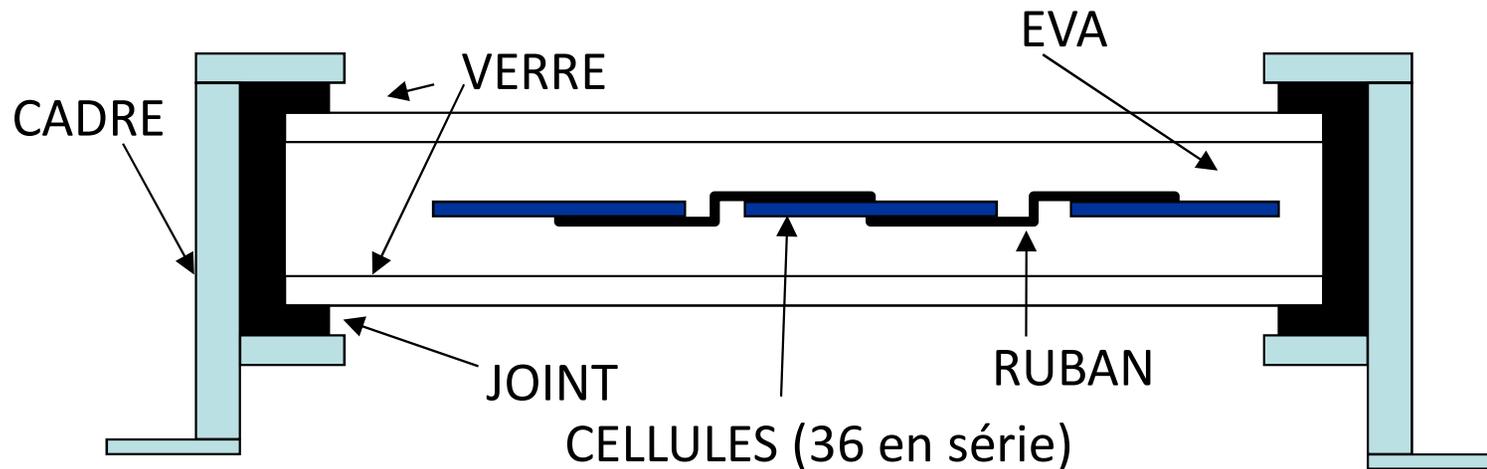


- Câblage des cellules photovoltaïques
  - Les cellules sont connectées entre elles par de fins rubans métalliques (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

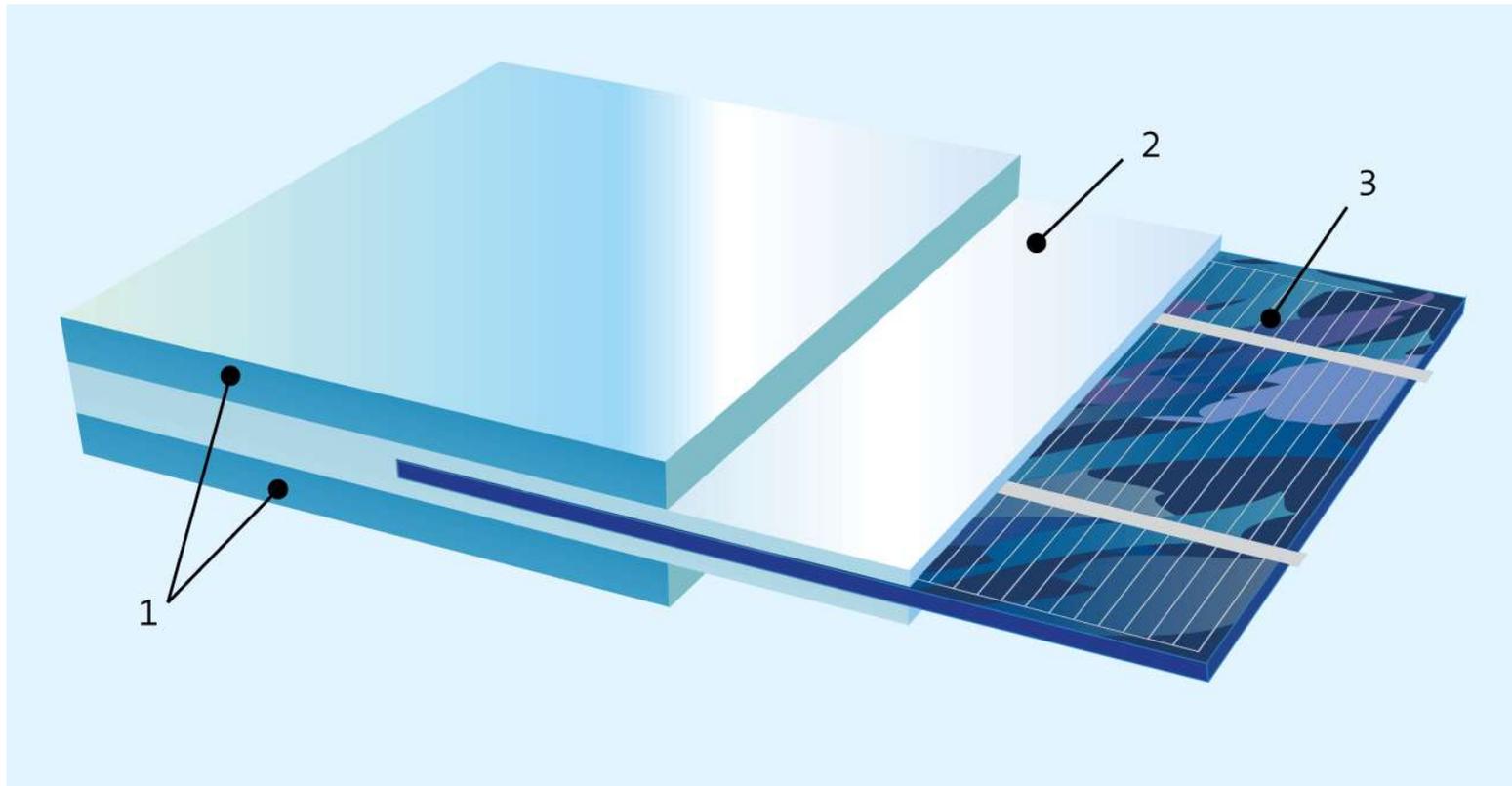


# La constitution d'un module photovoltaïque

- 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



## Coupe d'un laminé PV bi-verre



© www.solarpraxis.de

1. Verre face et arrière
2. Protection par EVA
3. Cellules cristallines

# La constitution d'un module photovoltaïque



## ■ 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 »





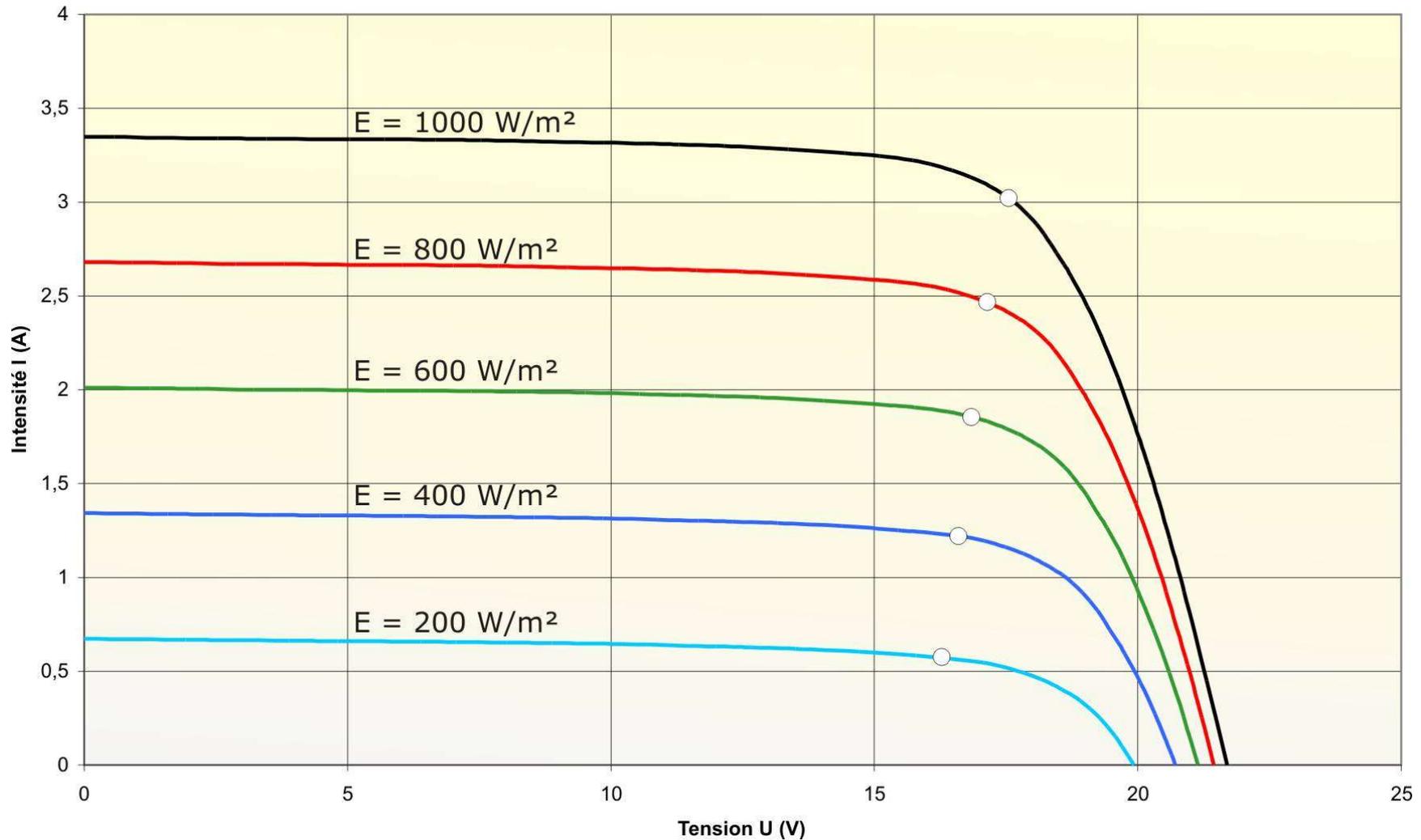
- Pour les câbles inter-modules, de groupes et principaux
  - Câbles unipolaire équivalent classe II - PV 1000-F (cf. guide UTE C 32-502)  
Stabilité aux UV – Tenue aux intempéries –
  - Tension : 1,2 Vco minimum,  
en pratique niveaux de tension: 300 à 1000V
  - Tenue en température :
    - 70°C température ambiante pour courant max
    - 90°C ou 120°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



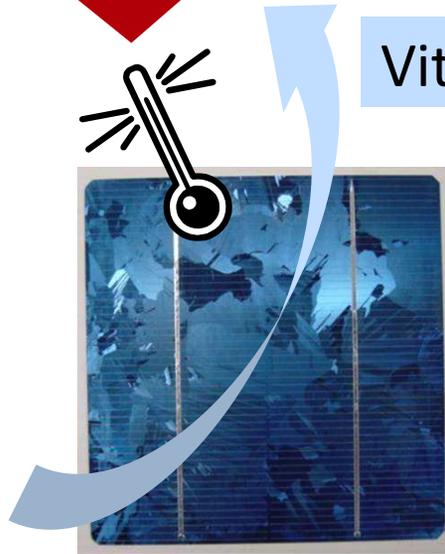
# Caractéristiques d'un module photovoltaïque au silicium cristallin selon l'ensoleillement



C'est la température de la cellule dans des conditions conventionnelles de fonctionnement :



Eclairement  
énergétique :  
 $800\text{W}/\text{m}^2$

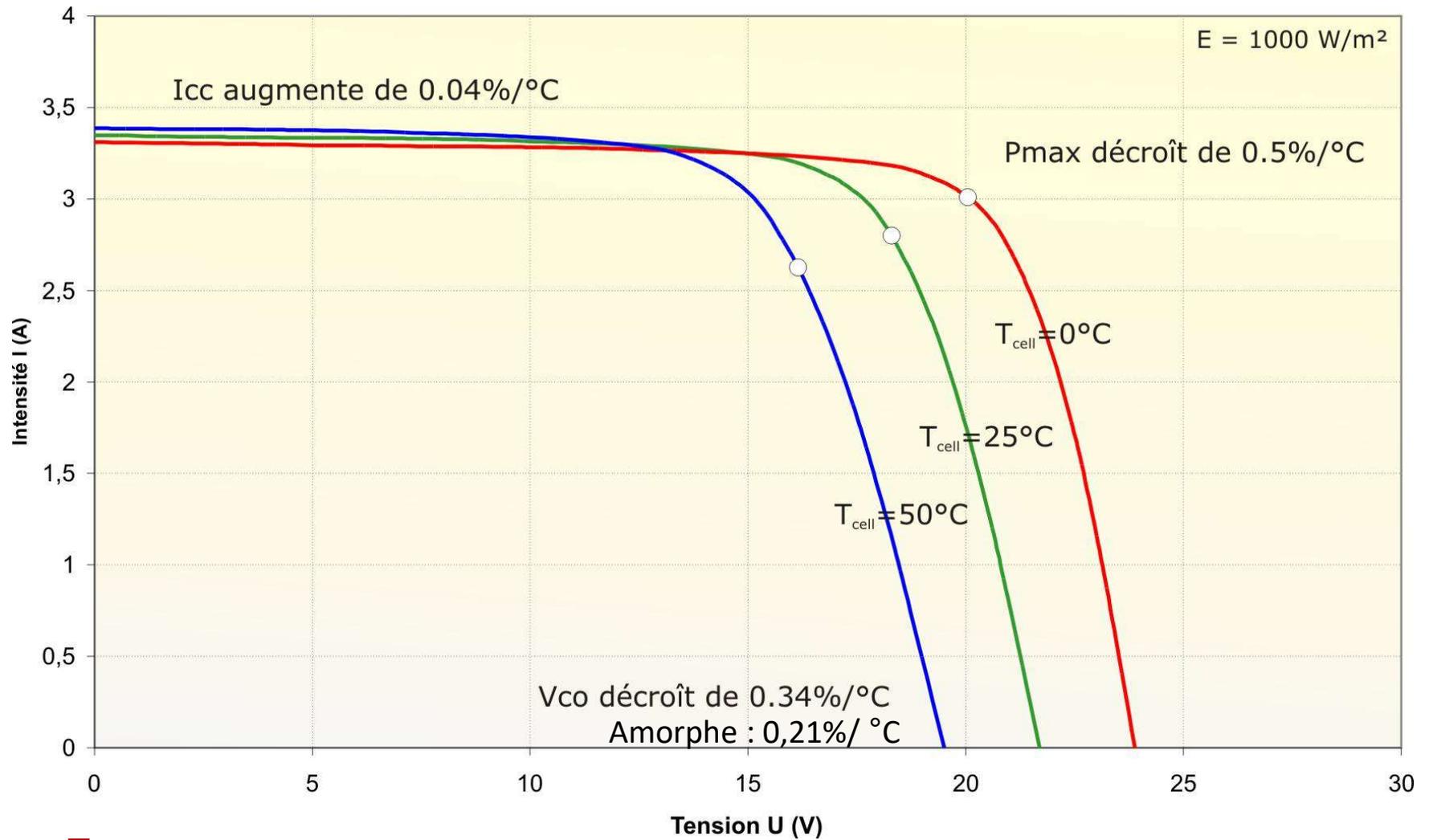


Vitesse d'air en surface :  $1\text{ m/s}$

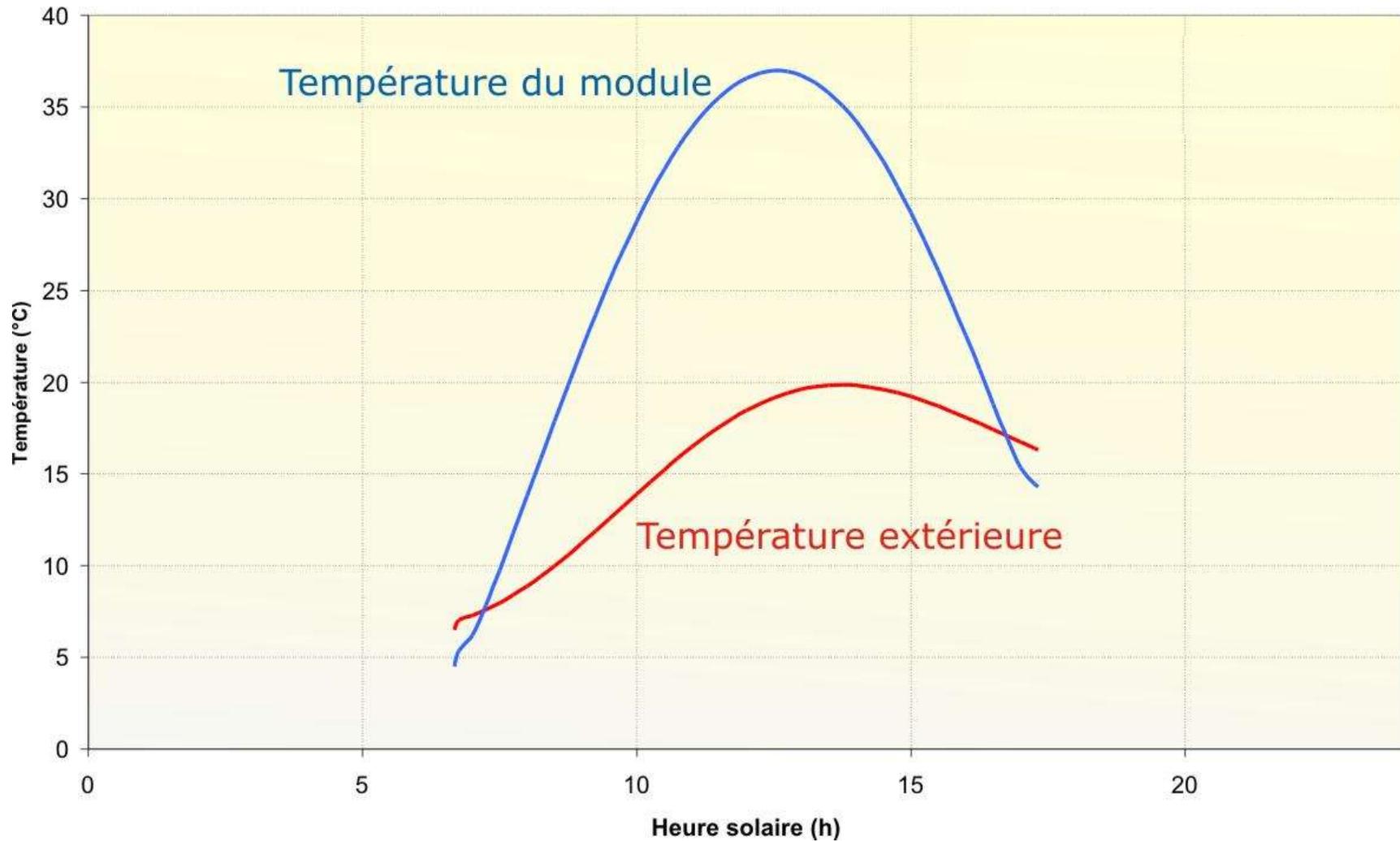


Température de l'air :  
 $20\text{ °C}$

# Caractéristiques d'un module photovoltaïque au silicium cristallin selon la température



# Température d'un module au silicium cristallin en fonctionnement



## ■ Caractéristiques :

- Isolation classe II
- Diodes by-pass intégrées
- Tension maximum admissible élevée (500 à 1000 V)
- Courant inverse admissible :  $I_{rm}$  au moins  $2 I_{SCSTC}$
- Connecteurs débrochables détrompés



## Rendement d'un module PV

$$\eta_{STC} = \frac{P_c}{E_{STC} \times S_{module}}$$

Technologie de cellule	Rendement actuel (2008)	Surface photovoltaïque pour 1kWc
m Si :monocristallin	13 à 17 %	7 à 8 m <sup>2</sup>
p Si :polycristallin	9 à 15 %	9 à 11 m <sup>2</sup>
a Si :amorphe	4 à 9 %	16 à 20 m <sup>2</sup>
m+a Si : mono + amorphe	16 à 18 %	6 à 8 m <sup>2</sup>
Autres semi-conducteurs		
CdTe (Tellurure de Cadmium )	9 à 10 %	10 à 11 m <sup>2</sup>
C.I.S (Diselénure de cuivre et d'indium)	10 à 12 %	11 à 13 m <sup>2</sup>

**ND170E1F**

**SHARP**

## SPECIFICATIONS

Cellules	Cellules en silicium polycristallin (155,5 mm) <sup>2</sup>
Nombre de cellules	48 montées en série
Tension maximale du système	1000 V CC
Puissance nominale	170 Wc
Dimensions	1 318 x 994 x 46 mm
Poids	16,0 Kg
Type de sortie	Câble avec connecteur

## VALEURS MAXIMALES ABSOLUES

Température de fonctionnement	-40 à +90 °C
Tension maximale du système	-40 à +90 °C

## COEFFICIENTS DE TEMPERATURE

$\alpha P_m$	-0,485 % / °C
$\alpha I_{sc}$	+0,053 % / °C
$\alpha V_{oc}$	-104 mV / °C

## PERFORMANCES

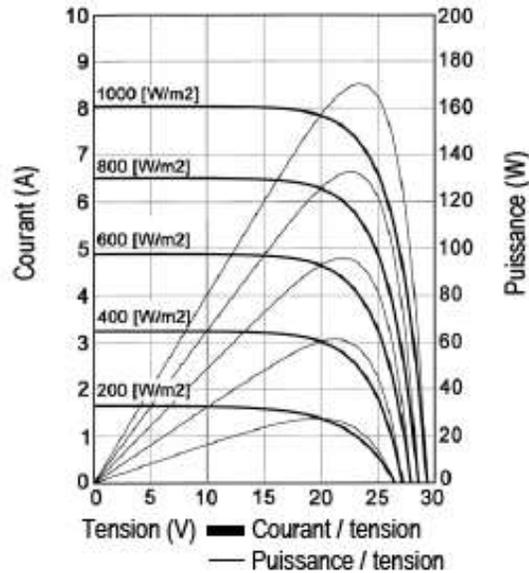
	Symbole	Min.	Typ.	Unité	Conditions
Tension en circuit ouvert	$V_{oc}$	-	29,3	V	Conditions de test standardisées (STC)  Ensoleillement : 1000 W/m <sup>2</sup> AM : 1,5 Température du module : 25°C
Tension à puissance maximale (crête)	$V_{pm}$	-	23,2	V	
Courant de court circuit	$I_{cc}$	-	8,04	A	
Courant à puissance maximale (crête)	$I_{pm}$	-	7,33	A	
Puissance maximale (crête)	$P_m$	161,5	170,0	Wc	
Rendement du module	$\eta_m$	-	13,97	%	

ND170E1F

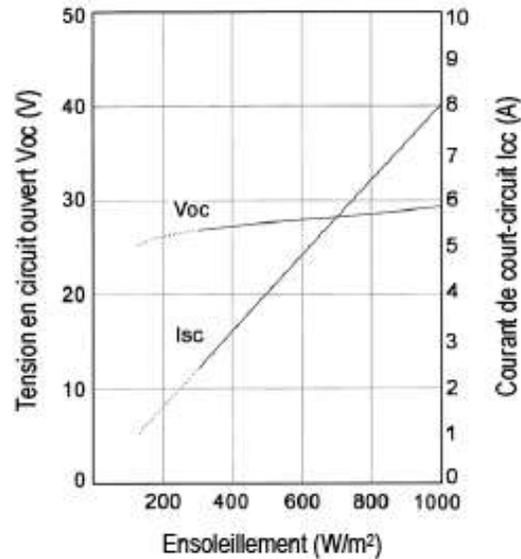
SHARP

## CARACTERISTIQUES

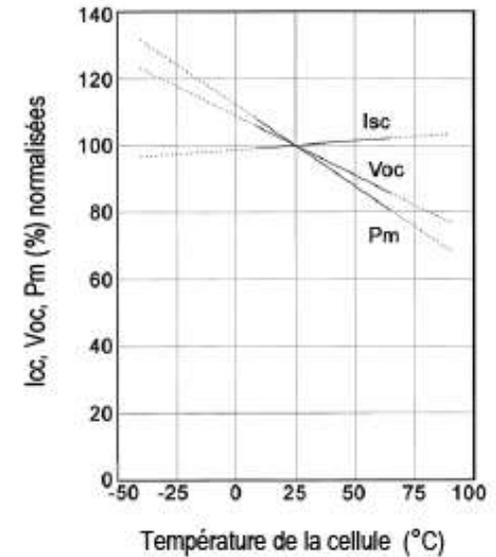
Courant, puissance en fonction de la tension  
(température de la cellule : 25°C)



Tension en circuit ouvert et courant de court-circuit en fonction de l'ensoleillement (température de la cellule : 25°C)

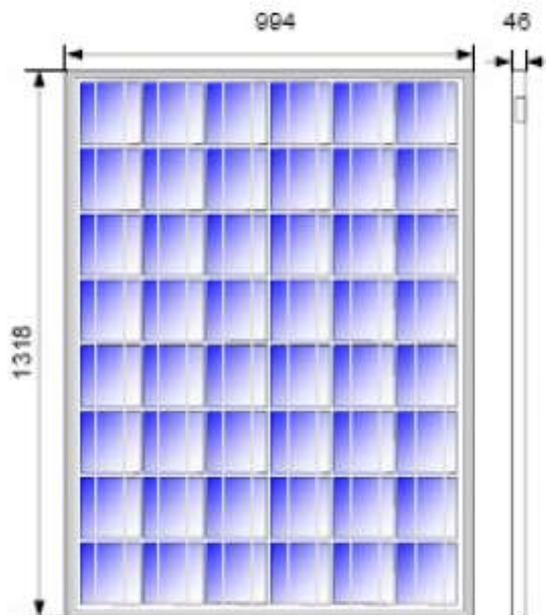


Icc, Voc, Pm normalisées en fonction de la température de la cellule



## MODULES SOLAIRES STANDARD

Modules photovoltaïques verre – Tedlar.



	MODULES 24V
Puissance (Wc)	170 Wc
Référence	AX02Y8
Type de cadre	aluminium anodisé
Transmission solaire	90,6%
Type de cellules	polycristallines
Nombre de cellules	48 cellules en série
Epaisseur du verre	4 mm
Type de connecteurs	TYCO
Type de câblage	2 x 1m en 4mm <sup>2</sup>
Diodes de by-pass	3
Courant court circuit [Isc] (en A)	8,81 A
Tension circuit ouvert [Voc] (en V)	28,9 V
Courant maximum (Impp)	7,46 A
Tension maximale (Vmpp)	22,8 V
Tension max. système (V)	1000 V DC
Rendement module	14,6 %
Gamme de température	-40°C à +90°C
Poids	16 Kg
dimensions	1318 x 994 x 46mm
Dimensions cellules	155mm x 155mm
Normes	Norme IEC 61215 TUV classe II insulation Marquage CE

# Différents modules photovoltaïques au silicium

- Conformité **NF 61730-1-2**
- administrative (Quater 200 code des impôts) :

**CEI 61215**

**Monocristallin**

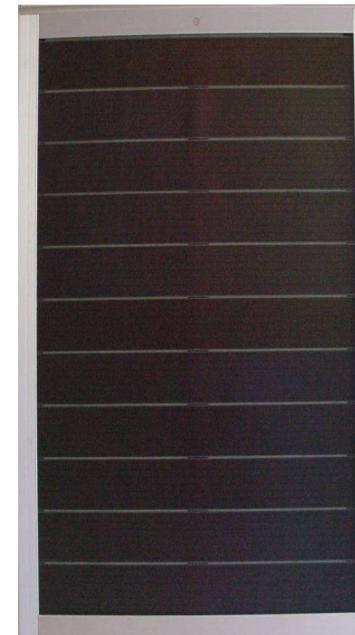


**Polycristallin**



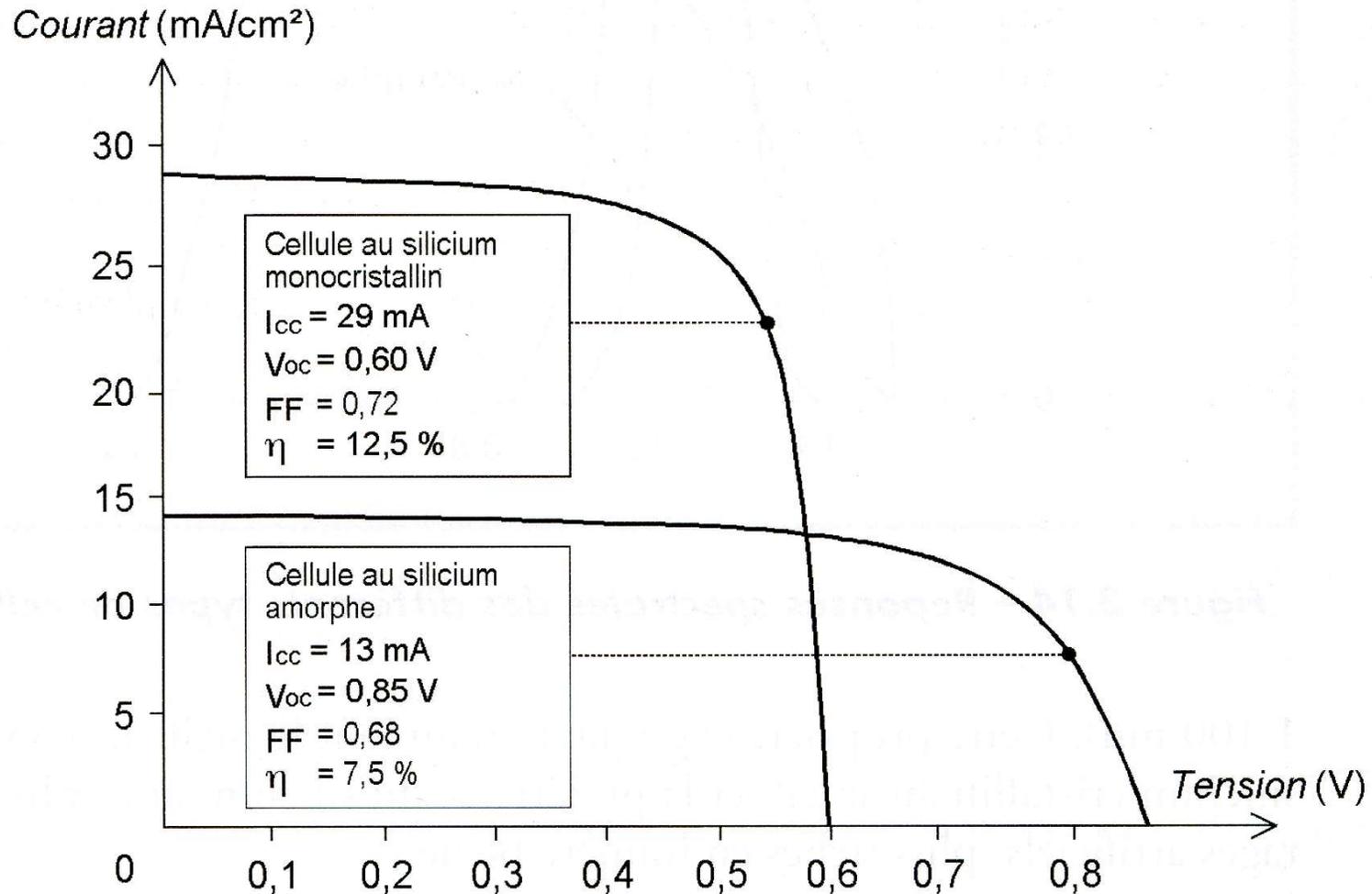
**CEI 61646**

**Couches minces**

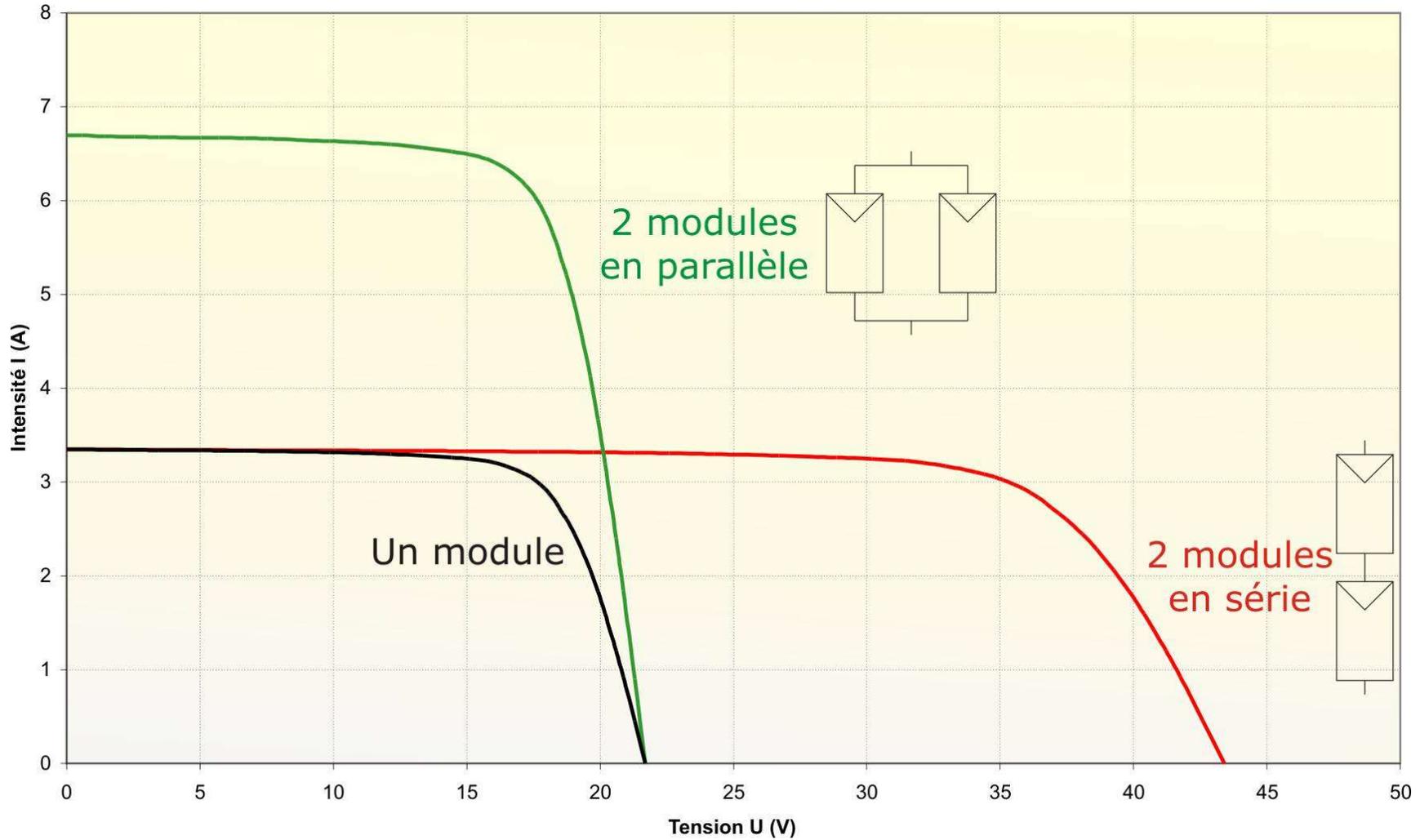


- $P_m$  Puissance nominale (*dans les conditions STC, en Wc*)
- $I_{cc}$  Courant de court circuit (*en A*)
- $V_{oc}$  Tension de circuit ouvert (*en V*)
- $V_{mpp}$  Tension à puissance maximale (*en V*)
- $I_{mpp}$  Intensité à puissance maximale (*en A*)
- $k_i$  Coefficient de température pour l'intensité (*en %/°C*)
- $k_v$  Coefficient de température pour la tension (*en %/°C*)
- $k_p$  Coefficient de température pour la puissance (*en %/°C*)
- **TUC (NOCT** en anglais) Température d'Utilisation des Cellules (*en °C*)
- $I=f(V)$  Diagramme des caractéristiques
- Surface active des cellules (*en m<sup>2</sup>*)
- Rendement du module (*en %*)
- **FF** Facteur de Forme =  $V_{mpp} * I_{mpp} / (V_{oc} * I_{cc})$
- Certification (*CEI 61215 ou CEI 61646*)

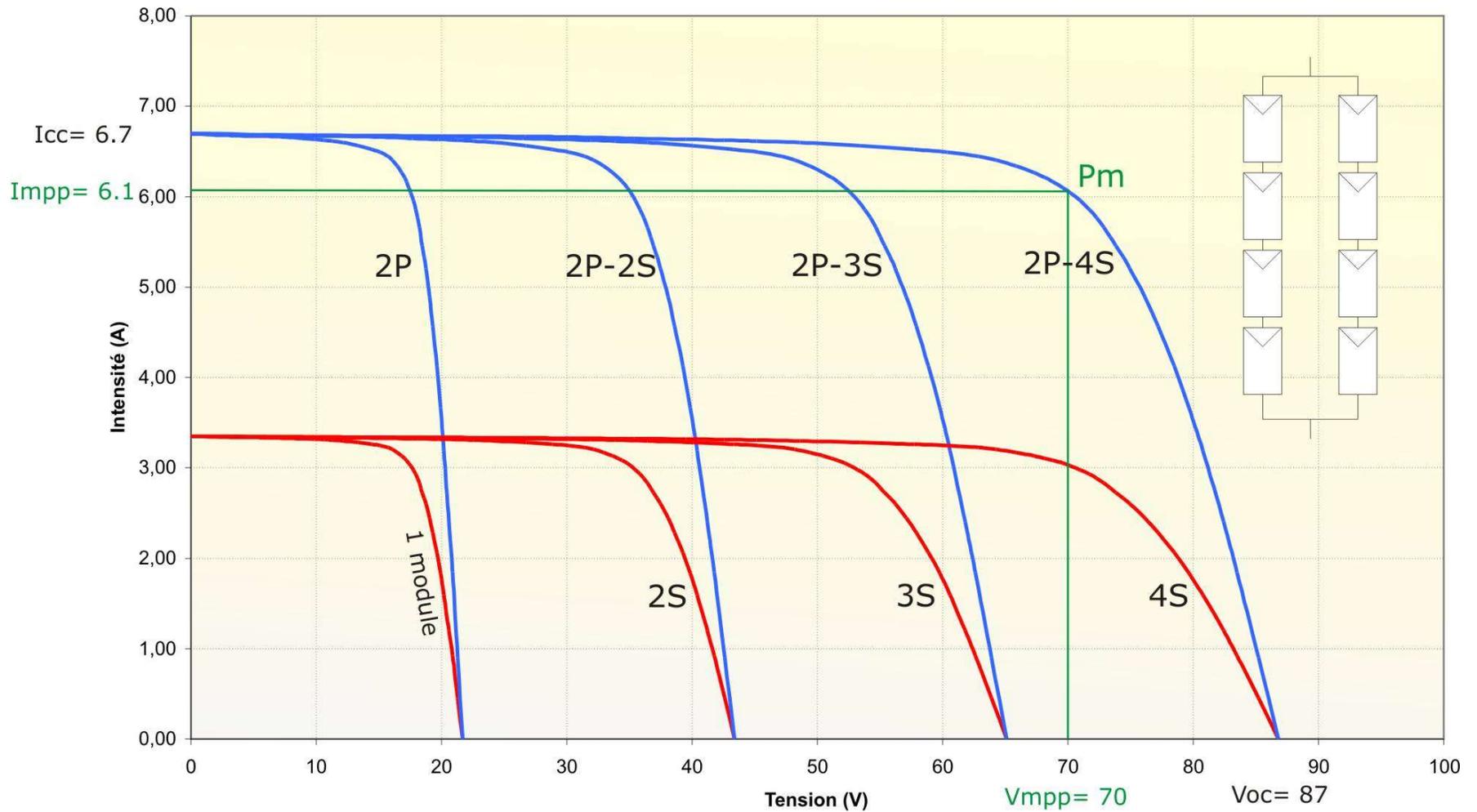
# Comparaison cristallin / amorphe (pour une même surface)



# Mise en série et en parallèle de modules

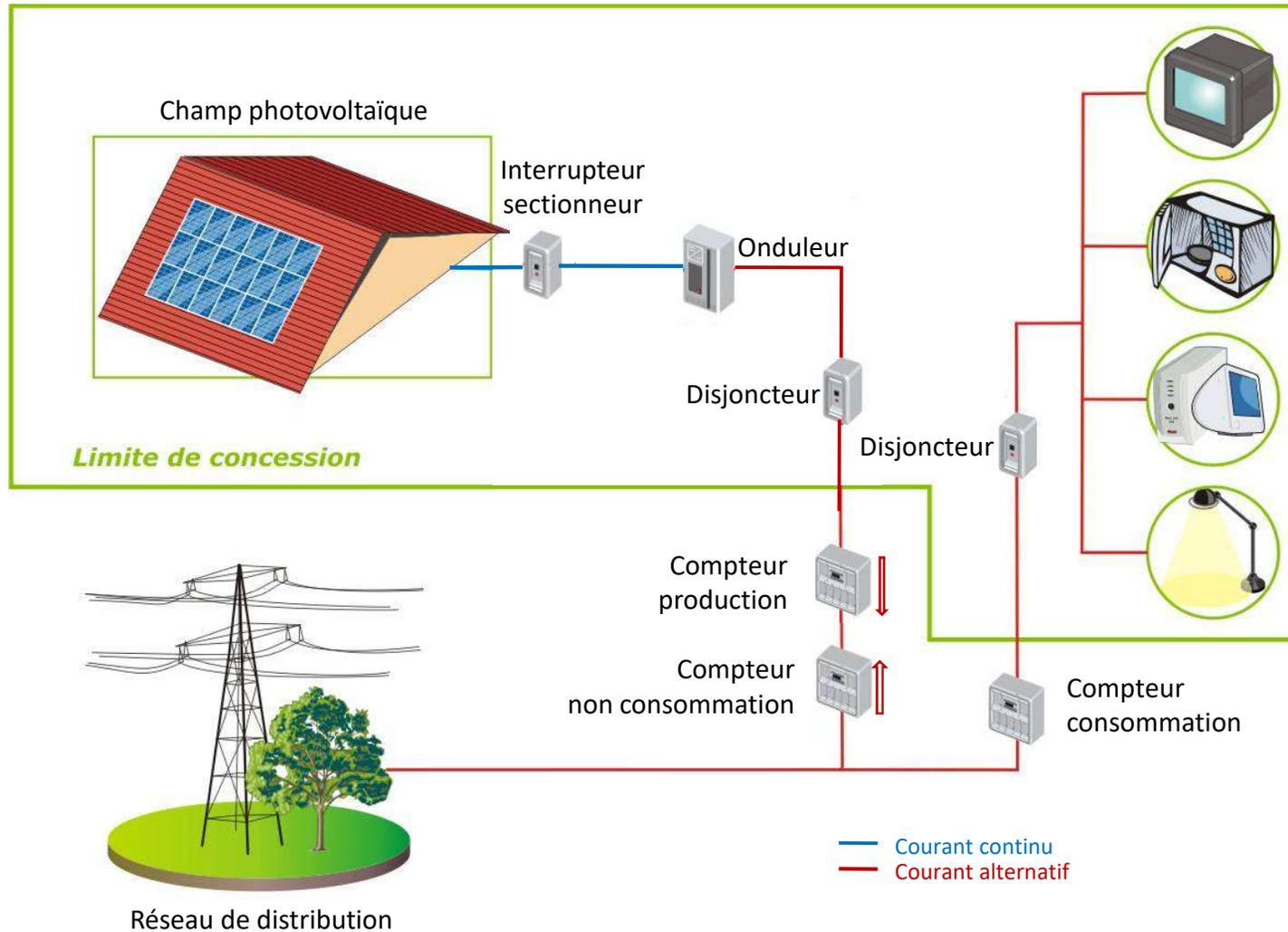


# Caractéristiques d'un champ PV



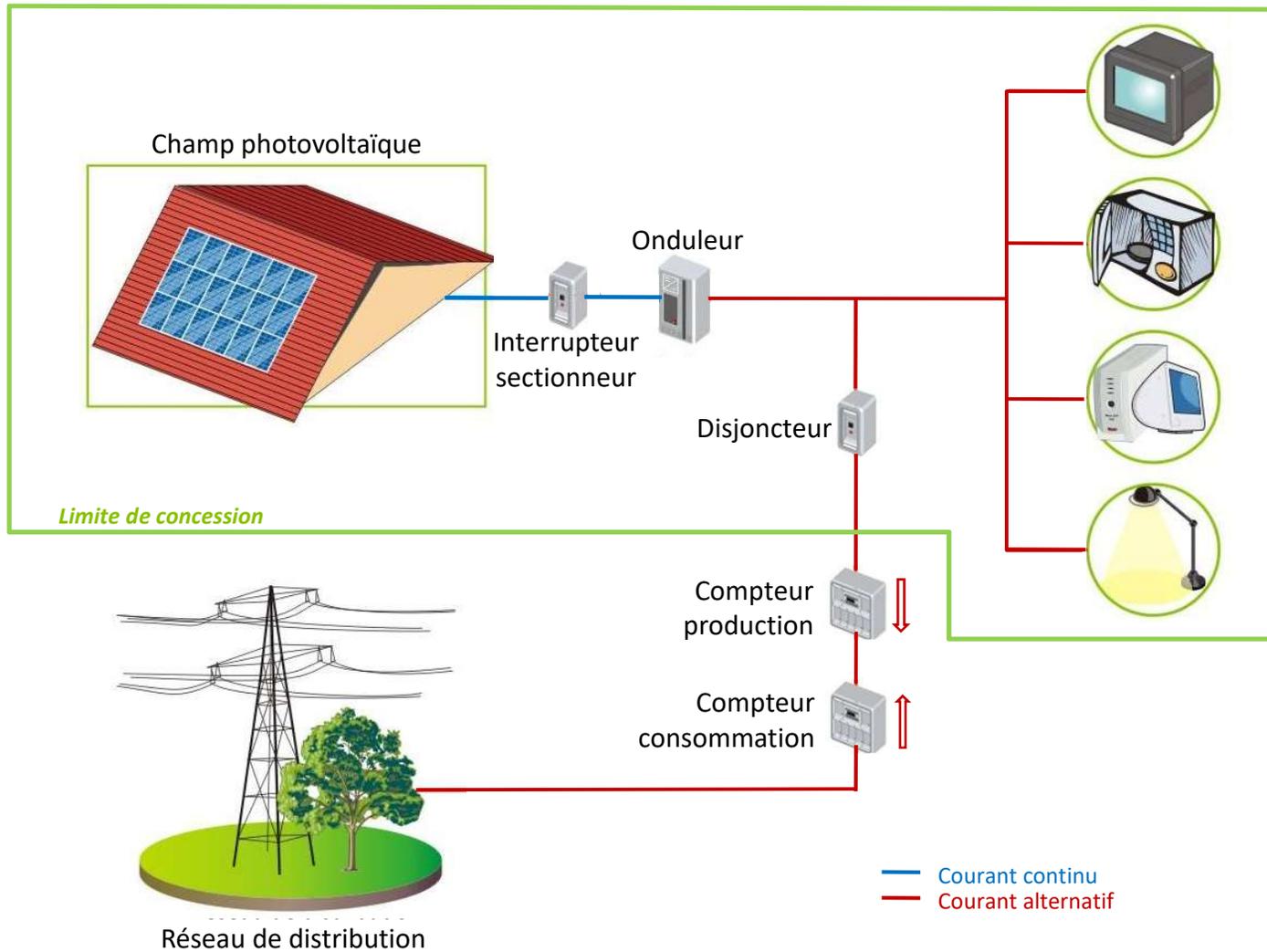
# Les systèmes PV raccordés réseau

## Vente totale



# Les systèmes PV raccordés réseau

## Vente du surplus



## Les points à retenir

- **Différentes technologies de cellules**  
Silicium monocristallin (13 à 17%), Silicium polycristallin (9 à 15%), Silicium amorphe (5 à 9%), CIS, CdTe
- **Condition standard STC**  
1 000 W/m<sup>2</sup>; AM = 1,5; température de cellule de 25°C ;
- **Grandeurs caractéristiques d'une cellule**  
V<sub>co</sub> = 0,6 V ; I<sub>cc</sub> fonction de la surface ;
- **Grandeurs caractéristiques d'un module à n cellules en série**  
V<sub>co</sub> = n x 0,6 V ; I<sub>cc</sub> fonction de la surface d'une cellule ;
- **Influence de l'ensoleillement**  
Intensité quasiment proportionnelle à l'ensoleillement
- **Influence de la température**  
V<sub>co</sub> diminue quand la température augmente  
(P diminue de 0,5%/C pour le silicium cristallin, et 0,21%/°C pour l'amorphe)
- **Module et connecteur de classe II**
- **Normes des modules : CEI 61215 et CEI 61646**
- **Les différents systèmes**
  - Les systèmes de pompage au fil du soleil
  - Les systèmes autonomes
  - Les systèmes hybrides
  - Les systèmes raccordés au réseau de distribution :
    - Vente du surplus
    - Vente du total