



CELLULES ET TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

2017

UN PEU D'HISTOIRE....

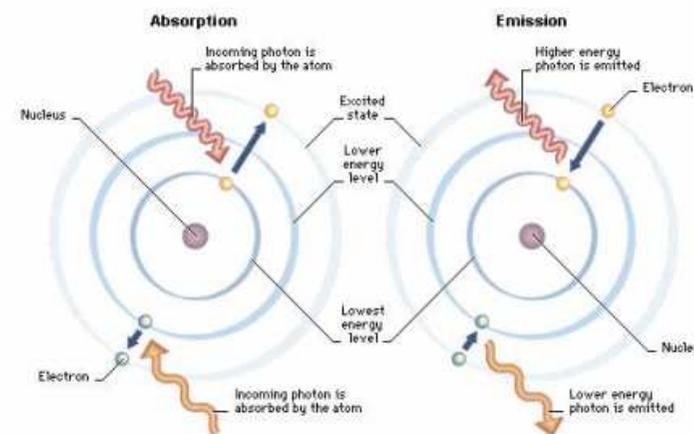
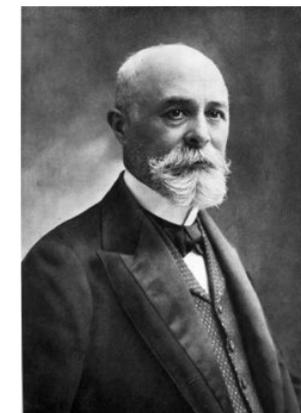
PRINCIPE DE FABRICATION DES MODULES

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PERFORMANCES

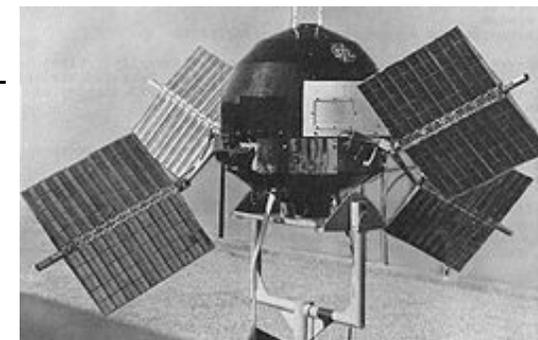
TOUR D'HORIZON DES TECHNOLOGIES

LA SITUATION DU MARCHE ACTUEL

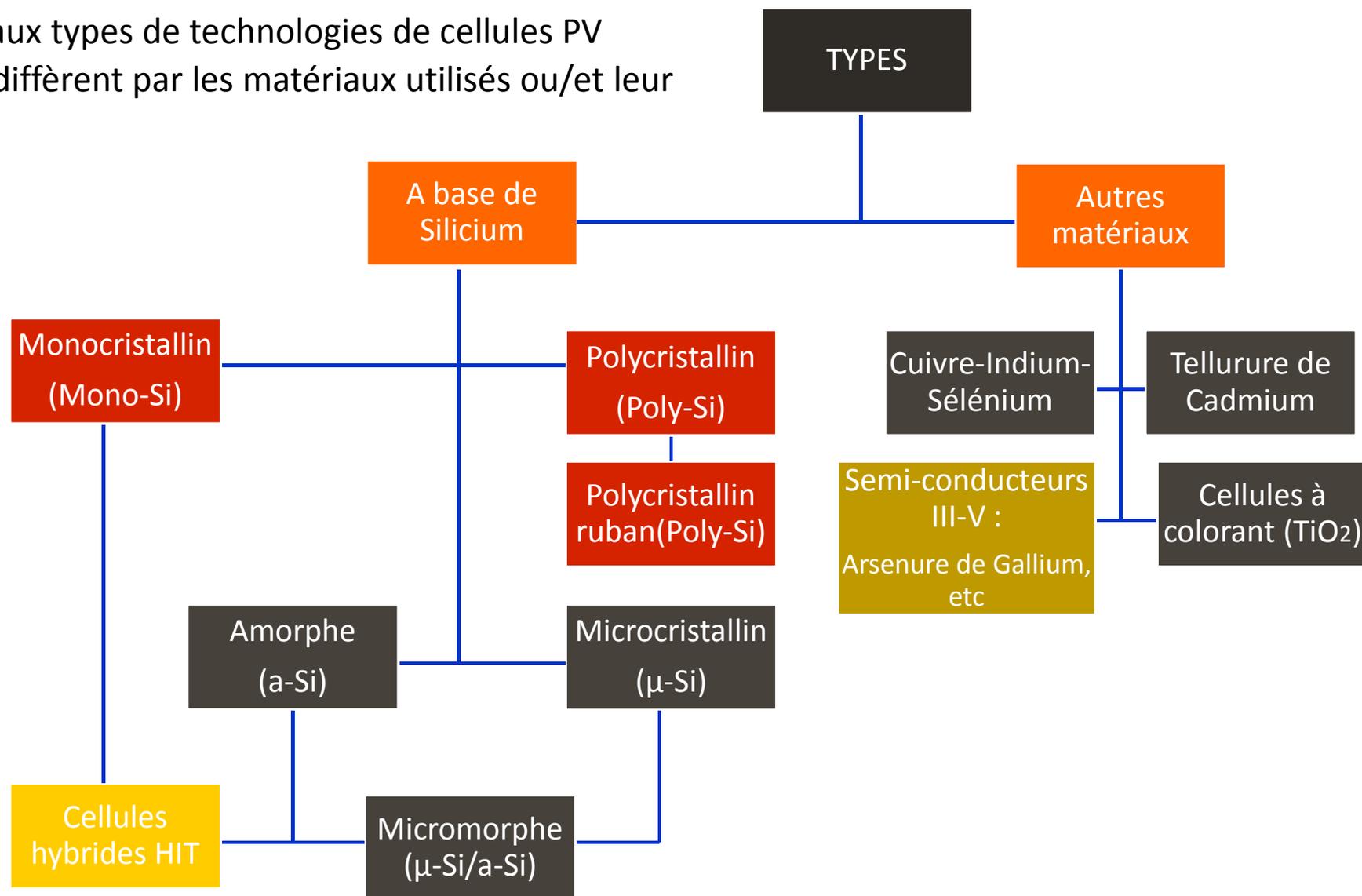
- **1839** : Découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre Edmond Becquerel
- **1883** : 1^{ère} « véritable » cellule PV par Charles Fritts avec un rendement de... 1% !
- **1905** : Explication de l'effet photovoltaïque par Einstein
- **1954** : 1^{ère} cellule en Si avec rendement de 5%, par Chaplin, Fuller and Pearson Laboratoires Bells

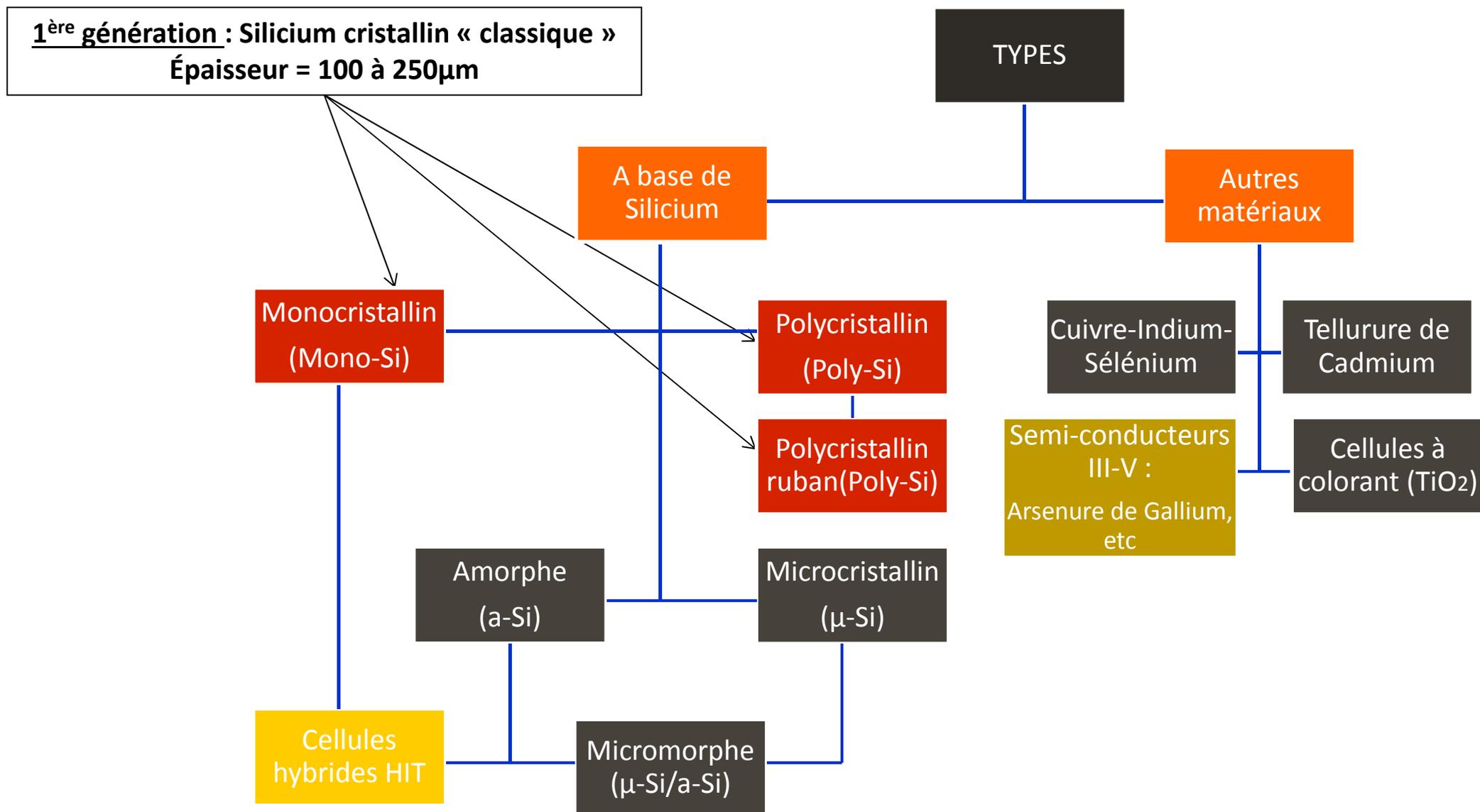


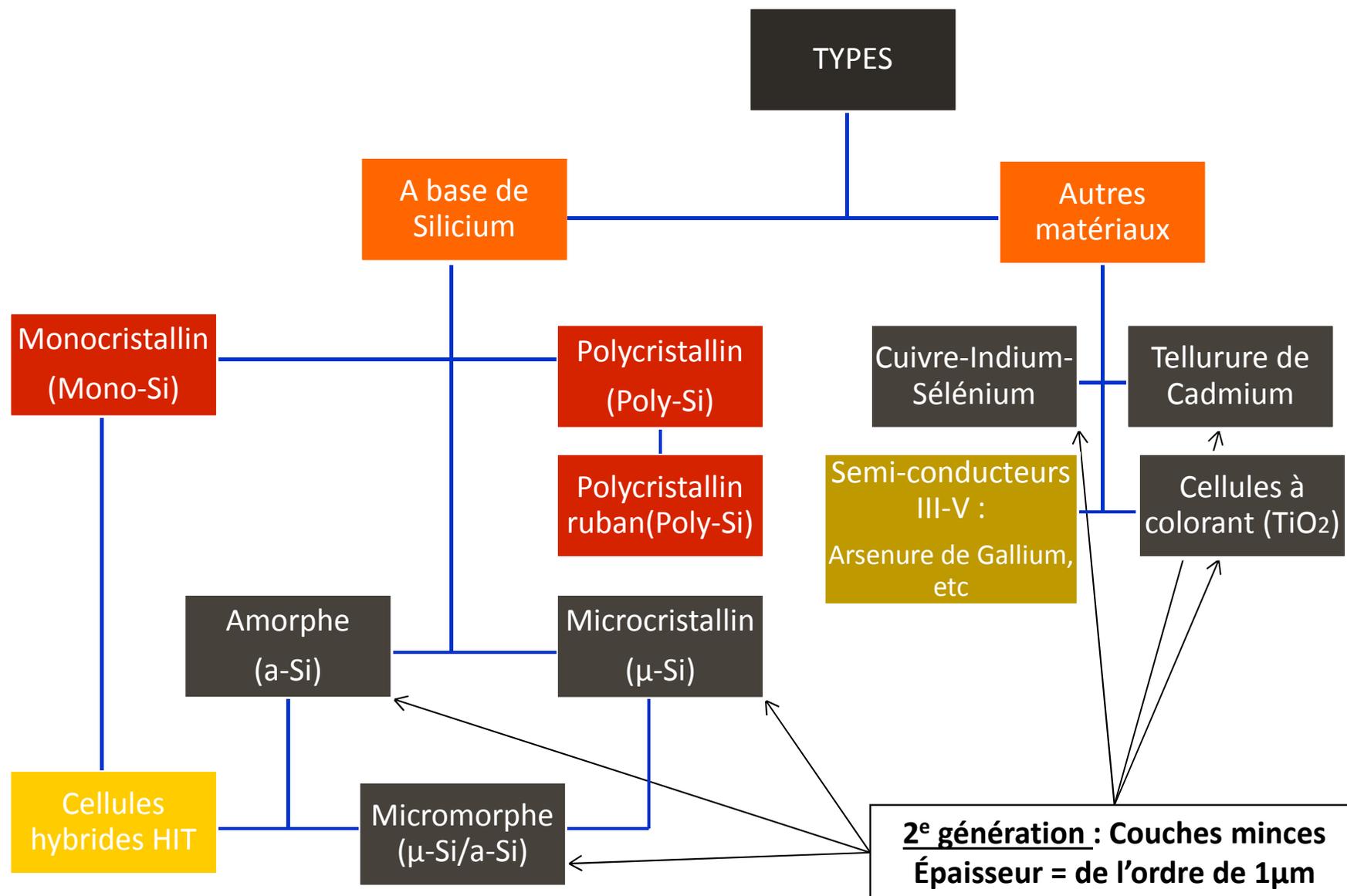
- **1959** : Premier satellite scientifique américain équipé de modules PV – premières applications spatiales
- **Années 1980** :
 - Progression de la technologie PV terrestre
 - Premières cellules couches minces et commercialisation de modules a-Si
- **Années 1990** :
 - Apparition des premières cellules hybrides et organiques
 - Développement Silicium qualité solaire
 - Croissance de la filière industrielle PV (Allemagne, Japon, ...)
- **Années 2000** :
 - Montée en puissance de la filière en France
 - Diversification de l'offre de modules/technologies
 - Optimisation des méthodes de production

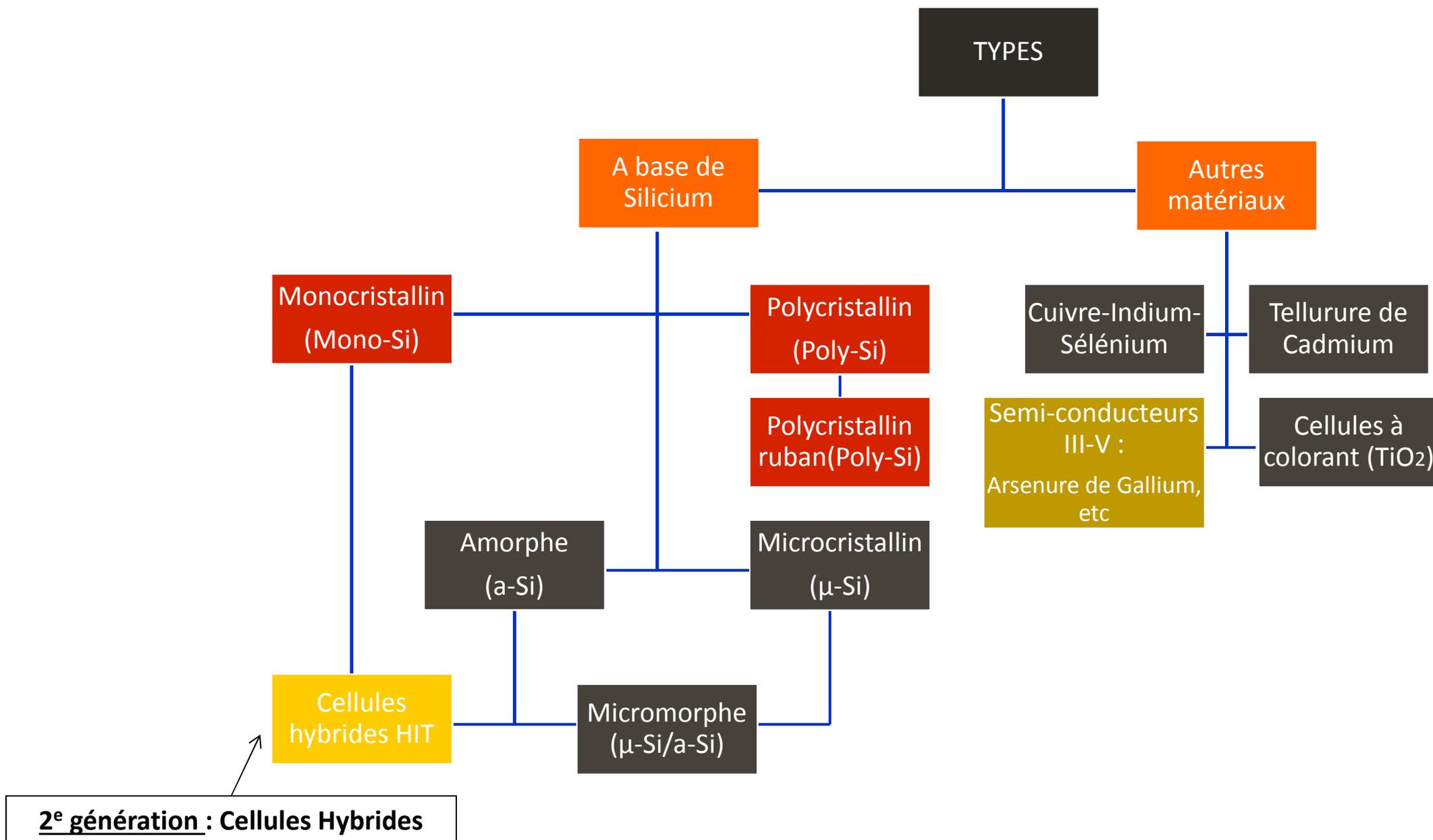


- ~ **10** principaux types de technologies de cellules PV recensées qui diffèrent par les matériaux utilisés ou/et leur épaisseur









UN PEU D'HISTOIRE....

PRINCIPE DE FABRICATION DES MODULES

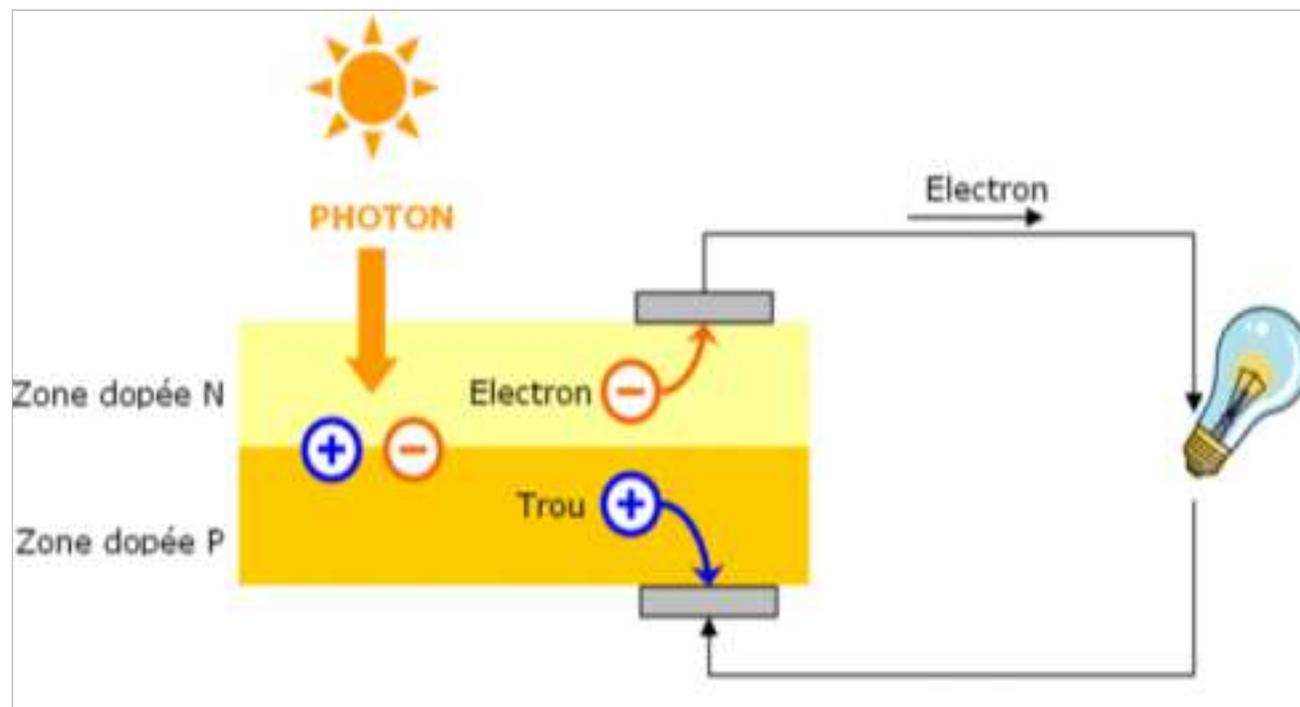
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PERFORMANCES

TOUR D'HORIZON DES TECHNOLOGIES

LA SITUATION DU MARCHE ACTUEL

L'effet photovoltaïque

- Les matériaux choisis pour constituer la cellule PV = **semi-conducteurs dopés** formant une **jonction « P/N »** : une zone dopée positivement, une zone dopée négativement
- Lorsqu'un électron heurte une cellule photovoltaïque, son énergie est transférée à un électron (-) dans le matériau constituant la cellule
→ échappe alors à sa position normale et crée un « trou » (+). Une différence de potentiel est créée : un courant peut-être généré si les charges sont collectées et le circuit fermé sur une charge.



Méthodes de fabrication : Silicium Cristallin

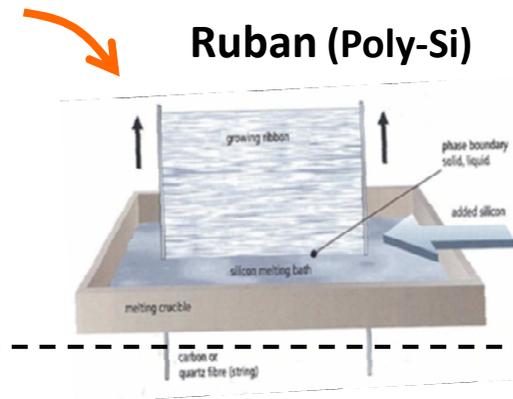
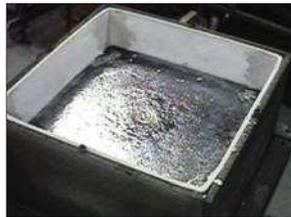


Poly-Si

Mono-Si

Ruban (Poly-Si)

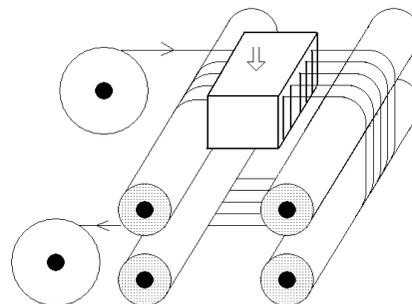
*Ajout de dopant P (+)
= Bore*



*Refroidissement
contrôlé*



Découpe des wafers



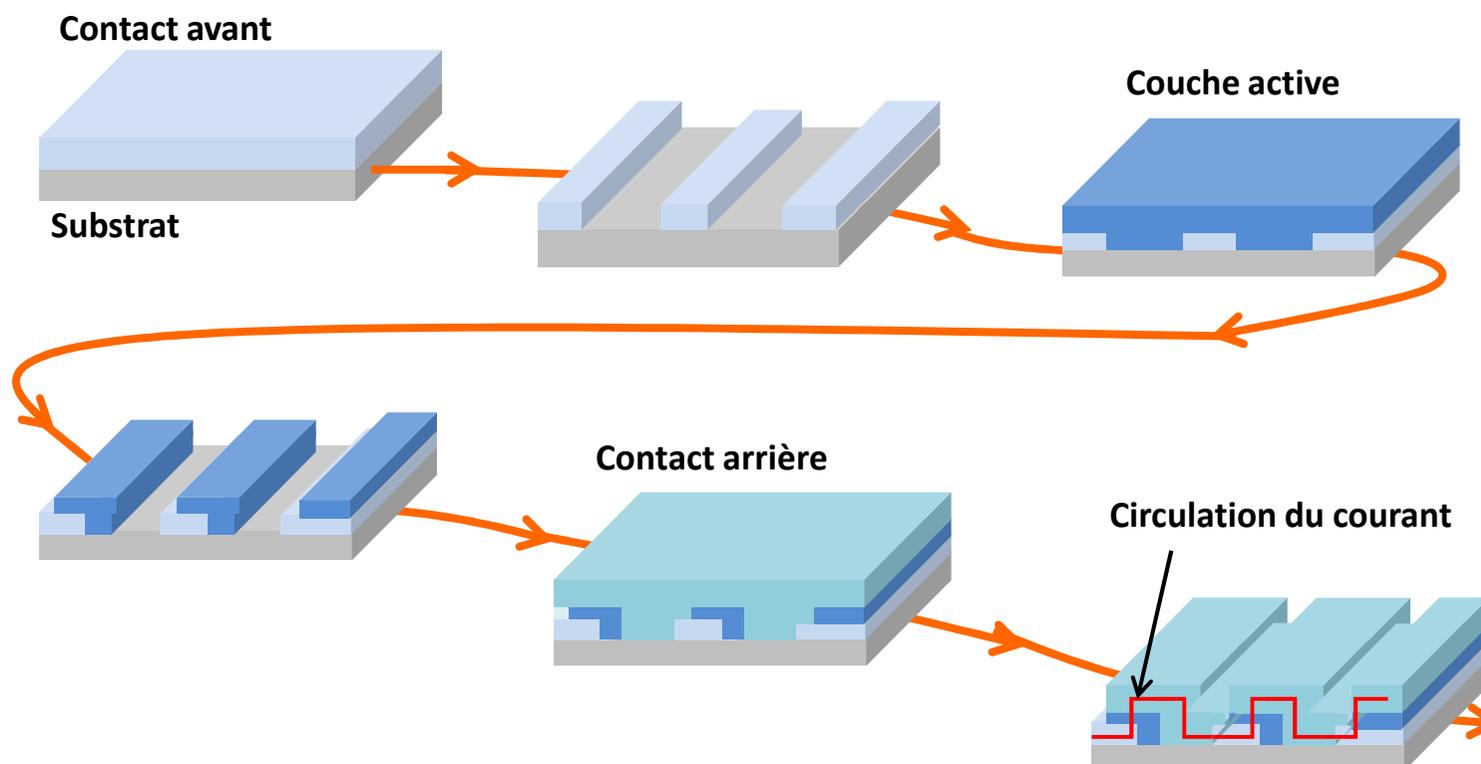
Wafer

Méthodes de fabrication : couches minces

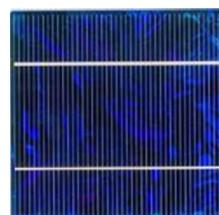
- La technologie couche mince = application d'une **fine couche de semi-conducteur actif sur un substrat** rigide, semi-rigide, ou flexible.

Il est découpé à la dimension désirée pour le module.

- Mise en série des cellules = partie intégrante du processus de fabrication des cellules.



Méthodes de fabrication : Silicium Cristallin

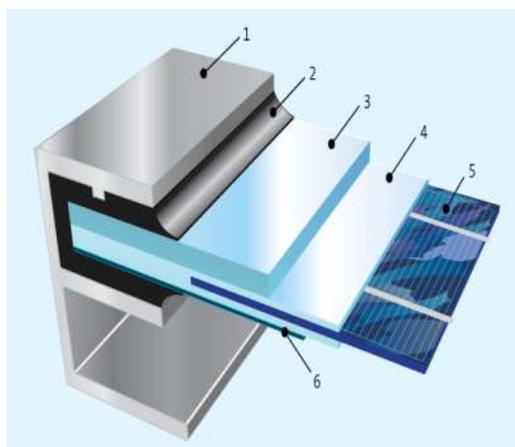


Ajout dopant N (-)
(Phosphore)

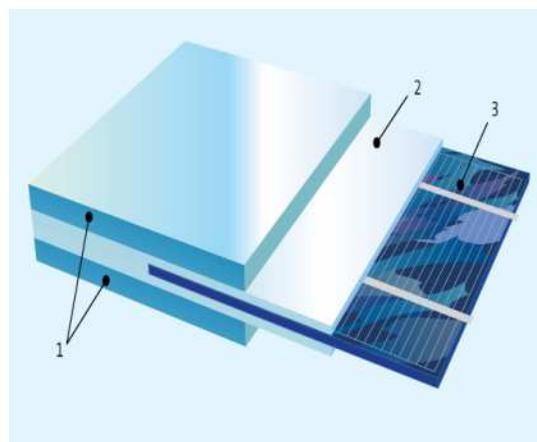
Traitement de surface

Ajout des collecteurs de charges

Encapsulation

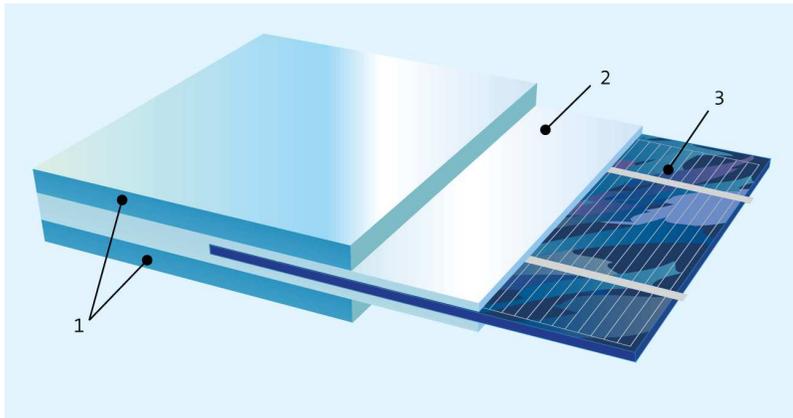


OU



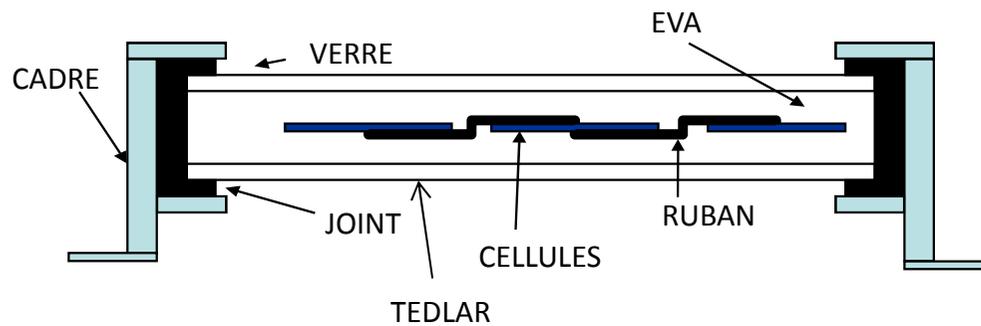
- 1 cadre alu
- 2 joint étanchéité
- 3 verre
- 4 support EVA
- 5 cellules
- 6 film Tedlar

- 1 verre
- 2 protections EVA
- 3 cellules



Module Laminé

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



Tailles standards des cellules :

4'' = 101 mm

5'' = 125,5 mm

6'' = 155,5 mm

UN PEU D'HISTOIRE....

PRINCIPE DE FABRICATION DES MODULES

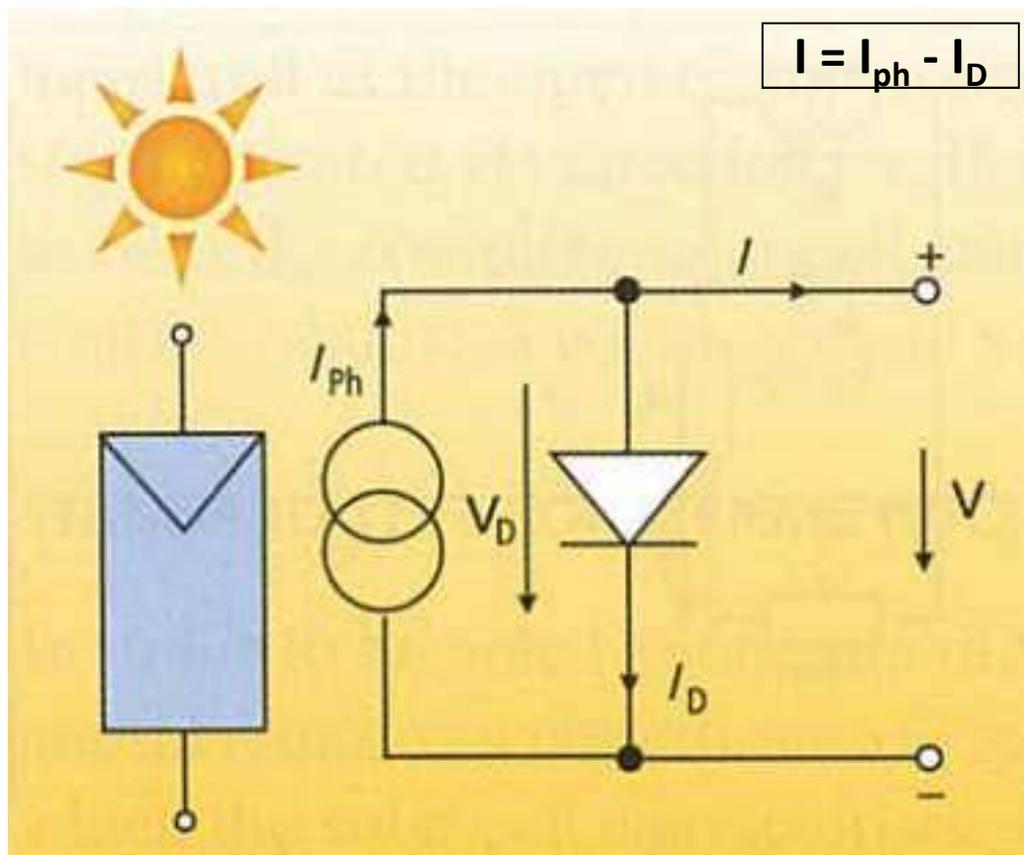
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PERFORMANCES

TOUR D'HORIZON DES TECHNOLOGIES

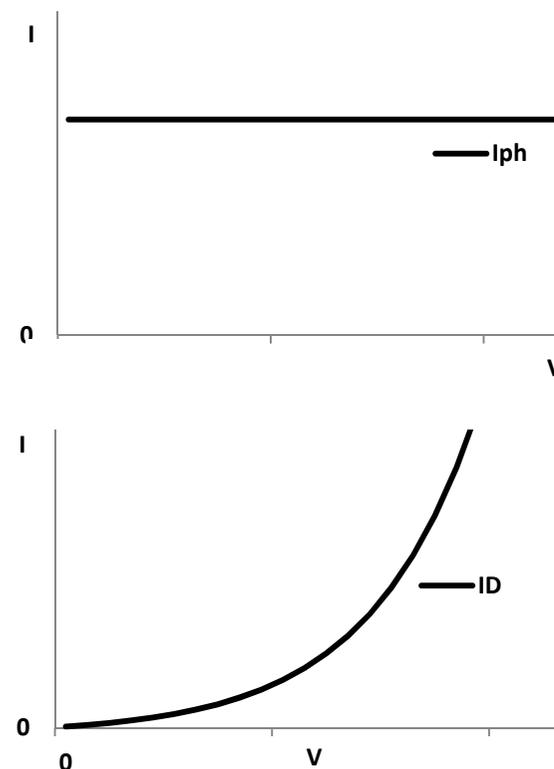
LA SITUATION DU MARCHE ACTUEL

Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Modèle idéal : Une cellule PV soumise au rayonnement solaire peut être assimilée à une diode en parallèle avec générateur de courant

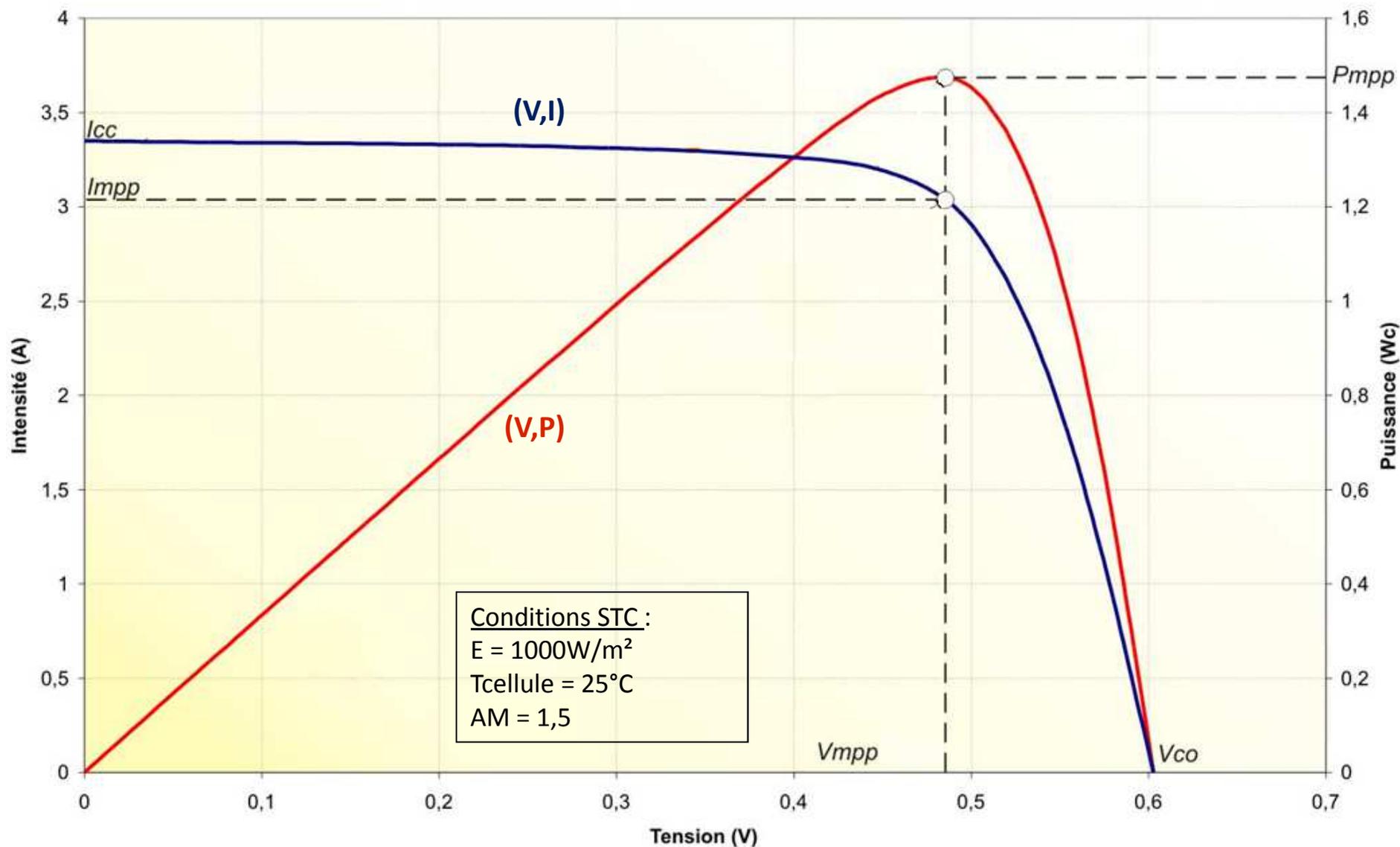


Caractéristique électrique des éléments :

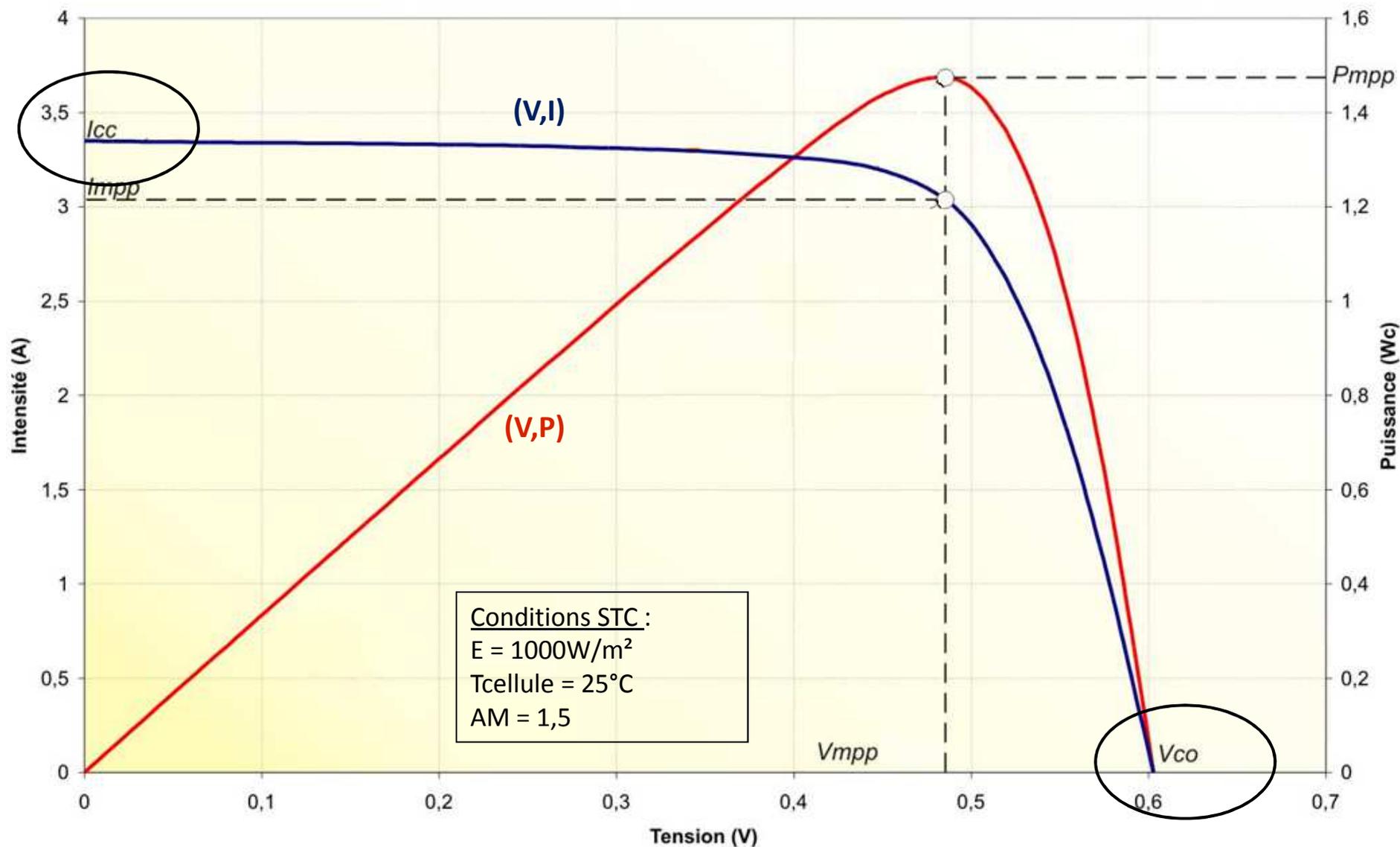


ON OBTIENT AINSI

Courbe (V,I) caractéristique d'une cellule PV

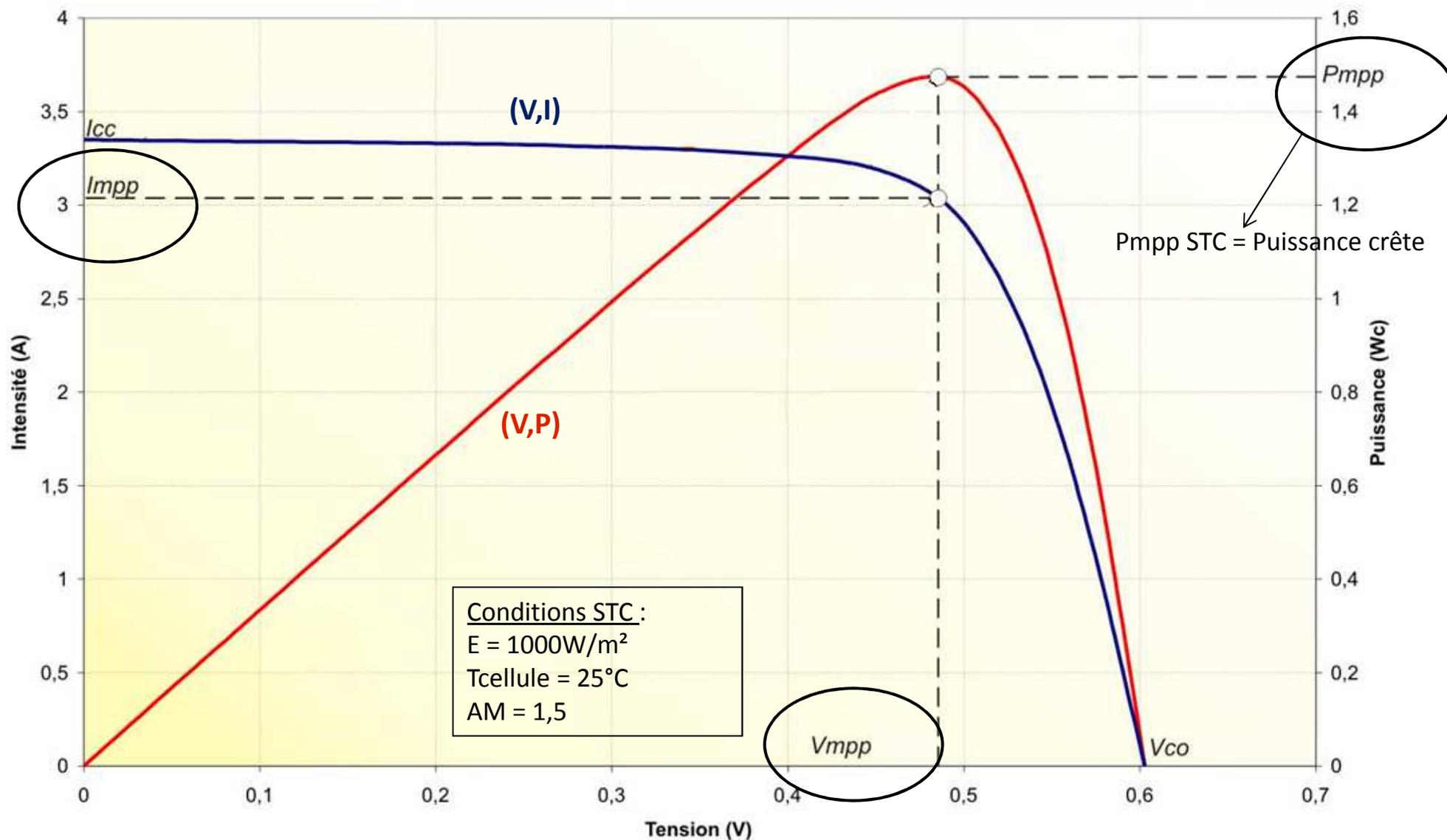


Courbe (V,I) caractéristique d'une cellule PV



Caractéristique Courant – Tension (IV) d'une cellule cristalline 4''

Courbe (V,I) caractéristique d'une cellule PV



Caractéristique Courant – Tension (IV) d'une cellule cristalline 4''

A NOTER

Les modules couches minces ont généralement une **tension plus élevée** et **un courant beaucoup plus faible** que les modules au Silicium cristallin.

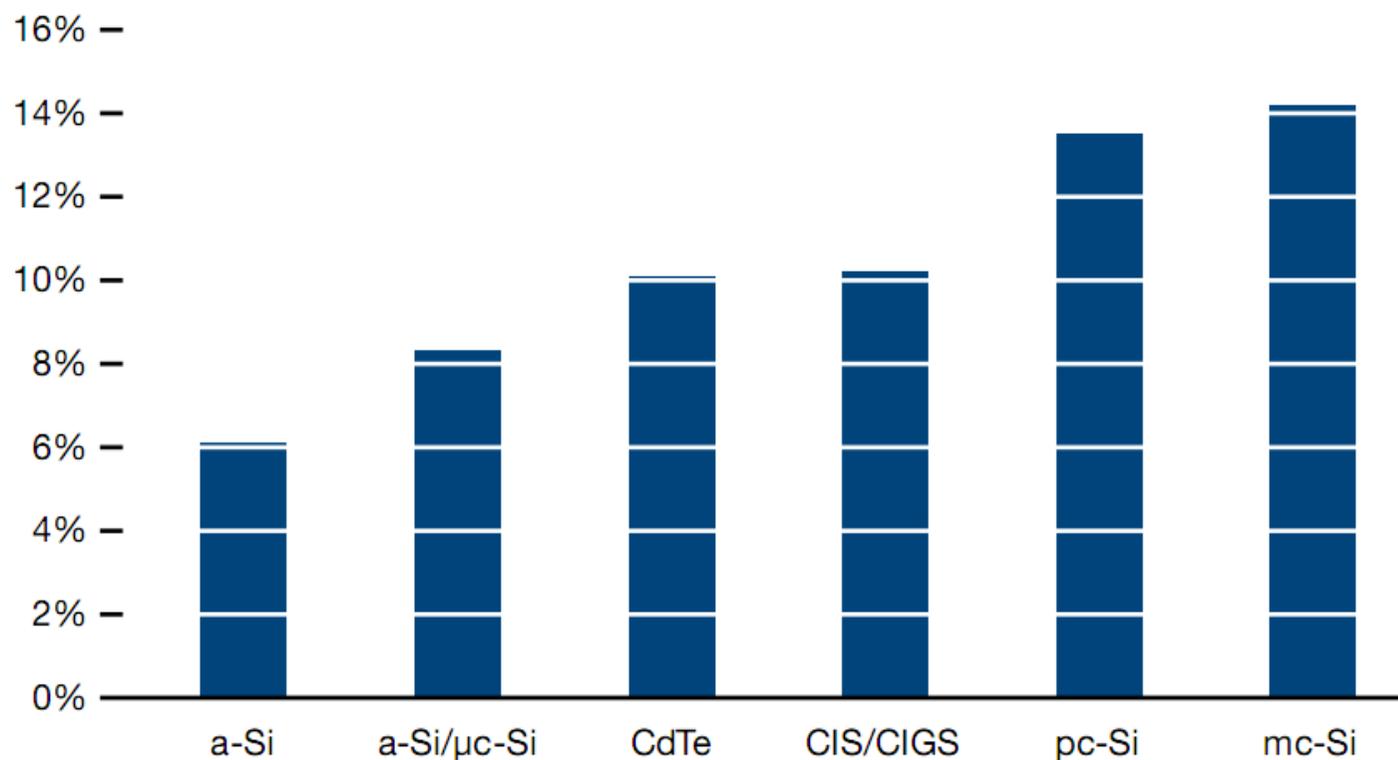
→ Moins de modules couches minces en série dans une chaîne = **plus de chaînes donc plus de câblage et de protections nécessaires !**



Rendement des modules

Les modules couches minces ont des **rendements plus faibles** que les modules au Silicium cristallin.

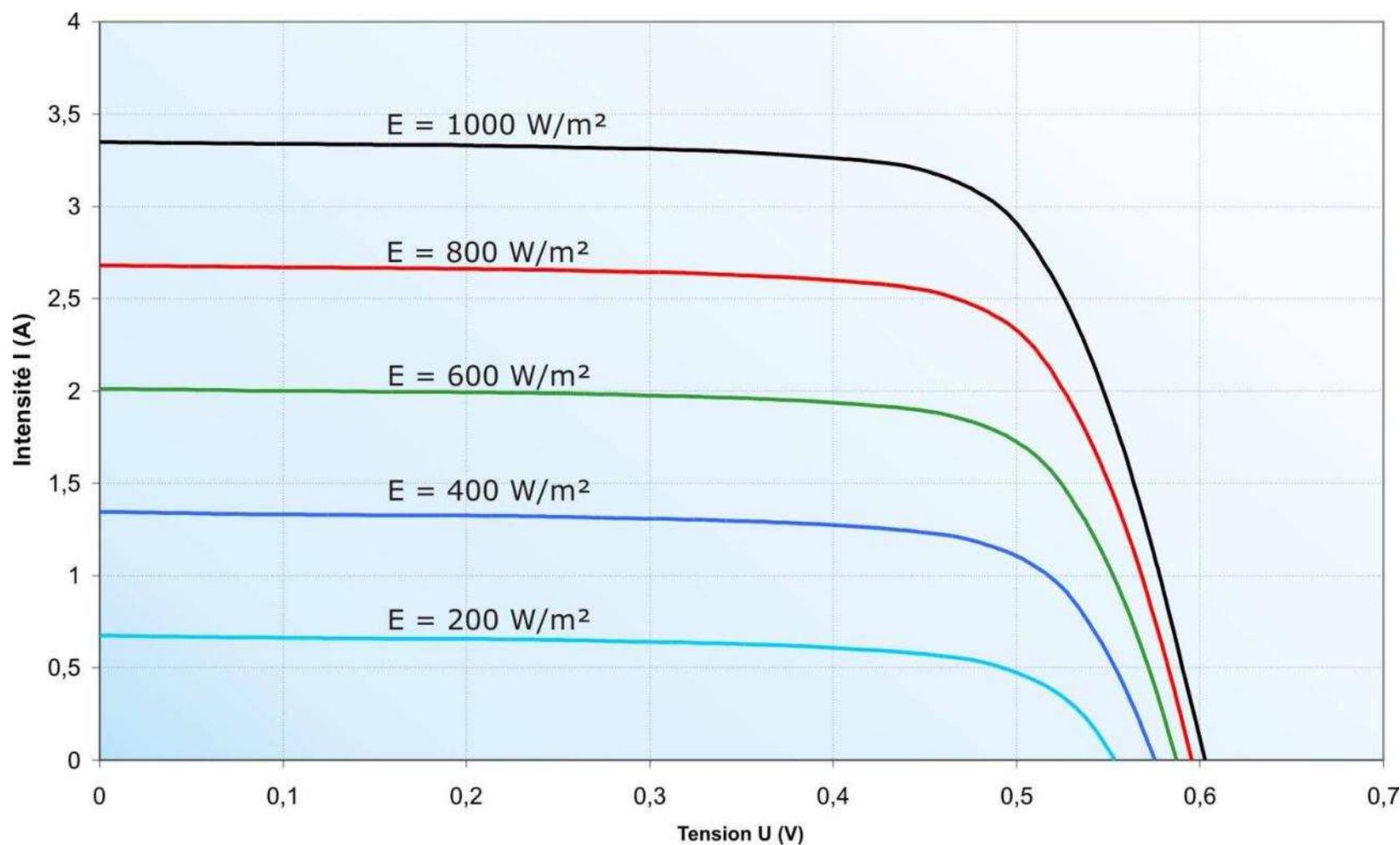
→ Plus de modules couches minces que cristallin pour un système de même puissance



Comportement général face au rayonnement :

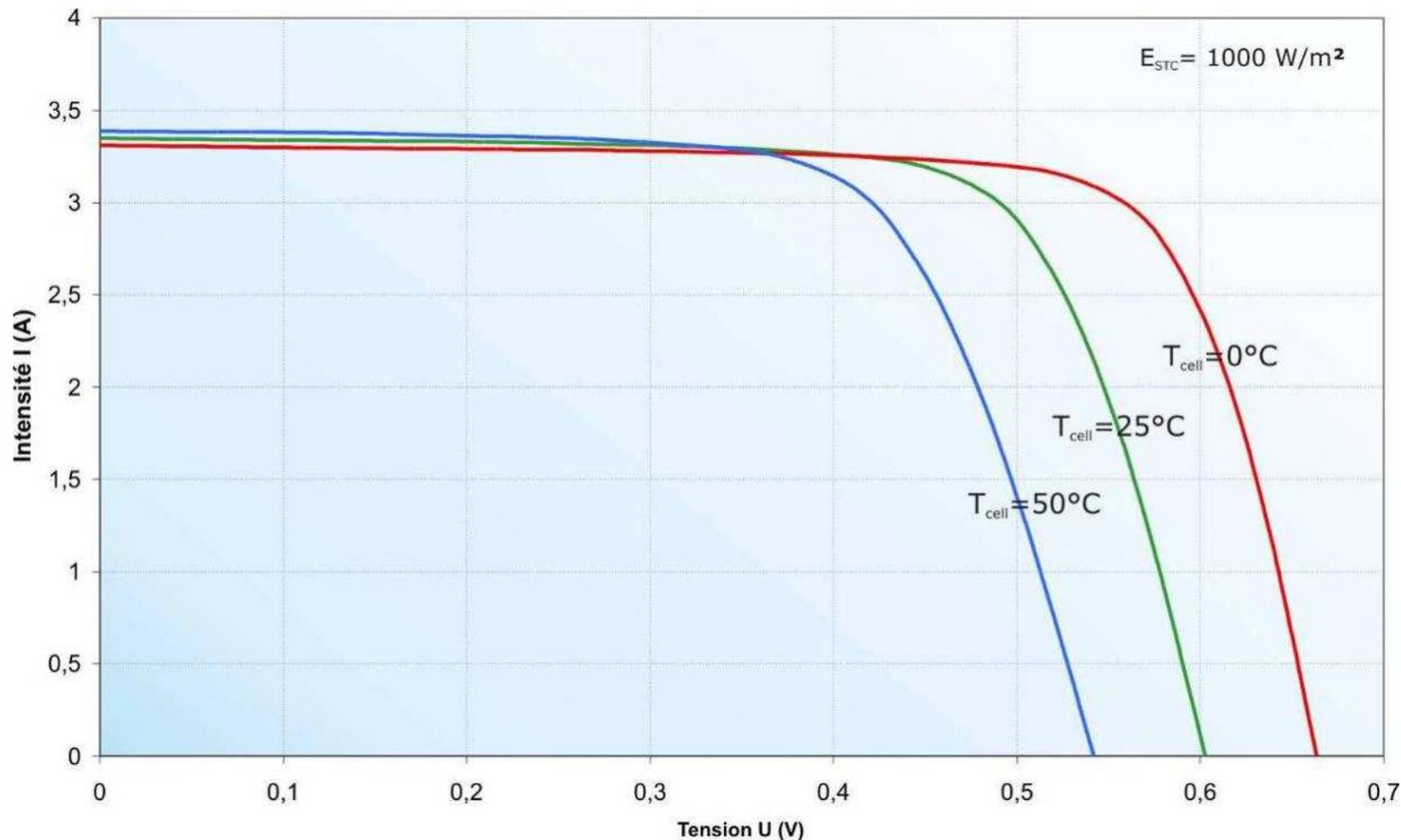
→ Le courant est proportionnel au rayonnement

→ La tension est peu dégradée lorsque le rayonnement diminue

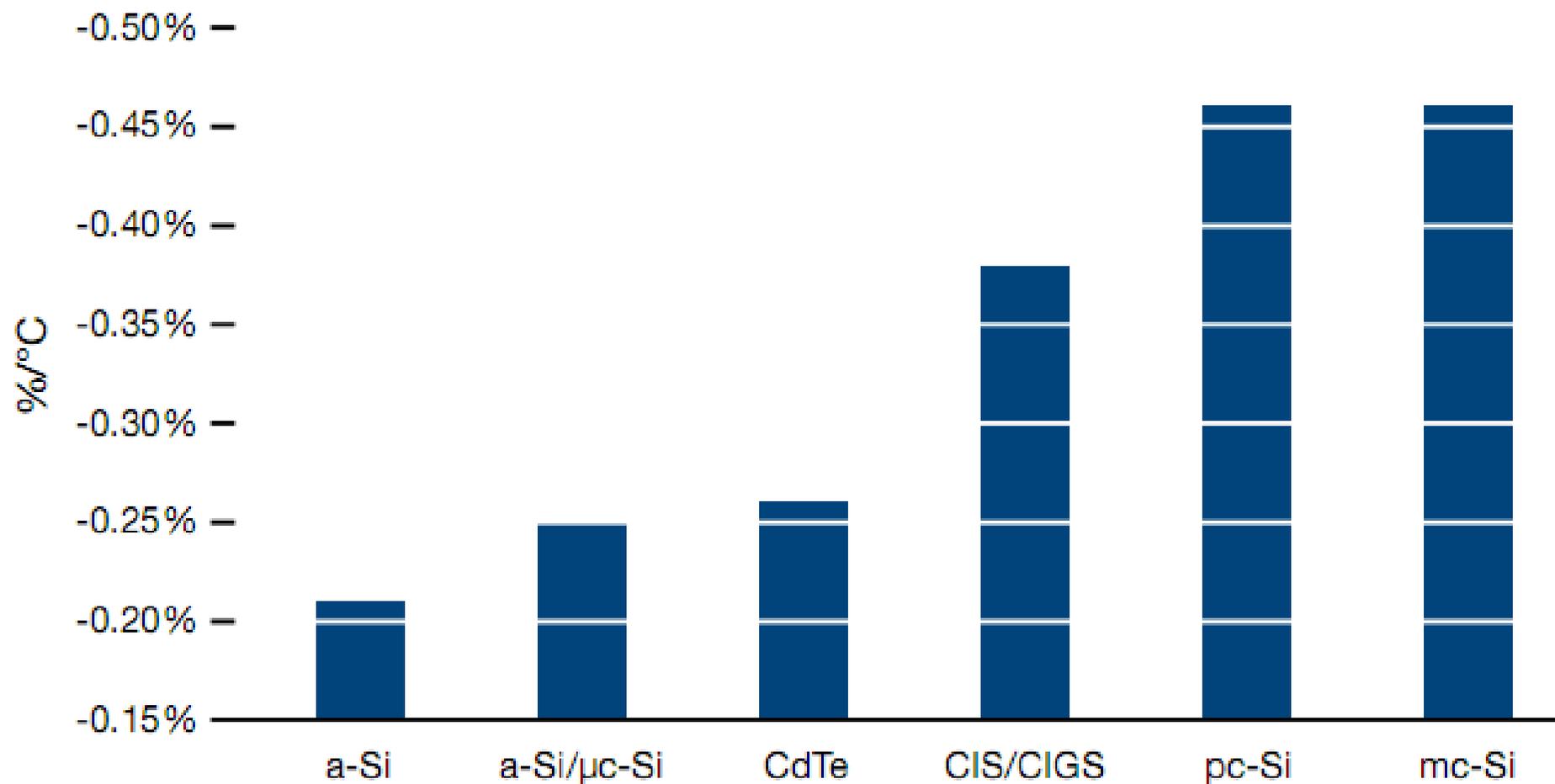


Influence de la température sur les caractéristiques électriques des cellules

- V_{co} d'une cellule diminue : proportion différente selon technologies
- I_{cc} augmente très légèrement ($<0,1\%/^{\circ}\text{C}$), et ce quelle que soit la technologie
- Modification de la courbe (V,I) : la puissance maximum diminue

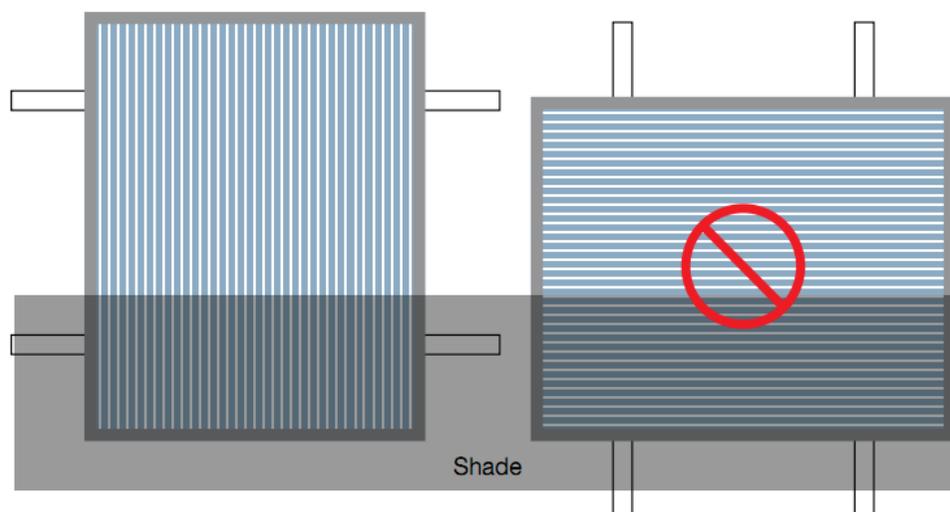
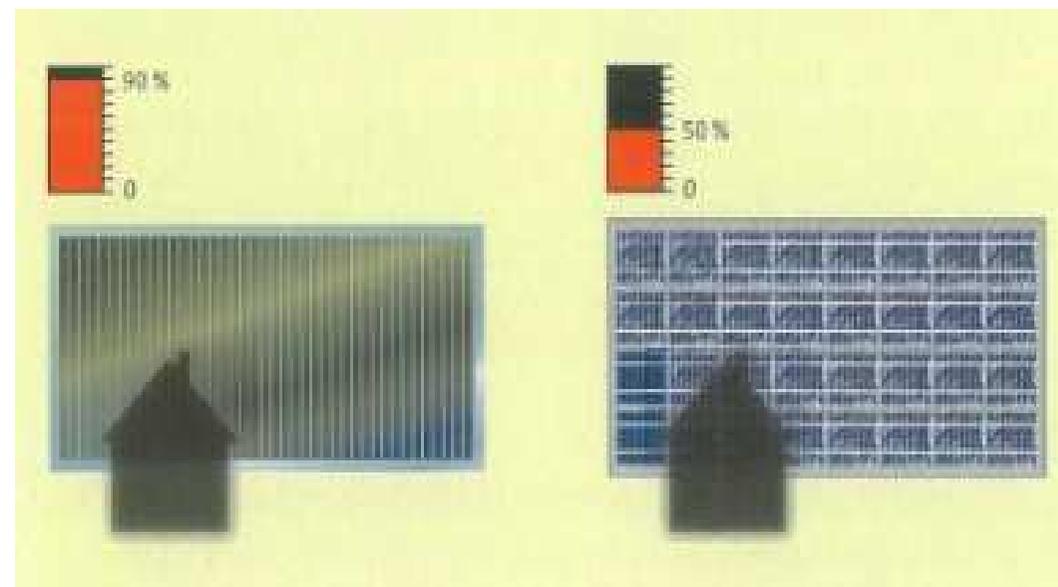


Effet de la température sur les différentes technologies



Effet de l'ombrage :

- Pour un même ombrage : impact moindre sur les performances des couches minces que sur les modules au silicium cristallin

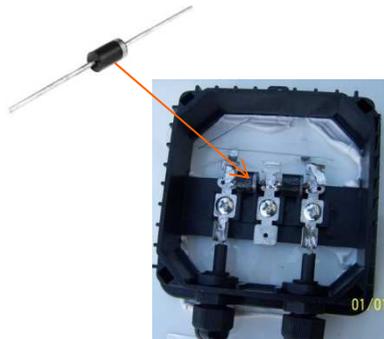
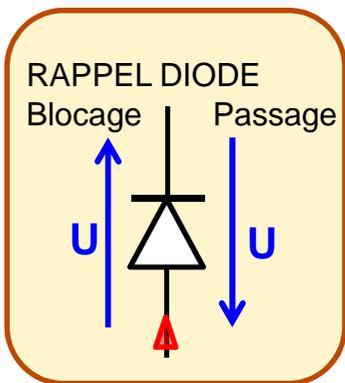
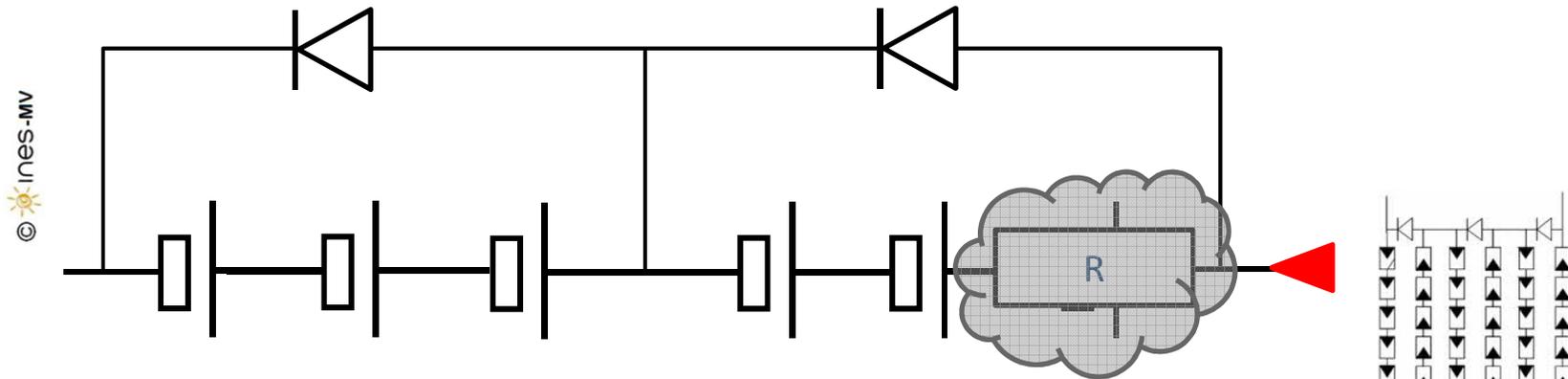


- Couches minces : cellules souvent longues et fines
Si modules mis dans le sens appropriés = impact ombrage diminué

Diode de by pass

- Paramètre : Ombrage

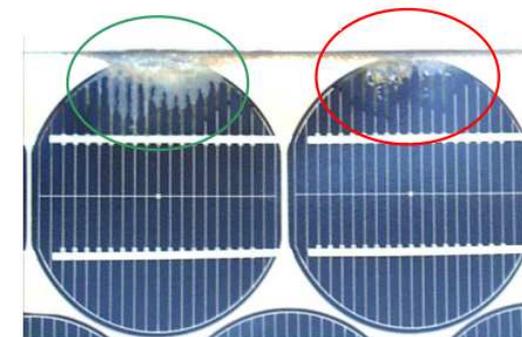
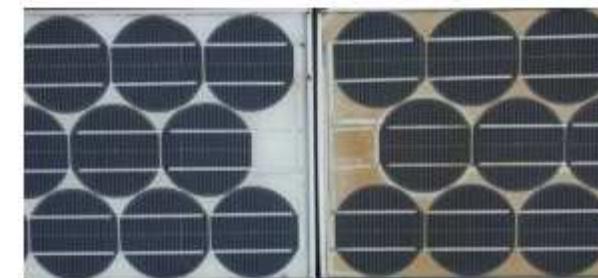
Une cellule ou un module à l'ombre se transforme en récepteur comme une résistance électrique qui va chauffer et entraîner une perte de production ou pire encore...



Phénomène 'Hot spot'
(point chaud)

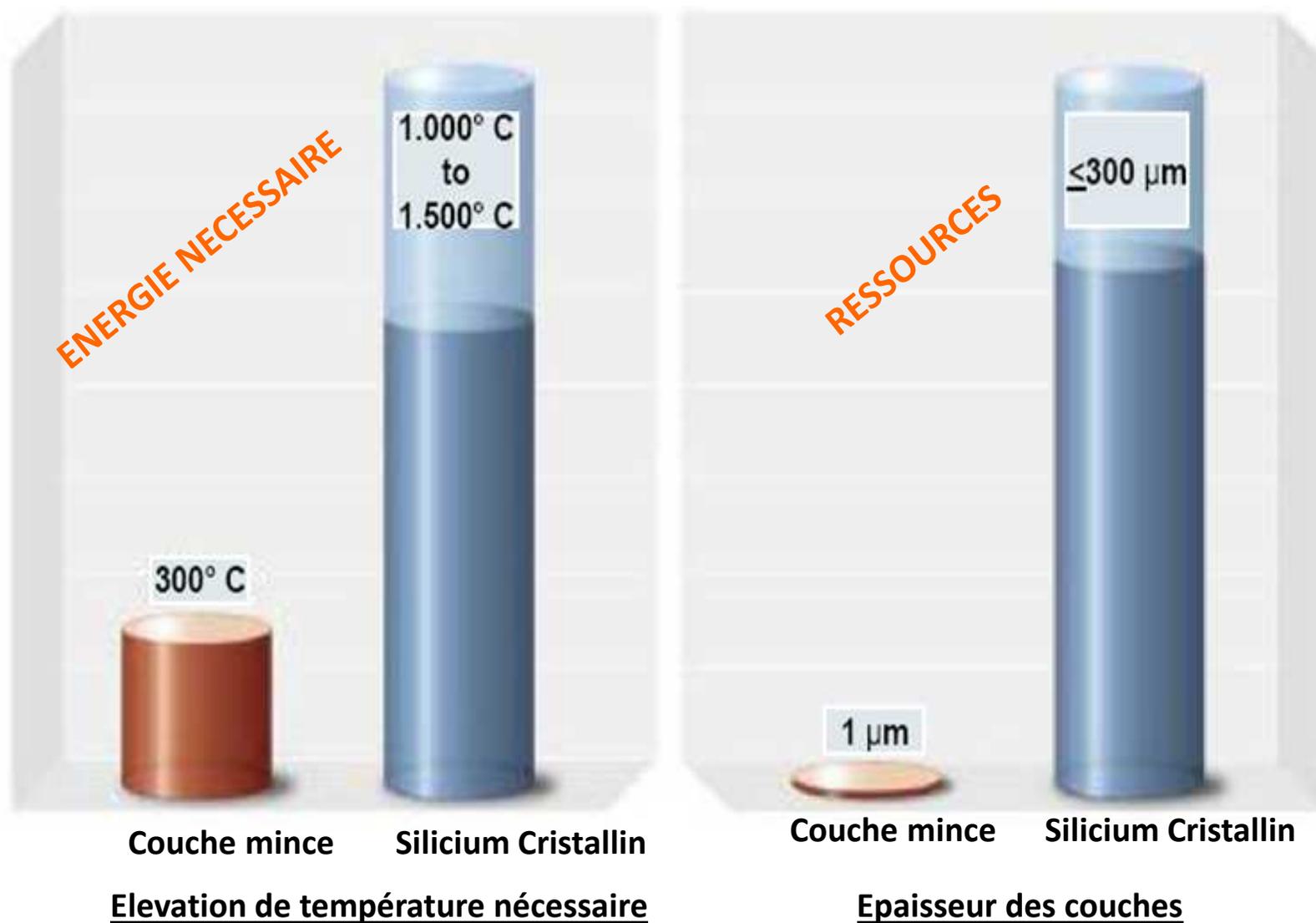
Dégradation continue des modules :

- Dégradation du matériau d'encapsulation
- Bris du verre
- Hot-spot
- Délamination
- Compatibilité des matériaux d'encapsulation
- Fatigue thermodynamique des soudures
- Dégradation du semi-conducteur

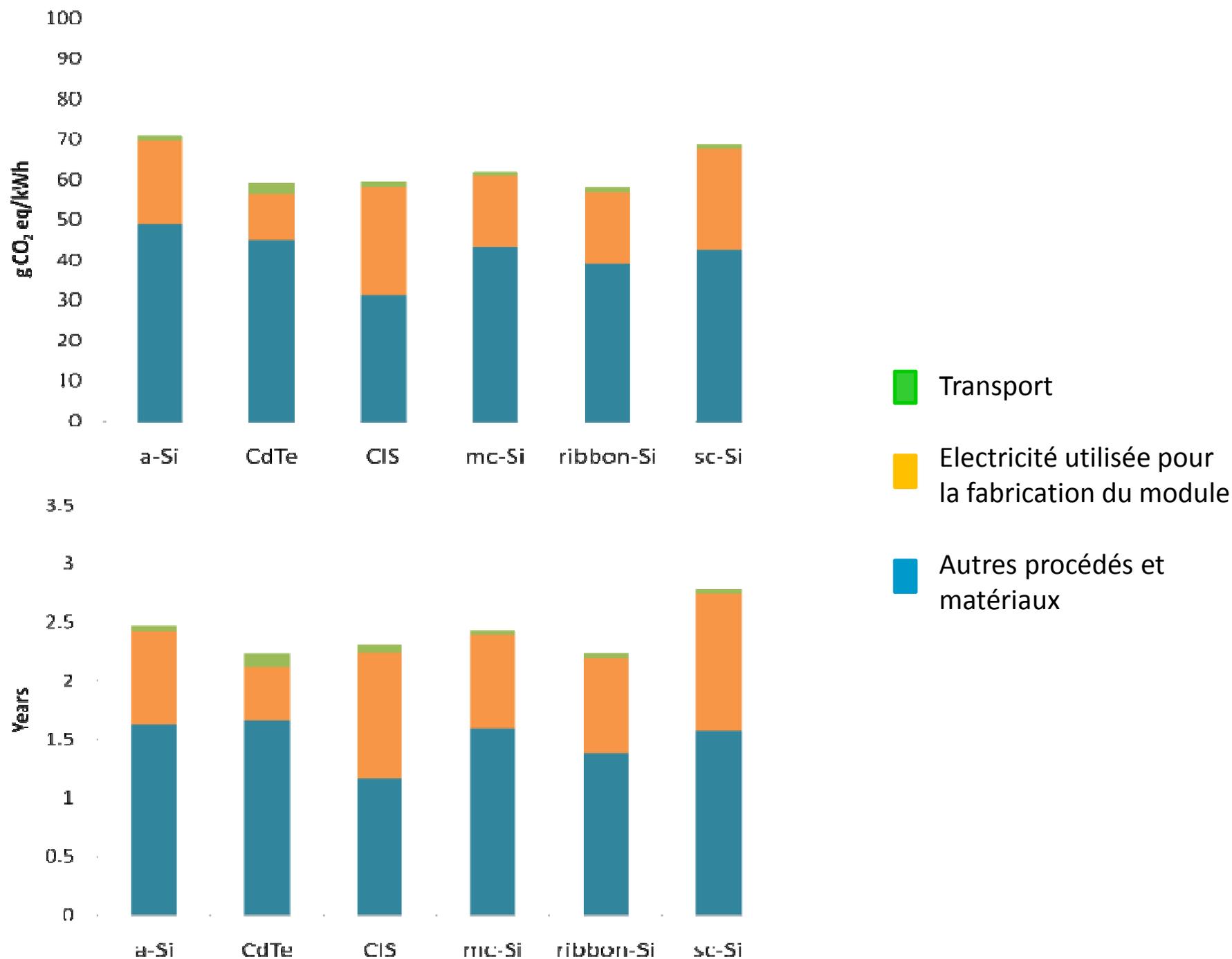


Pertes de puissance estimées :

- Silicium cristallin : **0,1 à 0,7%/an**
- Silicium amorphe : environ **0,8% par an**
- CdTe : **0,4 à 0,6 % par an**



Comparatif des consommations d'énergie nécessaires à la fabrication des différents types de cellules



UN PEU D'HISTOIRE....

PRINCIPE DE FABRICATION DES MODULES

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PERFORMANCES

TOUR D'HORIZON DES TECHNOLOGIES

LA SITUATION DU MARCHE ACTUEL

Module Silicium Polycristallin (Poly-Si) :

Rendement des modules: **14 à 17% Polycristallin**

Apparence : **Cristaux apparents ou non**

Couleur : **Bleu foncé**

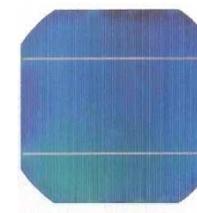


Module Silicium Monocristallin (Mono-Si) :

Rendement des modules: **14 à 21% Monocristallin**

Apparence : **Uniforme, cellule coupée aux 4 coins**

Couleur : **Bleu foncé**



Avantages	Inconvénients
Rendement surfacique élevé (100-150 Wc/m ²)	Fabrication coûteuse et énergivore
Stabilité au rayonnement	Sensibilité à la température (P ~ -0,45%/°C)
Technologie maîtrisée, nombreux fabricants	Faible rendement en lumière faible ou diffuse

Module à contacts en face arrière :

Données générales

Rendement des modules: **16 à 17% (poly-Si); 17 à 20,5% (mono-Si)**

Apparence : **Uniforme**

Couleur : **De bleu foncé à noir**

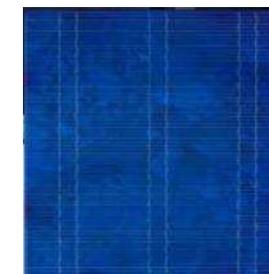
Composition et particularités

Contacts électriques situés en face arrière du module (en face avant sur des modules classiques)

→ **Augmentation de la surface utile d'absorption de la lumière = rendement amélioré**



Cellules monocristallines avec contacts en face arrière

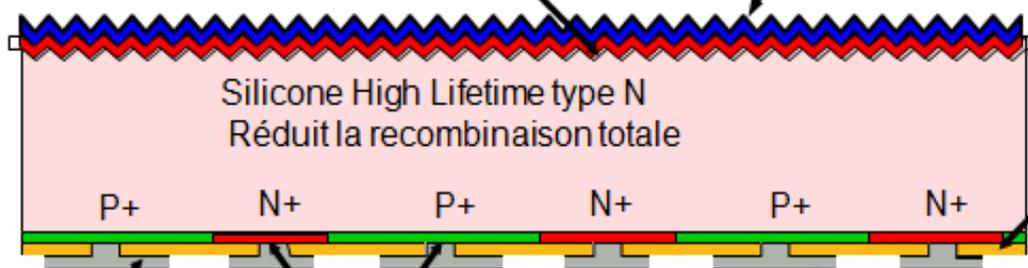


Cellule polycristalline avec contacts en face arrière

Diffusion avant légèrement pigmentée

• Réduit la perte de recombinaison

Texture + ARC



Passivation

• **Couche SiO₂** Réduit la perte de recombinaison de surface

Miroir arrière

• Réduit l'absorption de la luminosité arrière et emprisonne la lumière

Contacts localisés

• Réduit la perte de recombinaison de contact

Grilles arrière

• Éliminent les zones d'ombre
Le métal à haute couverture réduit la perte de résistance.

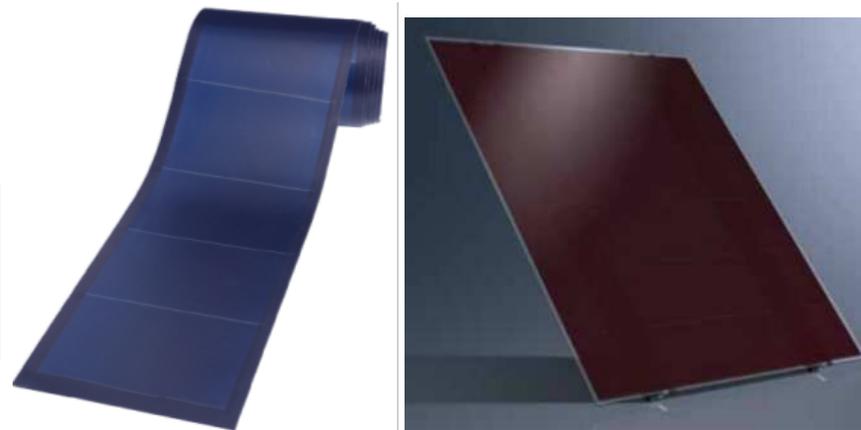
Module Silicium amorphe :

Données générales

Rendement : 3 à 10% (simple jonction), 6 à 13% (jonction multiple)

Apparence : **uniforme**

Couleur : **bleu foncé, reflet bruns**



Composition et particularités

Possibilités de cellules multi-jonction :

Exemple « triple jonction » : chaque cellule est composée de trois jonctions superposées de semi-conducteurs.

La jonction inférieure absorbe la lumière rouge, celle du milieu la lumière verte/jaune et la couche supérieure la lumière bleue.

→ **Absorption d'une plus grande partie du spectre solaire d'où de meilleures performances que le a-Si simple jonction.**

Avantages

Fort pouvoir absorbant autorisant de très faibles épaisseurs

Fabrication simple, bon marché et peu énergivore, possibilité de substrat flexible

Bonnes performances sous faible ensoleillement et faible sensibilité à la température ($P \sim -0,20\%/^{\circ}\text{C}$)

Inconvénients

Rendement surfacique faible (60-70 Wc/m²)

Temps de stabilisation des performances

Avantages	Inconvénients
Fort pouvoir absorbant autorisant de très faibles épaisseurs	Rendement surfacique faible (60-70 Wc/m ²)
Fabrication simple, bon marché et peu énergivore, possibilité de substrat flexible	Temps de stabilisation des performances
Bonnes performances sous faible ensoleillement et faible sensibilité à la température ($P \sim -0,20\%/^{\circ}\text{C}$)	

Module CdTe:

Données générales

Rendement des modules: **7 à 11 %**

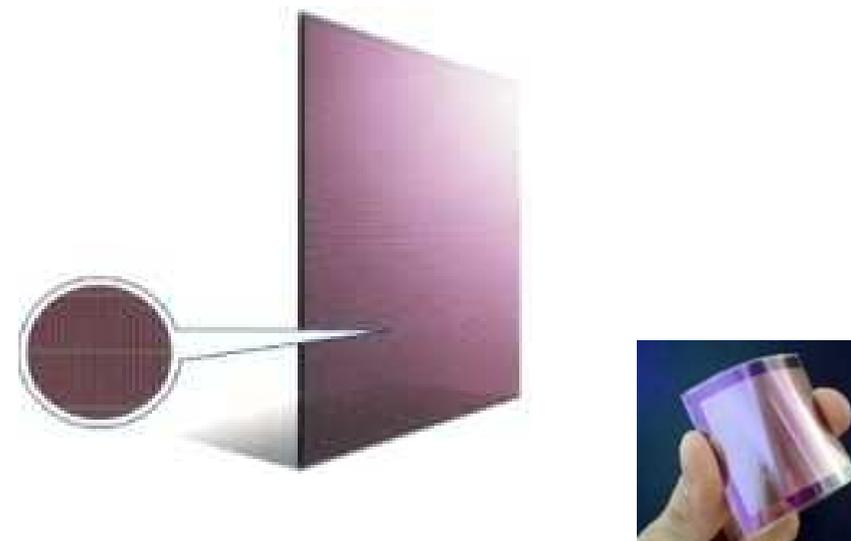
Taille standard : 1,2*0,6 (m)

Apparence : **Uniforme**

Couleur : **De gris foncé à noir**

Composition et particularités

Principal matériau de composition : Tellure de Cadmium →
couche mince



Avantages	Inconvénients
Faible coût de production	Faibles rendements (70-100 Wc/m ²)
Possibilité de substrats flexibles	Toxicité du Cadmium
Bon rendement en éclairage faible ou diffus	Rareté du Tellure
	Peu de fabricants (first Solar)

Composition et répartition en couches (Source: Calyxo)

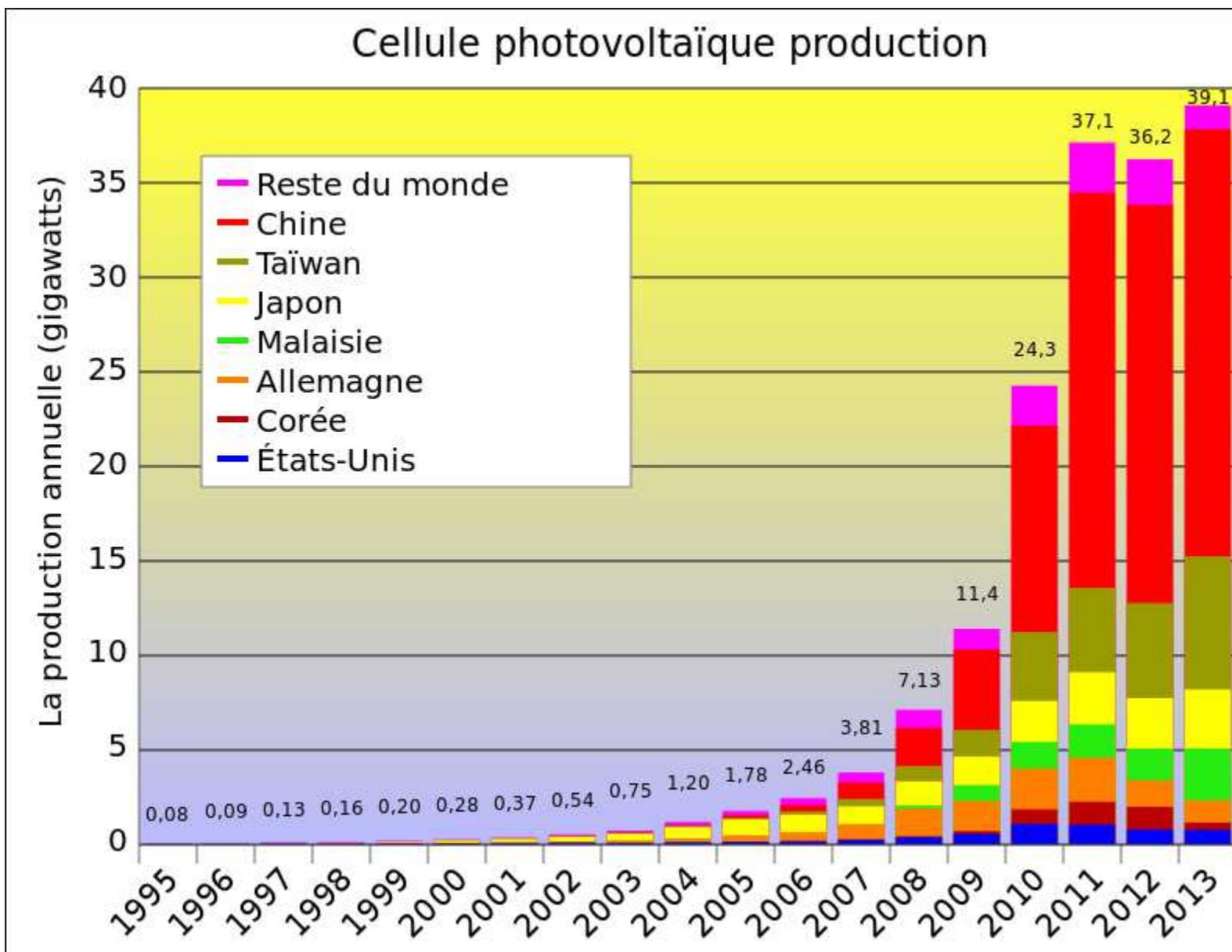
UN PEU D'HISTOIRE....

PRINCIPE DE FABRICATION DES MODULES

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PERFORMANCES

TOUR D'HORIZON DES TECHNOLOGIES

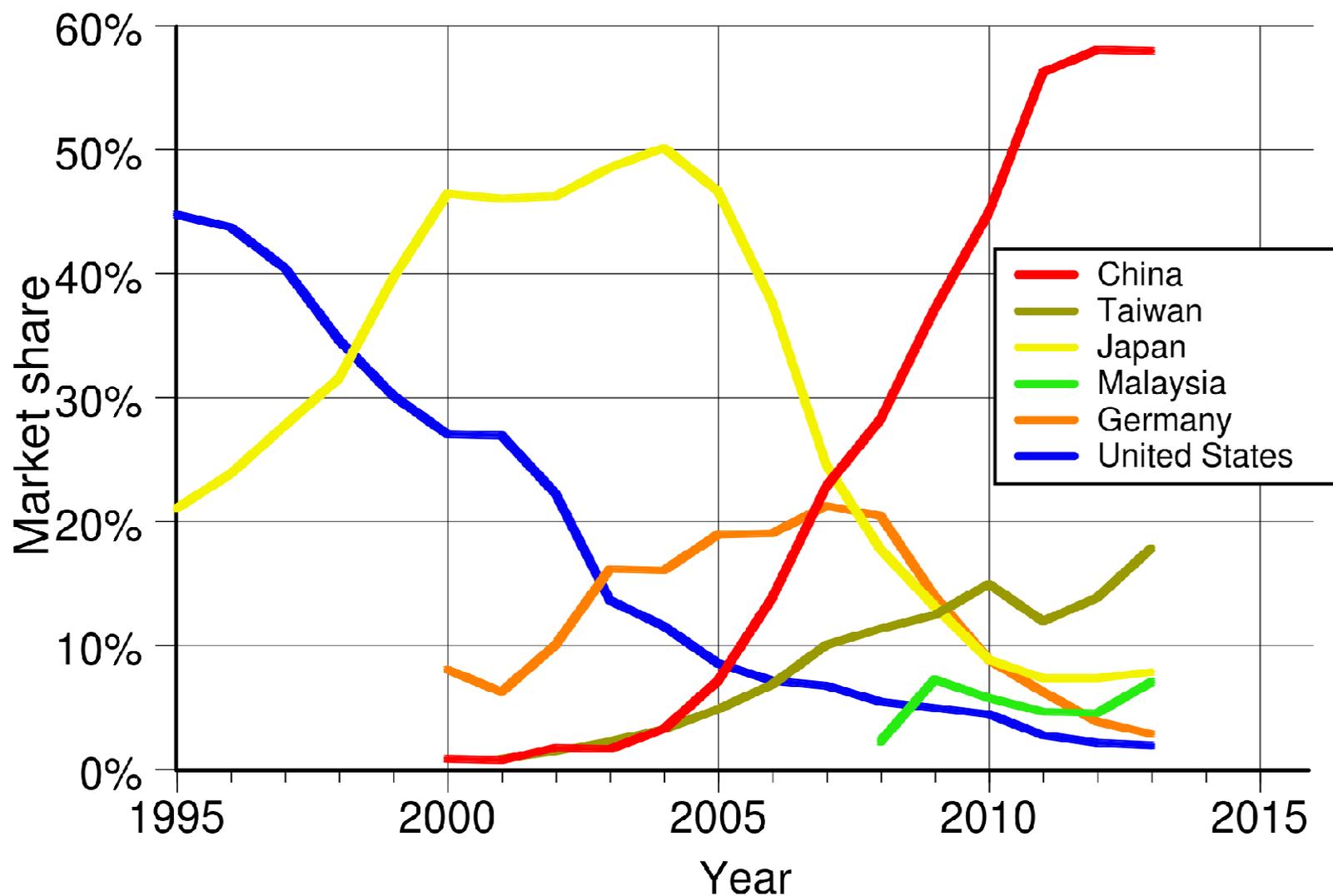
LA SITUATION DU MARCHE ACTUEL



Source : IEA PVPS, RTS CORPORATION – Chiffres 2013

- Place de la chine

Market Share of Photovoltaic Cells

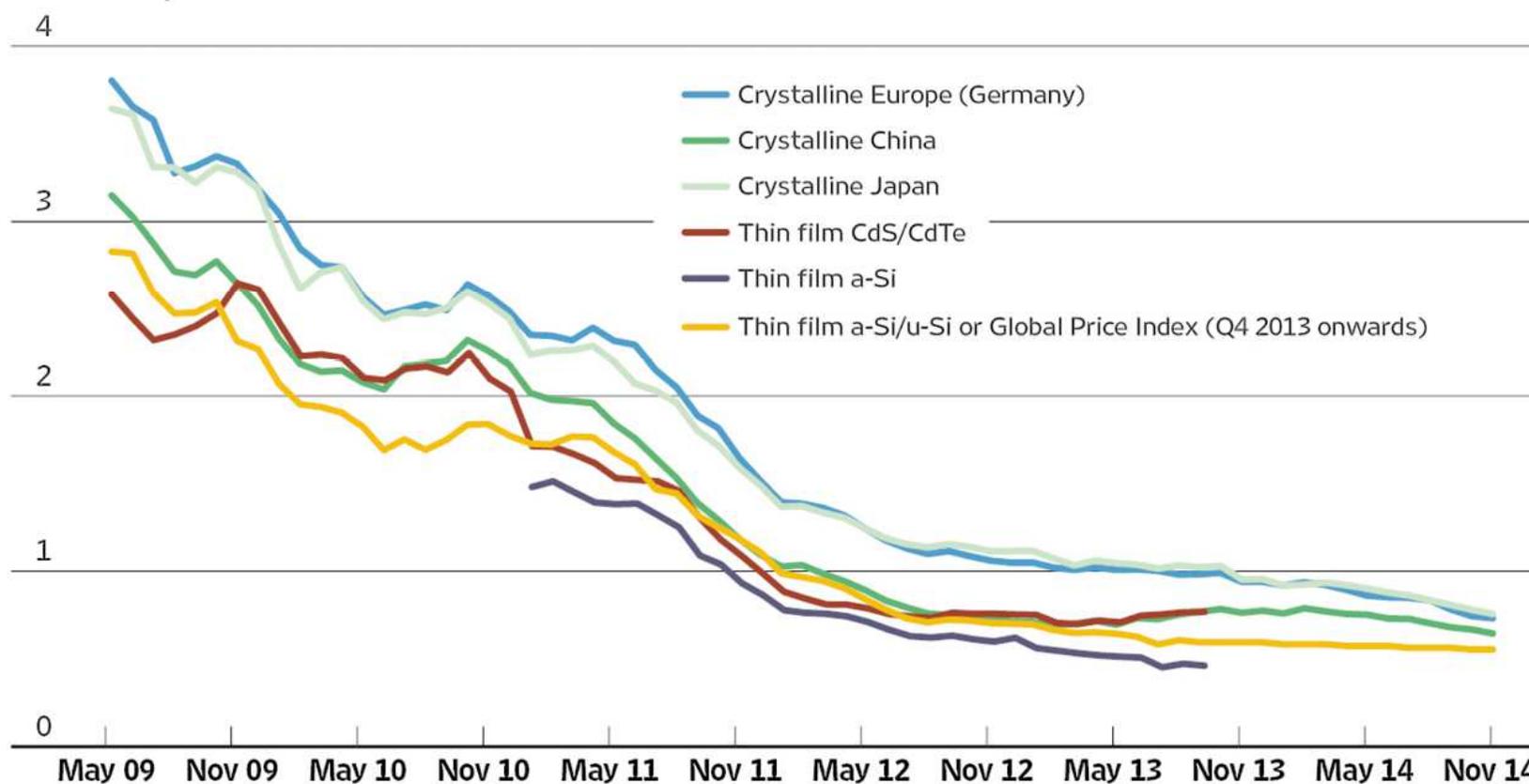


RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2014



FIGURE 5.2: AVERAGE MONTHLY SOLAR PV MODULE PRICES BY TECHNOLOGY AND MANUFACTURING COUNTRY SOLD IN EUROPE, 2009 TO 2014

2014 USD/W



Sources: GlobalData, 2014 and pvXchange, 2014.

• 2016

Prix de gros des panneaux photovoltaïques – Août 2016

Indicateur mensuel du prix des panneaux PV en silicium cristallin (hors installation)

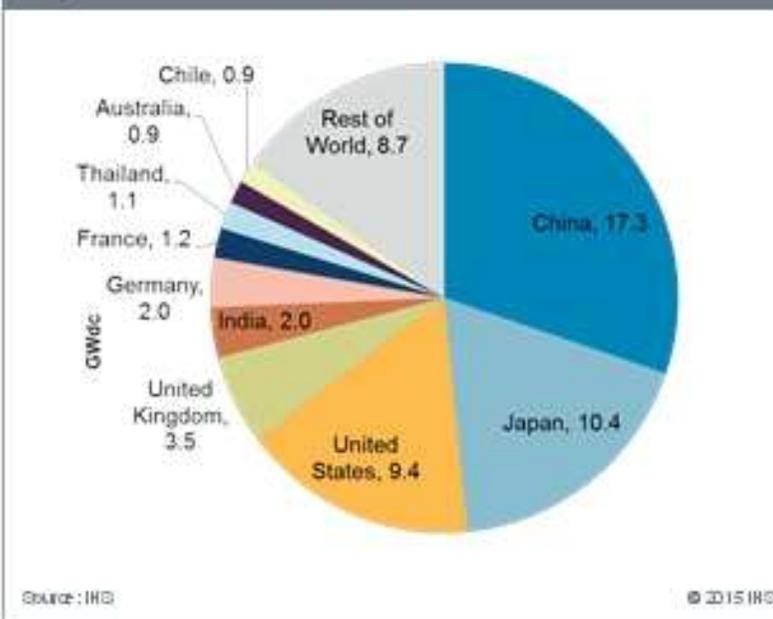
Pays d'origine	Prix en €/Wc (Août 2016)	Évolution comparée au mois précédent	Évolution depuis janvier 2016
Allemagne	0,53	-1,9% ↓	-10,2% ↓
Japon, Corée	0,62	+3,3% ↑	-6,1% ↓
Chine	0,51	-1,9% ↓	-8,9% ↓
Asie du Sud-Est, Taïwan	0,47	-2,1% ↓	-2,1% ↓

Source : www.pvxchange.com

Explications :

- 1) Seuls les prix nets des panneaux PV sont affichés.
- 2) Les montants affichés ne sont pas des prix clients finaux.
- 3) Les montants sont des prix moyens sur le marché spot à l'international (frais douaniers inclus)

Top solar markets in 2015



Type de modules	Prix (€/Wc)	Evolution comparée au mois précédent	Description
Haut rendement	0,66	-2,9%	Modules en silicium cristallin à partir de 275 Wc avec des cellules solaires PERC, HIT, type N et/ou à contacts arrières
All Black	0,56	0,0%	Modules entièrement de couleur noire, y compris le cadre, la protection arrière (backsheet), de 190 à 270 Wc
Gamme dominante	0,49	-2,0%	Modules classiques à 60 cellules, cadre alu standard, backsheet blanche, de 245 à 270 Wc
Bas coût	0,35	+2,9%	Modules d'entrée de gamme et/ou de second ordre et/ou d'occasion, sans garantie ou avec une garantie limitée

- PhotoWatt (Bourgoin Jallieu, 100 MWC):
- Sillia VL (Lannion)
- VOLTEC (Alsace)
- SCNA solar (Tourouvre Normandie)
- Fontroche (90MWc/an)
- FranceWatts (laminés sans cadre)



Source : VOLTEC



MERCI POUR VOTRE ATTENTION.....