

## 11. L'énergie solaire

### 11.4 – *Les collecteurs photovoltaïques*

#### 11.4.2 *Cellules-panneaux-collecteurs*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Carlos Alberto Brandt Rodriguez

Ricardo Izquierdo, Ing., Ph.D.

Oumara Savagado

Valery J. Bouchard

Odile Cesari, M.Ing

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Principes et fonctionnement
- Caractéristiques
- ***Cellules-Modules-Panneaux (collecteurs)***
- Cycle de vie et retour sur investissement
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

# Semi-conducteur: 1<sup>ère</sup> génération

- Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction pn et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.
- La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté.
- On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin.
- Ces dernières ont un rendement inférieur par rapport aux premières, mais ont un coût de fabrication moins élevé.

# Semi-conducteur: 2<sup>ième</sup> génération

- Les couches minces ("thin films") constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque.
- Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellurure de cadmium (CdTe), entre autres.
- Dans le cas de couches minces, la couche de semi conducteur est directement déposée sur un substrat (par exemple du verre).
- La production de ce type de cellules est moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers".

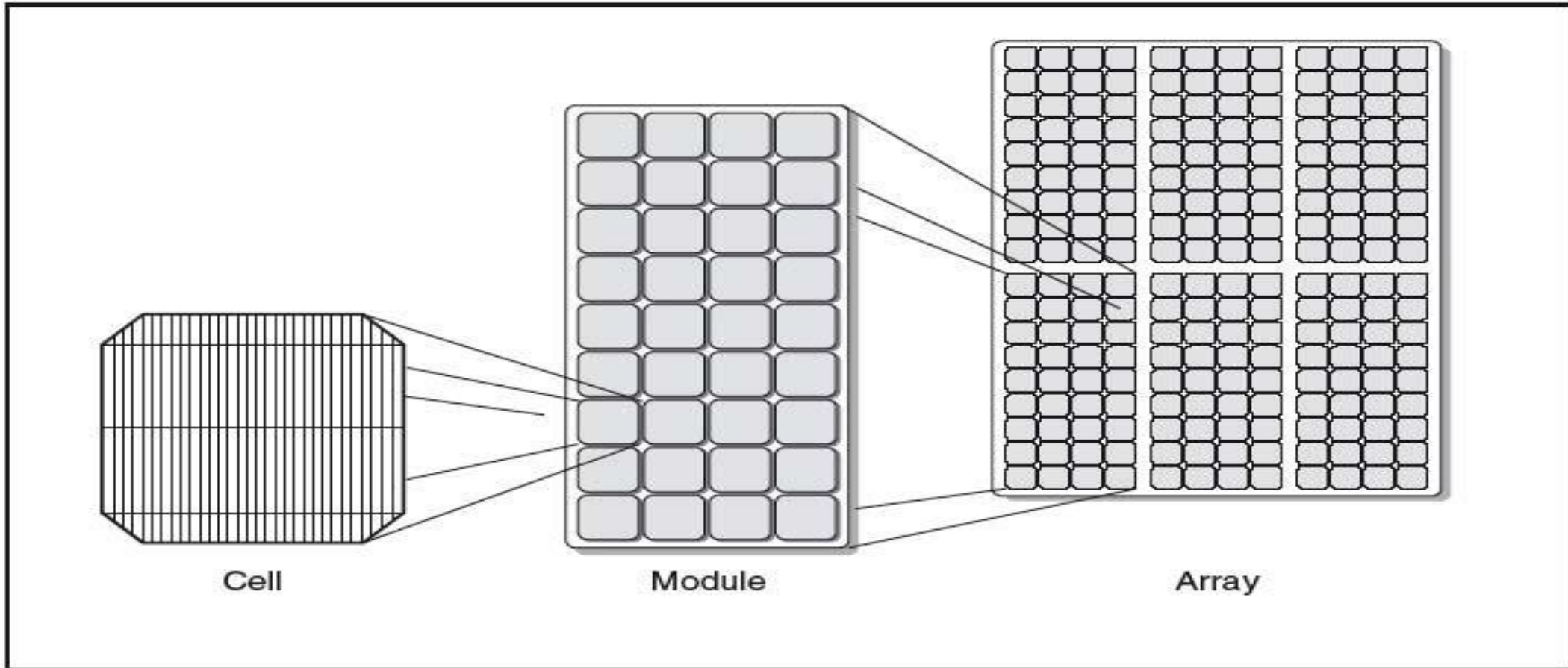
# Semi-conducteur: 2<sup>ième</sup> génération (suite)

- Le problème des cellules de seconde génération est le rendement moindre de ce type de cellules (6-7% et 14% en labo) et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication.
- Cependant, cette seconde génération a beaucoup d'avantages pour des marchés de niche comme les applications en modules flexibles, avec de faibles illuminations ou avec des températures élevées.
- Le diséléniure de cuivre Indium (CIS) qui est au stade de la production industrielle et offre un rendement de 10 à 12 % pour ses modules commerciaux ne présente pas les problèmes de toxicité du cadmium.
- Les réductions de coût attendues à moyen terme pour cette technologie sont donc très prometteuses.

# Semi-conducteur: 3<sup>ième</sup> génération

- La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, **qui est d'environ 30%**.
- Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :
  - superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes) à concentration
  - utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule
  - cellules à électrons chauds produisant plus de paires électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie
- Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

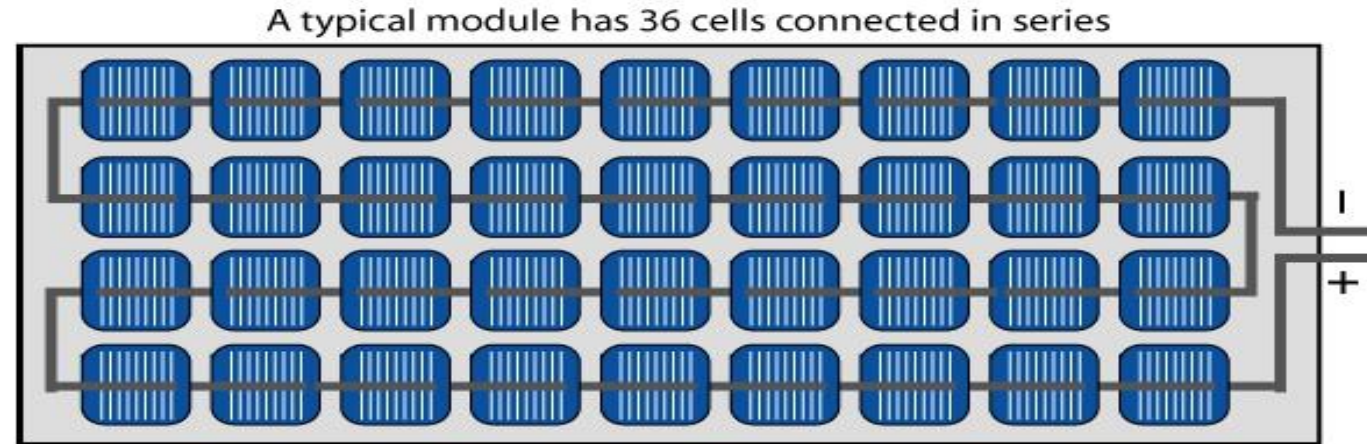
# Cellules-Modules-Panneaux



**Photovoltaic cells, modules and arrays** *The building blocks of solar electricity are modular in nature, allowing great flexibility in applications.*

# Modules solaires

$$\begin{aligned}I_{SC} \text{ total} &= I_{SC} \times M \\I_{MP} \text{ total} &= I_{MP} \times M \\V_{OC} \text{ total} &= V_{OC} \times N \\V_{MP} \text{ total} &= V_{MP} \times N\end{aligned}$$



$$I_T = M \cdot I_L - M \cdot I_0 \left[ \exp\left(\frac{q V_T}{n k T}\right) - 1 \right]$$

N : nombres de cellules en série

M : nombres de cellules en parallèle;

$I_T$  : courant total du circuit;

$V_T$  : voltage total du circuit;

$I_0$ : courant de saturation d'une seule cellule;

$I_L$ : courant court-circuit d'une cellule individuelle;

n: facteur d'idéalité de la diode

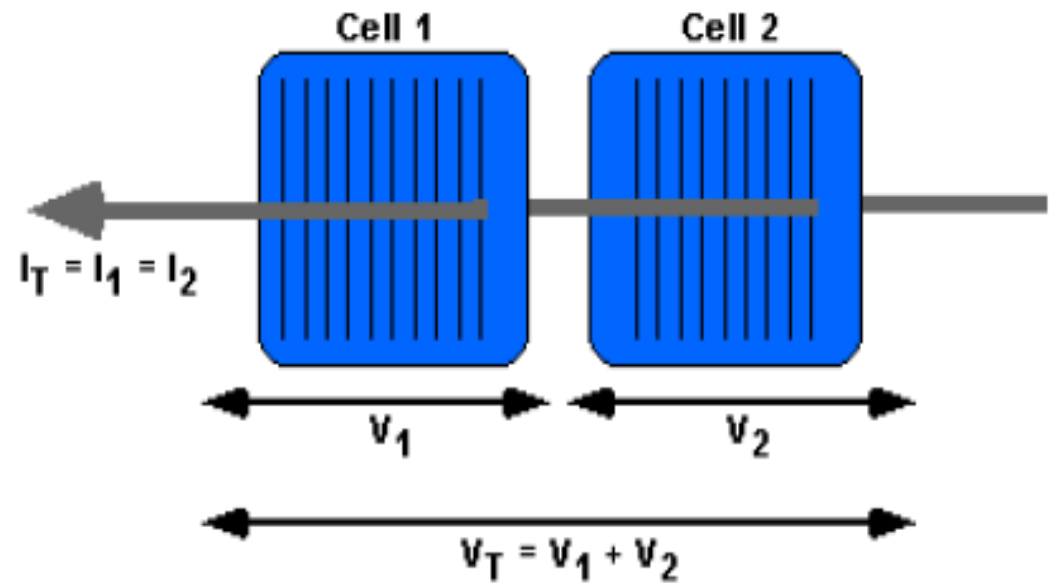
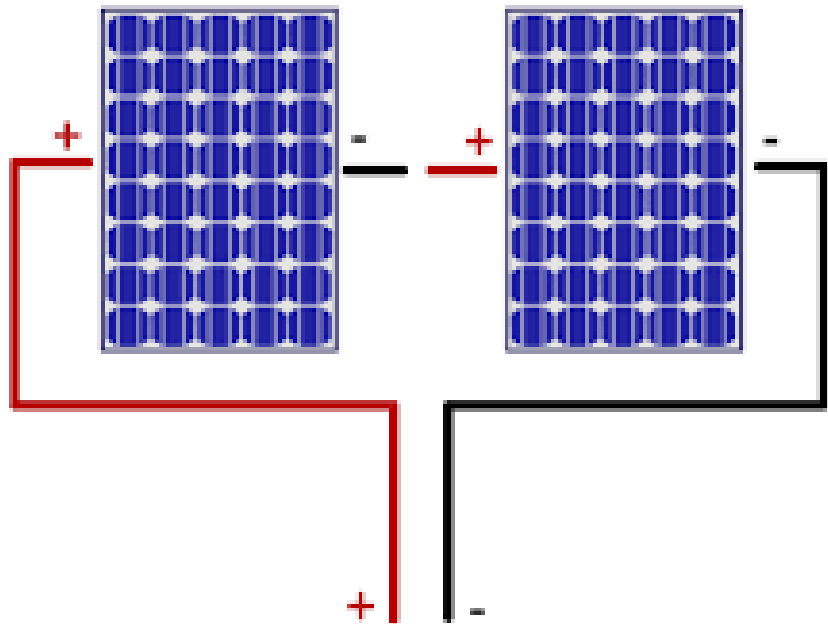
q,k, T: constantes



# Branchement en série

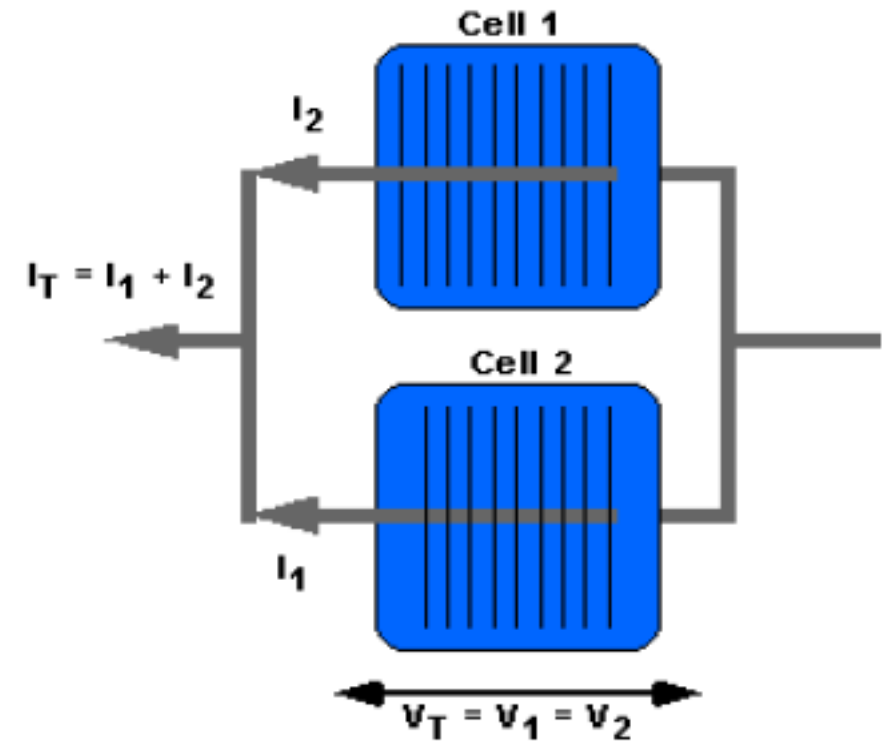
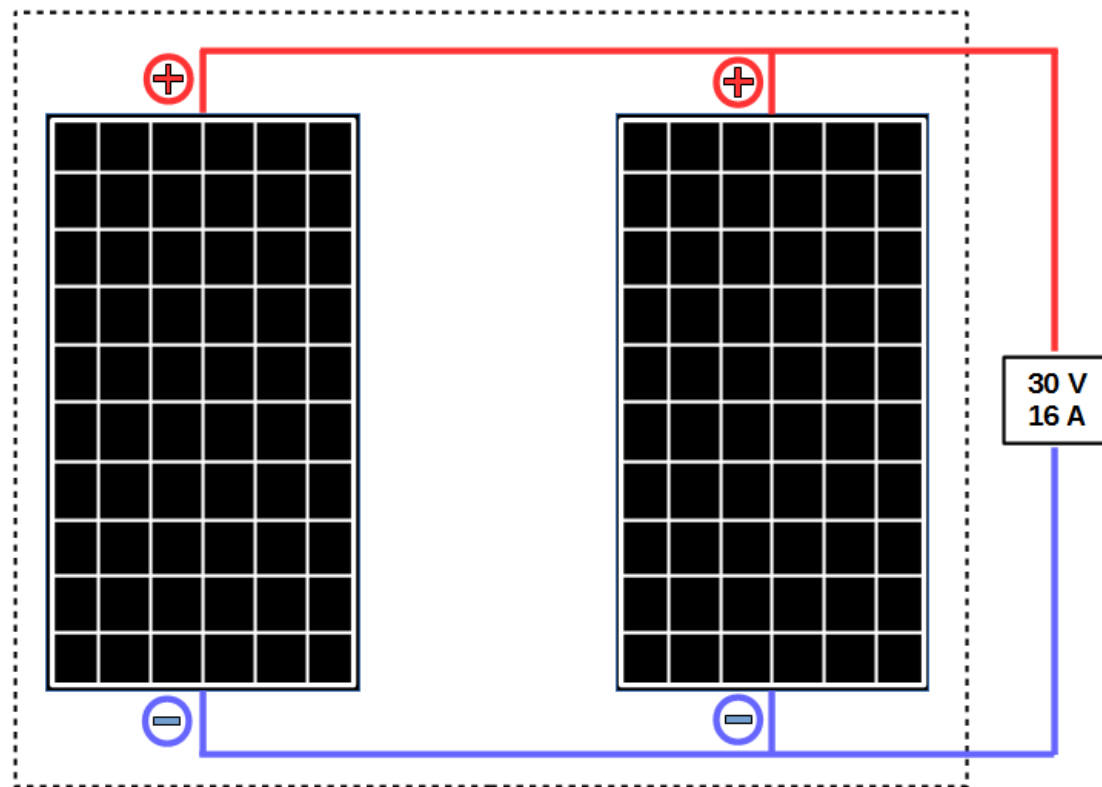
- Permet d'additionner les tensions ( $V$ )
  - Connecter la borne (+) du panneau solaire à la borne (-) et inversement

Branchement de panneaux en série



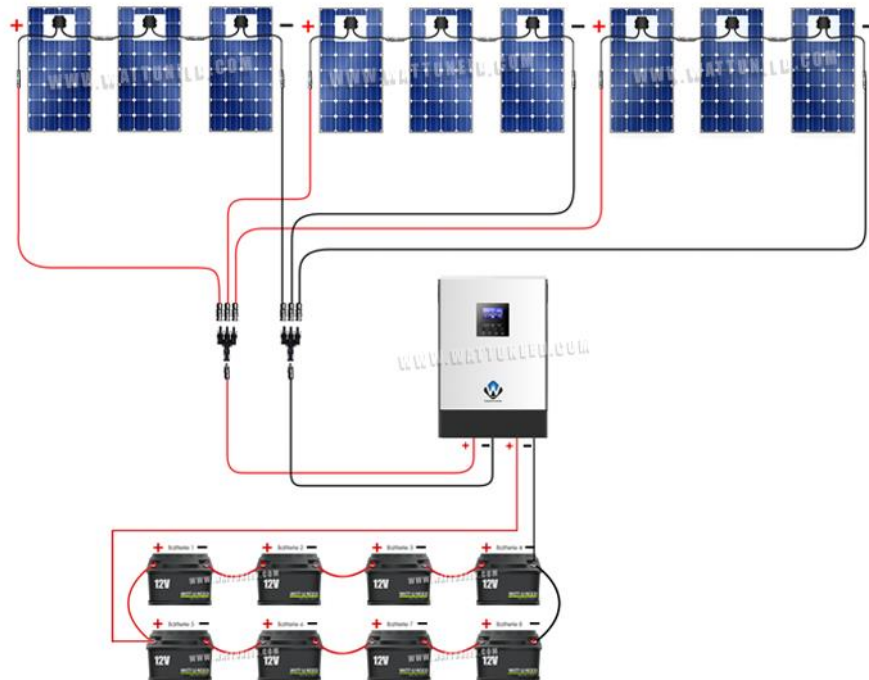
# Branchement en parallèle

- Permet d'additionner les courants ( $I$ )
  - Connecter les bornes (+) ensemble et les (-) ensemble



# Branchement mixte

- Pour une puissance suffisante, on opte pour un branchement mixte, série et parallèle.
  - Dépendamment du régulateur utilisé



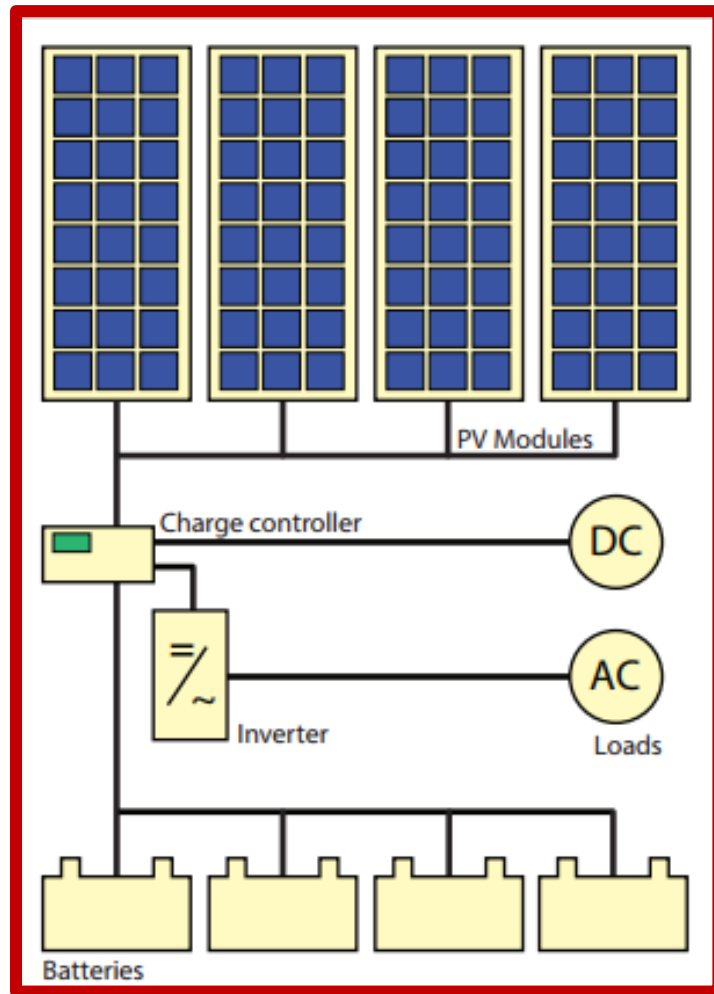
Exemple: Branchement de 3 séries de 3 panneaux parallèles

# Types de Systèmes PV

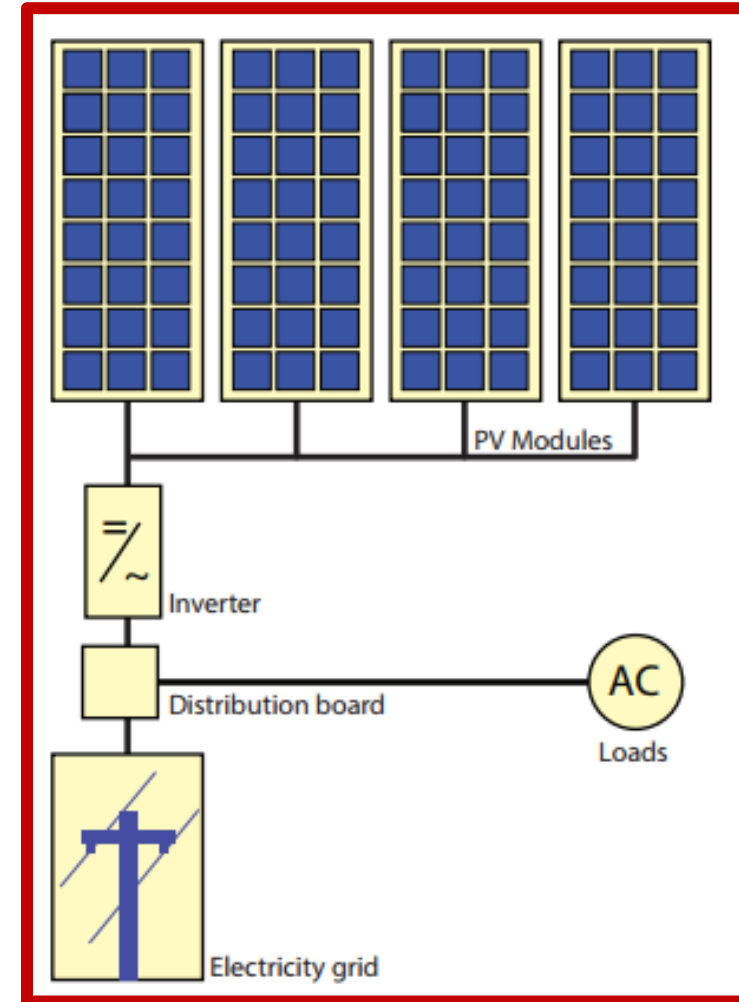
- Systèmes autonomes
  - Aucune connexion au réseau nécessaire ou souhaitée
- Systèmes connectés au réseau
  - Petits systèmes de type résidentiel
- Centrales de production
  - Grand système photovoltaïque situé dans un emplacement optimal et alimentant le réseau



# Types de Systèmes PV



**Autonome**



**Connecté**

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Principes et fonctionnement
- Caractéristiques
- Cellules-Modules-Panneaux (collecteurs)
- ***Cycle de vie et retour sur investissement***
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

Si vous visionnez en asynchrone cette présentation, prenez une pause avant de continuer!

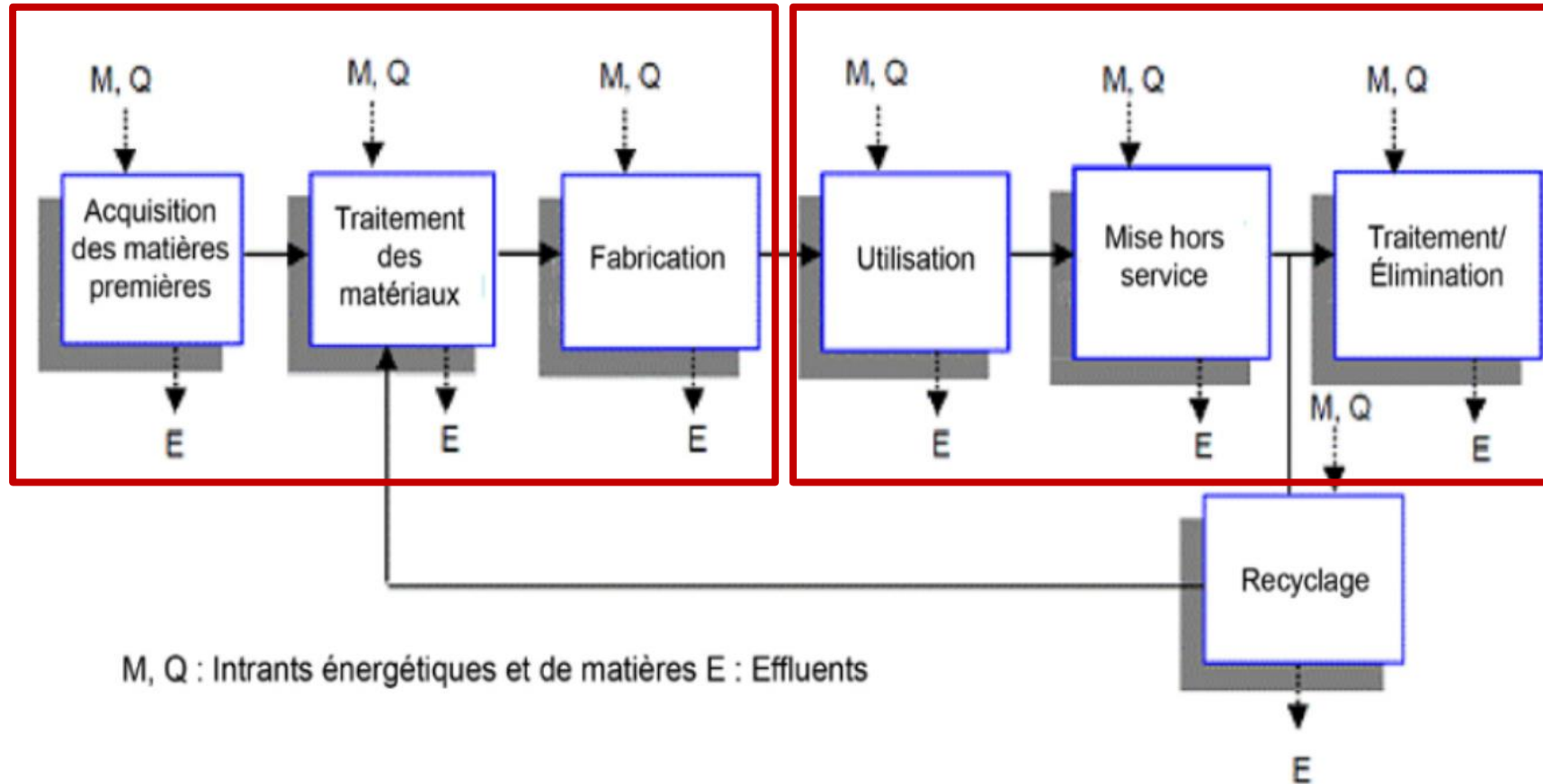
# Question



ENR2020

- À quel taux de pourcentage un module PV peut-il être recyclé?
  - A. 90%
  - B. 80%
  - C. 70%
  - D. 60%
  - E. 50%

# Cycle de vie



Source : Fthenakis et al., 2011



# Cycle de vie

- Analyse simplifiée, modules silicium polycristallin

Et.	Energie finale		Matériaux	Consommables	Rejets
	#	kWhe			
1	<b>Raffinage du silicium</b>				
	pour 1 kg de MG-Si (équiv. 95 Wc)				
	14		sable : ± 3 kg	Charbon, houille, coke, bois : 2,6 kg Graphite	poussières fines
Poly-Si	pour 1 kg de poly-Si procédé Siemens (équiv. 108 Wc)				
	100	51	MG-Si : 1,13 kg	Produits chimiques : 2 kg	produits chlorés
2	<b>Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques</b>				
	pour 1 m <sup>2</sup> de mc-Si à 240 um (équiv. 140 Wc)				
	30	1	poly-Si : 1,3 kg	Eau : 65 L Produits chimiques et gaz : 3,7 kg Creuset quartz : 0,4 kg Câble acier, abrasif SiC : 4,1 kg	silicium, slurry, câble, creuset

# Cycle de vie

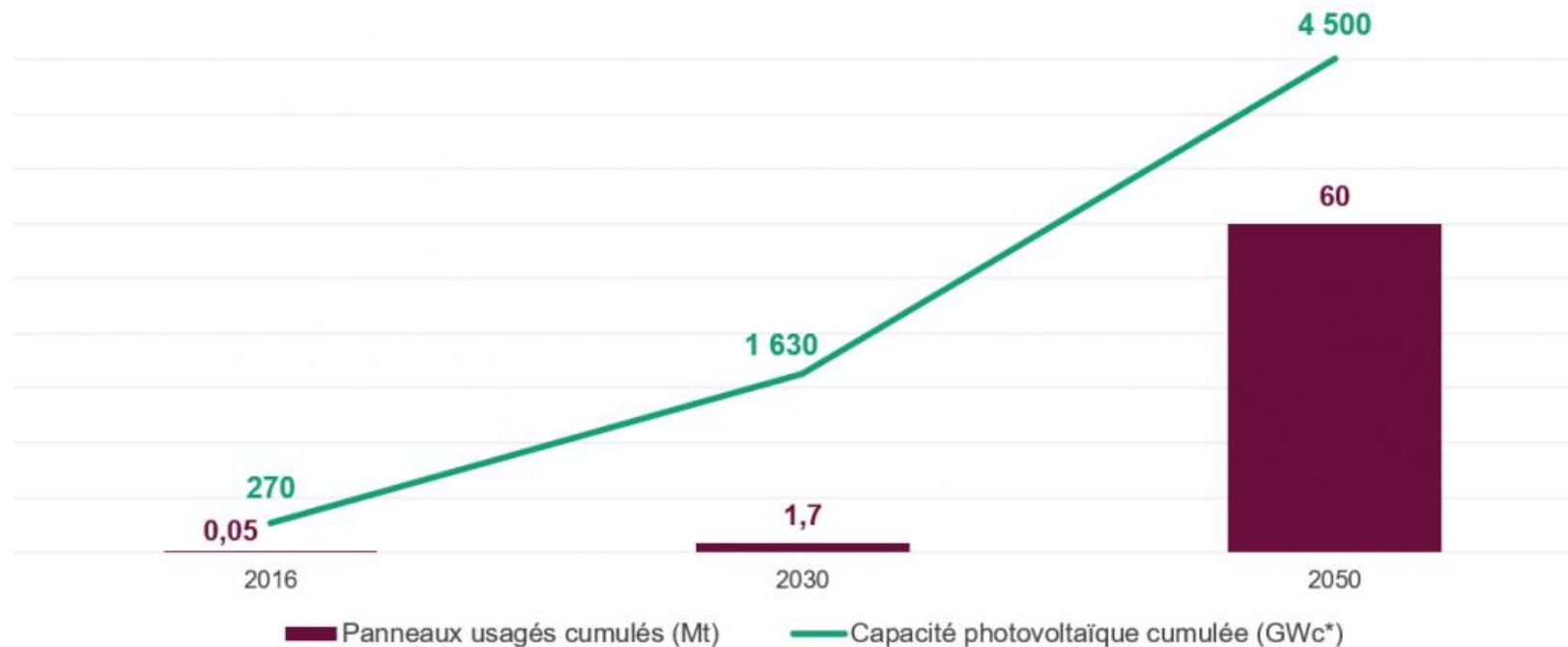
- Analyse simplifiée, modules silicium polycristallin

Et.	Energie finale		Matériaux	Consommables	Rejets
	#	kWhe			
3	<b>Fabrication des cellules</b>				
	pour 156x156 mm à 285 um (équiv. 3,6 Wc)				
Cellules	0,74	0	mc-Si : 1,06 plaque	Eau : 27 L Produits chimiques et gaz : 0,06 kg Polystyrène (emballage) : $10 \cdot 10^{-6}$ kg	gaz à effet de serre, solvants organiques, émissions fluorées, effluents acides et basiques, cellules pv
4	<b>Assemblage des modules</b>				
	pour 60 cellules (équiv. 220 Wc)				
Modules	10,7		61,2 cellules pv Al, boîte jonction, verre, EVA, tedlar, Cu, silicone	Eau : 34 L Solvants organiques : 0,035 kg Carton (emballage) : 1,75 kg	cellules pv, EVA, tedlar

# Recyclage des panneaux

- Plus de capacité  $\Rightarrow$  plus de déchets à gérer dans quelques années!

Projection de la capacité et de la quantité de déchets photovoltaïques cumulés mondiaux, 2016-2030

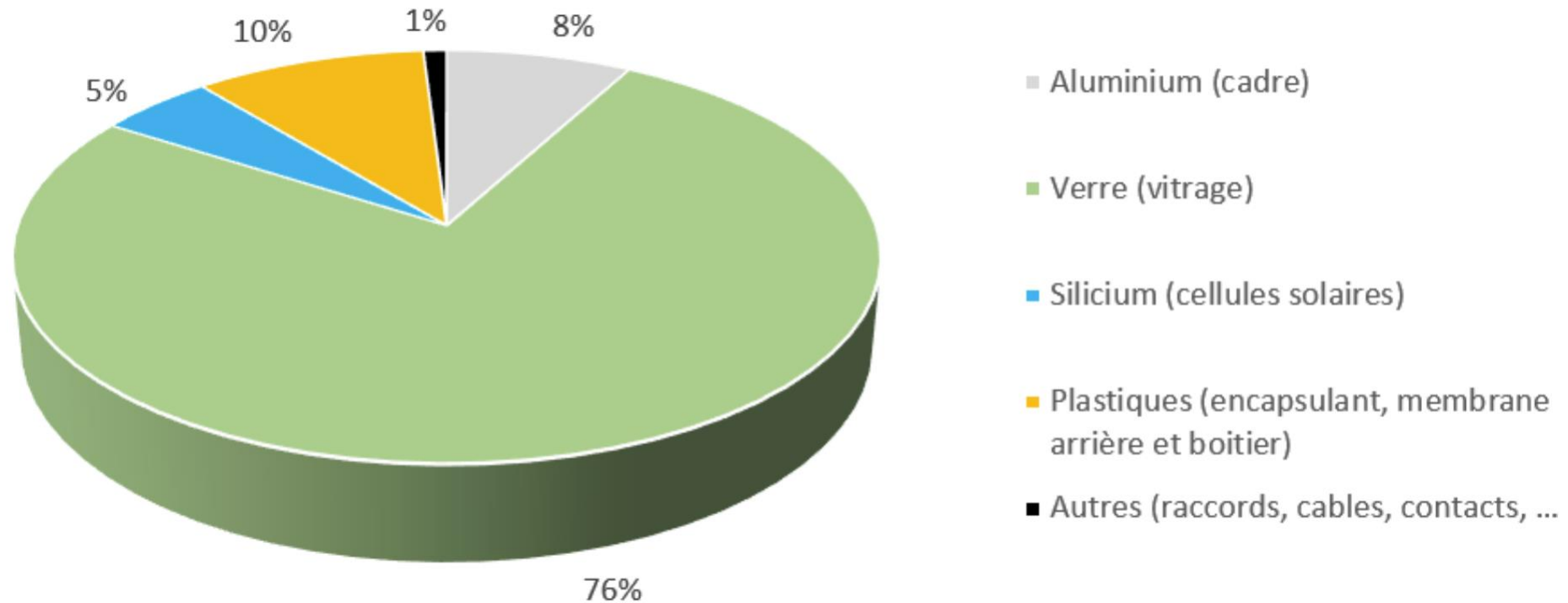


\*Puissance crête ou puissance maximale que le panneau peut délivrer au réseau électrique

Source : Rapport sur la gestion de la fin de vie des panneaux photovoltaïques (Juin 2016) par l'Agence Internationale des Energies Renouvelables

# Recyclage des panneaux

Composition massique d'un panneau solaire à base de silicium cristallin



Source : Rapport sur la gestion de la fin de vie des panneaux photovoltaïques (Juin 2016) par l'Agence Internationale des Energies Renouvelables

# Recyclage des panneaux

- Les processus de recyclage des panneaux varient selon le type de panneau et l'entreprise qui gère le recyclage, mais globalement, il suit les étapes suivantes :



# Recyclage des panneaux : collecte

- En Europe : recyclage très règlementé.
  - 2003 : directive européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques visant à la mise en place du principe de responsabilité élargie des producteurs. Les fabricants sont dans l'obligation de collecter et de traiter les panneaux photovoltaïques en fin de vie
  - 2007 : création de PV Cycle, organisme européen créé pour gérer la collecte de panneaux en vue de les recycler.
- Aux États-Unis : peu de réglementations en place pour l'instant.
  - L'entreprise Recycle PV s'associe à PV Cycle pour acheminer les panneaux américains en fin de vie en Europe pour les recycler.

# Recyclage des panneaux : collecte

- Au Japon :
  - Certaines entreprises s'occupent de la collecte et du traitement de ces panneaux, comme par exemple PV Techno Cycle et Toshiba Environmental Solutions
  - 2021 : PV Cycle s'est allié avec Akita PRTDO pour créer PV Cycle Japan afin d'assurer la collecte des panneaux photovoltaïques
- En Chine et en Inde : pour l'instant peu d'efforts
  - Les panneaux photovoltaïques en fin de vie ne sont pas traités et sont placés en décharge.

# Recyclage des panneaux : démantèlement

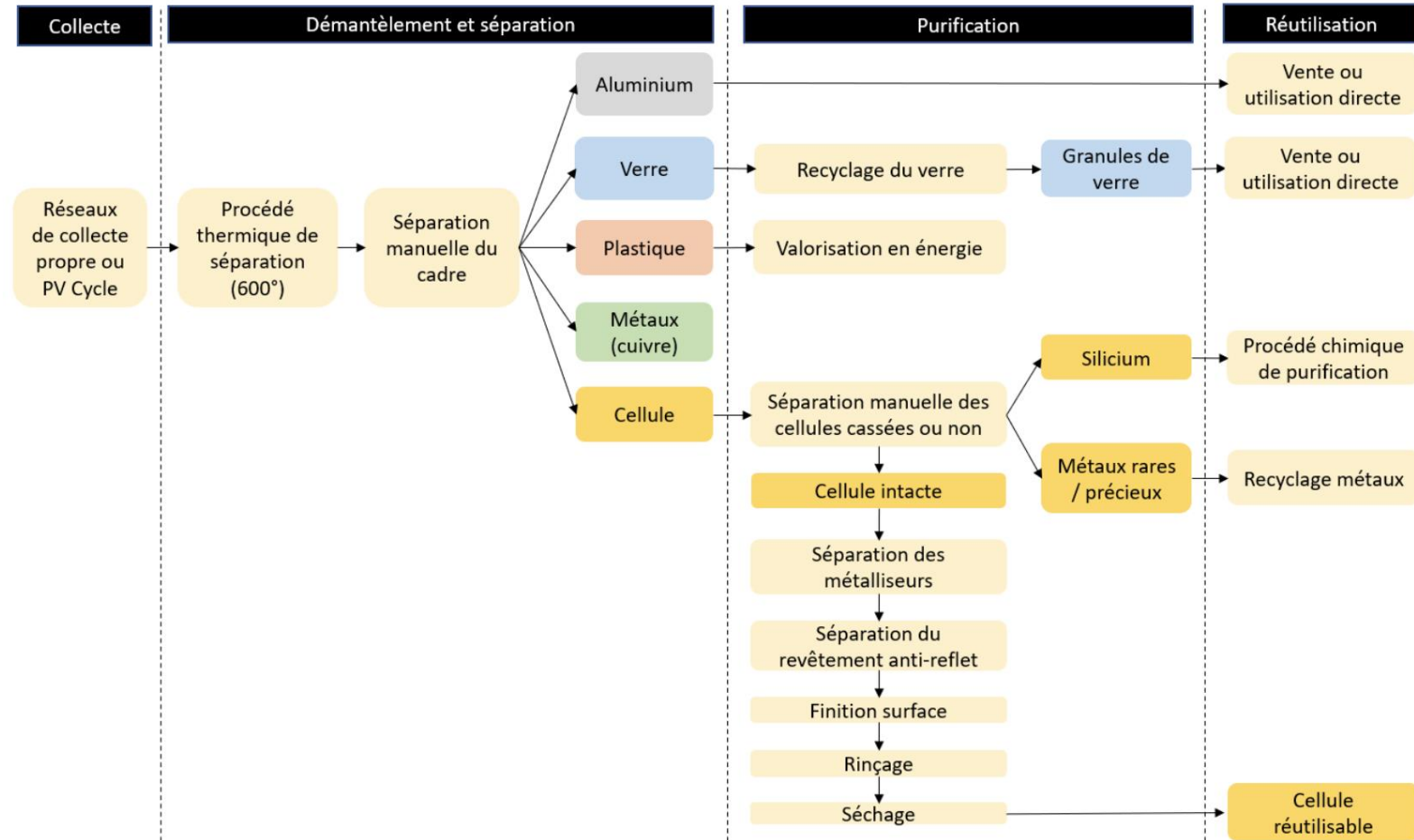
- Variable selon l'entreprise et le type de panneau.
- Trois exemples de procédés sont présentés par la suite pour les curieux, mais d'autres procédés existent.
- Ces procédés concernent les panneaux utilisant la technologie du silicium cristallin (la plus répandue à l'heure actuelle).

**Pour avoir plus de notions sur les analyses de cycle de vie :  
ENV850 – Analyse de cycle de vie, donné par Annie Levasseur, PhD  
aux sessions d'été.**



# Recyclage des panneaux : démantèlement

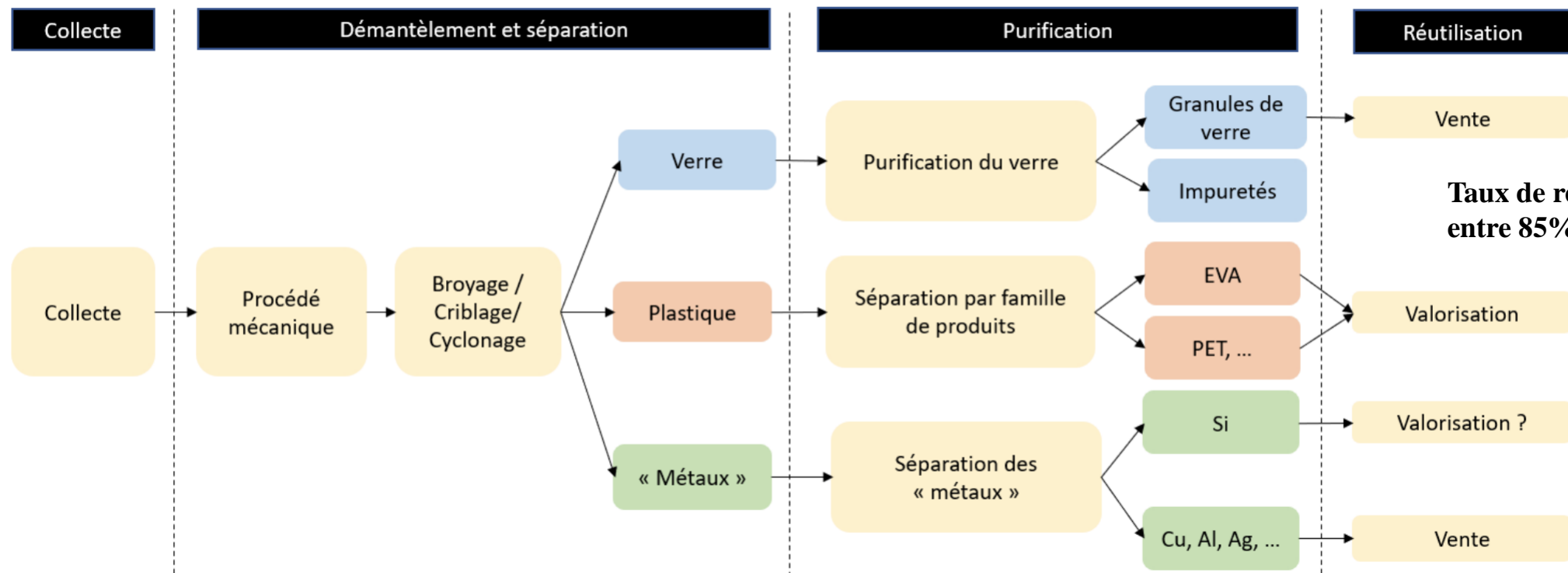
- Procédé thermique et chimique : exemple de l'entreprise allemande Solar World :



**Taux de recyclage global  
entre 90% et 95.7%**

# Recyclage des panneaux : démantèlement

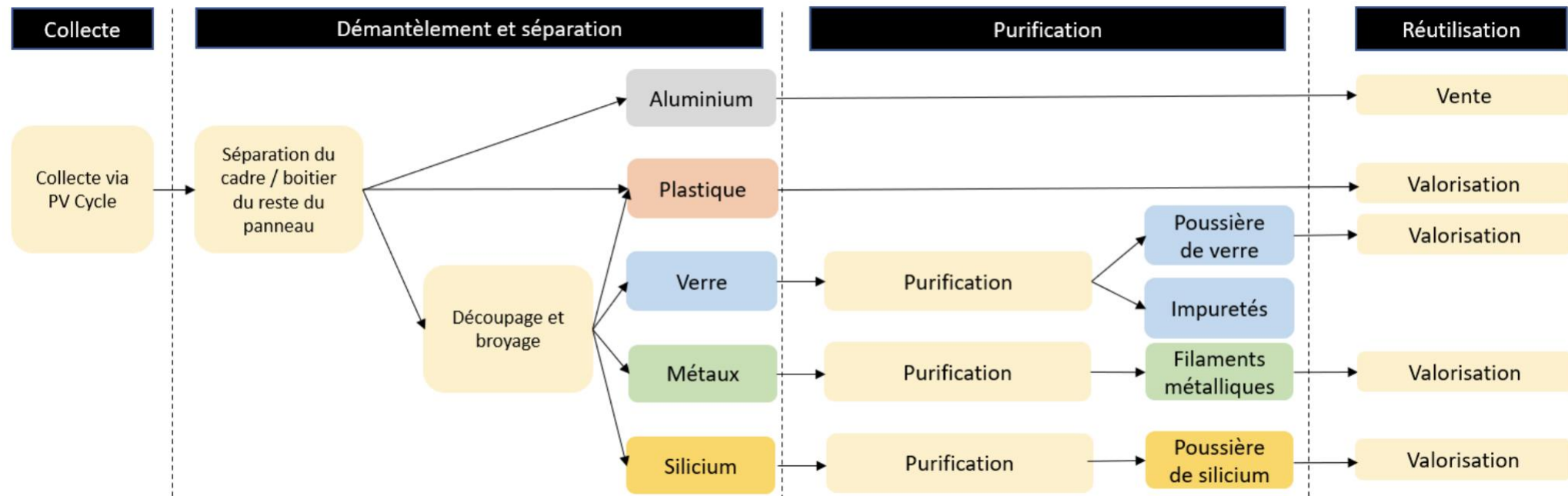
- Procédé mécanique et chimique : exemple de l'entreprise française Recupyl :



**Taux de recyclage global  
entre 85% et 90%**

# Recyclage des panneaux : démantèlement

- Procédé mécanique : exemple de l'entreprise française Veolia :



**Taux de recyclage global  
d'environ 90%**

# Recyclage des panneaux : valorisation

- Aluminium : recyclable « à l'infini »
- Verre : recyclable « à l'infini » (dans de nouveaux panneaux si le verre est sans impuretés, autrement dans d'autres usages classiques du verre)
- Silicium : réutilisable jusqu'à 4 fois (dans de nouveaux panneaux ou dans d'autres appareils électroniques)
- Cuivre et argent : fondus et intégrés à la chaîne existante de recyclage de ces matériaux
- Plastique : seul élément non recyclé

# Retour sur investissement énergétique

- Le photovoltaïque
  - Lifetime = 40 ans (25 ans de garantie)
    - Des systèmes photovoltaïques sont en production depuis les années 1970.
      - Oldenburg, Energielabor lab, 336 modules, 1976

Photovoltaik-Modul AEG-Telefunken TSG MQ 36/0  
(temperature 25°C)

	1976	2011
rated power	10,3 W	9,9 W
open circuit voltage	21,0 V	20,3 V
short circuit voltage	685 mA	664 mA
MPP-voltage	16,6 V	16,6 V
MPP-current	630 mA	607 mA
efficiency	8,55 %	8,2 %
total number of mudules		336
total power		3460 W

Hardly any variations after 35 years in operation: the manufacturer's specifications in comparison to the Oldenburg measurement data.

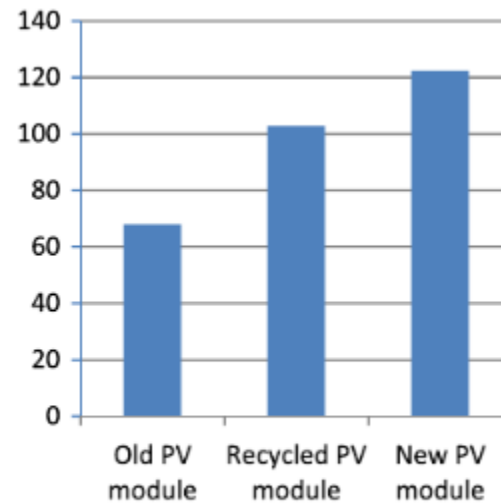
# Retour sur investissement énergétique

- Le photovoltaïque

- Lifetime = 40 ans (25 ans de garantie)

- Comparative analysis of old, recycled and new PV module: Ashfaq, Husain, Giri, JKSU (2017) 29, 22-28

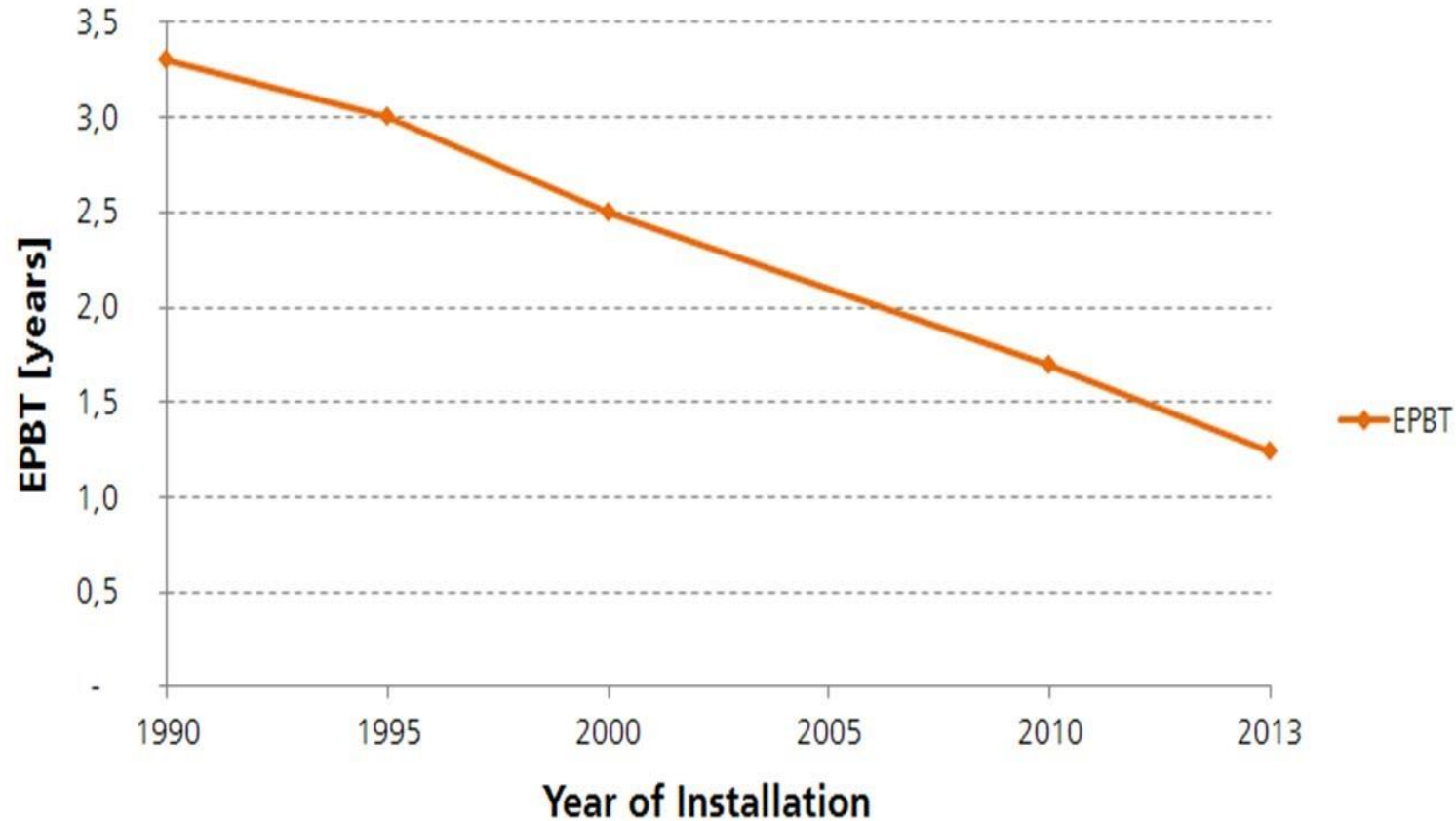
- About 90% of the materials recovered from solar panels can be recycled into useful products.



(a) PV module power (W)

# Retour sur investissement énergétique

- RIE ou Taux de Retour Énergétique ou EROI ou EROEI ou EPBT



Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 12 July 2017

# Retour sur investissement énergétique

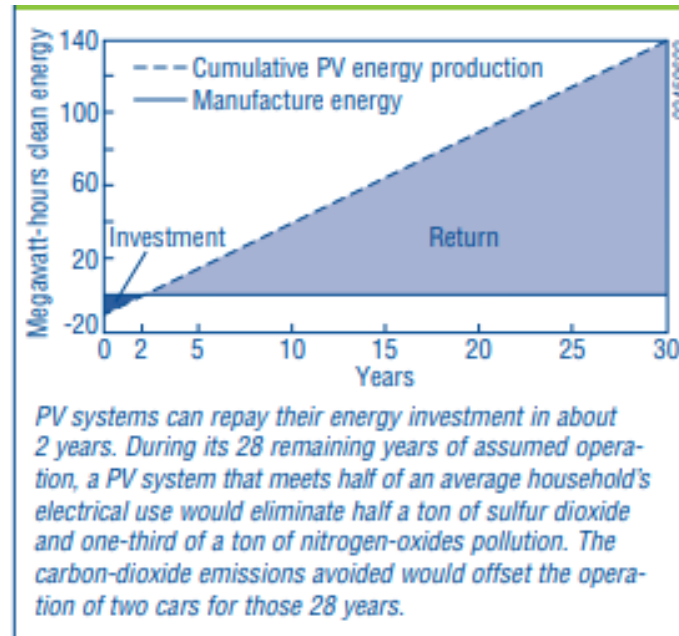
- Le photovoltaïque
  - Energy Pay-Back Time (EPBT) = 1,5–2 ans (1-4 ans NREL, 2004)
    - Bhandari, Collier, Ellingson, Apula,
    - Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis,
    - Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 47, July 2015, Pages 133-141



# L'énergie solaire

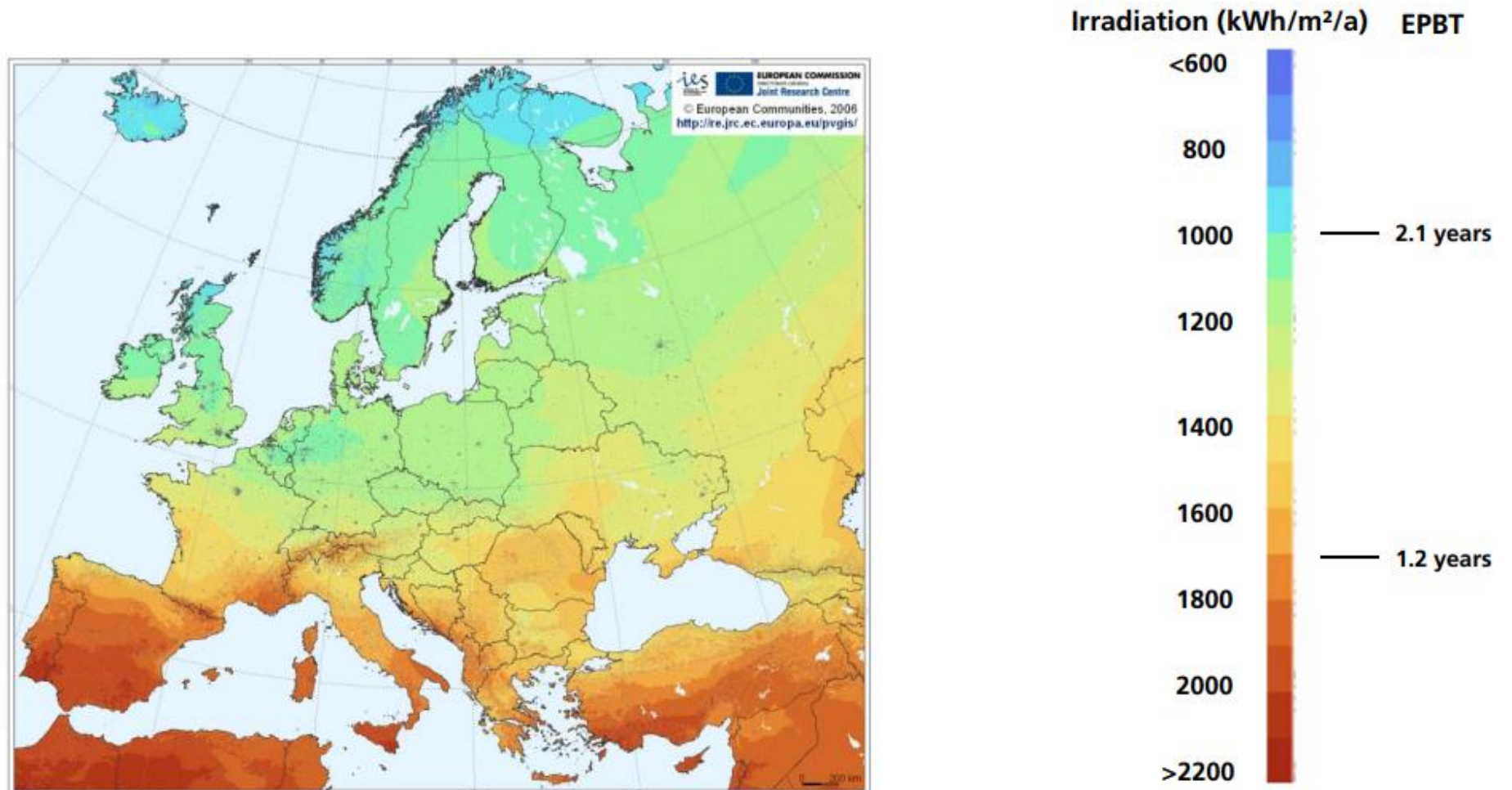
- Le photovoltaïque
  - Energy Return On Energy Invested (EROI ou EROEI)  $\approx$  15-20
    - EROI = Lifetime/EPBT, expression simplifiée :
      - Une performance constante sur toute la vie utile
      - Aucune énergie supplémentaire investie dans le maintien d'actifs.

**What is the energy  
payback for PV?  
DOE/GO-102004-  
1847  
January 2004**



# Retour sur investissement énergétique

- Europe

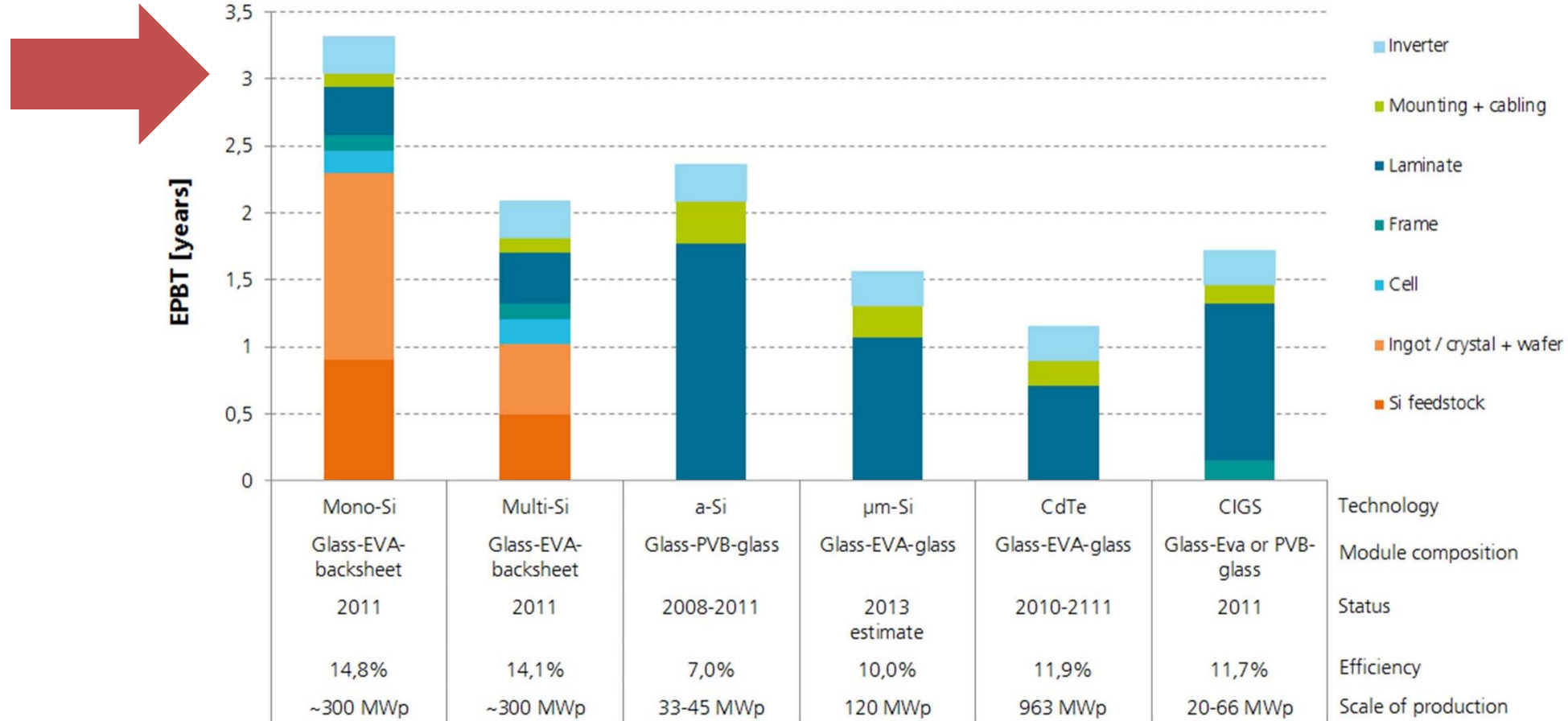


Data: M.J. de Wild-Scholten 2013. Image: JRC European Commission. Graph: PSE 2014 (Modified scale with updated data from PSE and FraunhoferISE)

Fraunhofer ISE:Photovoltaics Report, updated: 23 June 2020

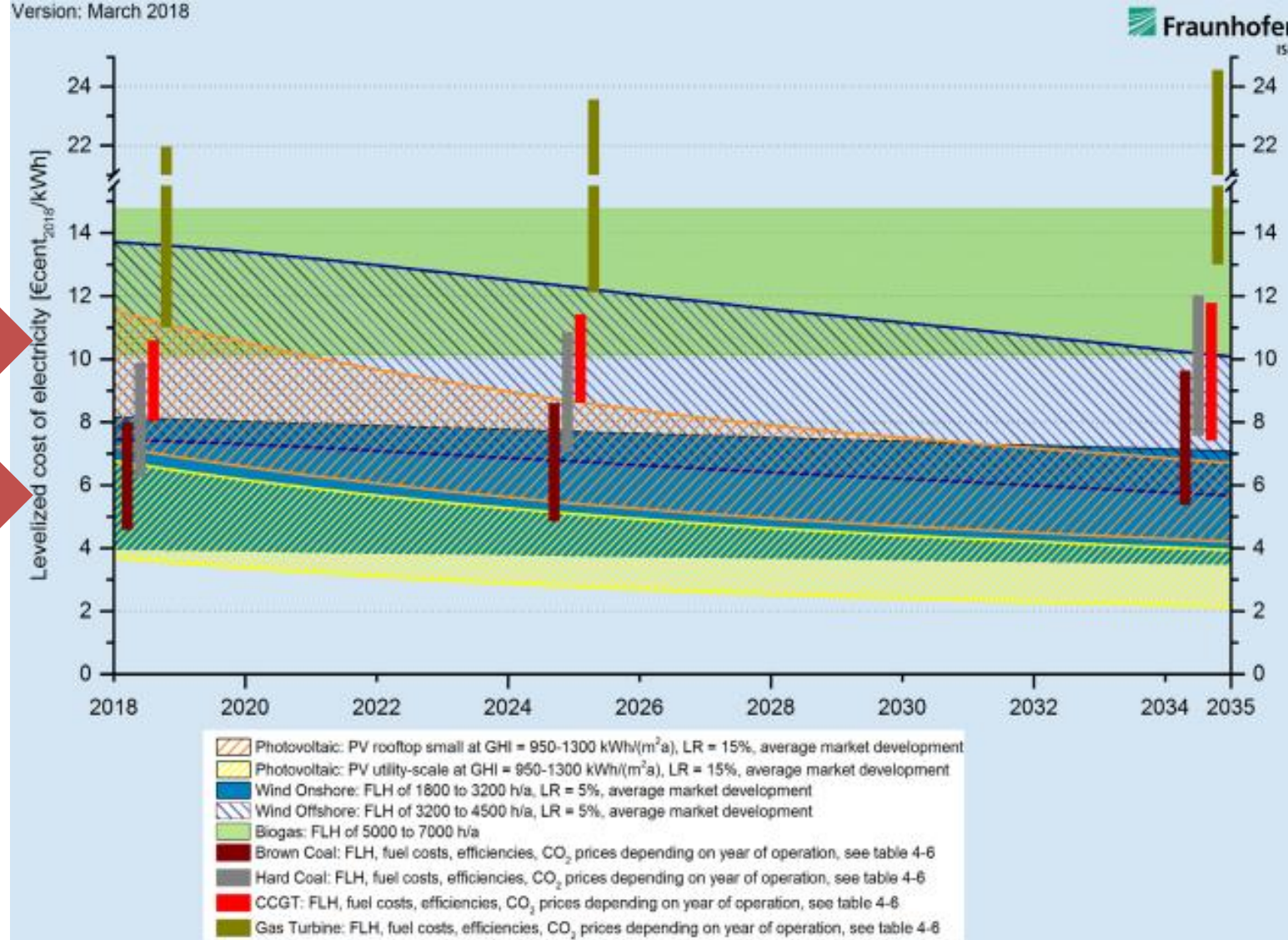
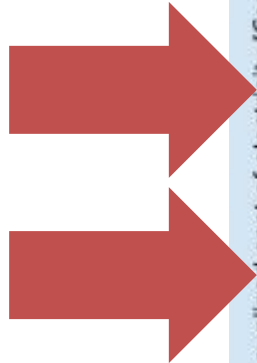
# Retour sur investissement énergétique

- Allemagne



Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 23 June 2020

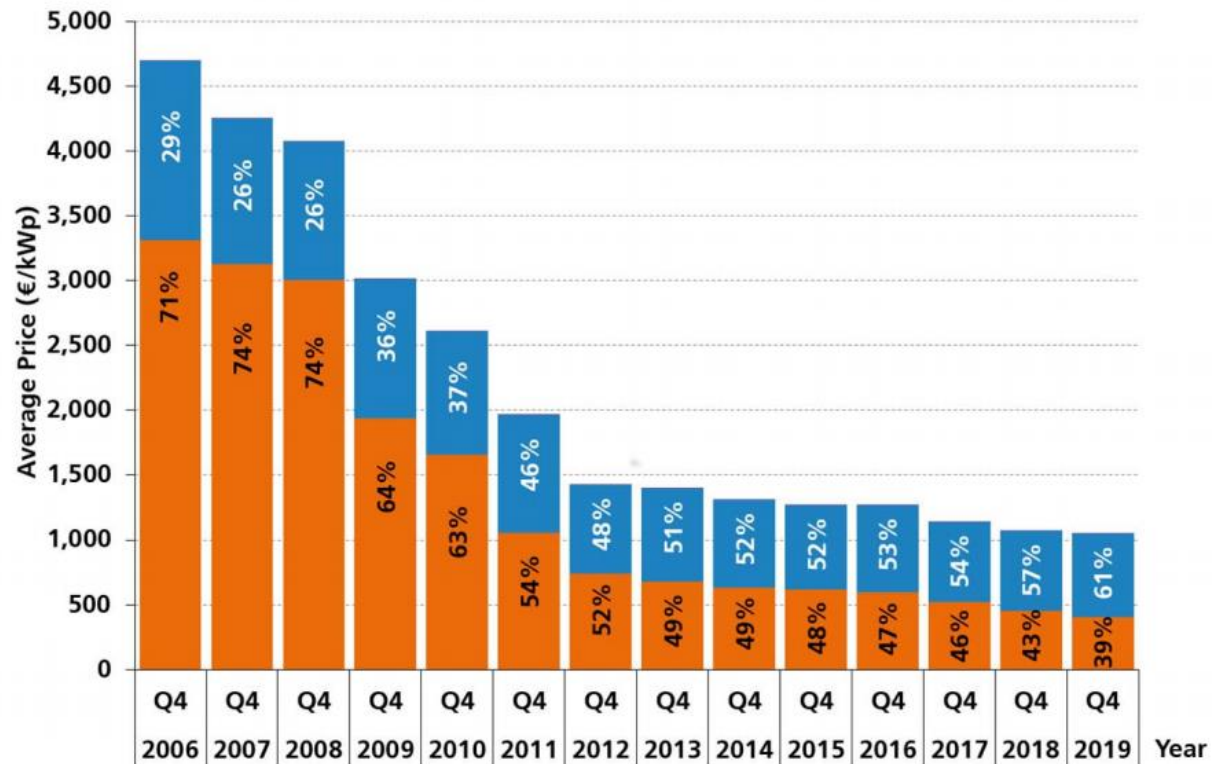
# Coûts : Levelized Cost of Electricity (LCOE)



EN2018\_Fraunhofer-ISE\_LCOE\_Renewable\_Energy\_Technologies March 2018

# Coûts : Systèmes PV en toiture en Allemagne

## Average Price for PV Rooftop Systems in Germany (10kWp - 100kWp)



■ BOS incl. Inverter  
Percentage of the Total Cost  
■ Modules

← 1€/Wp

Data: BSW-Solar. Graph: PSE Projects GmbH 2020

©Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 23 June 2020



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

