

Solaire photovoltaïque

Ordres de grandeur, état des lieux & perspectives

16 Mars 2024

Daniel Suchet - daniel.suchet@polytechnique.edu



Pourquoi le solaire ?

Puissance solaire sur Terre

1360 W/m² dans l'espace
(flux émis $4\pi R^2 \sigma T^4$ réparti sur $4\pi D^2$)

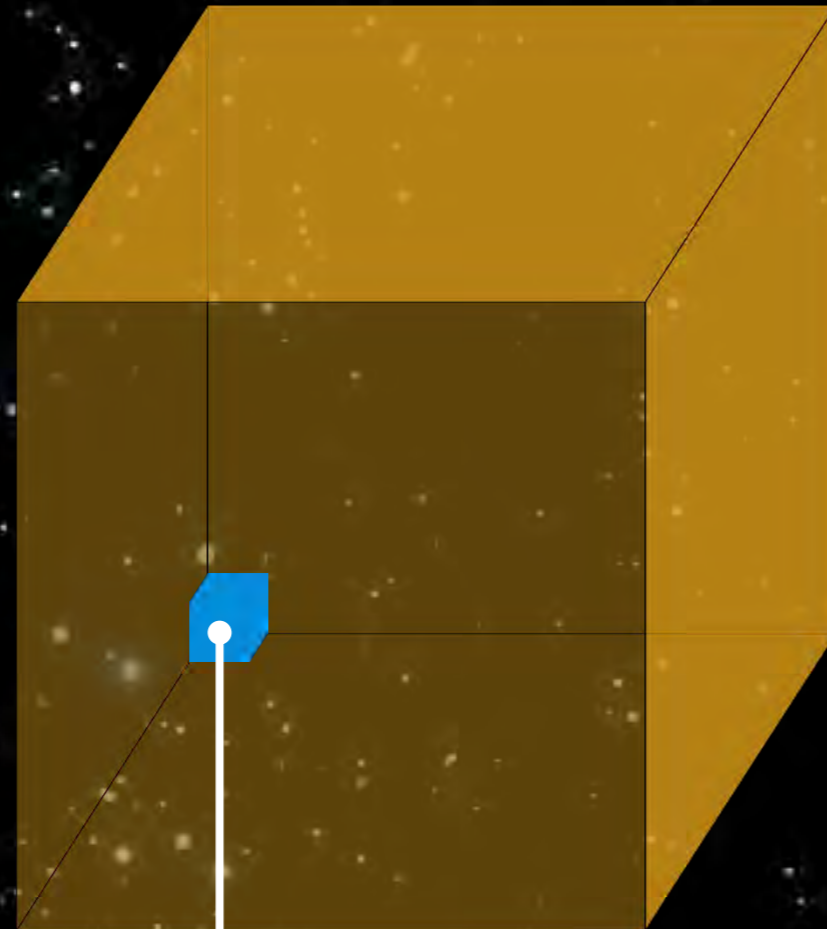
1000 W/m² au sol en plein Soleil
(absorption & réflexion atmosphérique)

150 W/m² en moyenne en France
*(Rotation terrestre : $\cos(\text{lattitude})/\pi$
Météo : $\sim 2/3$)*



Une manne énergétique !

Potentiel solaire annuel
(terres émergées, avec météo)
23 000 TWy



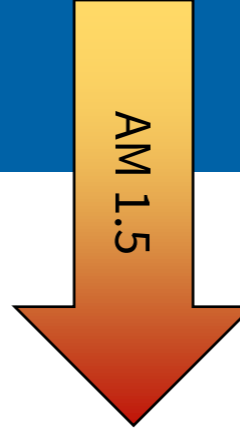
1 an conso mondiale
18 TWy

500 TWh_{elec} / an
→ 2 000 km²
= 15% de la surface des routes



Convertir la puissance solaire

Illumination directe
 $G_{\max} = 1000 \text{ W/m}^2$



Illumination moyenne
 $\bar{G}_{\text{mean}} = 150 \text{ W/m}^2$



En chimie
Photo-synthèse
Efficacité 0,1-1%



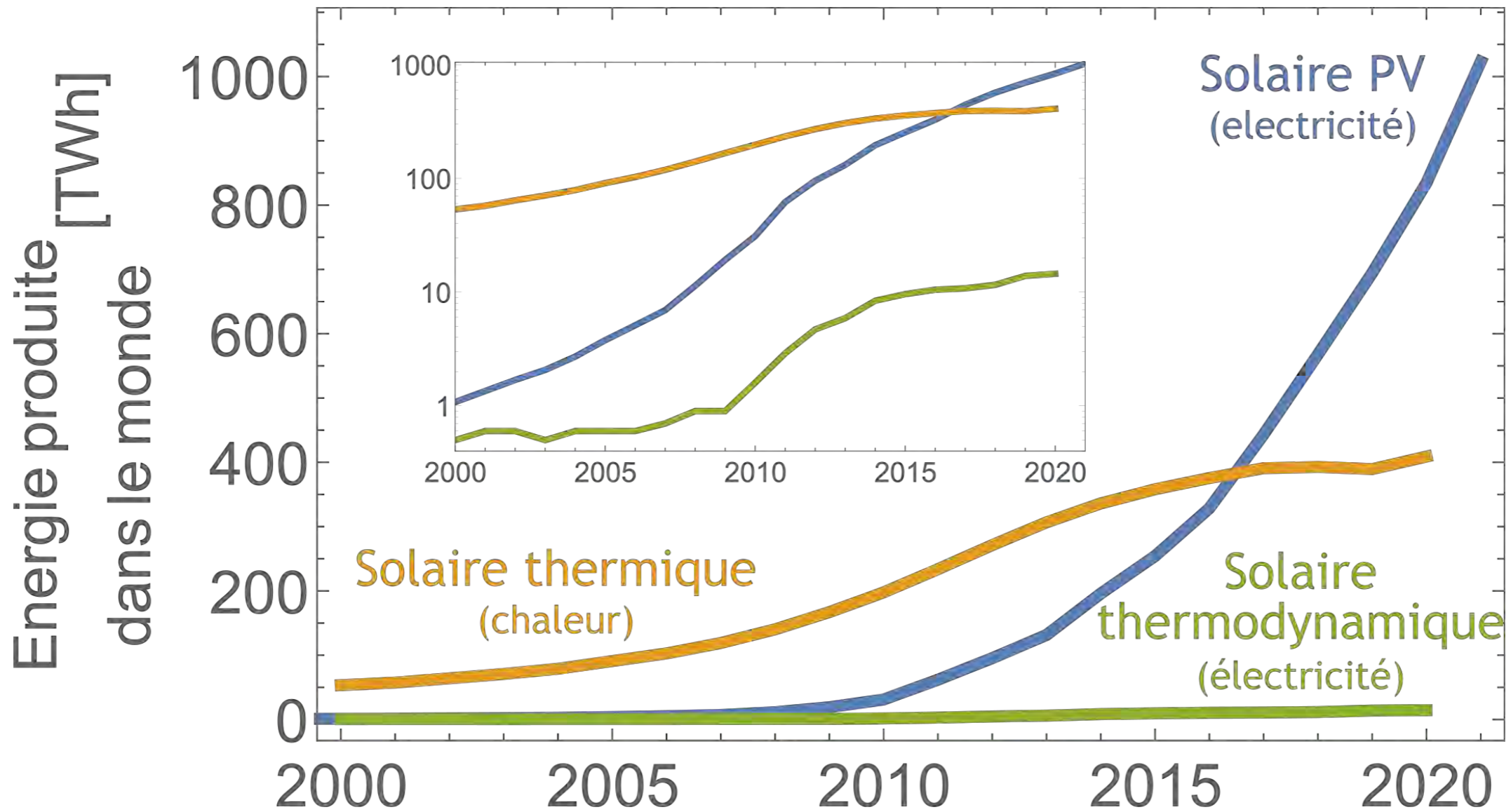
En chaleur
Solaire thermique
Efficacité 80%



En chaleur, puis en électricité
Solaire à concentration
Efficacité 20%



Directement en électricité
Solaire photovoltaïque (PV)
Efficacité 20%



Attachez vos ceintures !

Première version du texte

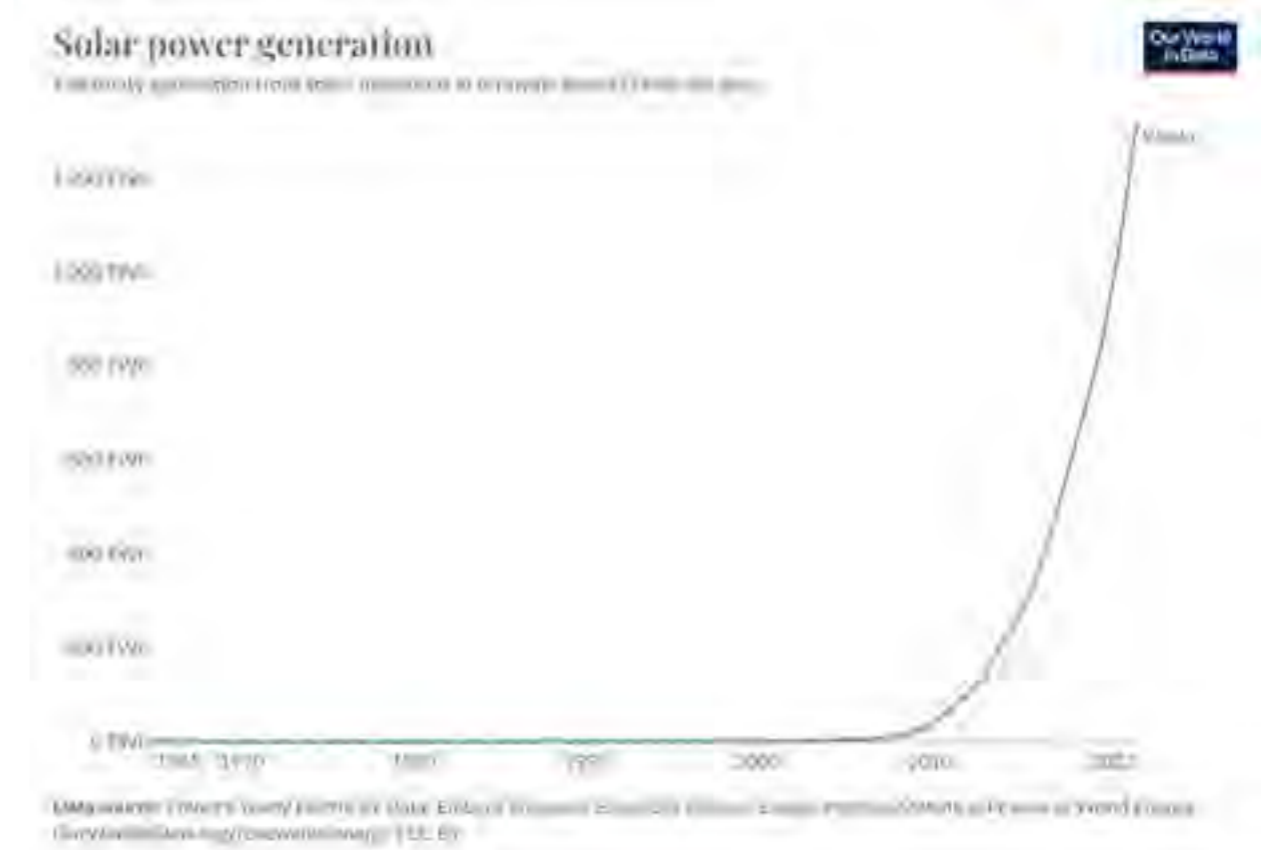
Ces performances ont permis au photovoltaïque de produire près de **600 TWh en 2018**, soit 2.6% de l'électricité mondiale.

Version publiée

Ces performances ont permis au photovoltaïque de produire plus de **1000 TWh en 2020**, soit 3 % de l'électricité mondiale.

Erratum

Ces performances ont permis au photovoltaïque de produire près de **1300 TWh en 2022**, soit 4.4% de l'électricité mondiale.



Capacité installée fin 2022

Monde : 1 046 GW (+200 GW par rapport à 2021)

France: 17.4 GW (+ 2.6 GW par rapport à 2021)

Electricité produite sur l'année 2022

Monde : 1300 TWh (=4.4% du total)

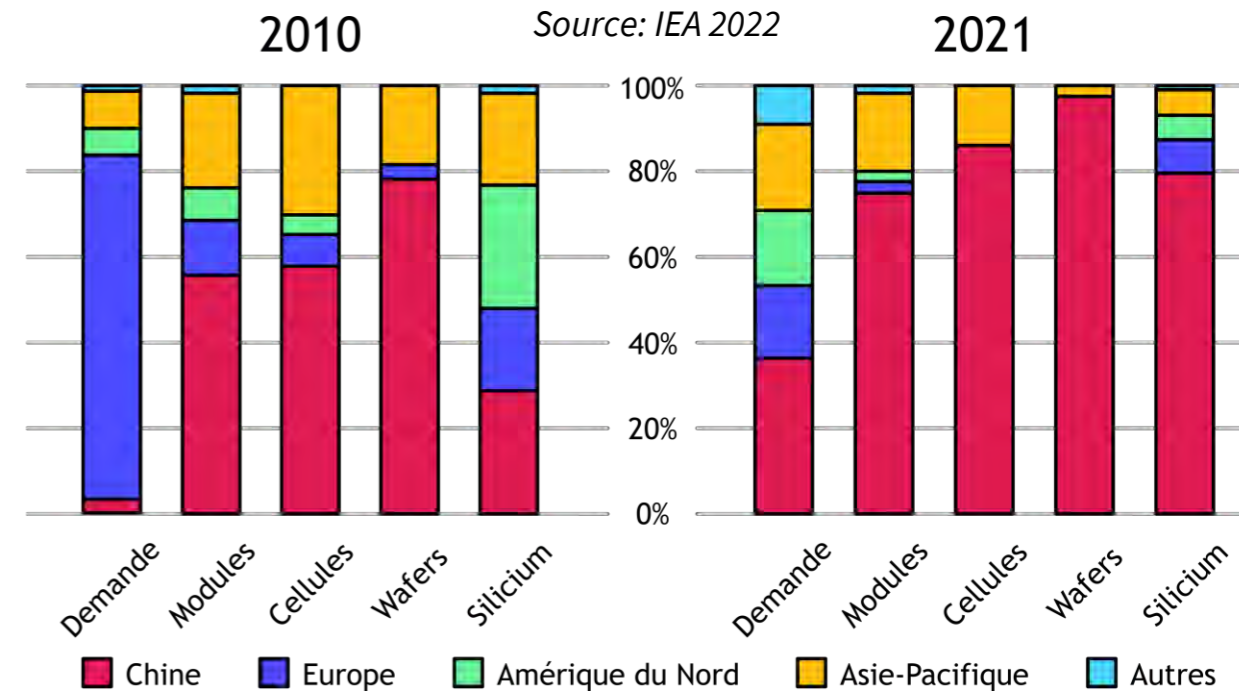
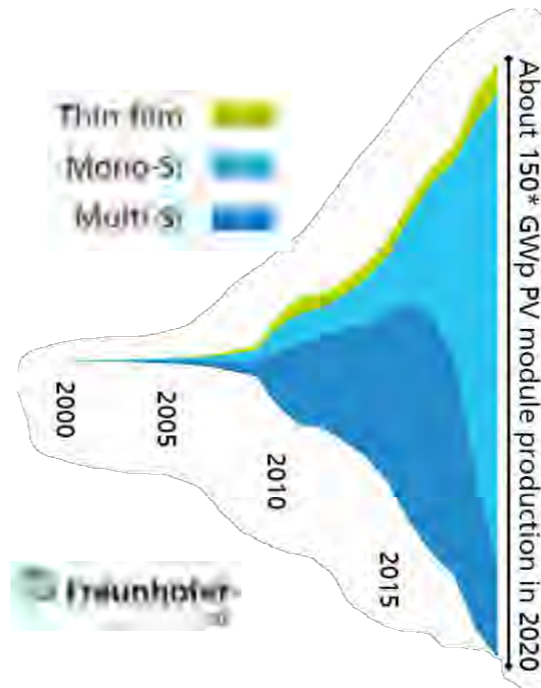
France: 18.6 TWh (=4% du total)

Facteur de charge
12-15%

Technologie solaire :

Silicium cristallin (95%)

Fabriqué en Chine (80-97%)



De quoi parle-t-on ?

Module (ou panneau) solaire en sortie d'usine

Puissance nominale (puissance électrique sous éclairement standard)

Coût du module (par Watt-crête)



Module solaire installé

Puissance nominale (puissance électrique sous éclairement standard)

ou puissance idéale (compte tenu de l'emplacement, de l'orientation...)

Coût installé, incluant électronique, main d'œuvre... (par Watt-crête)



Module solaire en cycle de vie

Production énergétique réelle (sur l'année, ou sur 25 ans)

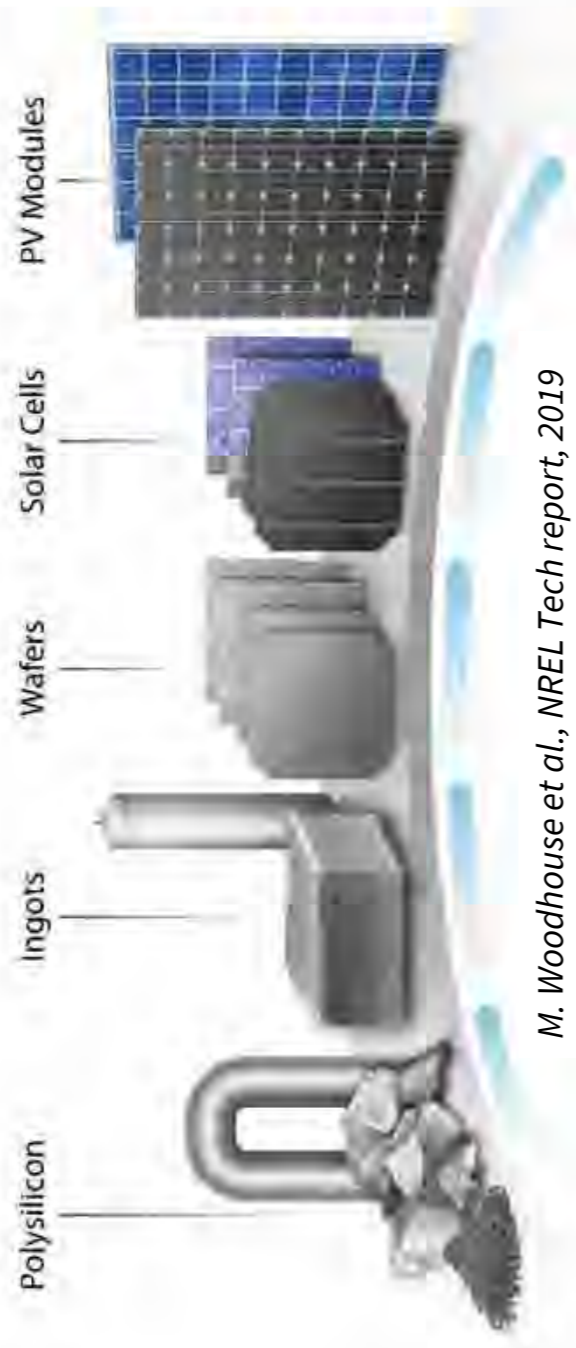
Coût actualisé de l'énergie – LCOE, incluant nuit, météo, dégradation... (par kWh).



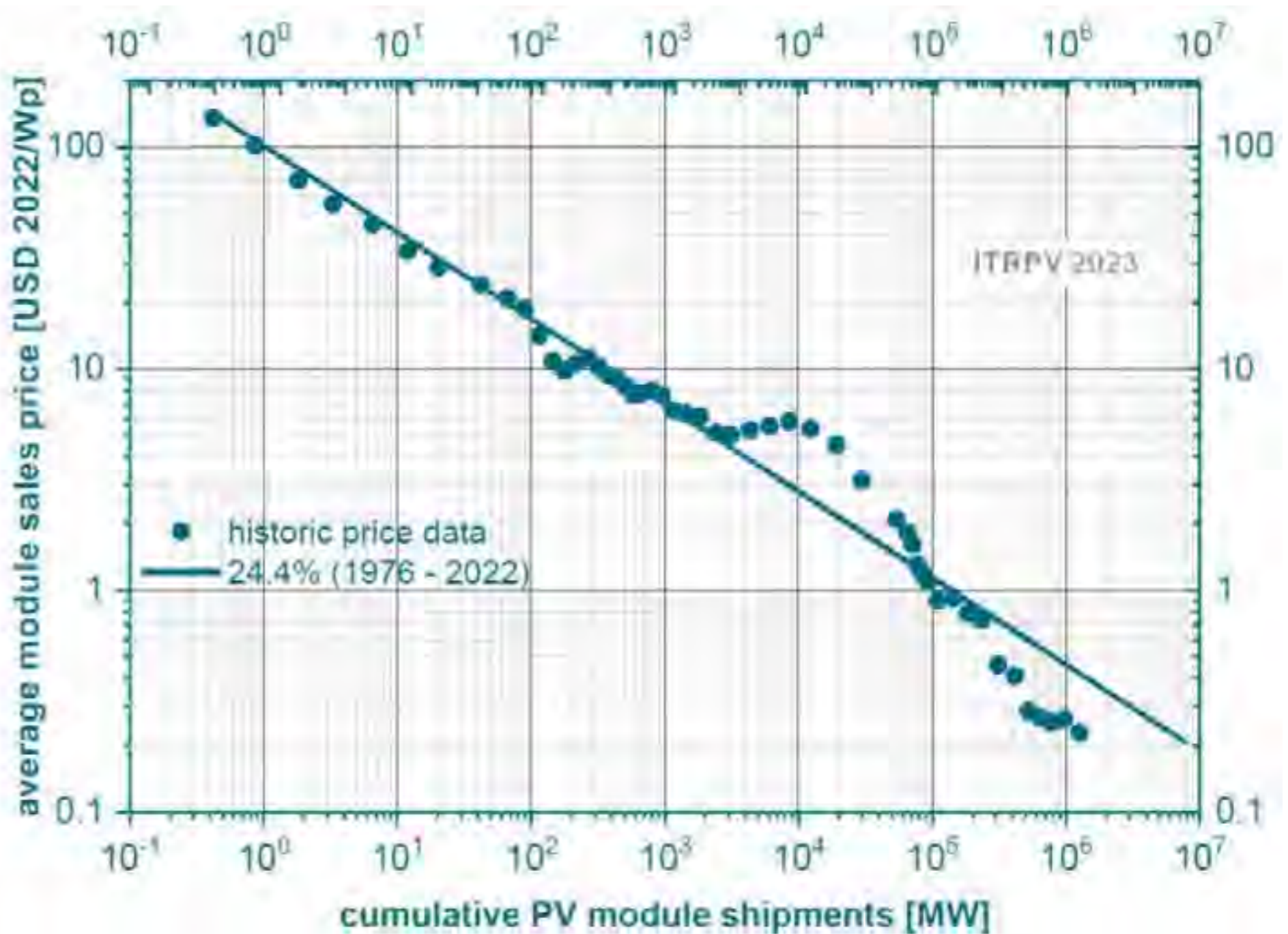
Prix du module



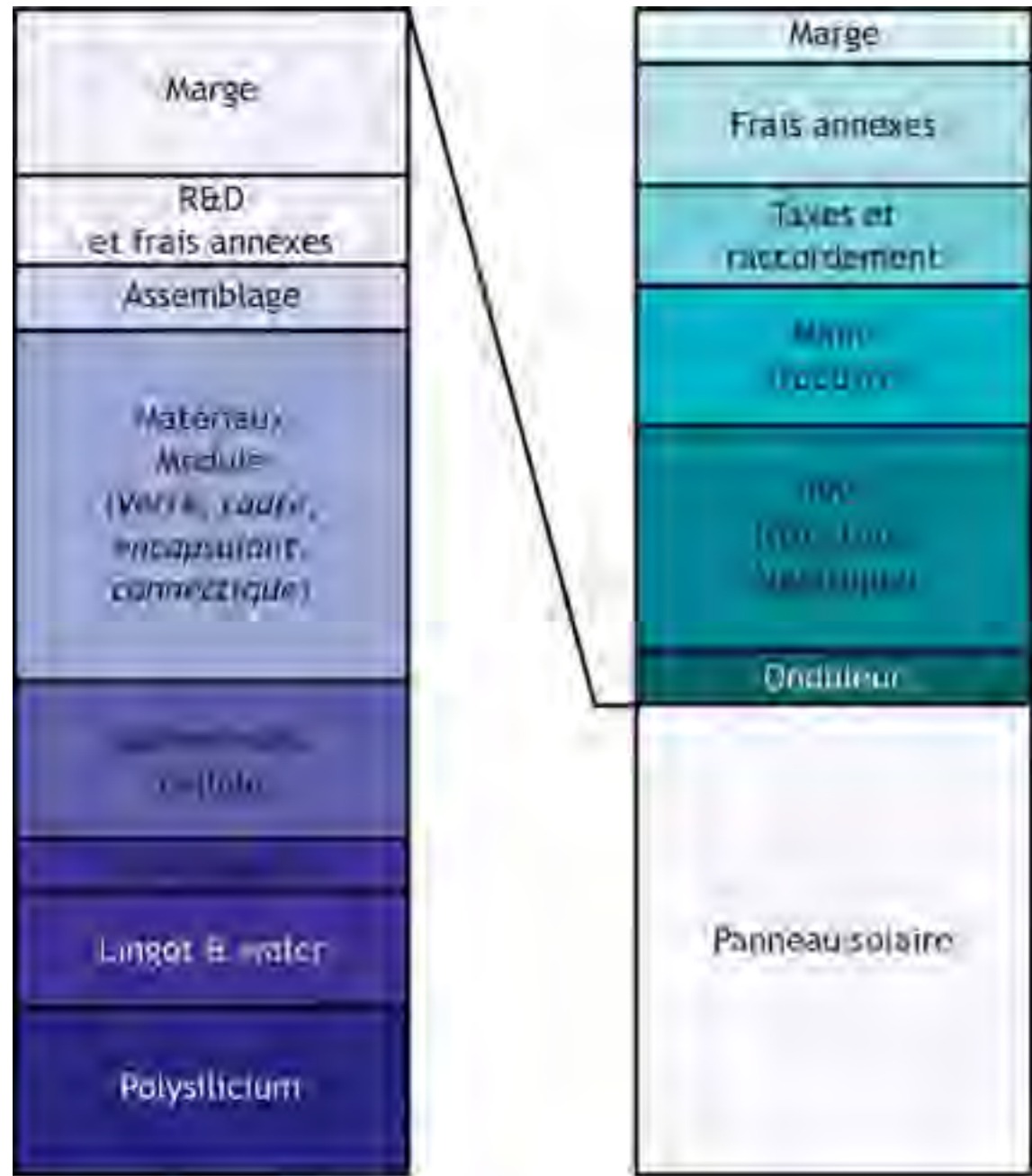
Prix des modules
0.3€/Wp



M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019



Prix de l'installation



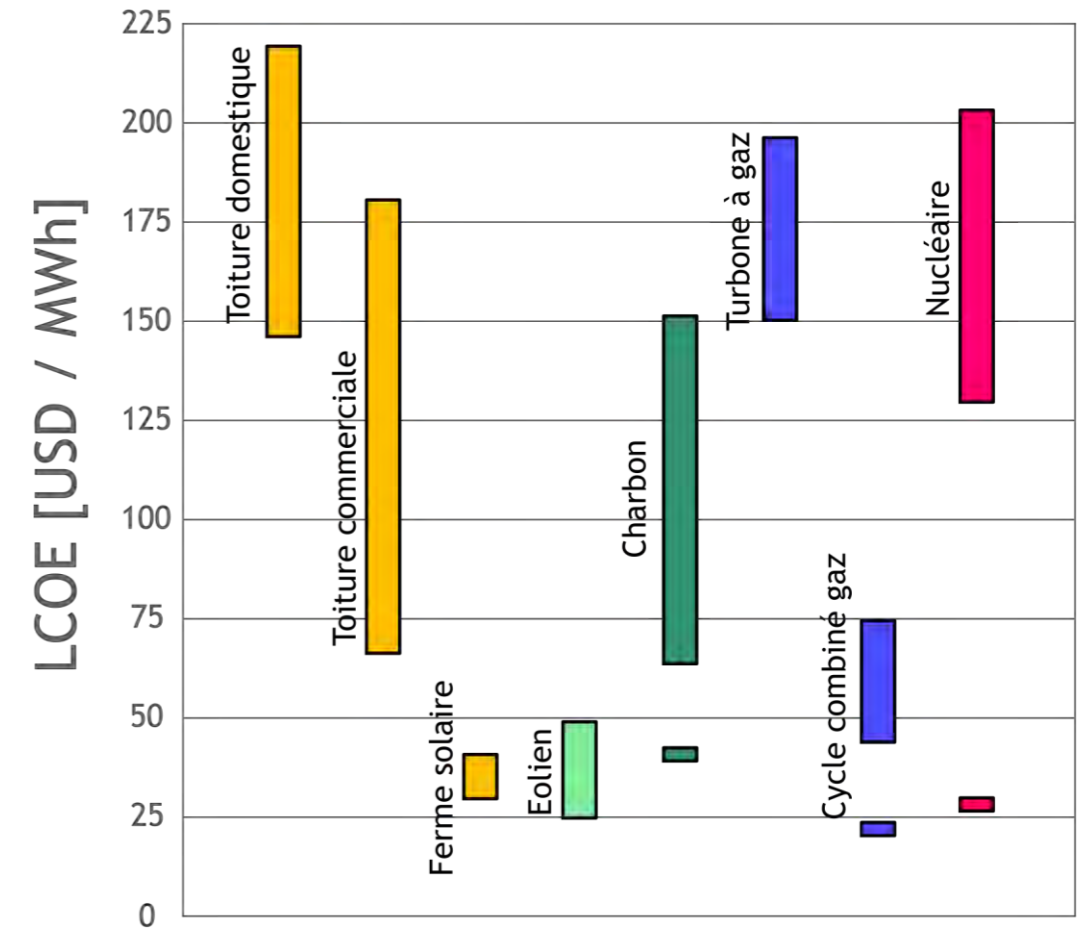
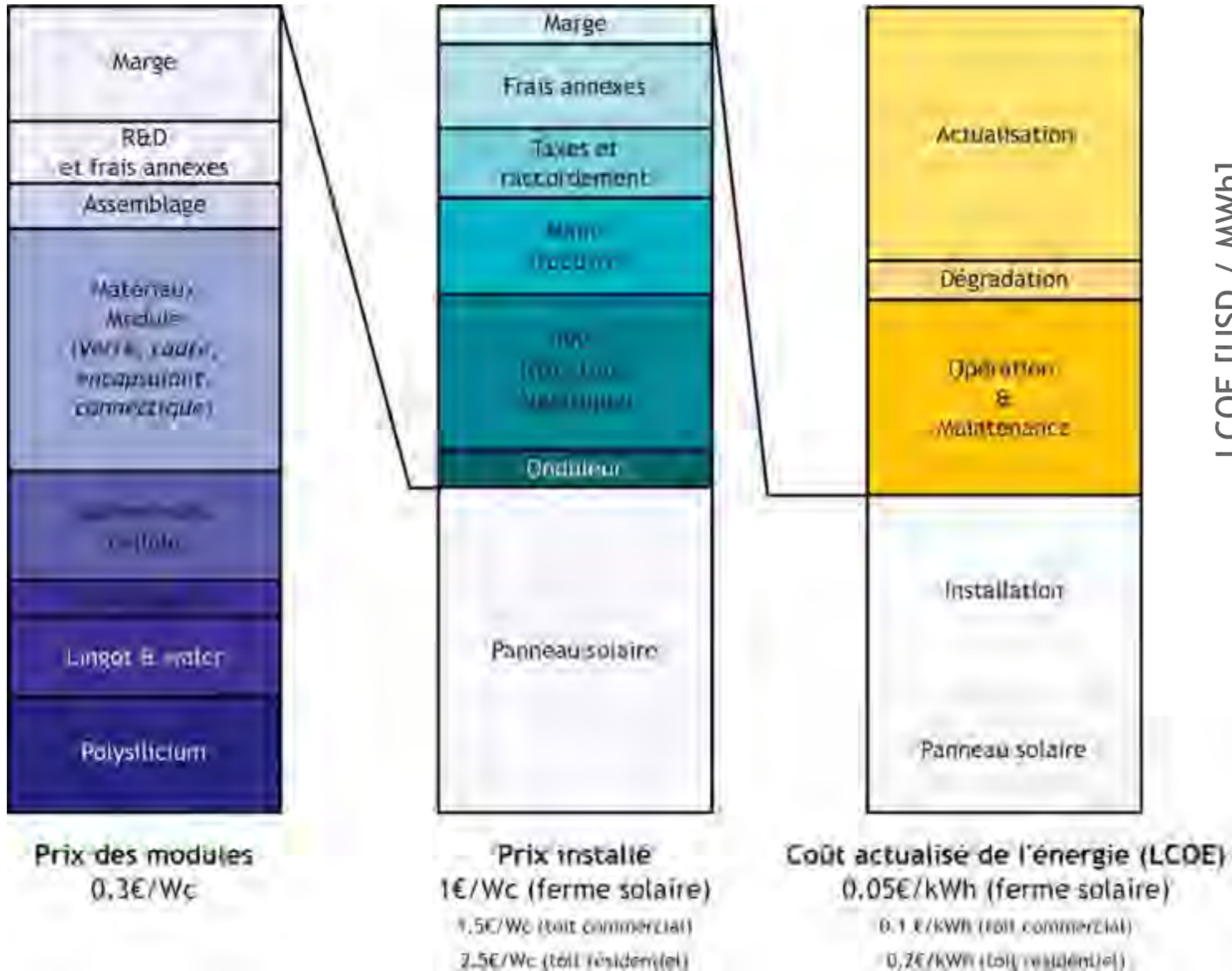
Prix des modules
0,3€/Wc

Prix installé
1€/Wc (ferme solaire)
1,5€/Wc (toit commercial)
2,5€/Wc (toit résidentiel)



Ordre de grandeur :
1 hectare = 1 MWc = 1M€ = 1 GWh/an

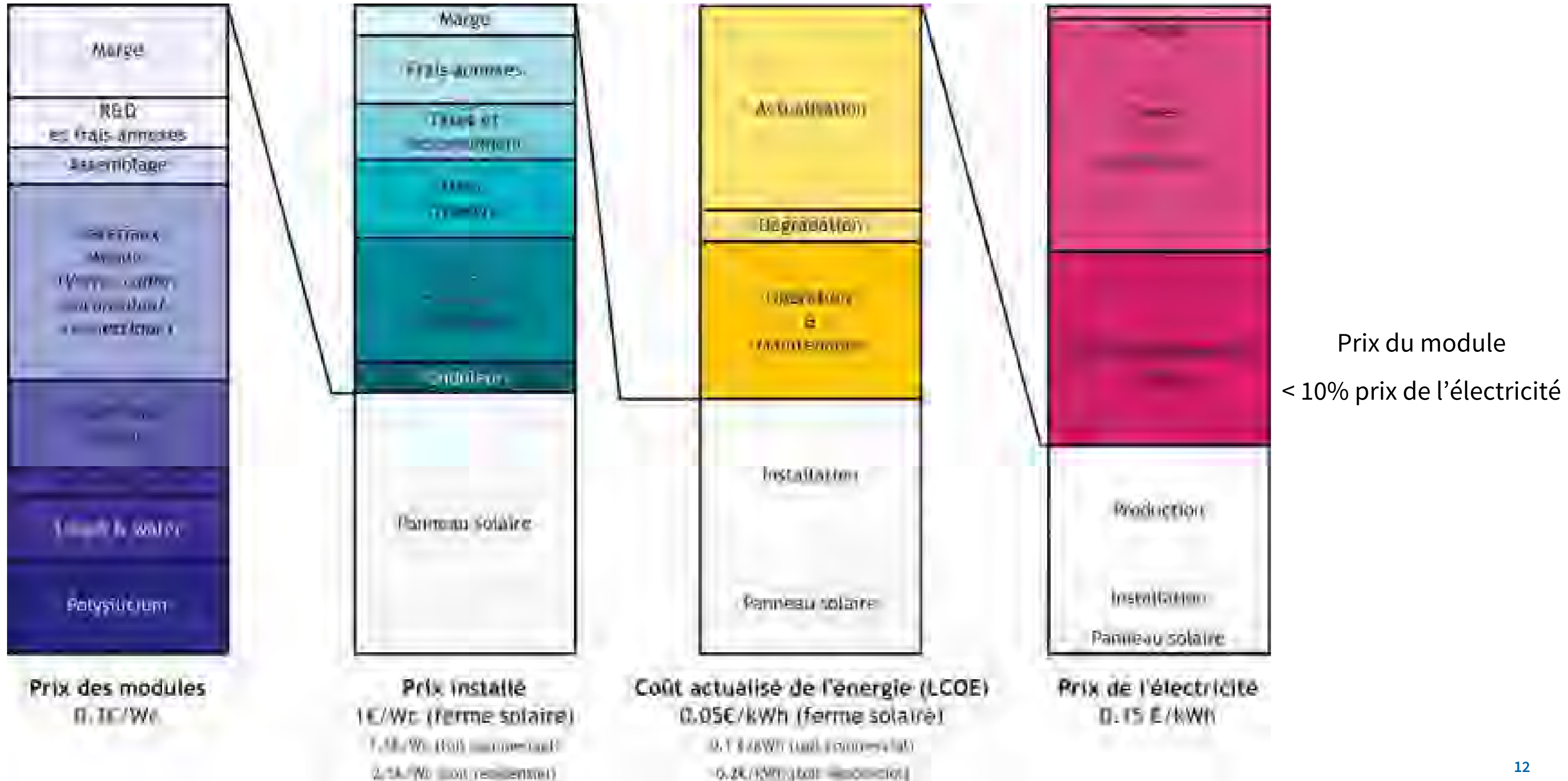
Coût actualisé de l'énergie



Limites de l'indicateur LCOE (installation marginale vs coût système)

Source : Lazare

Prix de l'électricité pour le consommateur

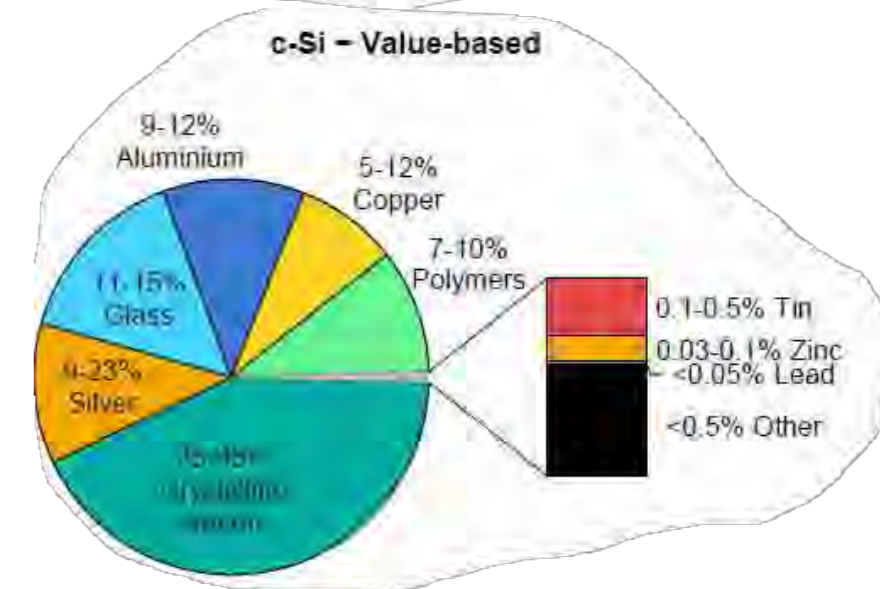
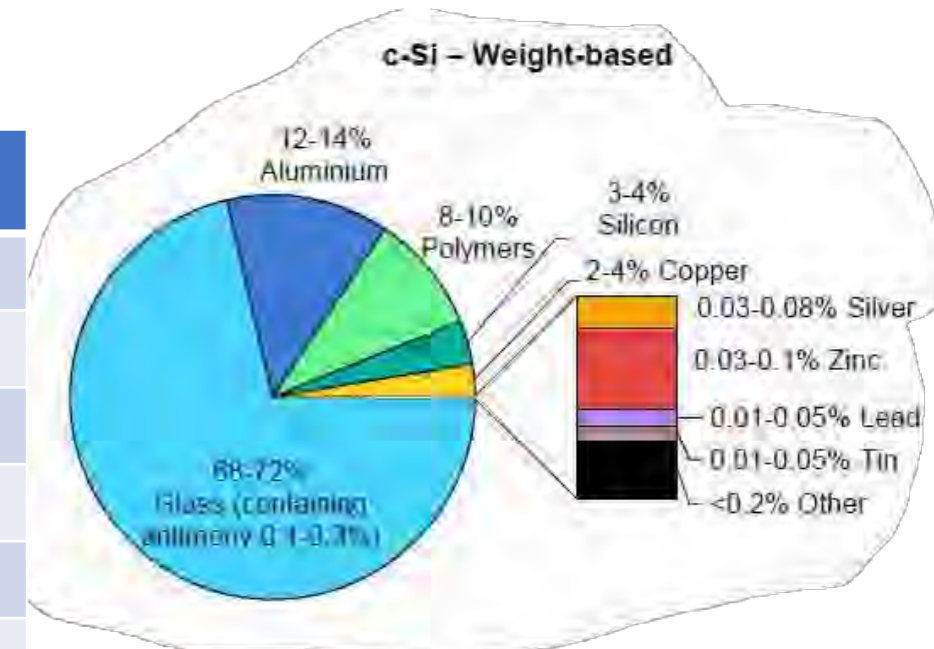


Liste de course pour un module silicium installé

Poids en gramme	par m ²	par Wc	par kWh
Silicium	600	3	0.1
Gallium ou Bore	0.000 2	0.000 001	0.000 000 003
Argent	4	0.02	0.000 6
Aluminium	1 600	8	0.24
Plastique	1 700	8.5	0.25
Verre	8 000	40	1.2
Cuivre	900	4.5	0.14
Béton	12 000	60	1.8
Acier	14 000	70	2.1
CO ₂	50	1 000	30
Energie primaire [MJ]	3 000	15	0.45

Hypothèses :

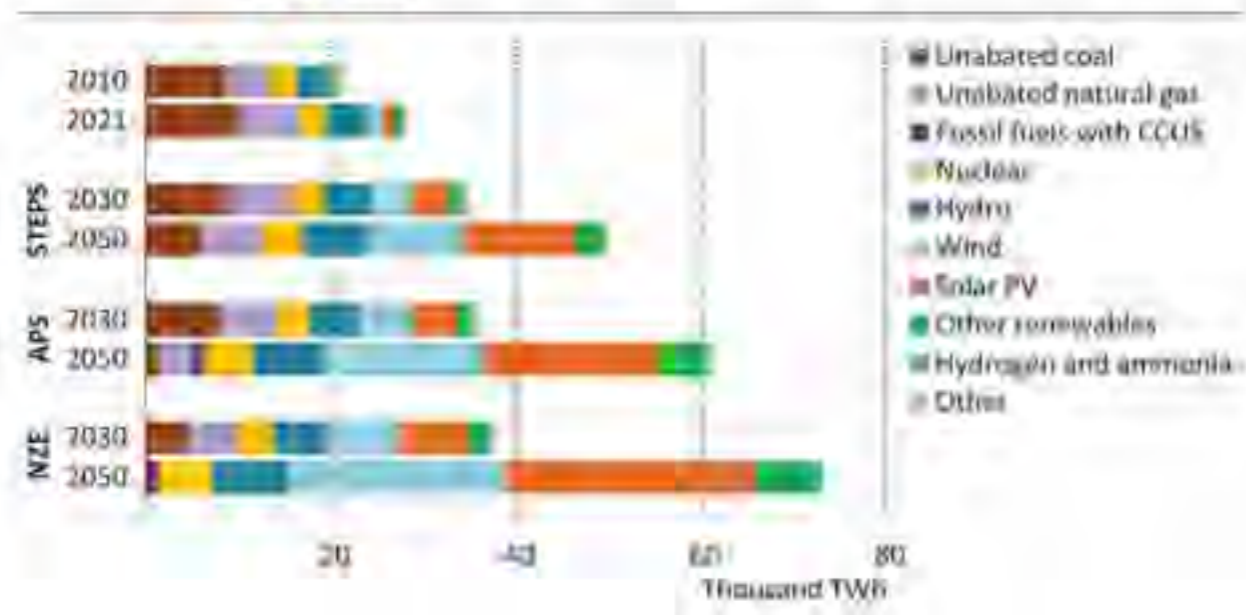
efficacité : 20%, ensoleillement 1700 kWh/m²/an, facteur de perf. 85%, Durée de vie 25 ans, dégradation -0.5%/an



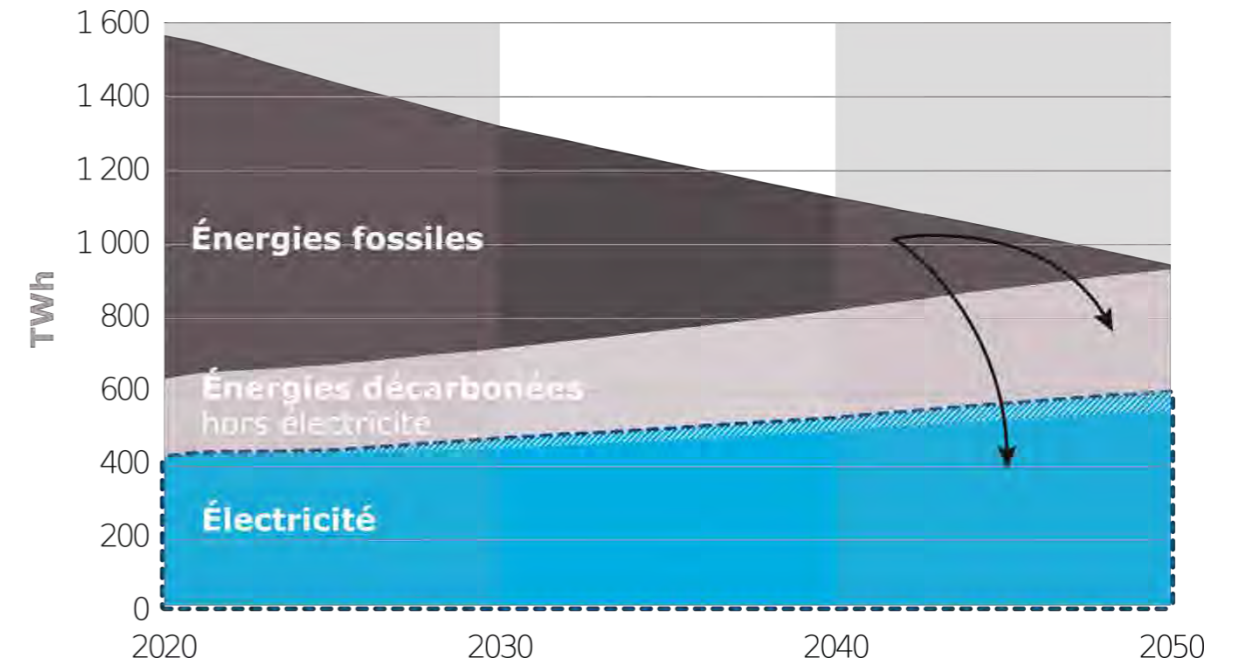
Source: IEA 2022

« La prévision est difficile surtout lorsqu'elle concerne l'avenir. »
(Niels Bohr, Pierre Dac)

Figure 6.7 Global electricity generation by source and scenario, 2010-2050



Monde 2050 : solaire PV x25 = 1/3 du total, ~ +1TW installé/an
(scénario Net Zero, IEA WEO 2022)

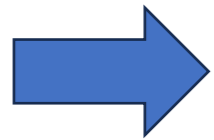


France 2050 : solaire entre x7 et x20 selon la part de nucléaire
(Futurs Energétiques 2050, RTE 2022)

Panneaux à haut rendement

Option 1 : Acheter un panneau à 20% de rendement pour 0.2€/Wc

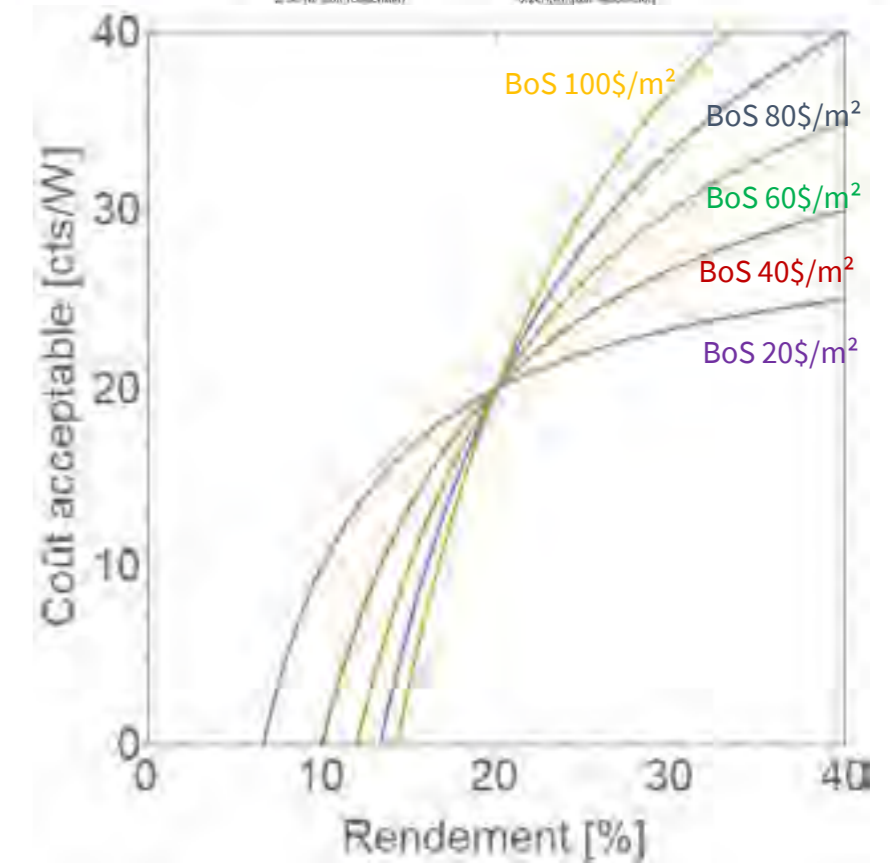
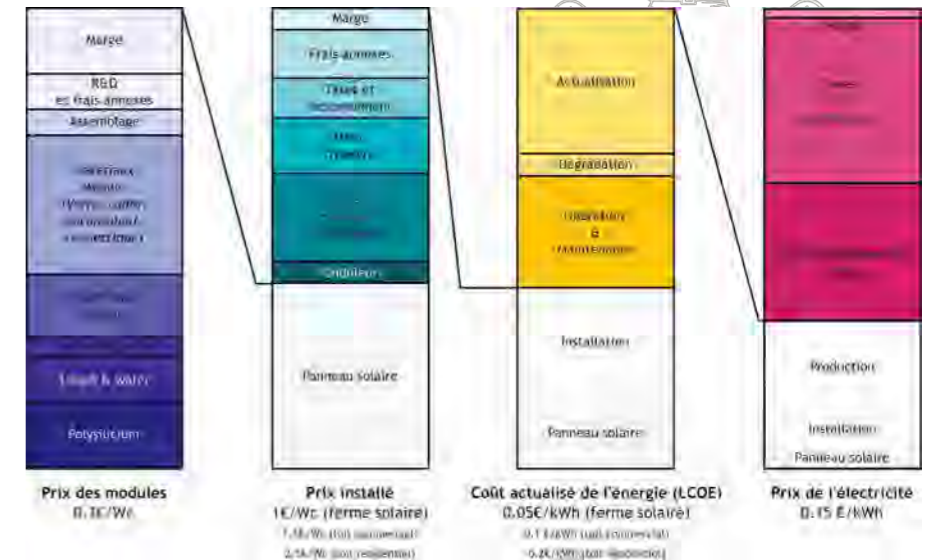
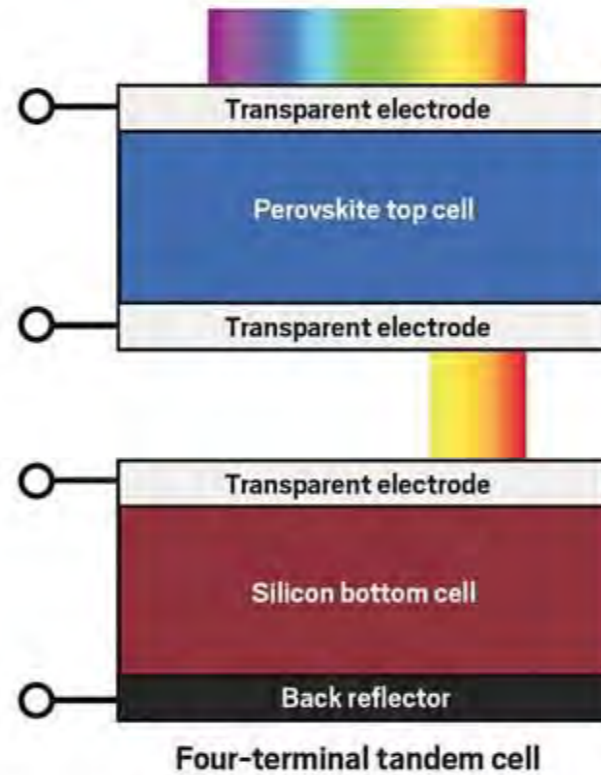
Option 2 : Récupérer un panneau à 10% de rendement gratuitement



Augmenter les rendements (quitte à augmenter le coût de fabrication) est clé pour baisser le prix de l'électricité

Principale perspective : cellule tandem

Wernet et al., Adv. Mat. (2018)

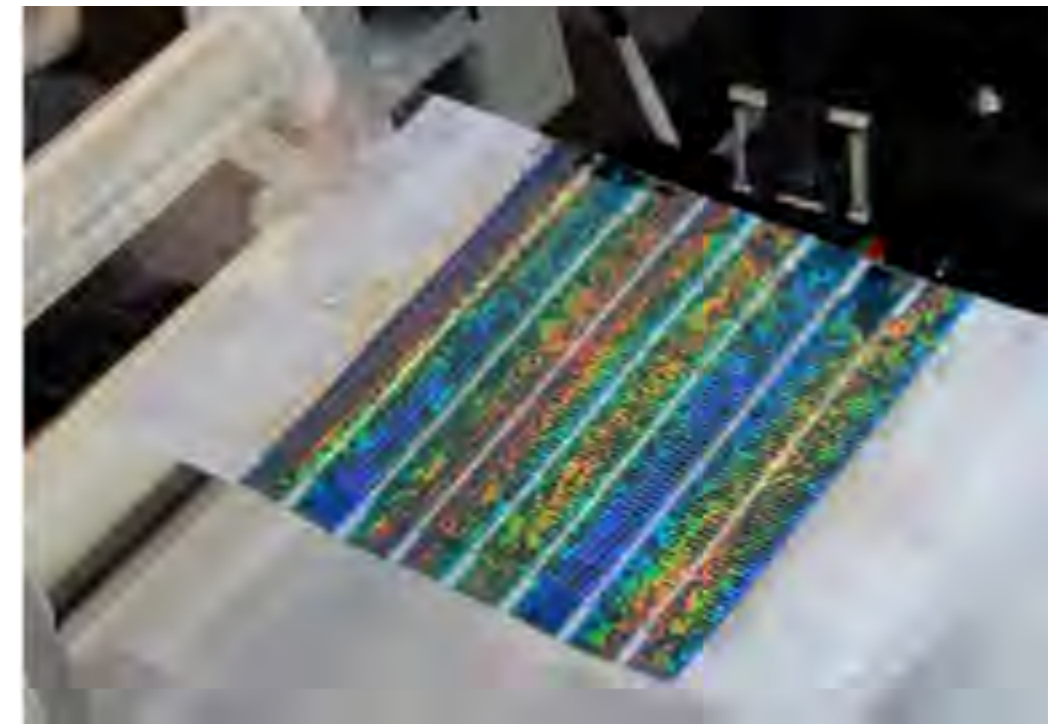


Diversifier les applications

Mechanical properties

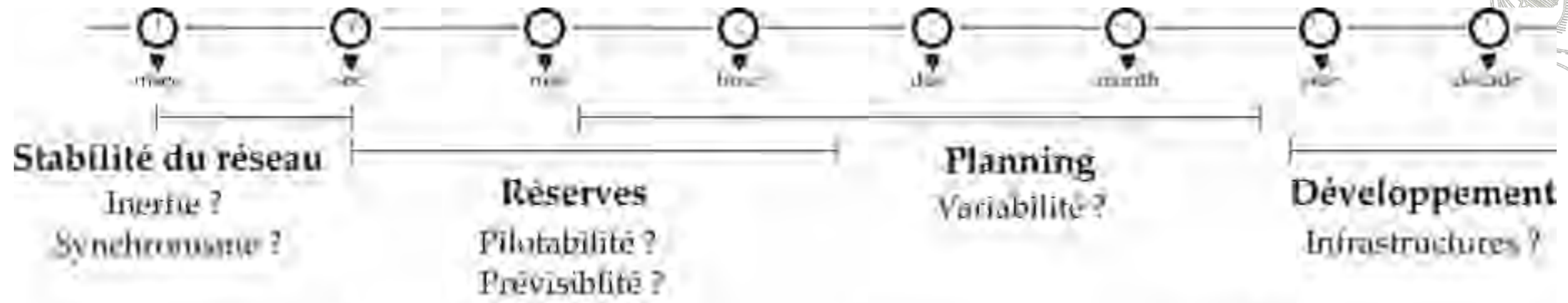


Optical properties



PV et réseau : stockage, mais pas que !

L'intégration du photovoltaïque (et de l'éolien) pose une multitude de questions



Ces points ne sont pas bloquants aux taux de pénétration actuels.

Ils deviendront problématiques au-delà ~50% de puissance (2035 d'après PPE).

Il existe une palette de solutions techniques ; coût complet difficile à estimer.

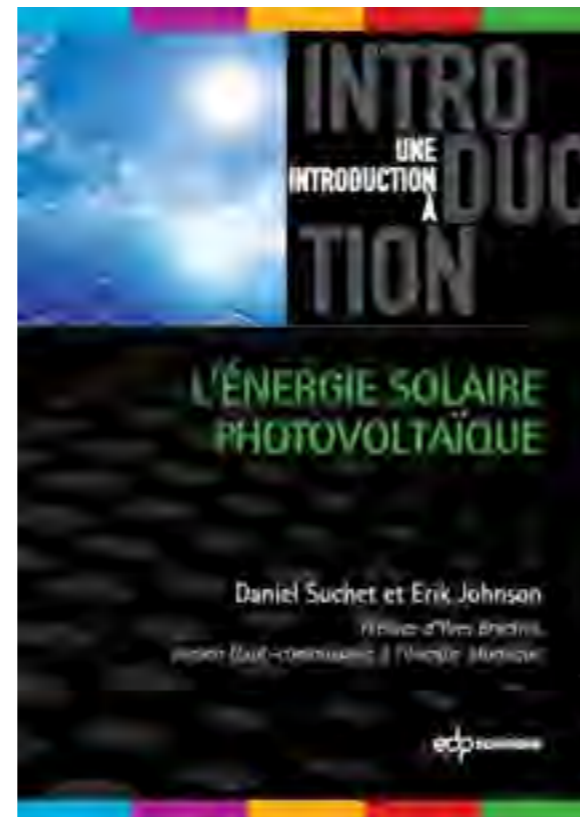
Une initiative CNRS + FedPV

<https://solairepv.fr/>



Chez EDP Sciences

<https://www.coursera.org/learn/outsmarting-intermittency>





l'augmentation de la production éolienne et solaire en France se traduit par une réduction de l'utilisation des moyens de production thermiques

émissions évitées : environ 22 MtCO₂ par an

Ces résultats battent en brèche une vision réductrice du système électrique où chaque incrément de production éolienne et solaire se **ferait au détriment du nucléaire et n'aurait pas d'influence sur les émissions de gaz à effet de serre.**

Tant que la capacité de production cumulée de l'éolien terrestre et du photovoltaïque demeure inférieure à environ 50 GW, l'infrastructure actuelle semble globalement bien adaptée

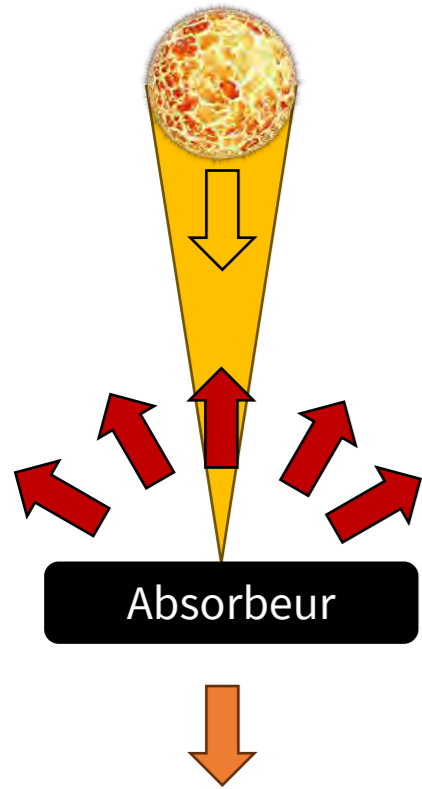
Au-delà de 50 GW en revanche, des adaptations plus structurantes sont nécessaires pour accueillir les nouvelles installations renouvelables

NOTE : PRÉCISIONS SUR LES BILANS CO₂
ÉTABLIS DANS LE BILAN PRÉVISIONNEL
ET LES ÉTUDES ASSOCIÉES

**Schéma décennal
de développement
du réseau**

ÉDITION 2019

Convertir le rayonnement... en chaleur



Chaleur reçue

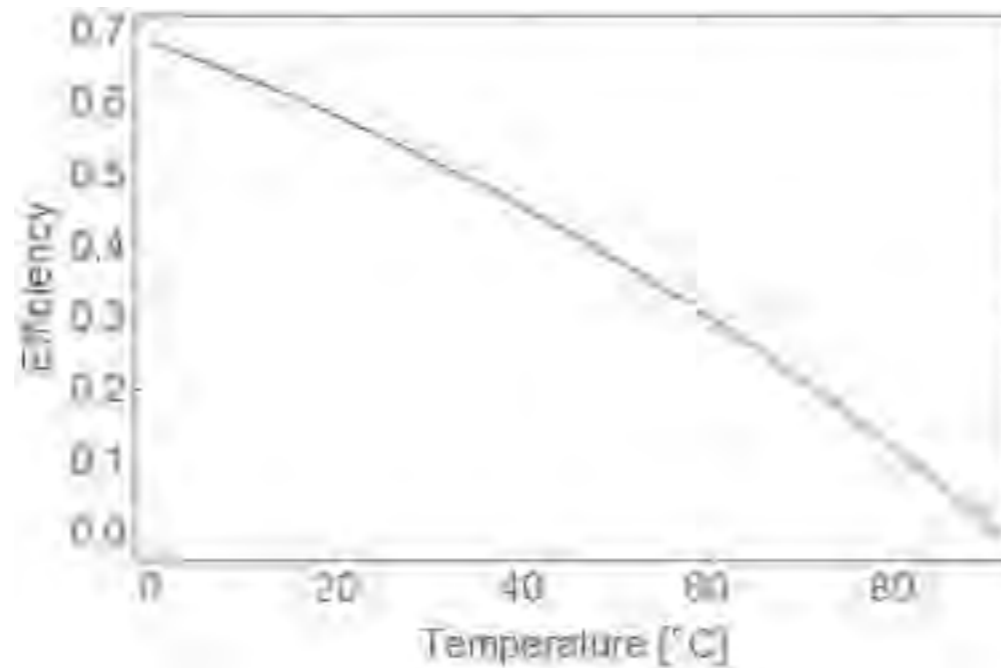
$$\dot{Q}_{\text{in}} = \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 \times S_{\text{cell}}$$

Chaleur rayonnée

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma T_{\text{cell}}^4 \times S_{\text{cell}}$$

Chaleur disponible

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{rad}}$$

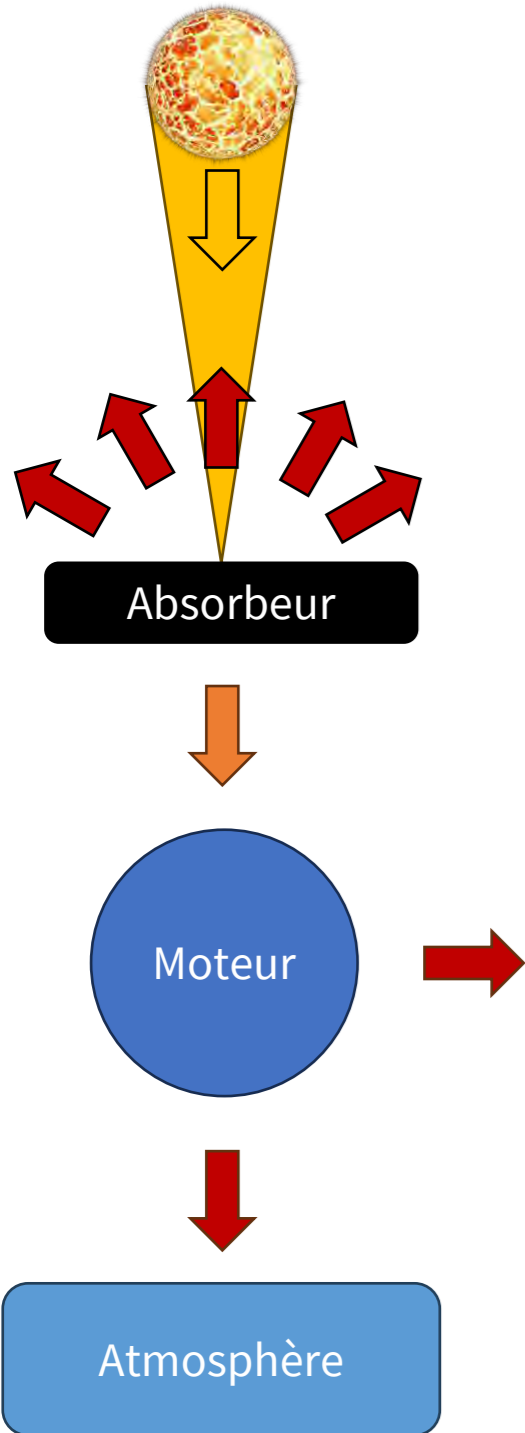


Compromis :
+ chaud = + utile mais - efficace



Solaire thermique
Efficacité 80%

Convertir le rayonnement... en chaleur, puis en électricité



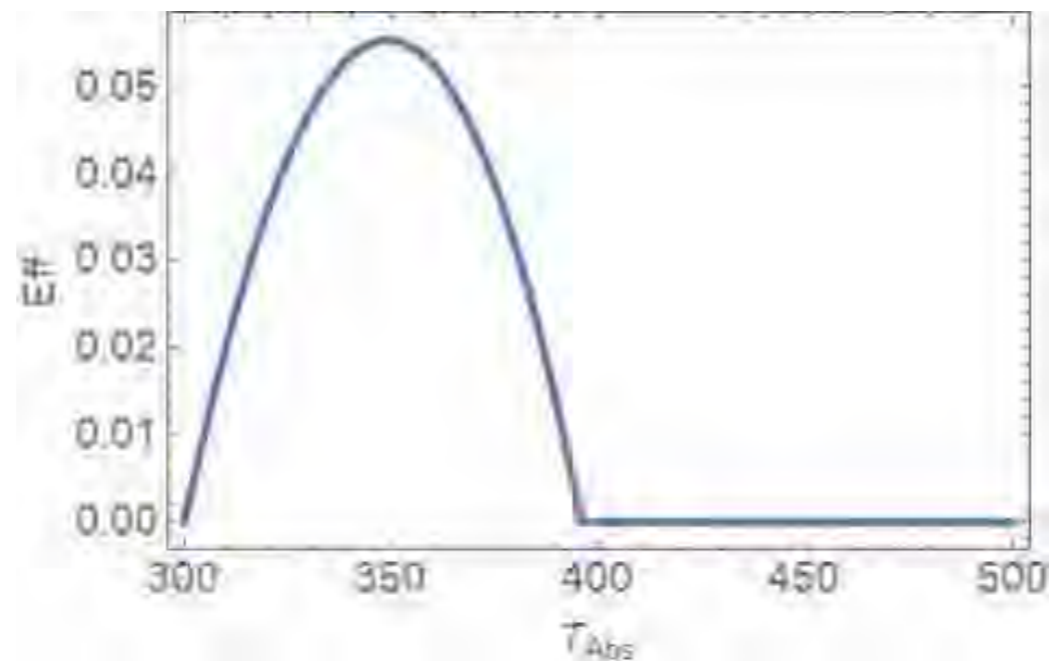
Chaleur reçue $\dot{Q}_{in} = \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 \times S_{cell}$

Chaleur rayonnée $\dot{Q}_{rad} = \sigma T_{cell}^4 \times S_{cell}$

Chaleur disponible $\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{rad}$

Moteur parfait $\dot{W} = \dot{Q}_{abs} \left(1 - \frac{T_{atm}}{T_{abs}} \right)$

Rendement : $\frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \left(1 - \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \frac{T_{abs}^4}{T_s^4} \right) \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{abs}} \right)$

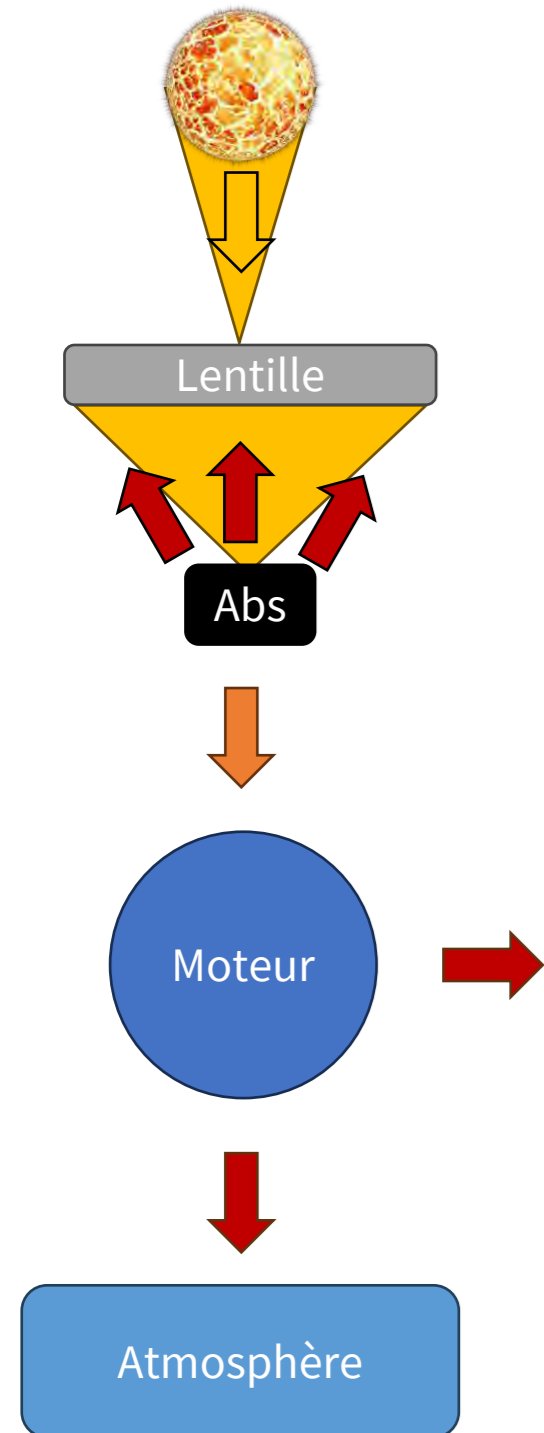


Trop chaud : pertes par rayonnement
Trop froid : conversion en travail nulle



Solaire thermique pour alimenter un moteur

Convertir le rayonnement... en chaleur, puis en électricité



Chaleur reçue

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 \times S_{\text{cell}}$$

Chaleur rayonnée

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma T_{\text{cell}}^4 \times S_{\text{cell}}$$

Chaleur disponible

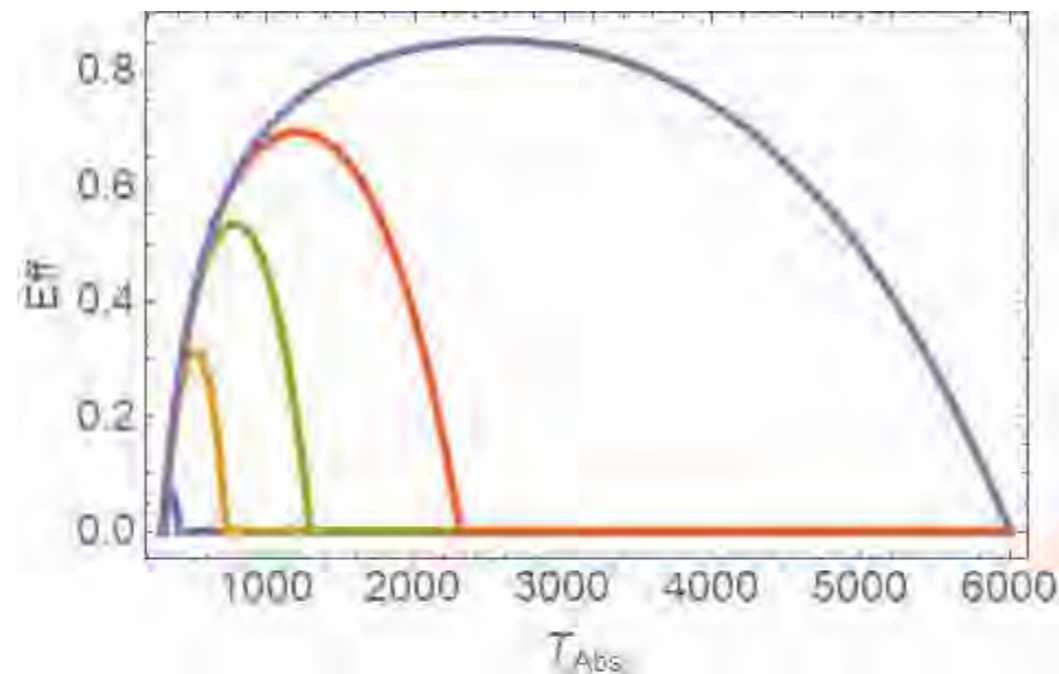
$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{rad}}$$

Moteur parfait

$$\dot{W} = \dot{Q}_{\text{abs}} \left(1 - \frac{T_{\text{atm}}}{T_{\text{abs}}} \right)$$

Avec concentration

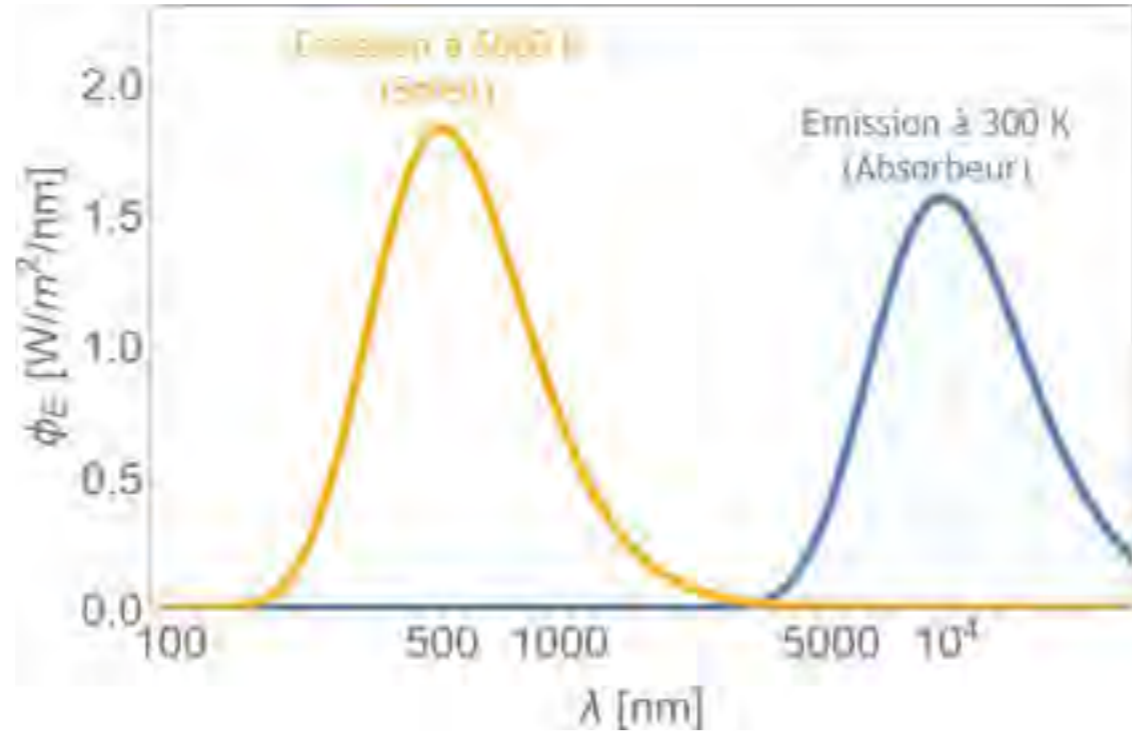
$$\frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = \left(1 - \frac{1}{C} \times \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \frac{T_{\text{abs}}^4}{T_s^4} \right) \left(1 - \frac{T_{\text{ext}}}{T_{\text{abs}}} \right)$$



**Solaire à concentration
Solaire thermodynamique**

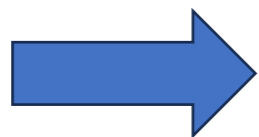
Voir cours Nolwenn Le Pierres

Convertir le rayonnement... directement en électricité



Absorber (mais émettre) les petites longueurs d'onde

Ne pas émettre (mais ne pas absorber) les grandes longueurs d'onde

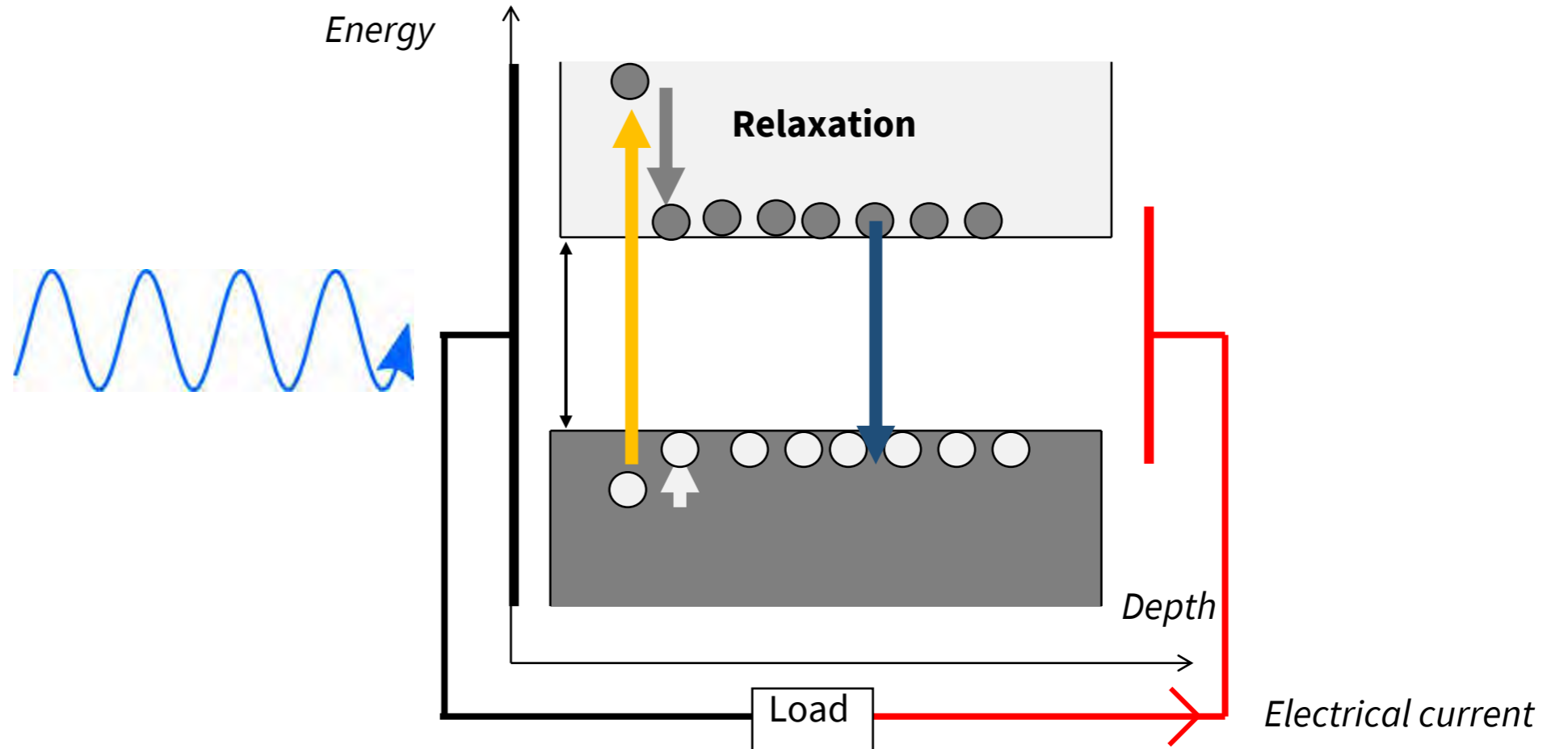
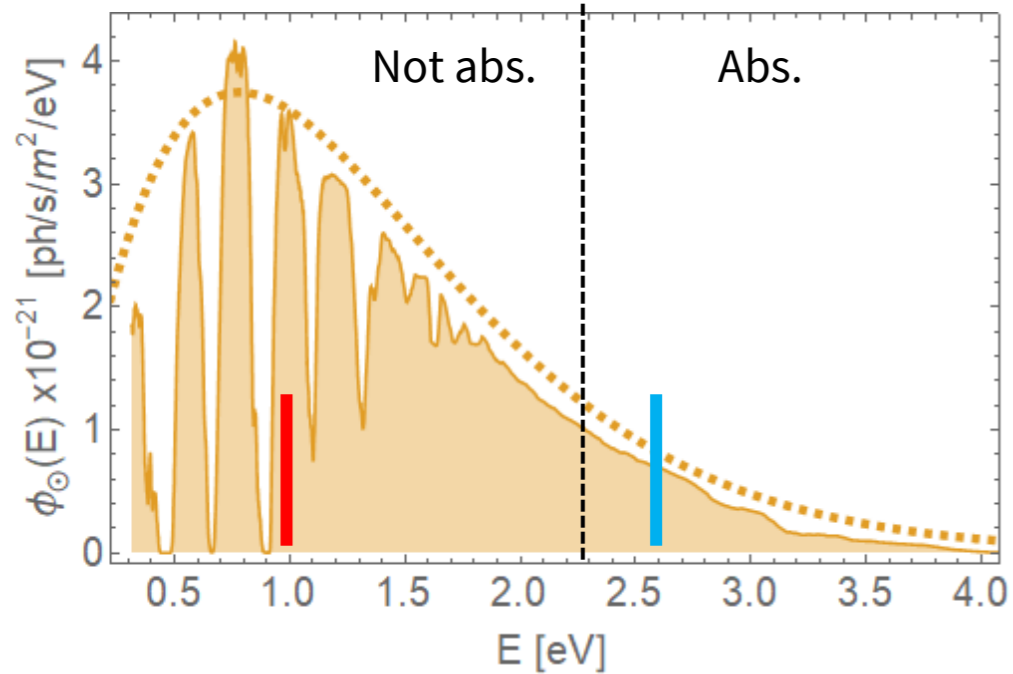


Semiconducteur (gap)



Solaire photovoltaïque (PV)

Basic steps



Each photon with $E > E_g$ promotes an electron to the conduction band

Optical Absorption

(Carriers relax to the bottom of the band)

Some carriers fall back to the valence band

Lifetime

Carriers move from the absorber to the boundaries

Transport

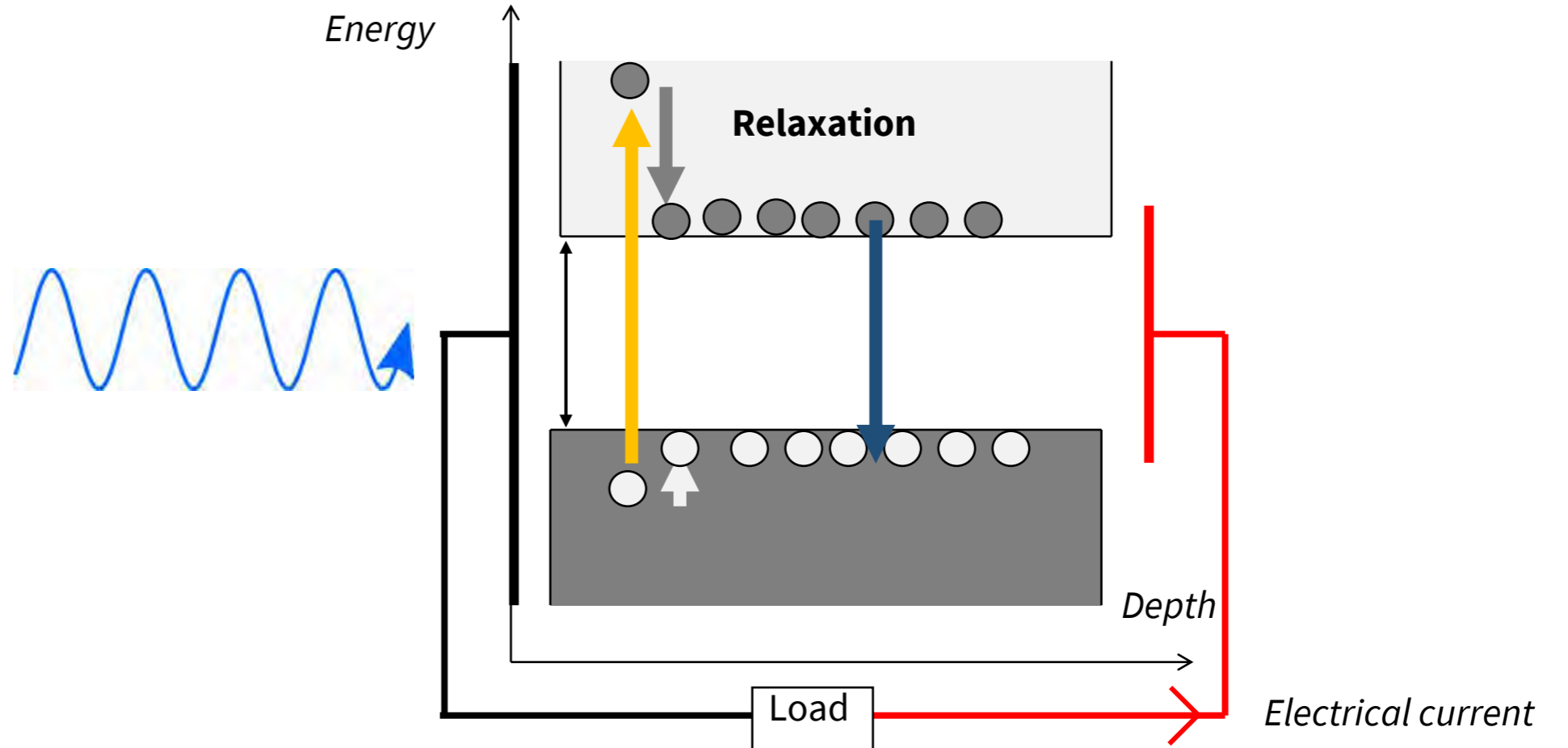
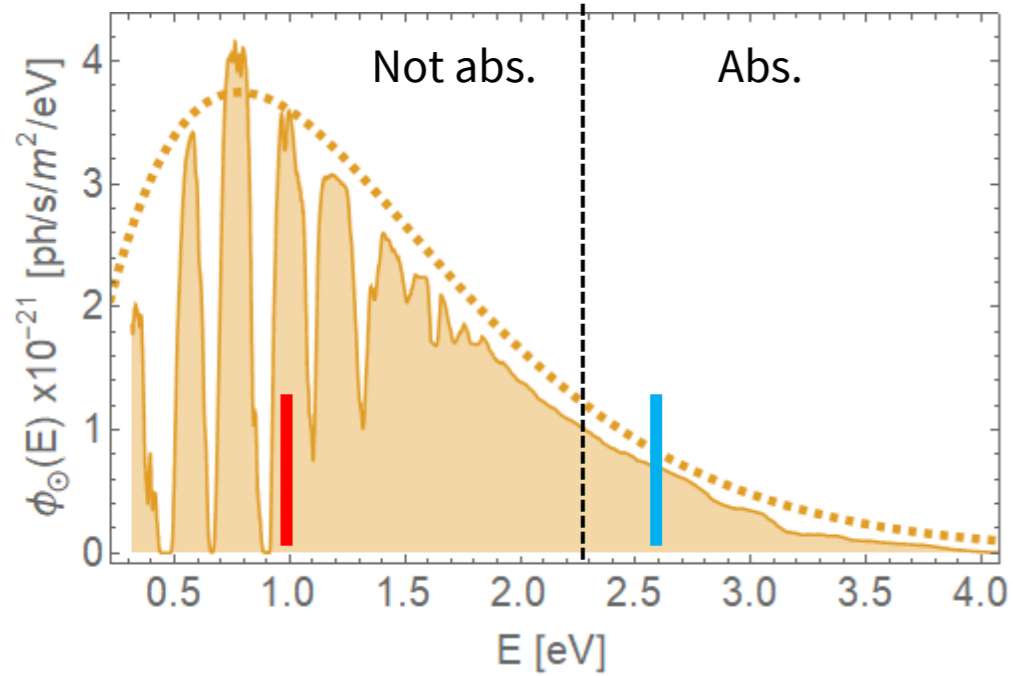
Each electron in the CB provides an energy $\approx E_g$

Selective extraction

Convertir la lumière du Soleil en électricité



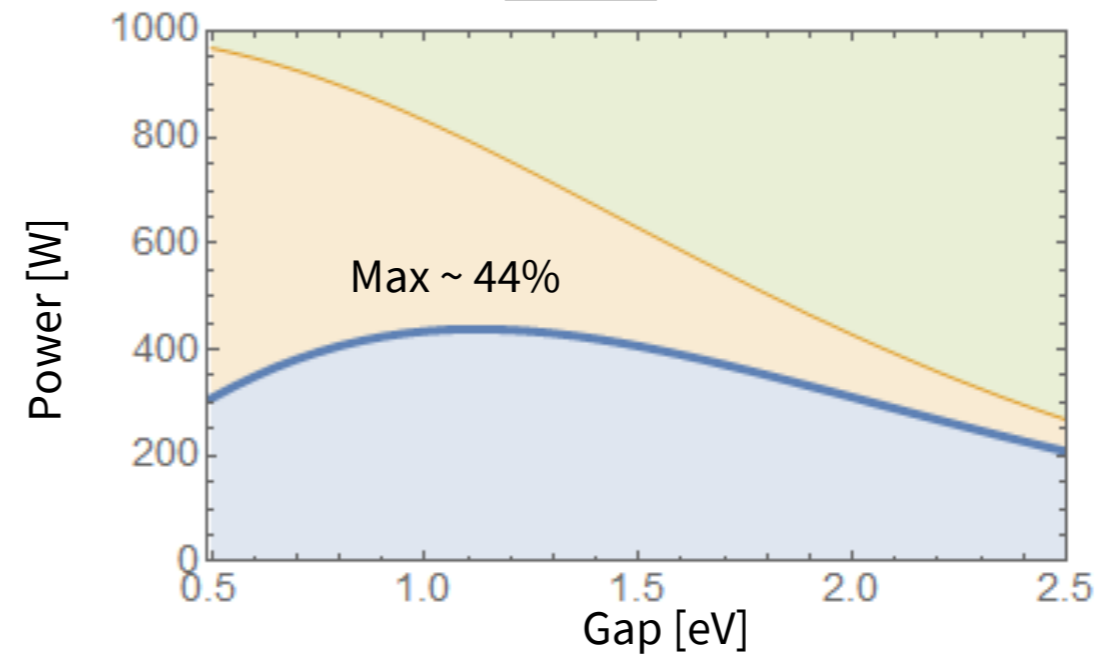
Basic steps



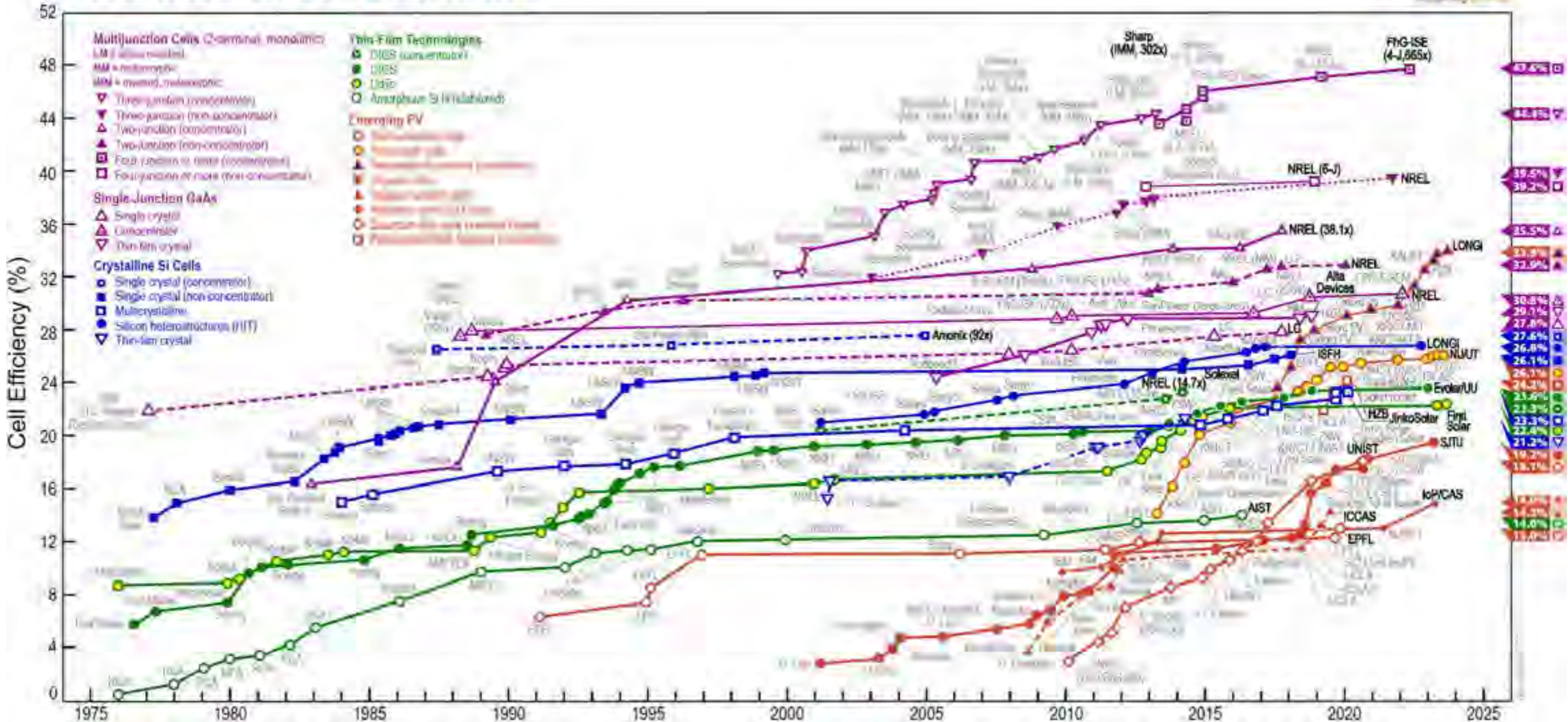
Rough estimate for the efficiency

$$P \propto E_g \times \int_{E_g}^{+\infty} \phi_{\odot}(E) dE$$

Trivich Finn limit



Best Research-Cell Efficiencies





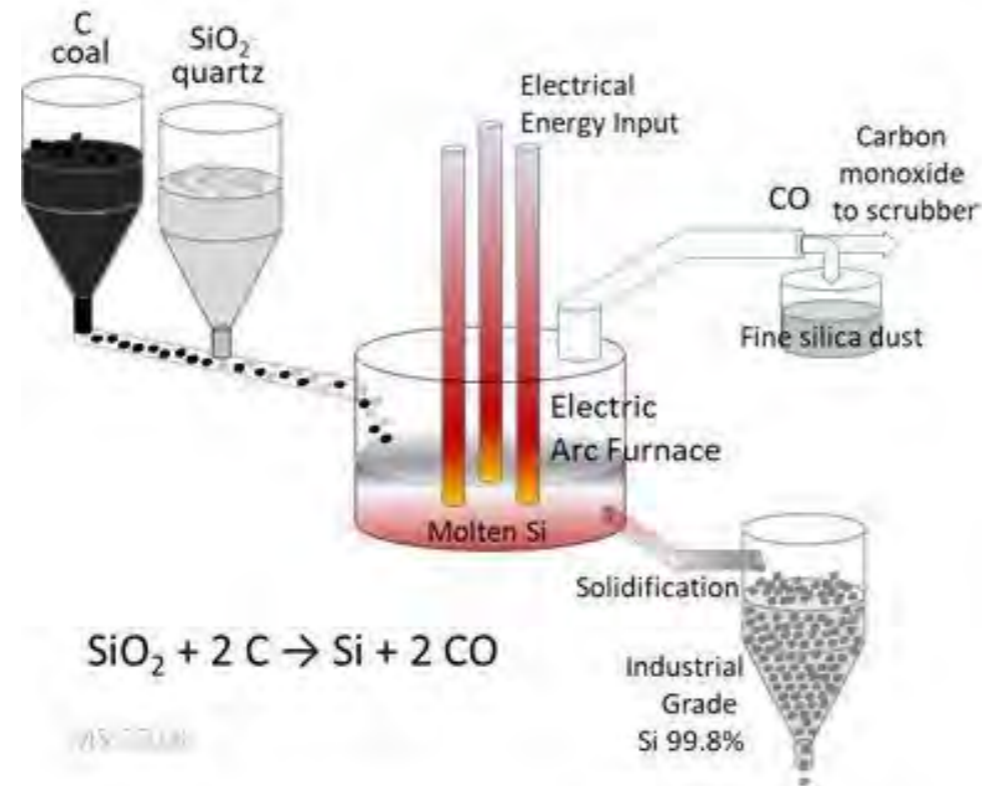
M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019

De la silice au (poly)silicium

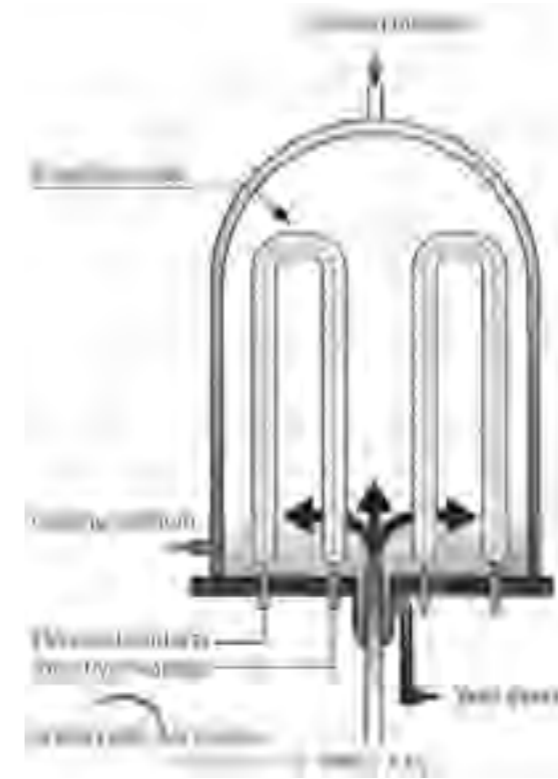


SiO₂ - quartzite

Carbon réduction



Procédé de Siemens

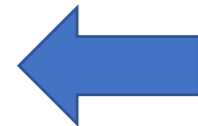


Solar grade poly-Si
(7N) 99.99999%



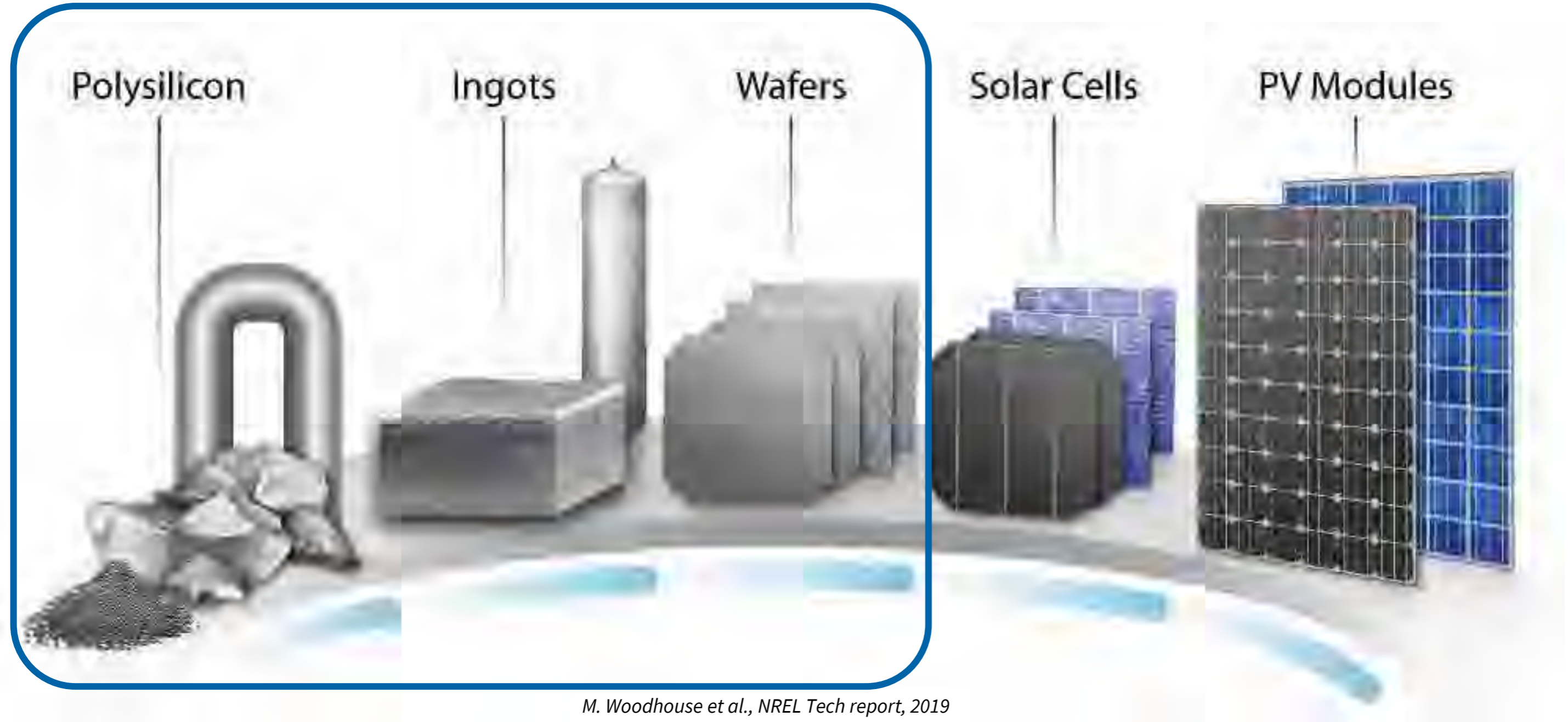
Electronics
Solar cells

Alluminium
Steel
Silicone
...

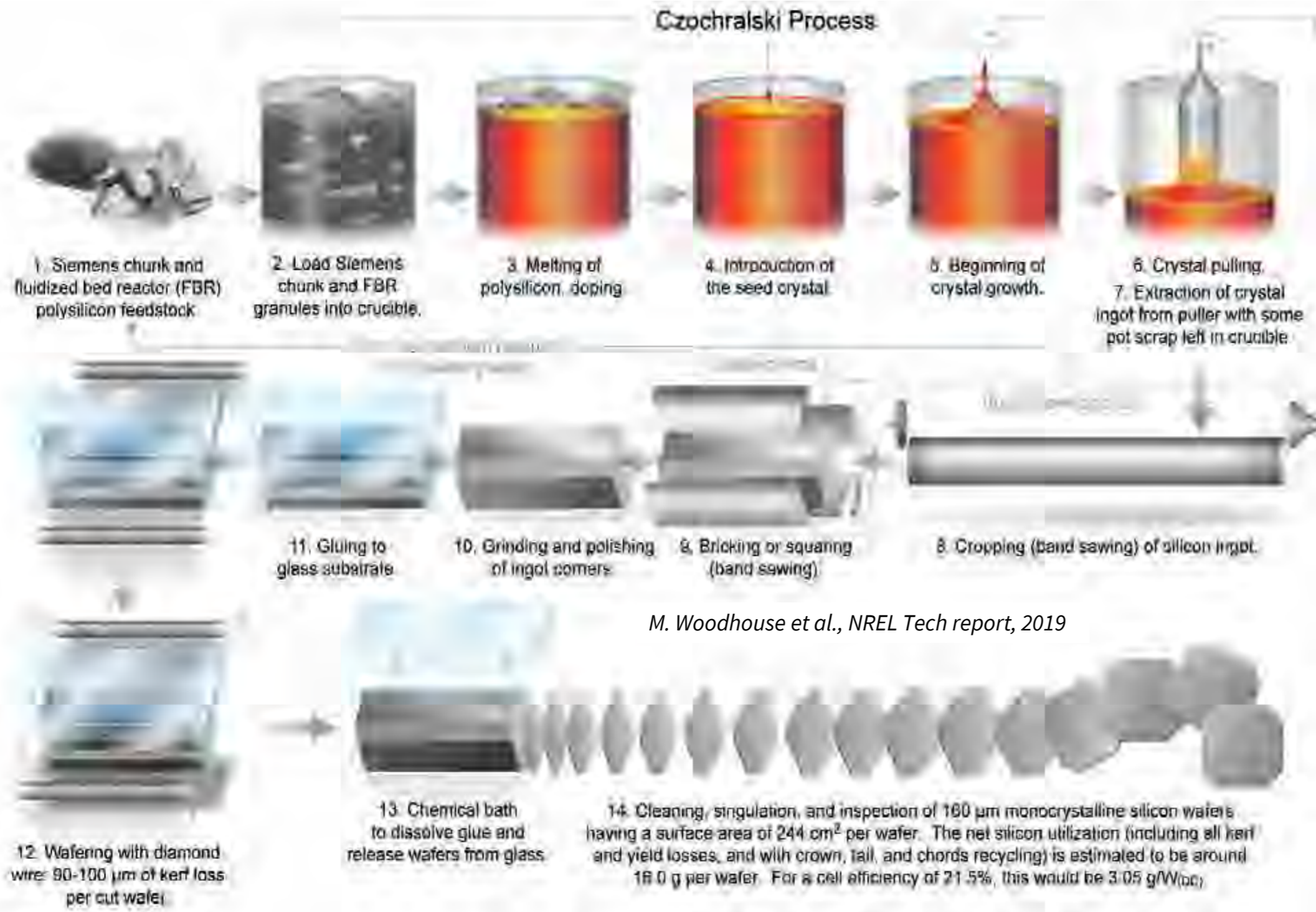


Metallurgic grade
98.5-99.5%

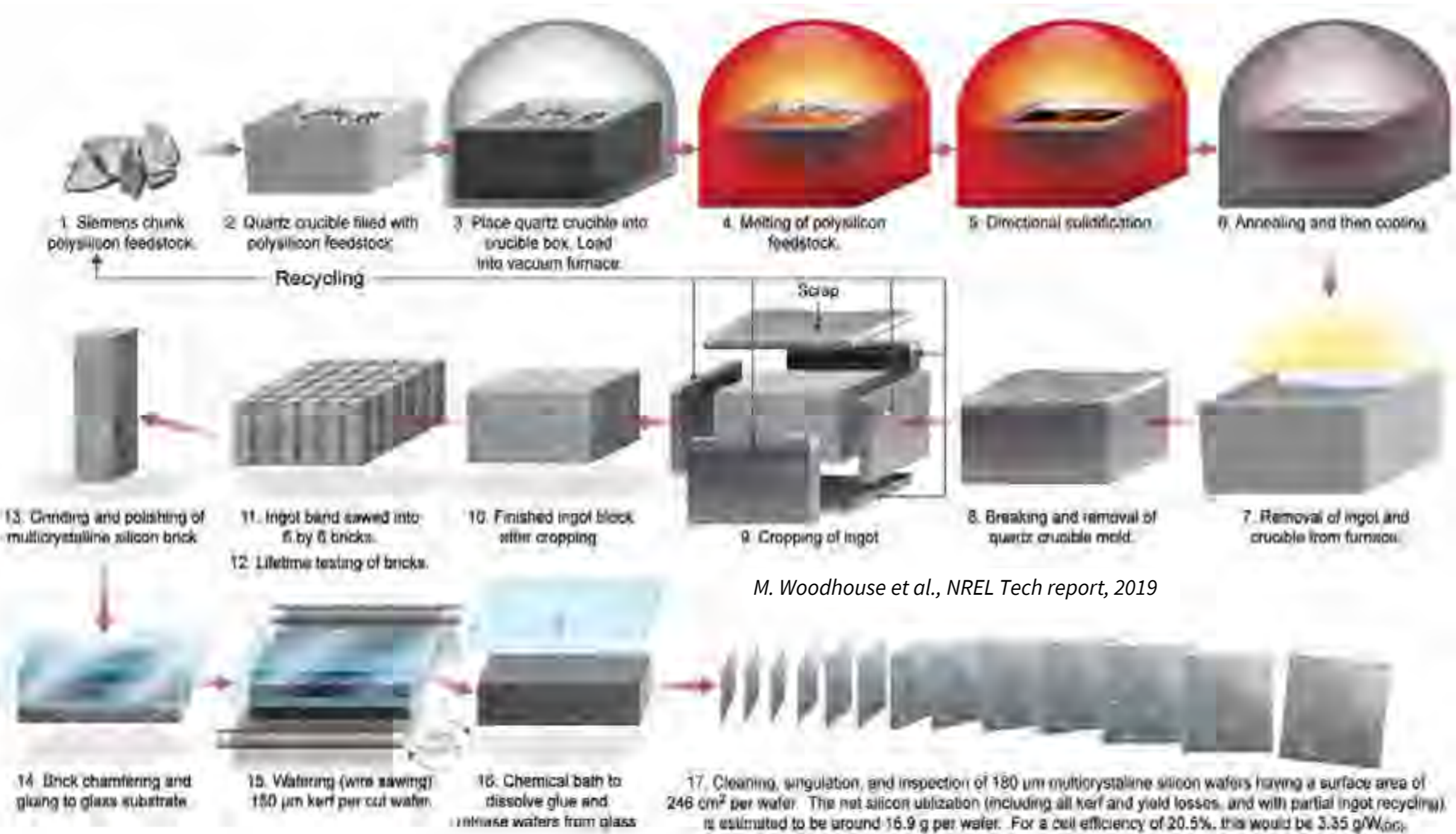
Du (poly)silicium au wafer



Du (poly)silicium au wafer monocristallin

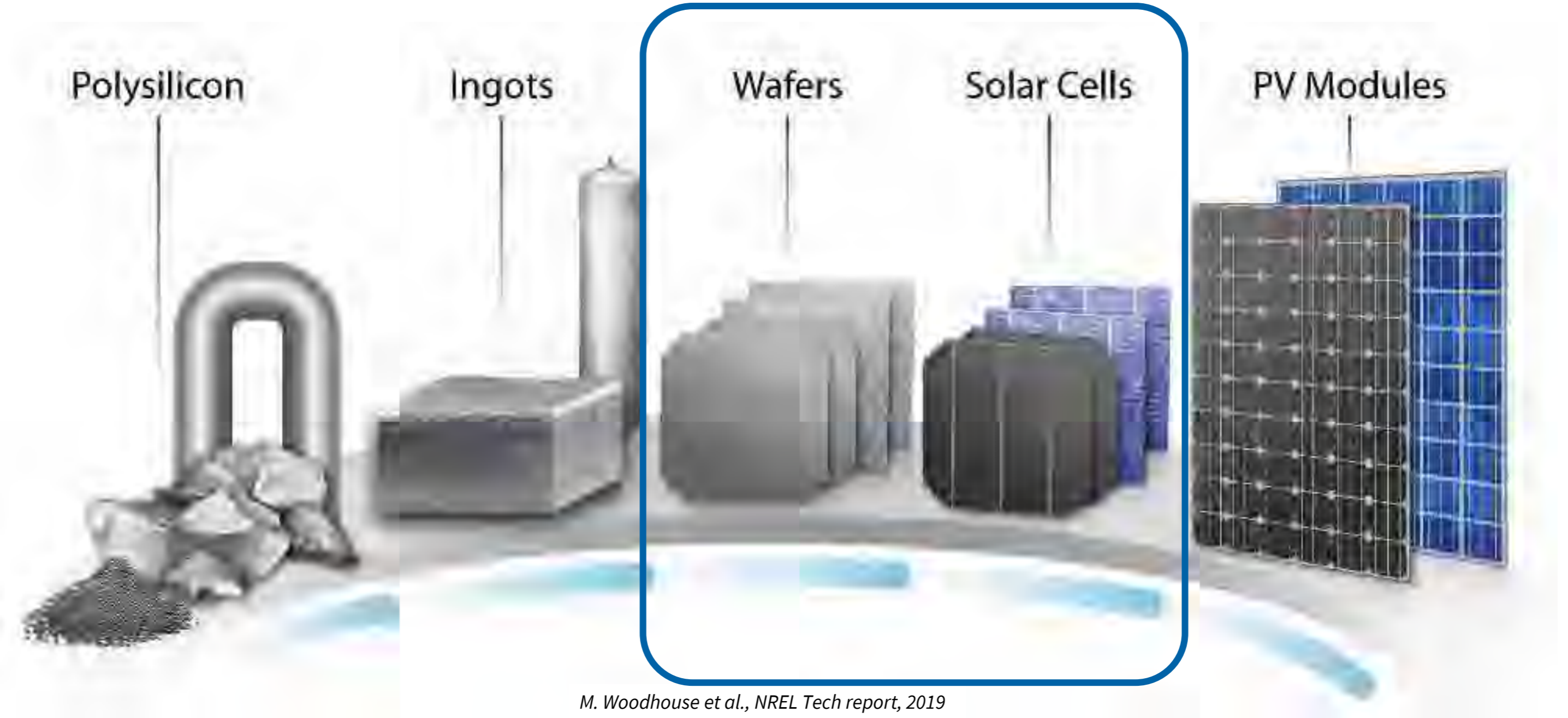


Du (poly)silicium au wafer multicristallin

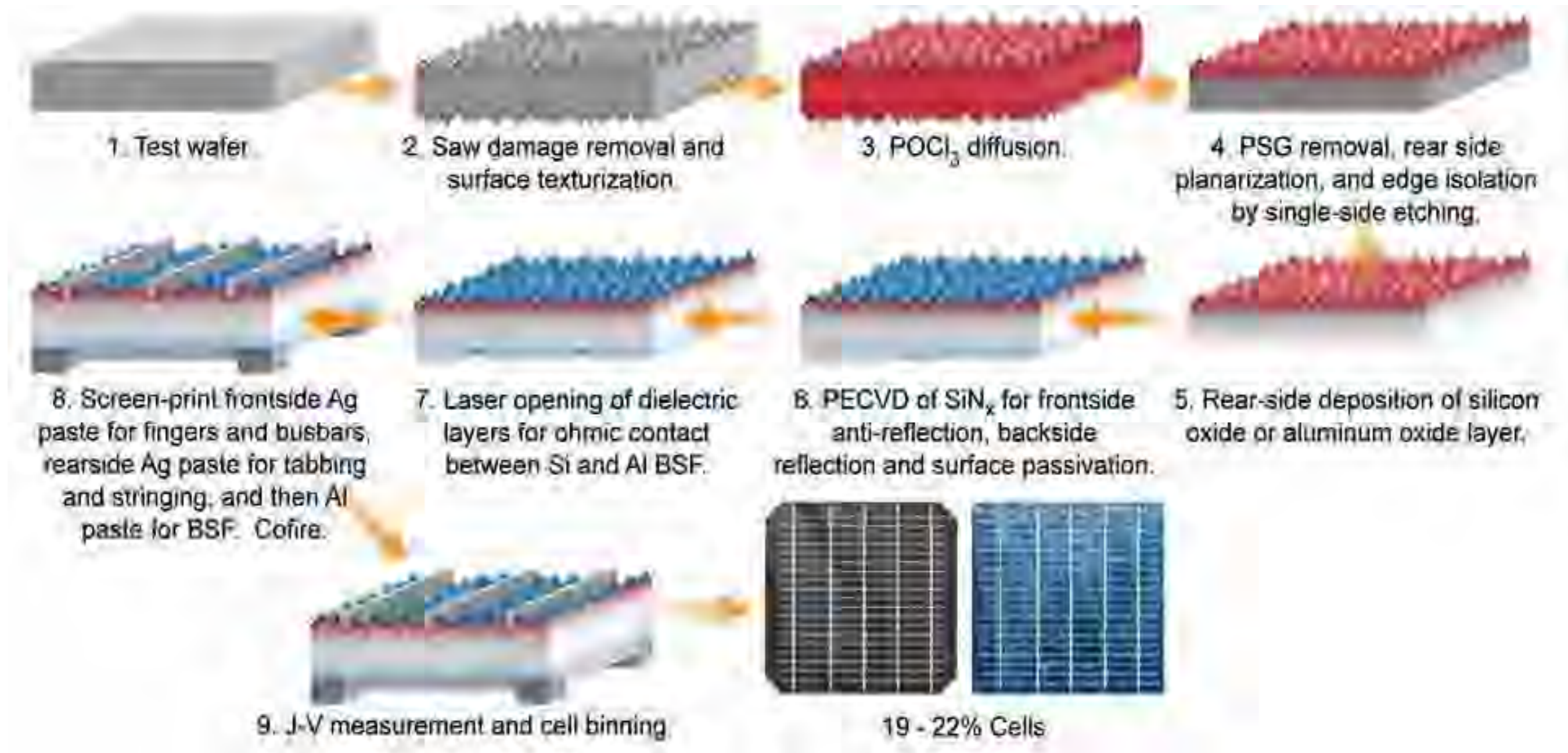


M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019

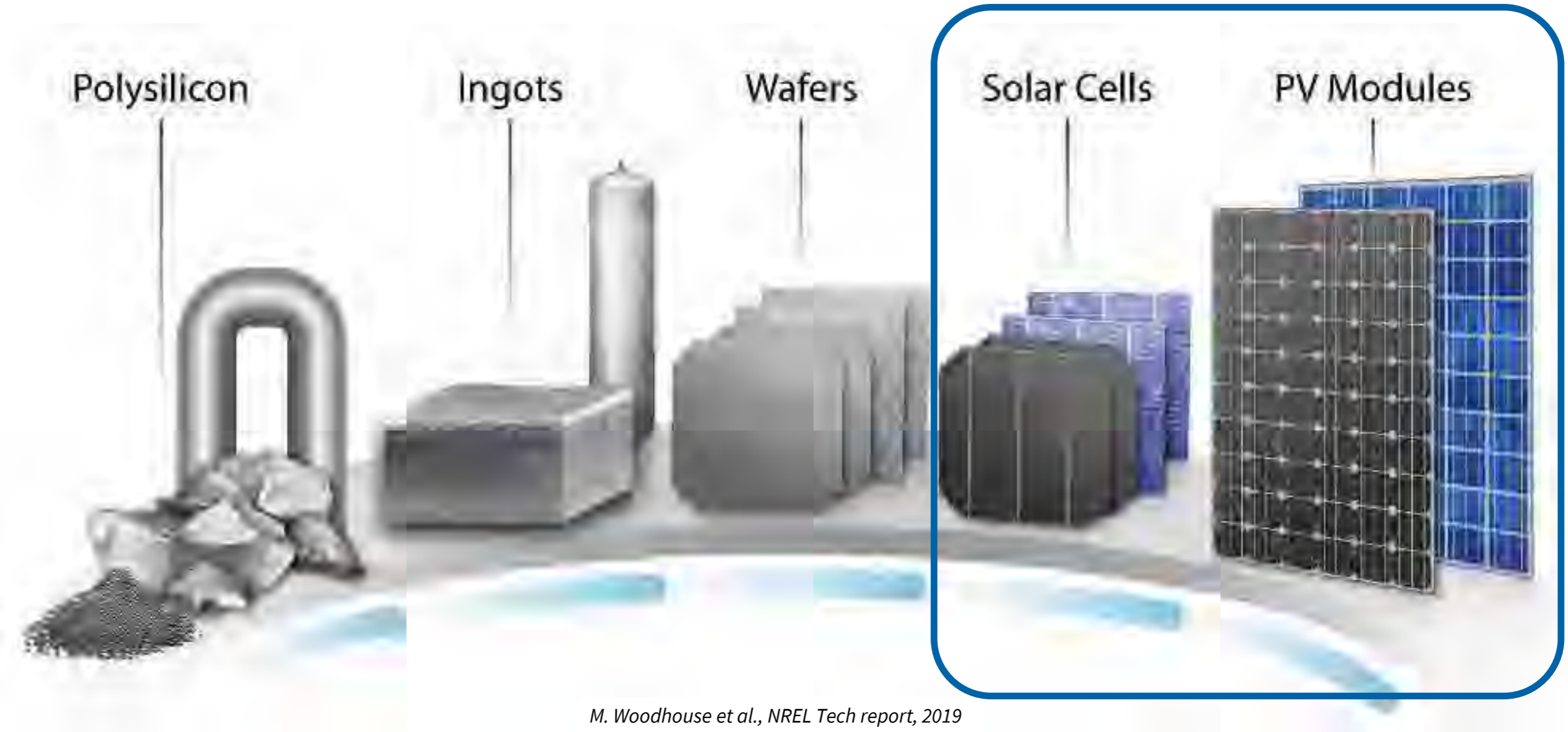




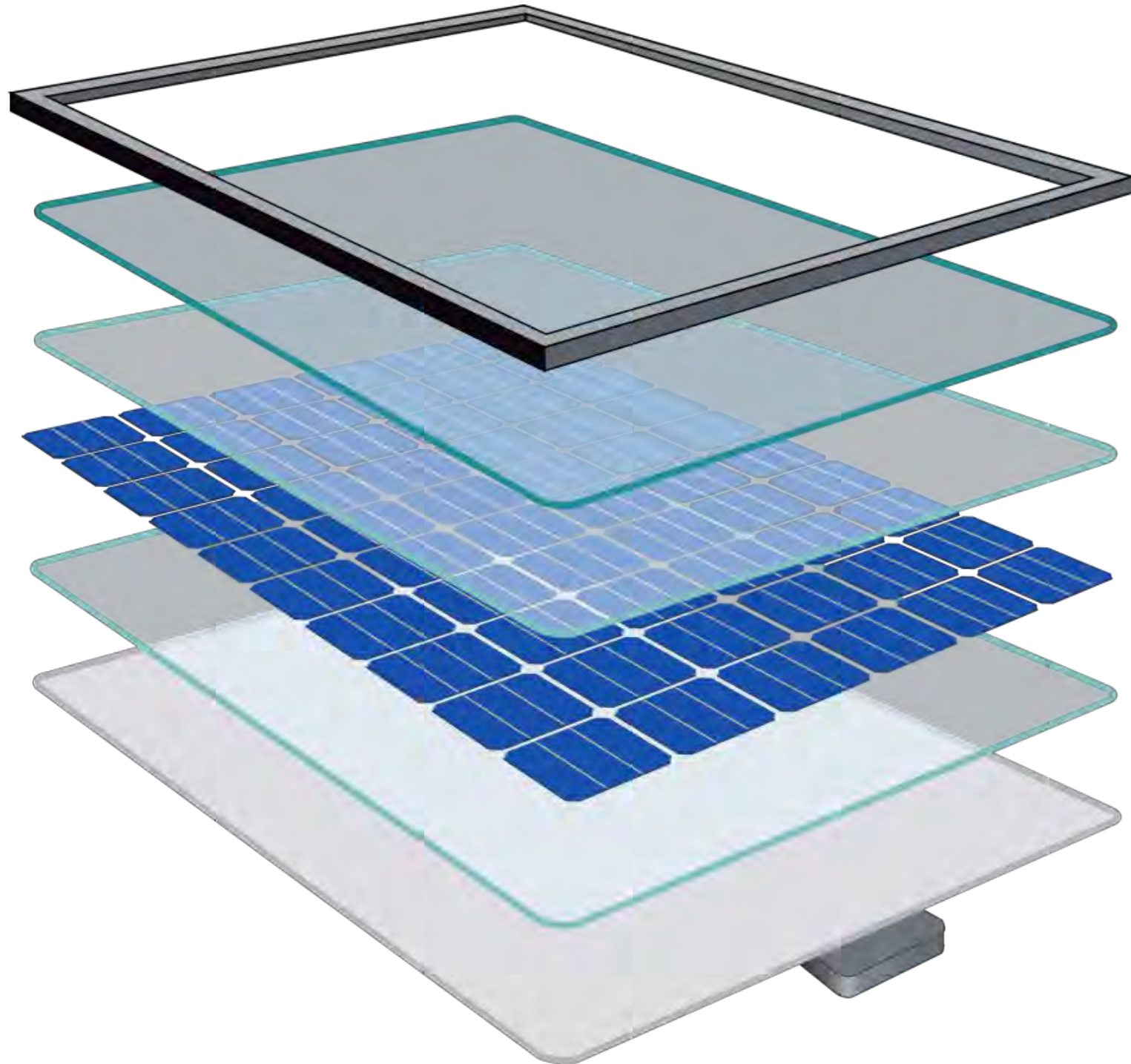
M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019



M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019



M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019



Cadre en aluminium

Verre (2-3 mm)

Encapsulant (EVA)

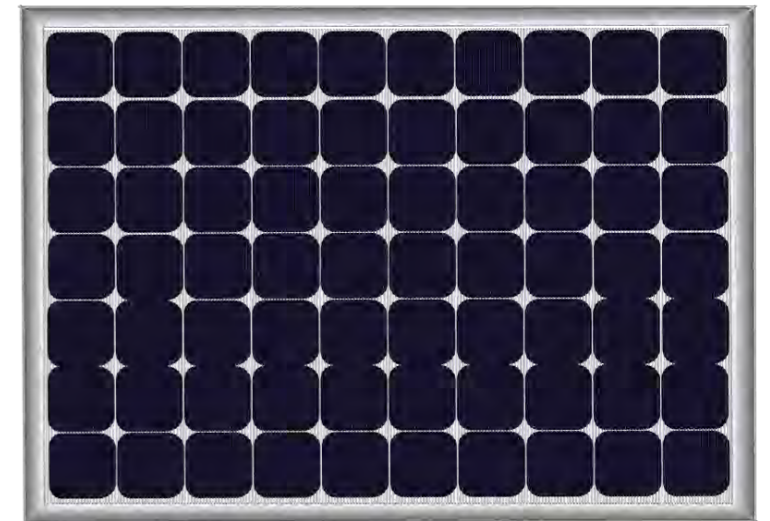
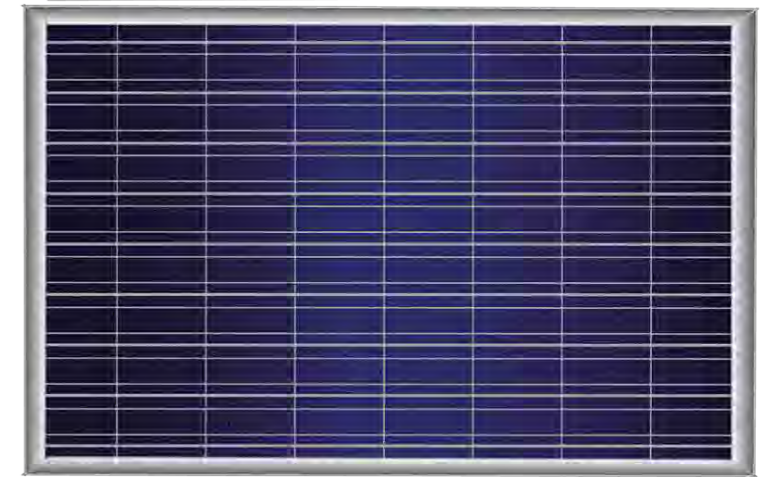
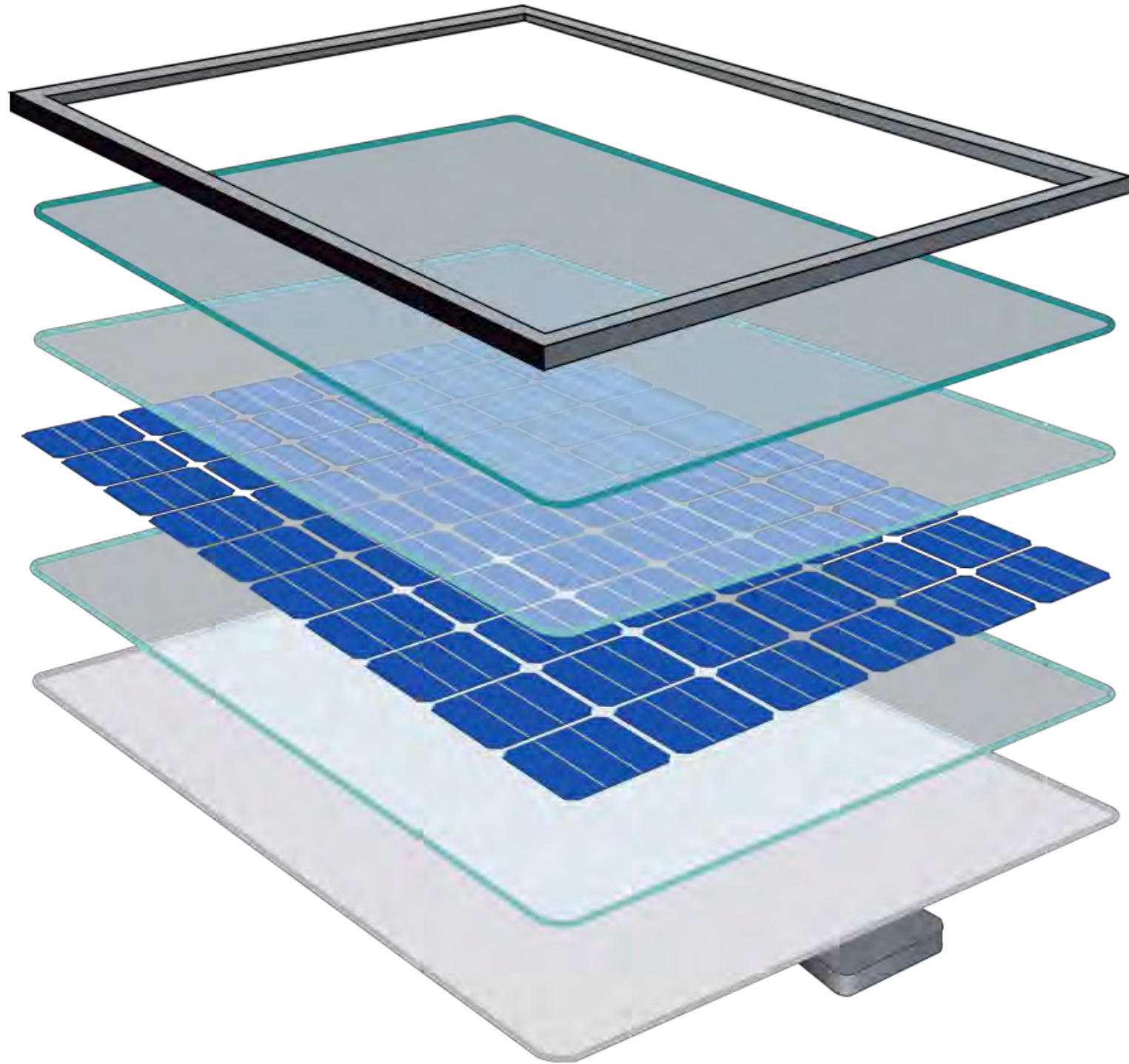
60 – 72 cellules connectées en série

Encapsulant (EVA)

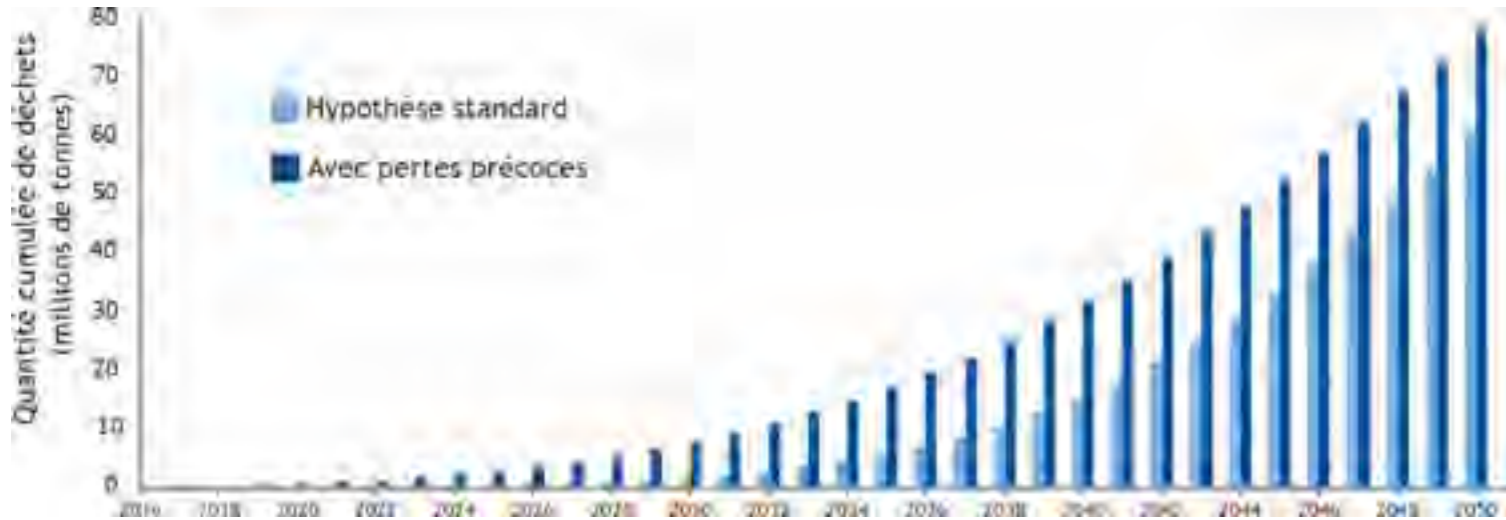
Backsheet

Boîte de jonction

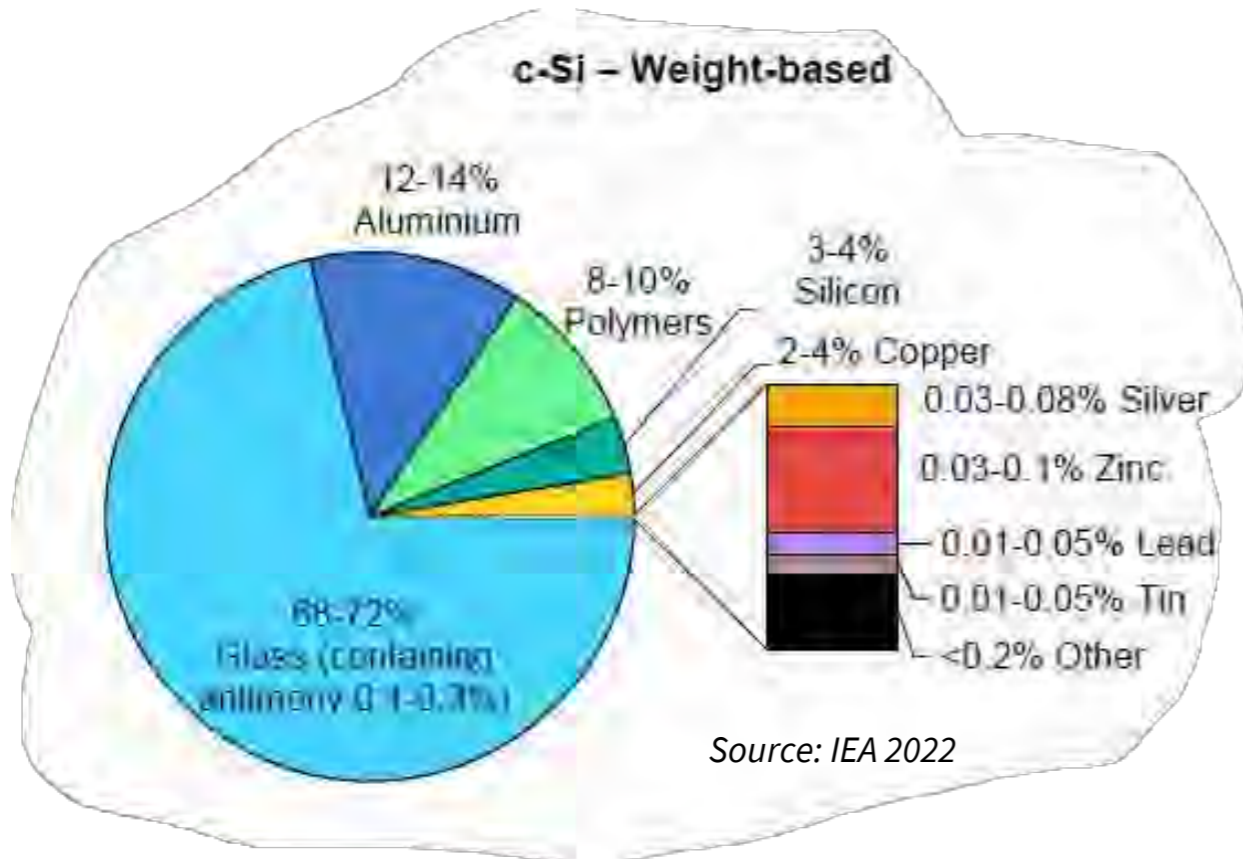
De la cellule au module



Fin de vie & recyclage



Source: IRENA 2018

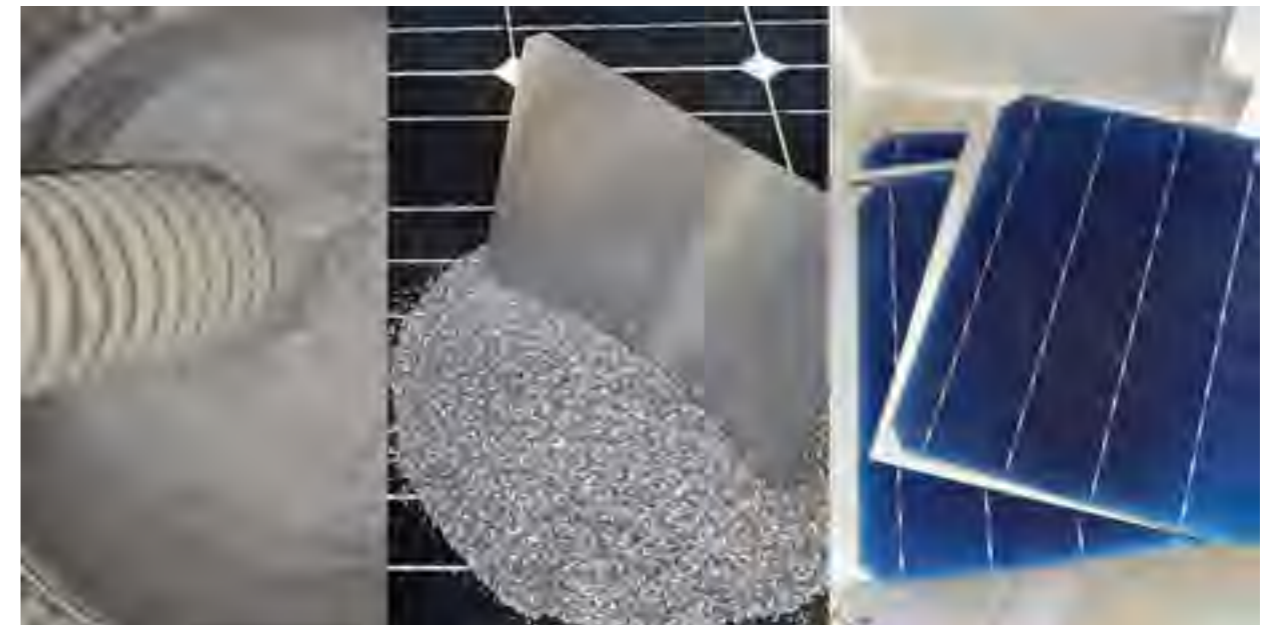


Source: IEA 2022

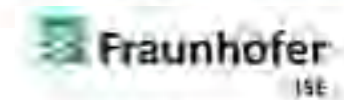
Europe's first solar panel recycling plant opens in France

"This is the **first** dedicated solar panel recycling plant in Europe, possibly **in the world**," Gilles Carsuzaa, head of electronics recycling at Veolia, told reporters.

G. De Cleerq, Reuters, June 2018



PERC Solar Cells from 100 Percent Recycled Silicon





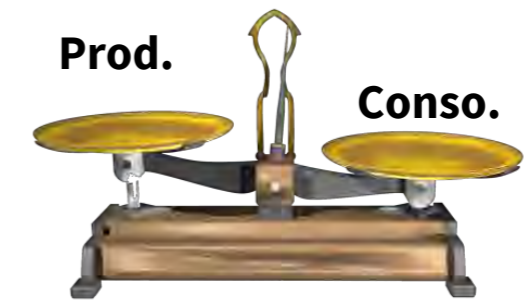
1 LA PRODUCTION

SOURCES D'ÉNERGIE

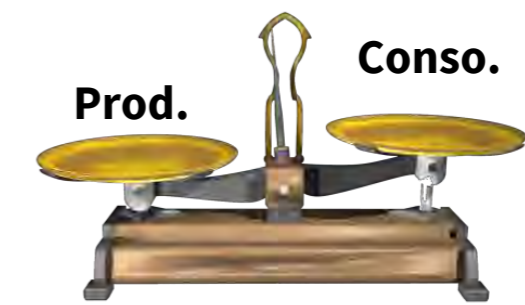


4 LA FOURNITURE

VENTE D'ÉLECTRICITÉ :
- Aux clients finaux (entreprises, particuliers)...



Evacuer le surplus vers le réseau



Soutirer le déficit du réseau

Autoconsommation ne veut pas dire autonomie ou autarcie !

Equilibre en énergie (sur une journée ou une année)

≠

Equilibre en puissance !

Convertir la lumière du Soleil en électricité



Convertir la lumière du Soleil en électricité





Qu'est ce qu'on veut faire ?

Comment on s'y prend ?

OBJECTIFS

SECURITE



DURABILITE



EQUITE

Trilemme énergétique d'après le World Energy Council

MOYENS

SOBRIETE



EFFICACITE



SUBSTITUTION



COMPENSATION

The silicon king

