

Solaire photovoltaïque

Ordres de grandeur, état des lieux & perspectives

Conférence de la SFP Paris Sud – 7 Novembre 2022

Daniel Suchet - daniel.suchet@polytechnique.edu



Pourquoi le solaire ?

Puissance solaire sur Terre

1360 W/m² dans l'espace

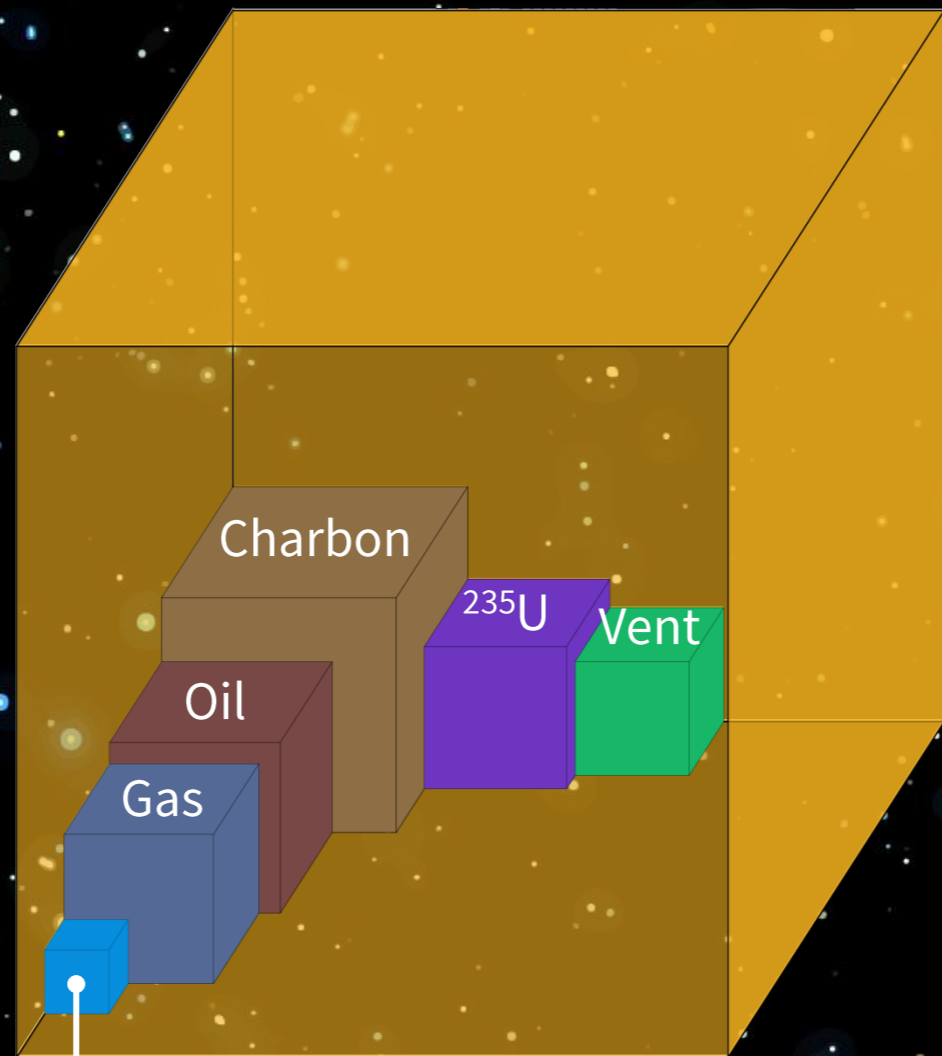
1000 W/m² au sol en plein Soleil

150 W/m² en moyenne en France
(nuage, jour/nuit, latitude...)



Pourquoi le solaire ?

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



1 an conso mondiale
18 TWy



Convertir la puissance solaire

AM 1.5

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 1%



En chaleur
Solaire thermique
Efficacité 80%



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



Directement en électricité
Solaire photovoltaïque (PV)

I/ Le solaire photovoltaïque aujourd'hui

Rétrospective et état des lieux

II/ Du concept à la technologie

Principes et limites fondamentales

Panneau solaire : le making of

III/ Coûts économiques, coûts écologiques

IV/ Perspectives et défis à venir

Industrie du Terawatt

Dispositifs à haut rendement

Applications innovantes

Intégration au réseau



Une brève histoire du photovoltaïque



1839 : découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond Becquerel
chlorure d'argent sur lame de platine

redécouvert en ~1880 par Smith, Adams & Day, Fritts
Cellule en selenium, 1% de rendement environ

1946 : brevet de Ohl « pour un dispositif électrique photo-sensible »
Silicium dopé

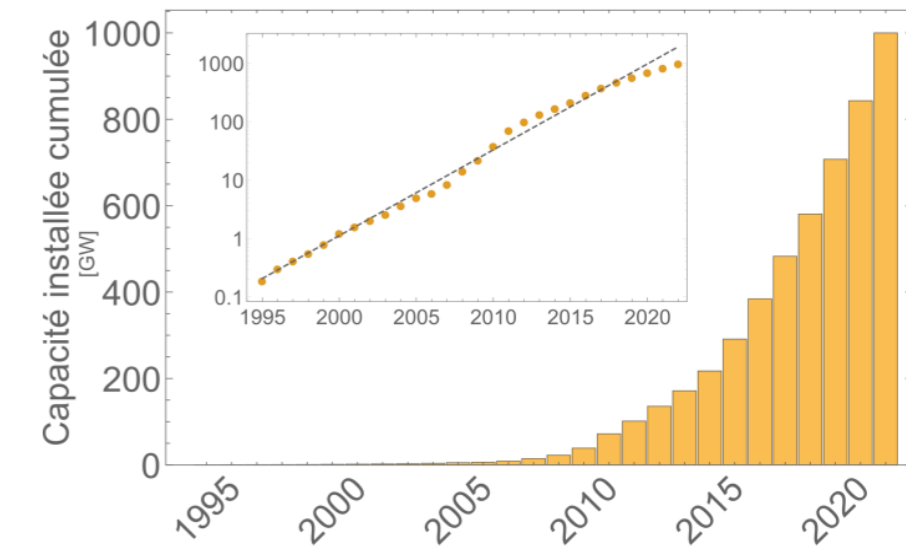
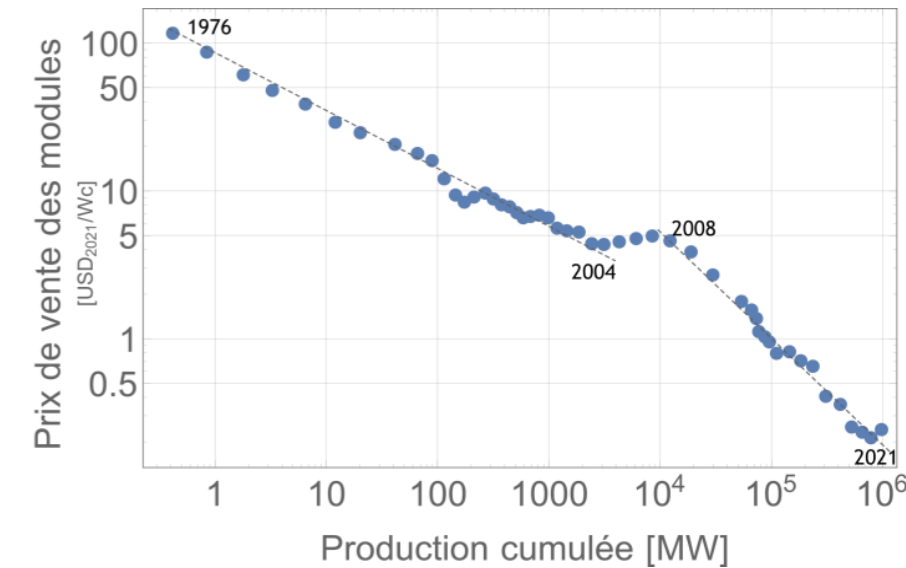


1954 : Chapin, Fuller & Person : première cellule à 6% de rendement
Application commerciale dès 1956 (échec)

1958 : Cellules solaire sur le premier satellite américain Vanguard-1
Amélioration des procédés, gain en rendement, baisse des coûts

1970' : Approvisionnement silicium : rebus de la microélectronique
Développement du photovoltaïque terrestre

2006 : tension sur le silicium. Création d'une filière dédiée (Chine)
Quasi monopole sur la chaîne de valeur



Source: ITRPV 2022, BP Statistics

Capacité installée fin 2021

Monde : 840 GW (+170 GW par rapport à 2020)

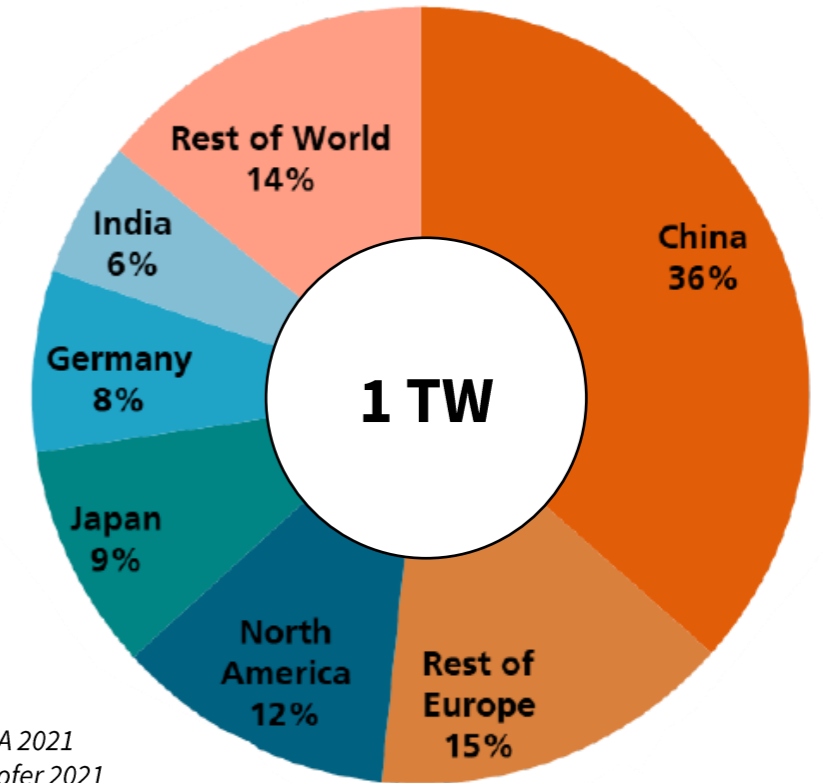
France: 12.3 GW (+ 2 GW par rapport à 2020)

Electricité produite sur l'année 2021

Monde : 1000 TWh (=3.7% du total)

France: 14 TWh (=3% du total)

Facteur de charge
12-15%

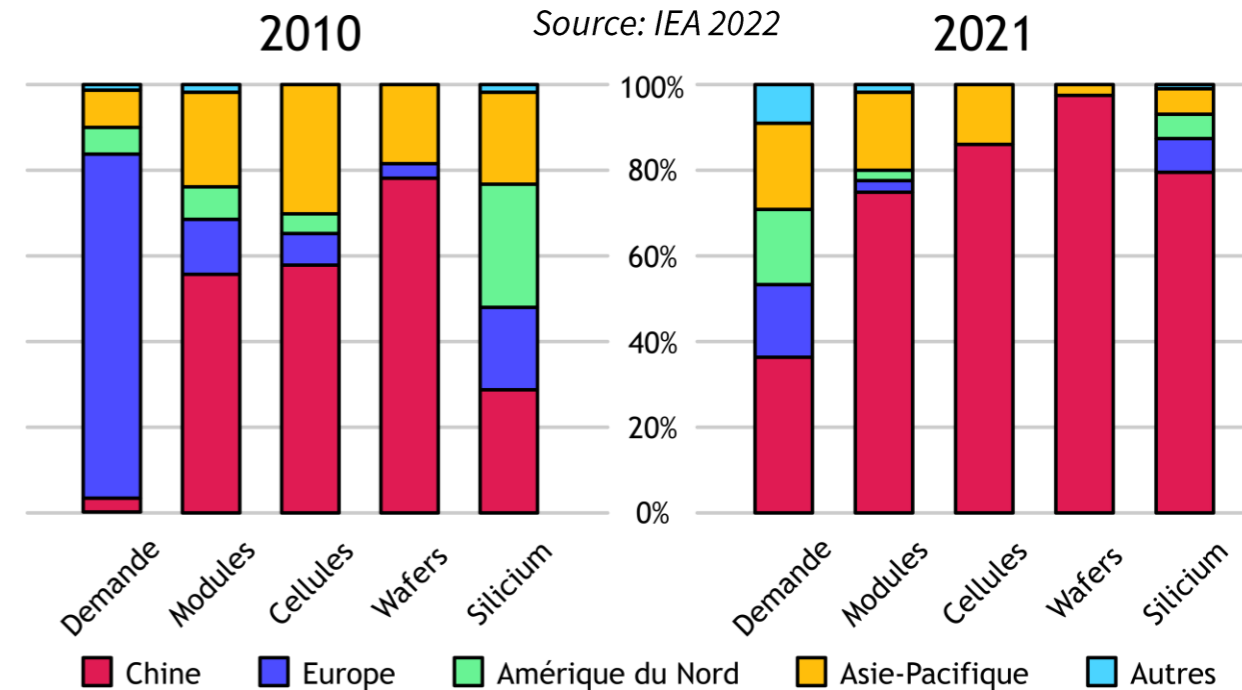
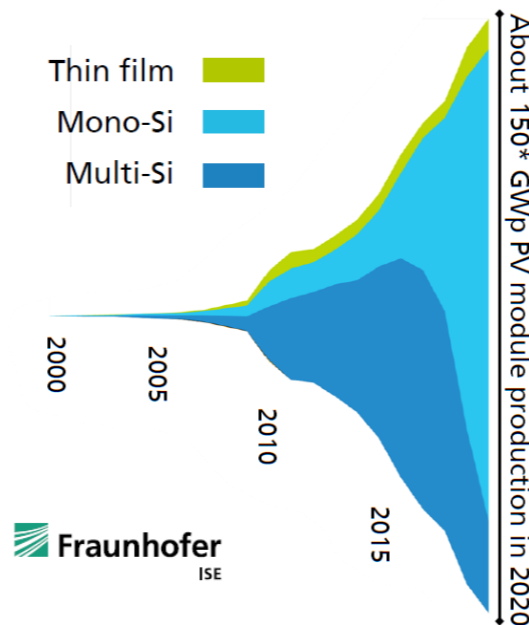


IRENA 2021
Fraunhofer 2021

Technologie solaire :

Silicium cristallin (95%)

Fabriqué en Chine (80-97%)



I/ Le solaire photovoltaïque aujourd'hui

Rétrospective et état des lieux

II/ Du concept à la technologie

Principes et limites fondamentales

Panneau solaire : le making of

III/ Coûts économiques, coûts écologiques

IV/ Perspectives et défis à venir

Industrie du Terawatt

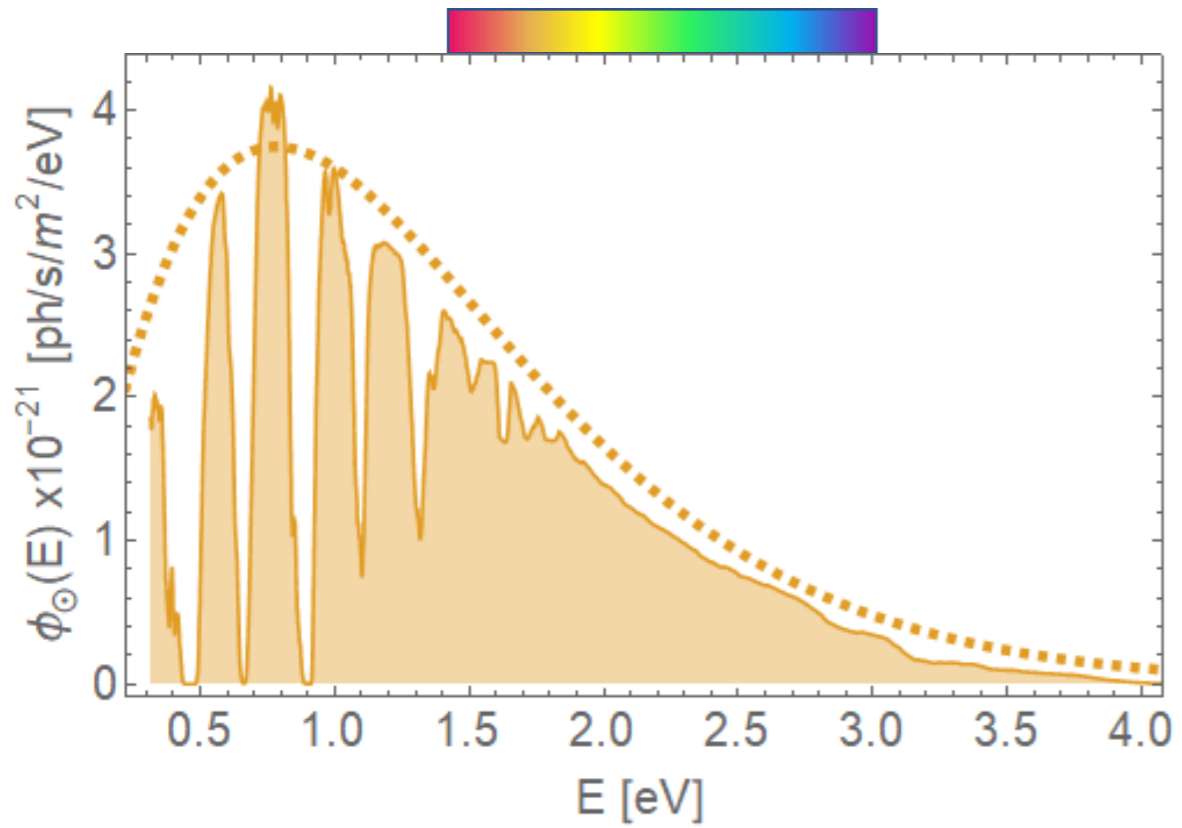
Dispositifs à haut rendement

Applications innovantes

Intégration au réseau

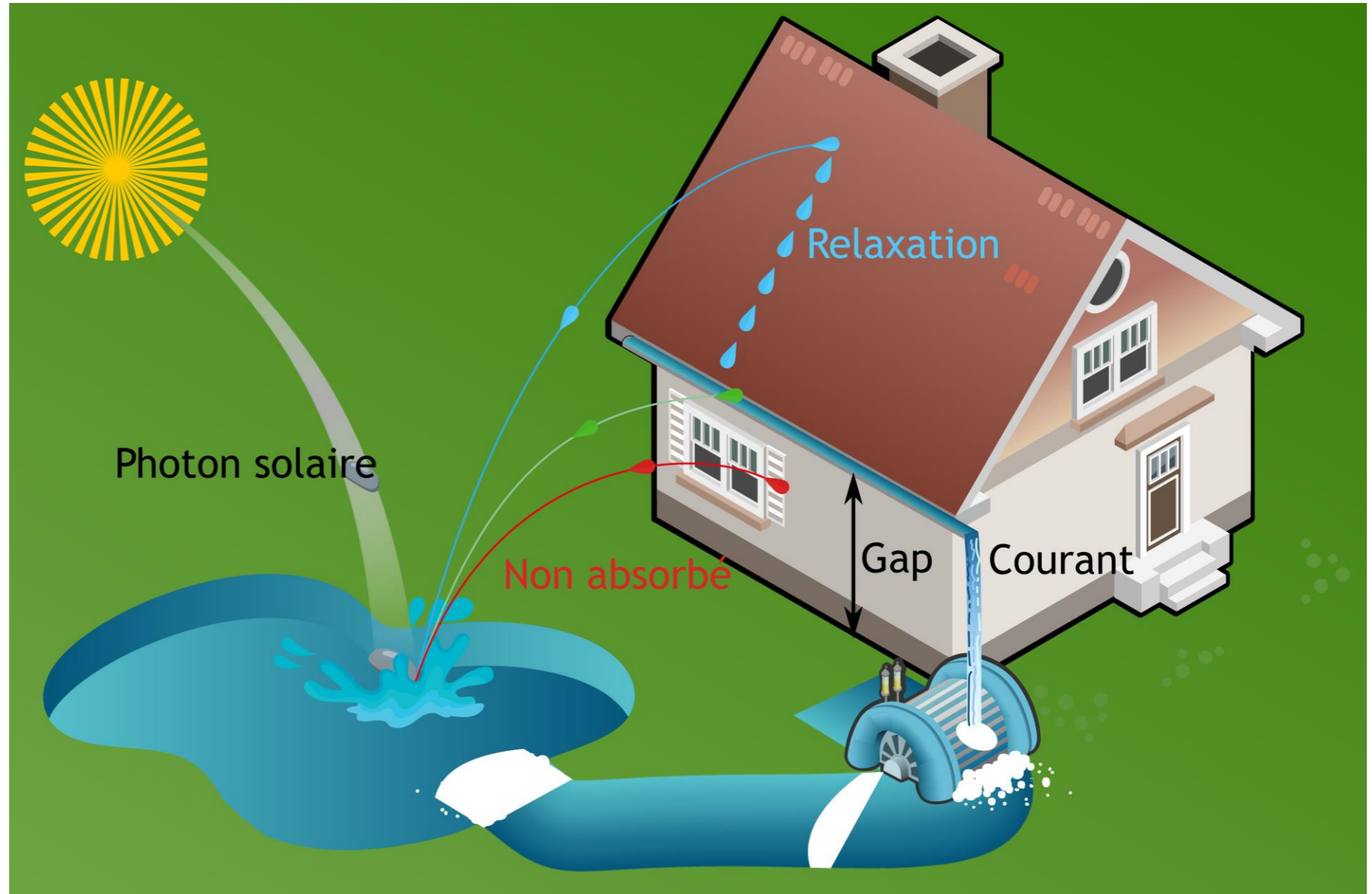


L'effet photovoltaïque – limite de Trivich Flinn



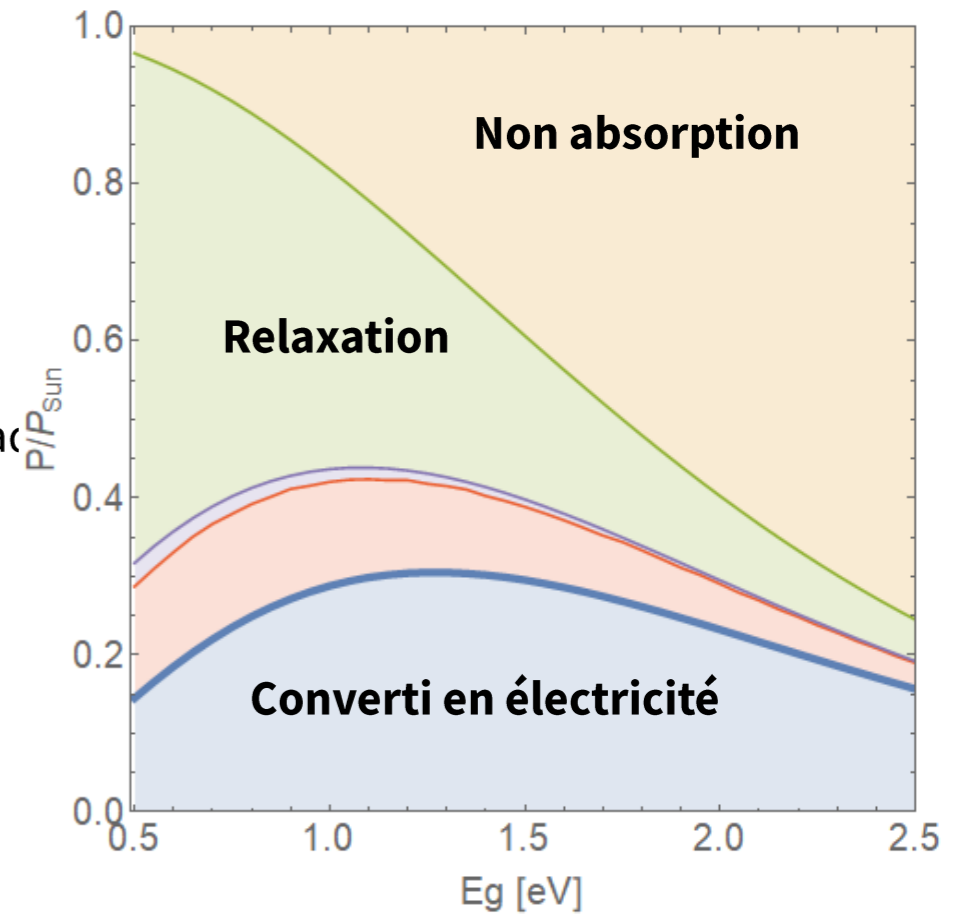
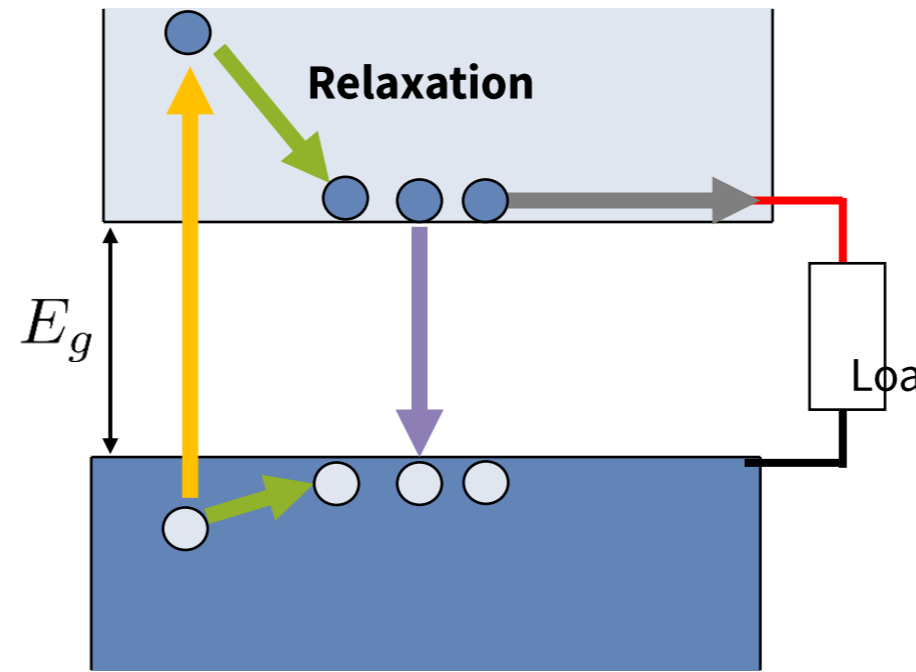
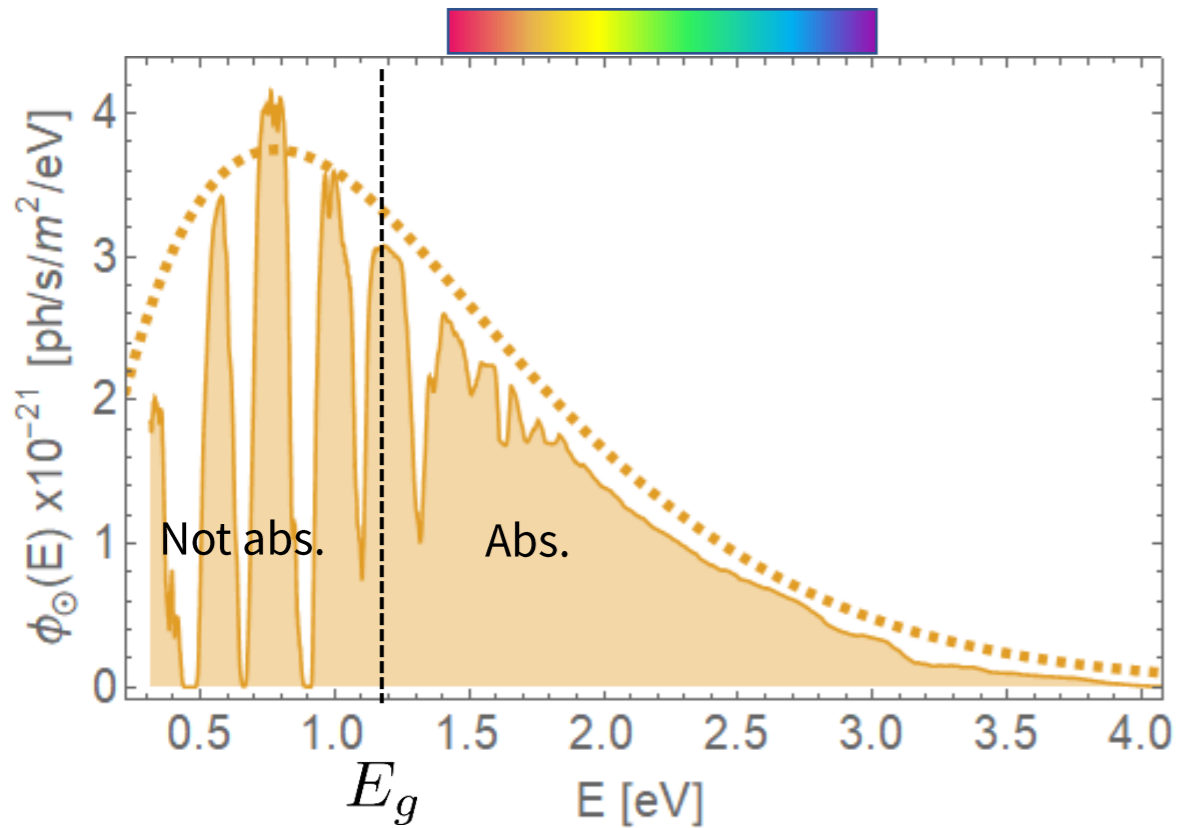
$$P \propto E_g \times \int_{E_g}^{+\infty} \phi_{\odot}(E) dE$$

Maximal pour un gap ni trop grand, ni trop petit



Crédit : Sébastien Ceste (CPM Polytechnique)

4 fonctions indispensables à la conversion photovoltaïque



4 fonctions fondamentales :

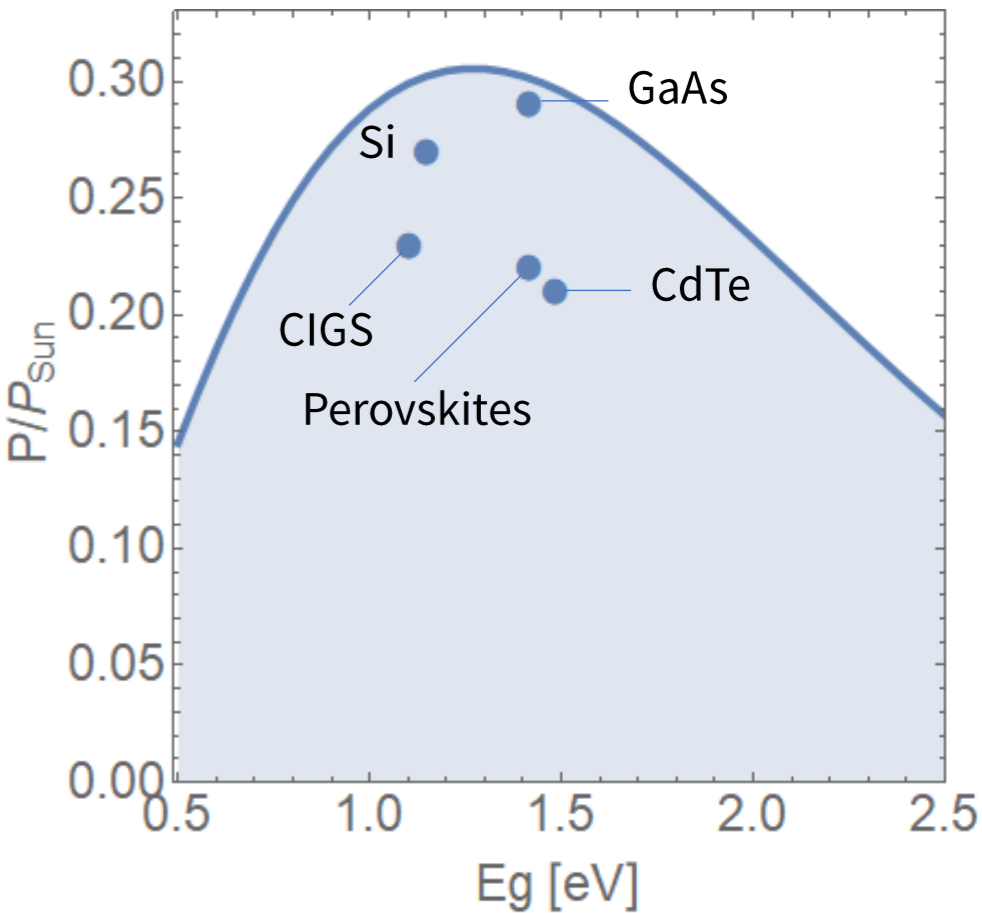
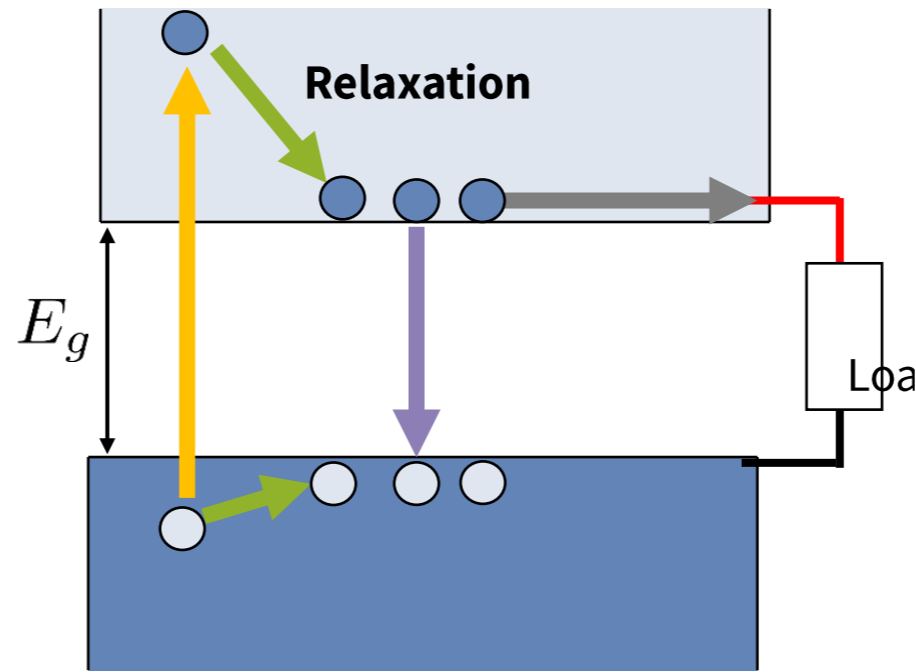
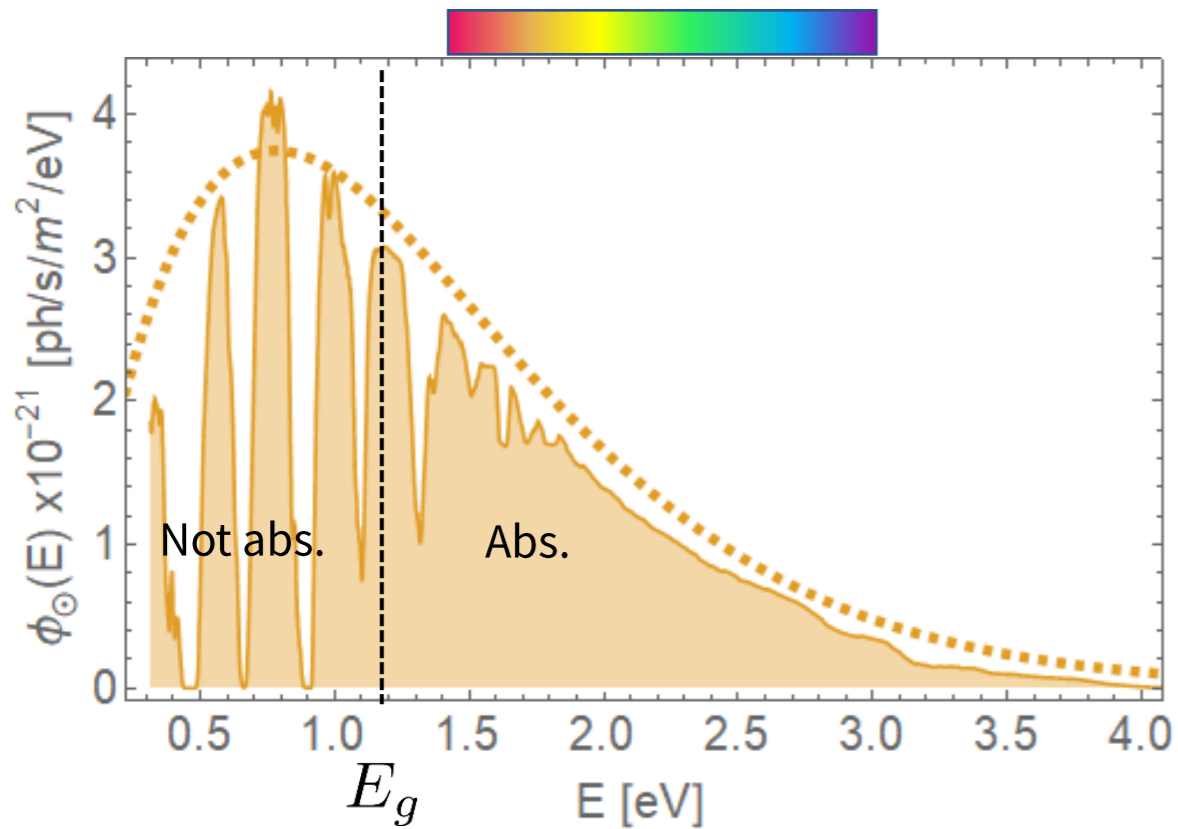
Absorber la lumière

Garder les électrons excités

Transporter les électrons jusqu'aux contacts

Permettre une extraction sélective

4 fonctions indispensables à la conversion photovoltaïque



4 fonctions fondamentales :

Absorber la lumière

Garder les électrons excités

Transporter les électrons jusqu'aux contacts

Permettre une extraction sélective

*Limite de
Shockley & Queisser
(1961)*

~30% pour
un gap ~1.2eV

Efficacité de conversion



nature energy ARTICLES
PUBLISHED: 20 MARCH 2017 | VOLUME: 2 | ARTICLE NUMBER: 17032

Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%

Kunta Yoshikawa*, Hayato Kawasaki, Wataru Yoshida, Toru Irie, Katsunori Konishi, Kunihiro Nakano, Toshihiko Uto, Daisuke Adachi, Masanori Kanematsu, Hisashi Uzu and Kenji Yamamoto

Record
cellule silicium

(Yoshikawa et al., Nature Energy (2017))

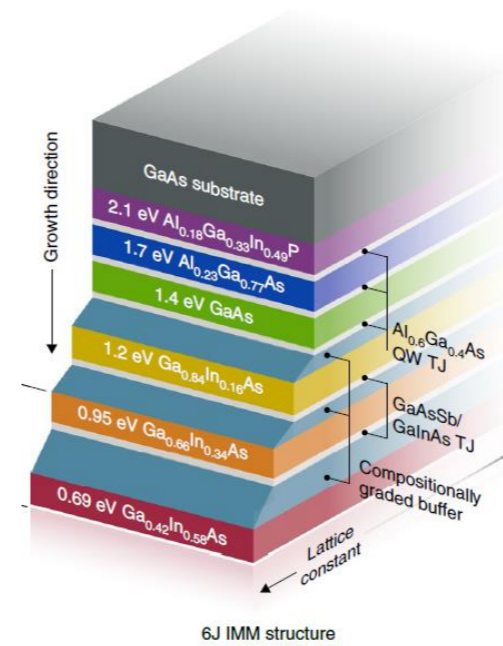
Record actuel
(multijonction)

Geisz JF, Nature Energy (2020)

nature energy ARTICLES
https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5

Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration

John F. Geisz, Ryan M. France, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Andrew G. Norman, Harvey L. Guthrey, Matthew R. Young, Tao Song and Thomas Moriarty



Systemes
commerciaux

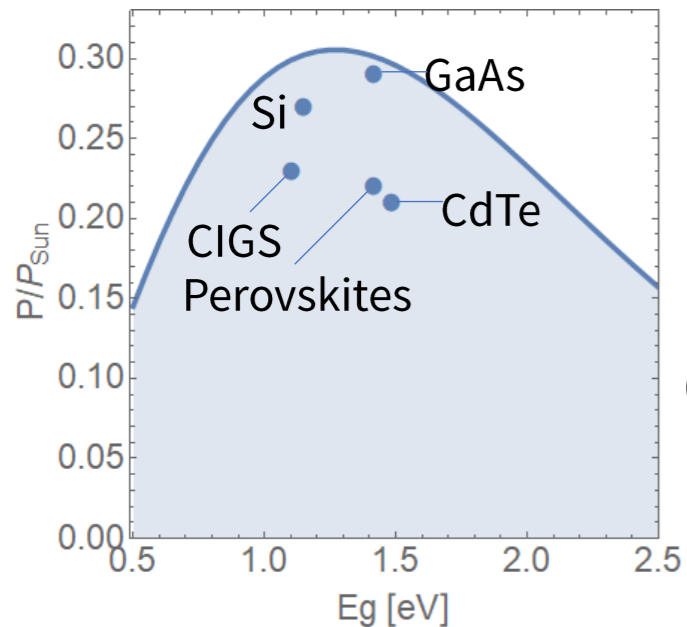
0%

22% 27% 30%

47%

86%

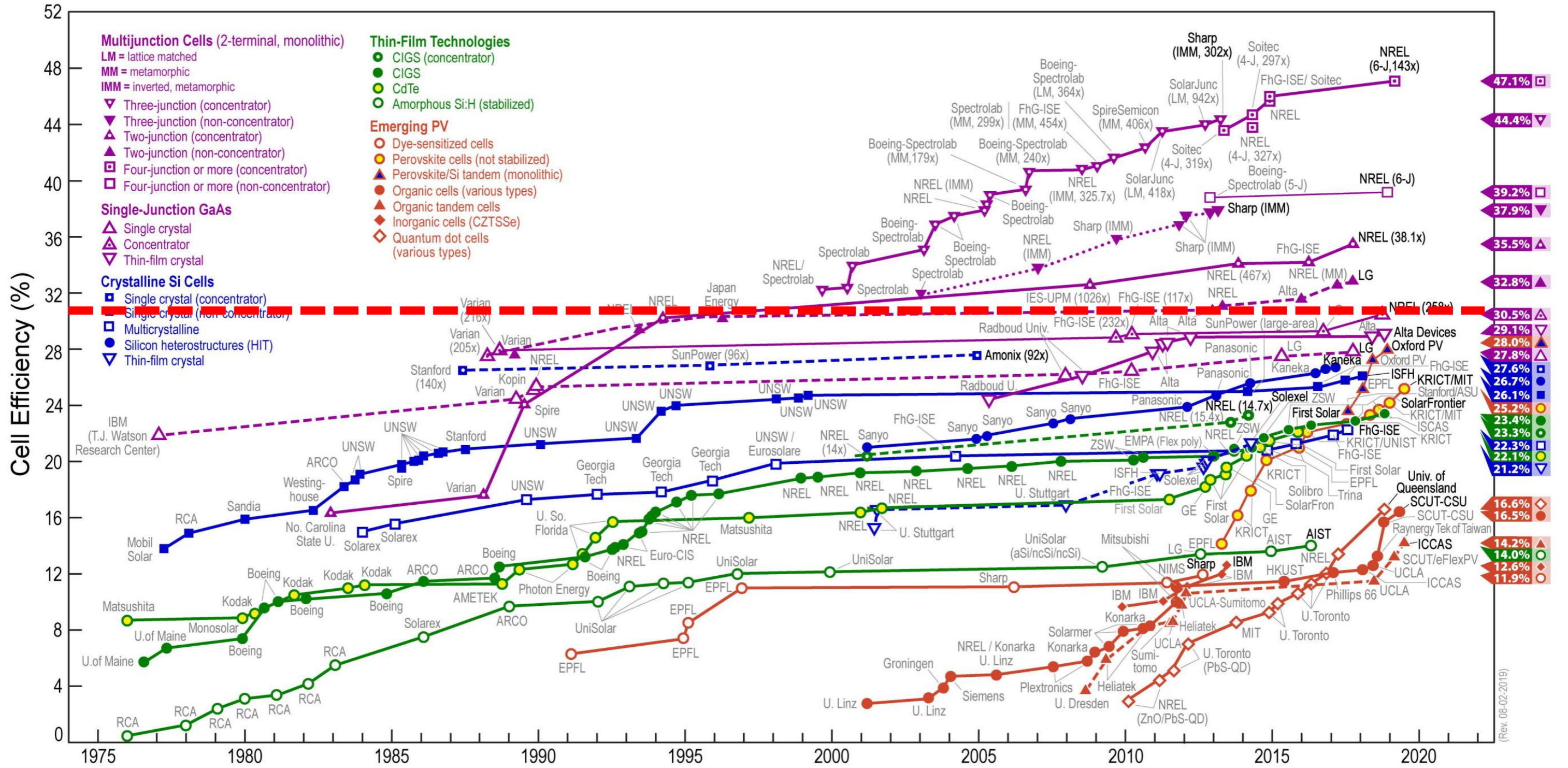
100%

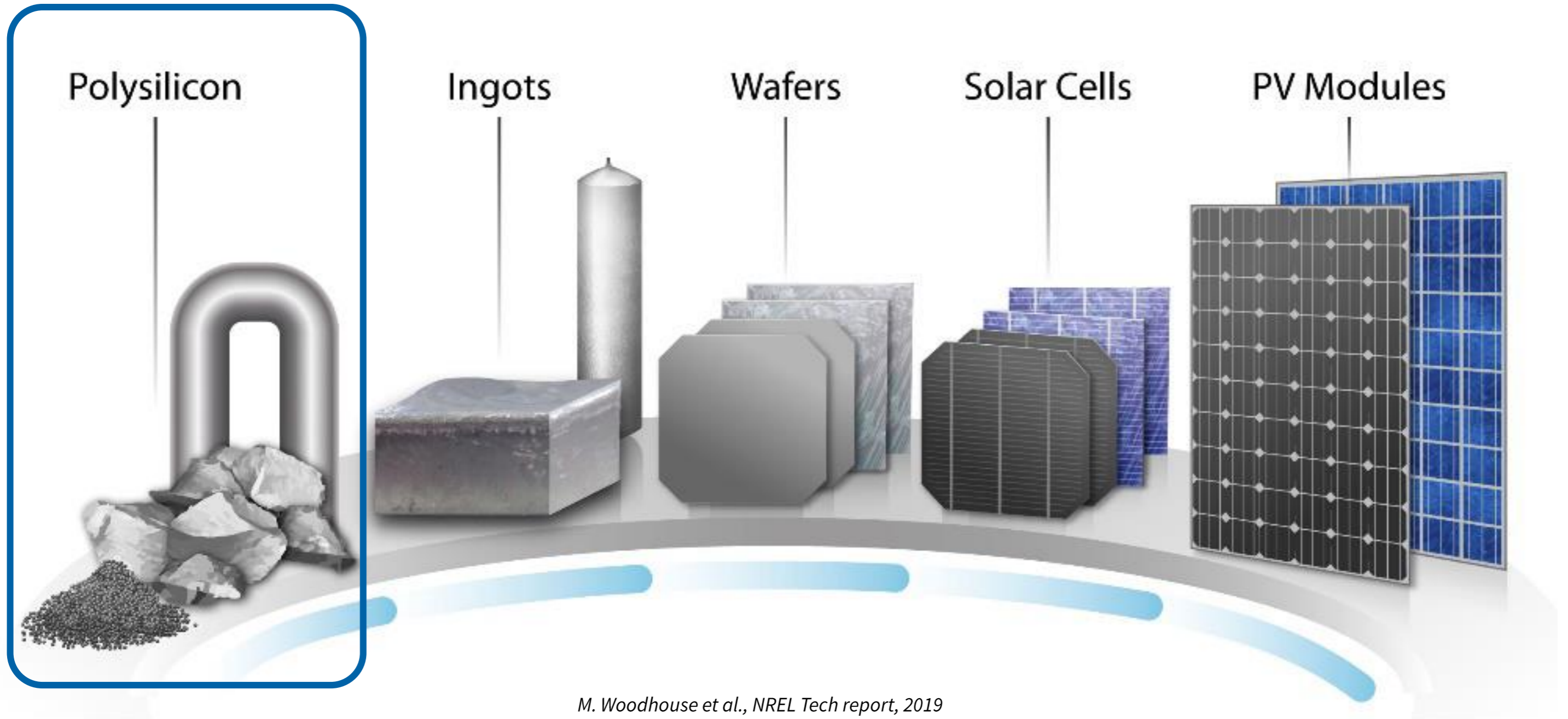


Maximum théorique
des cellules simples
(limite de Shockley Queisser)

Rendement
thermodynamique

Welcome to the jungle !



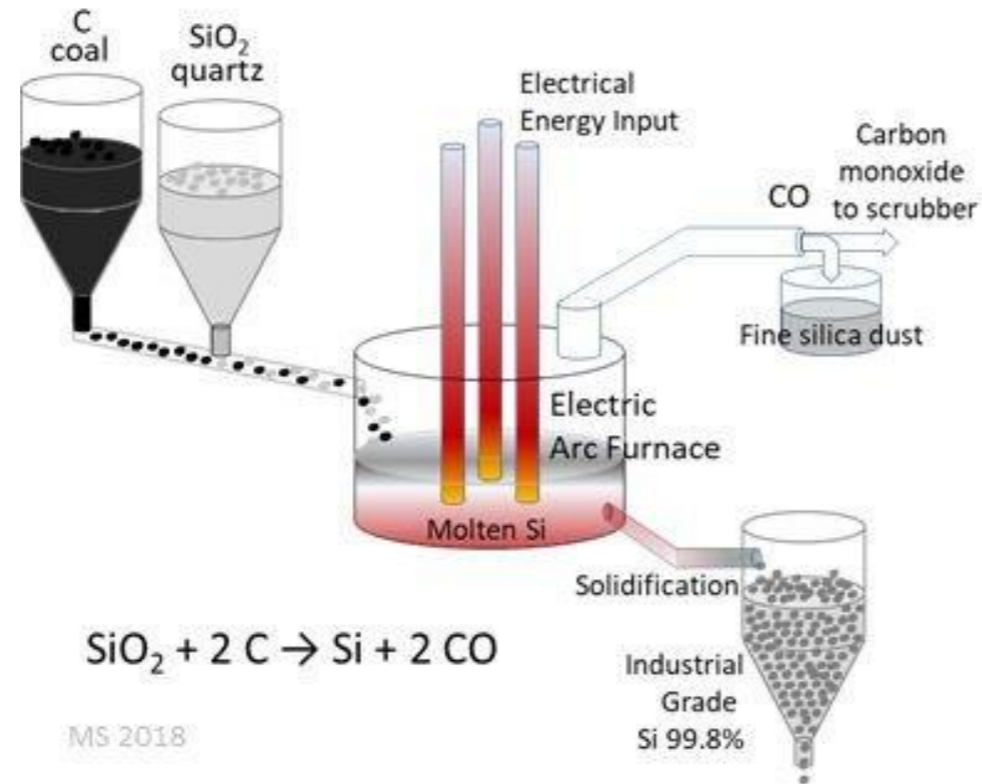


De la silice au (poly)silicium



SiO₂ - quartzite

Carbon réduction

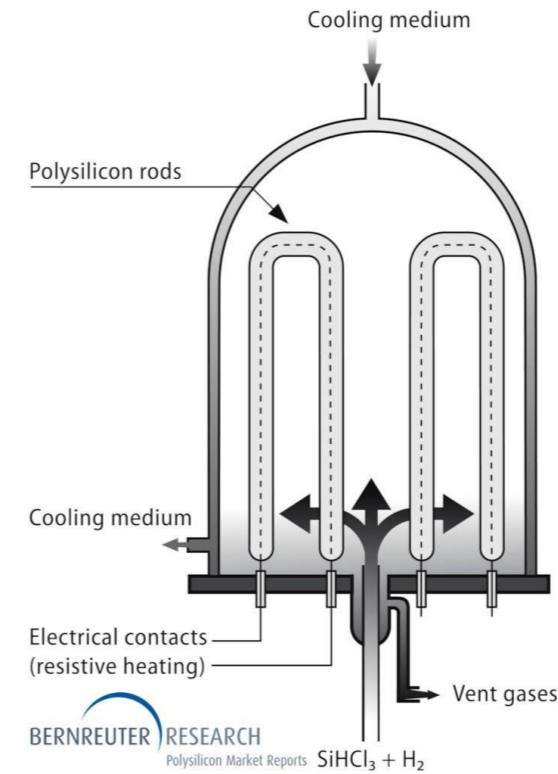


Alluminium
Steel
Silicone
...



Metallurgic grade
98.5-99.5%

Procédé de Siemens

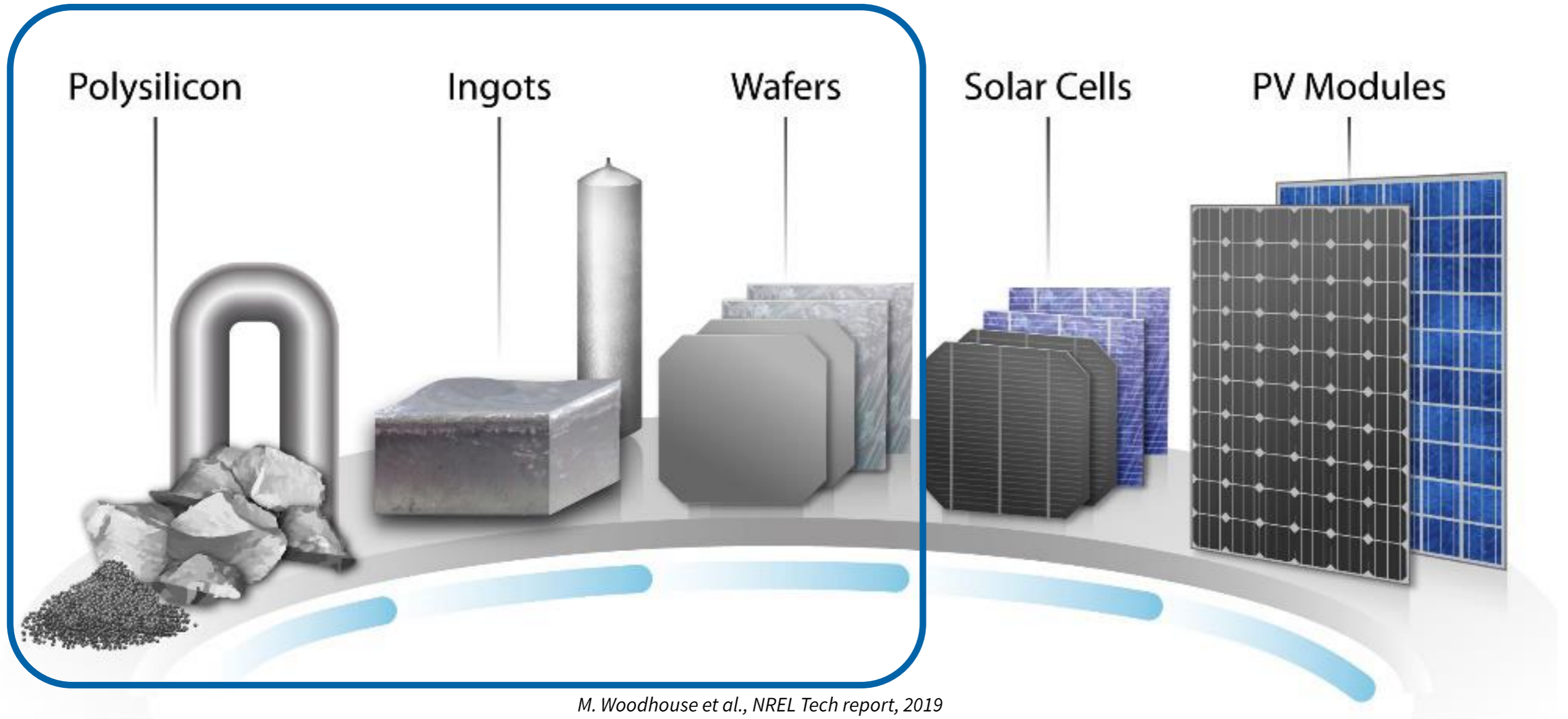


Solar grade poly-Si
(7N) 99.99999%

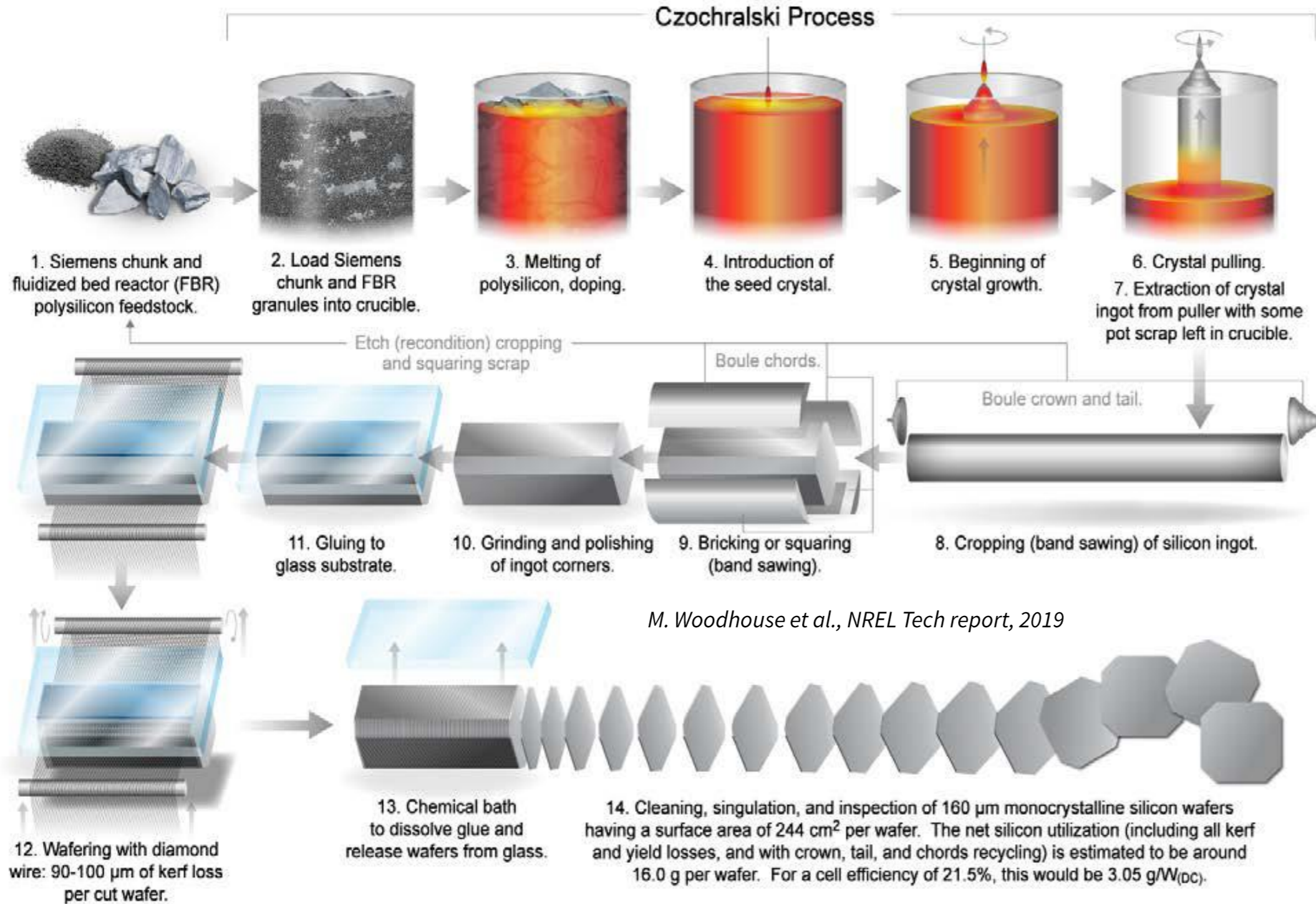


Electronics
Solar cells

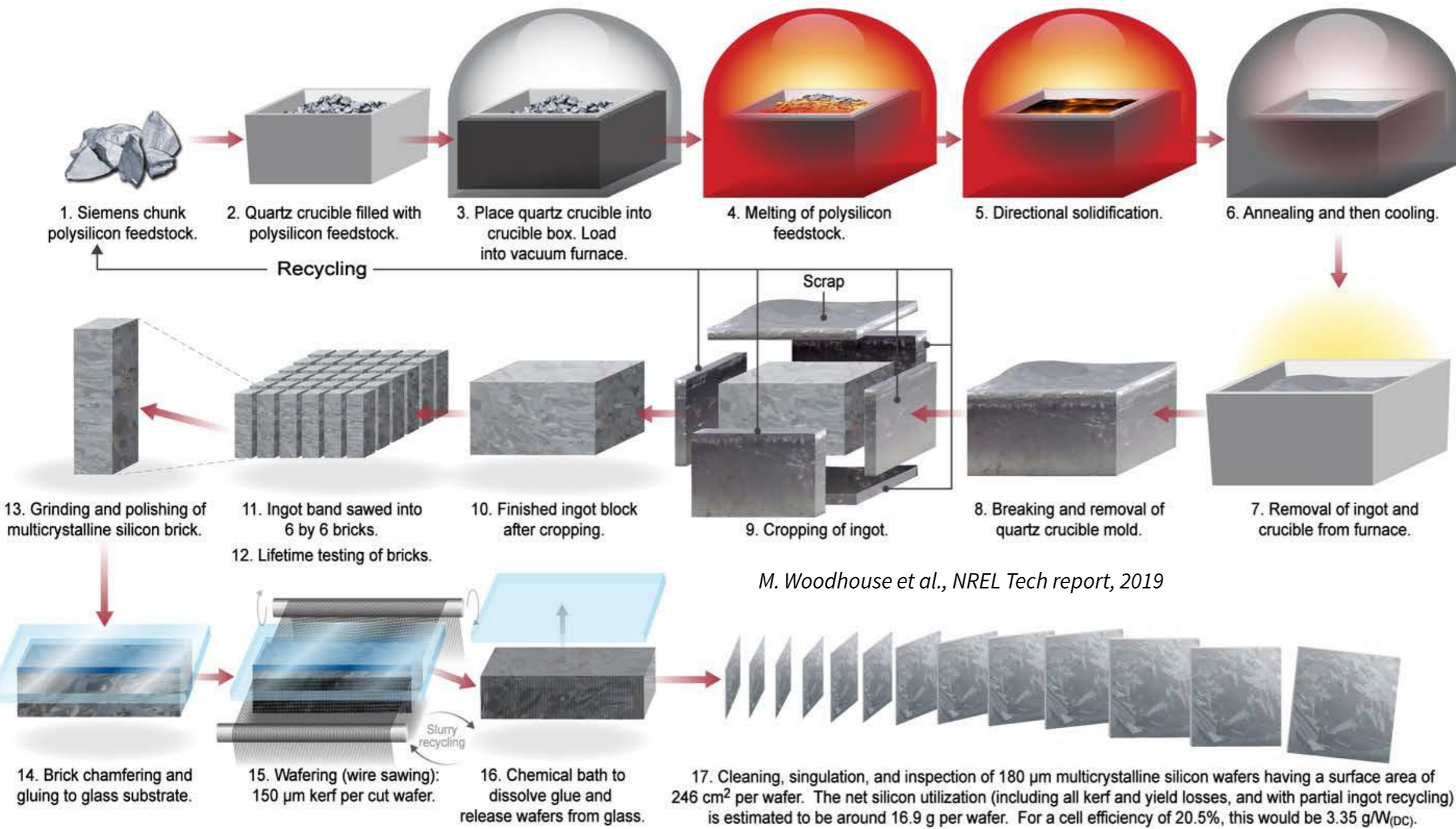
Du (poly)silicium au wafer



Du (poly)silicium au wafer monocristallin

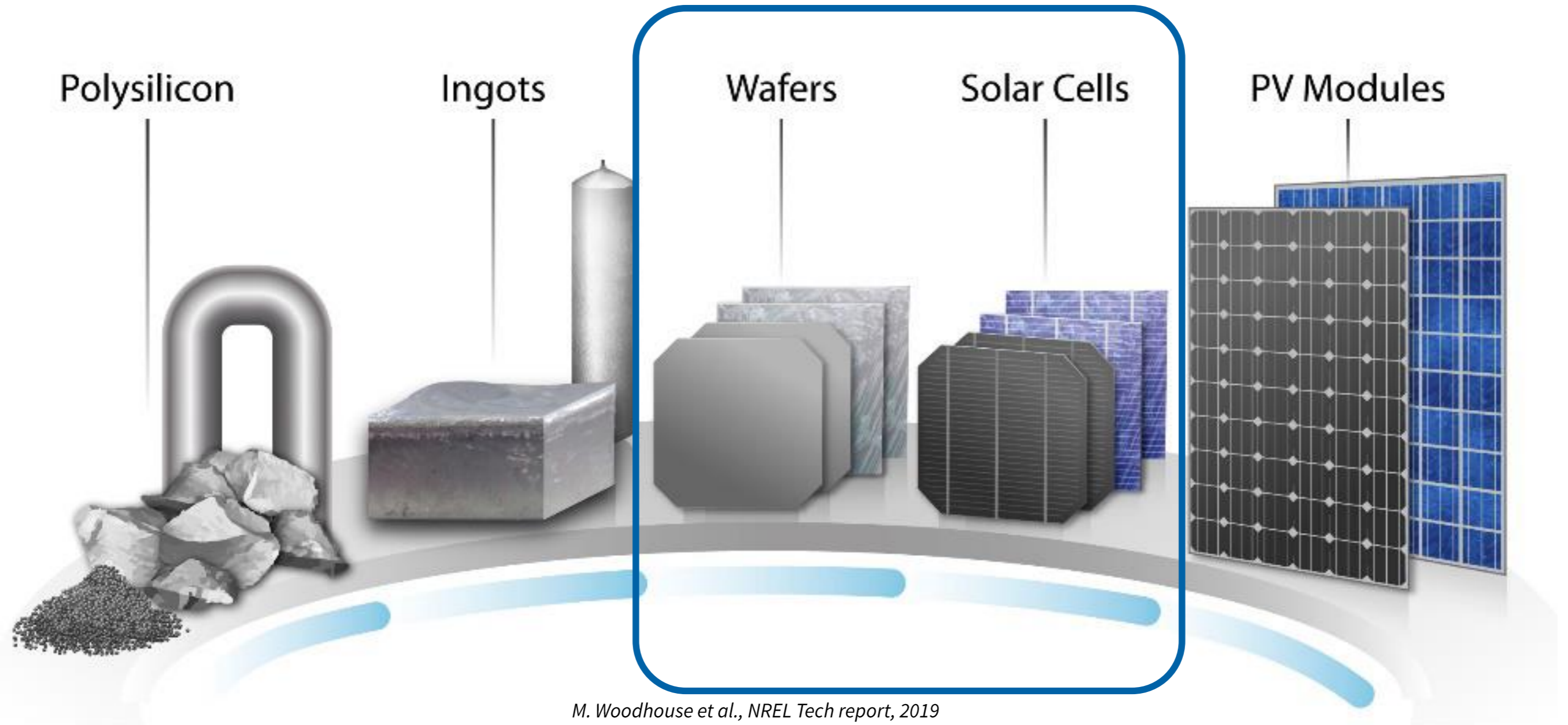


Du (poly)silicium au wafer multicristallin

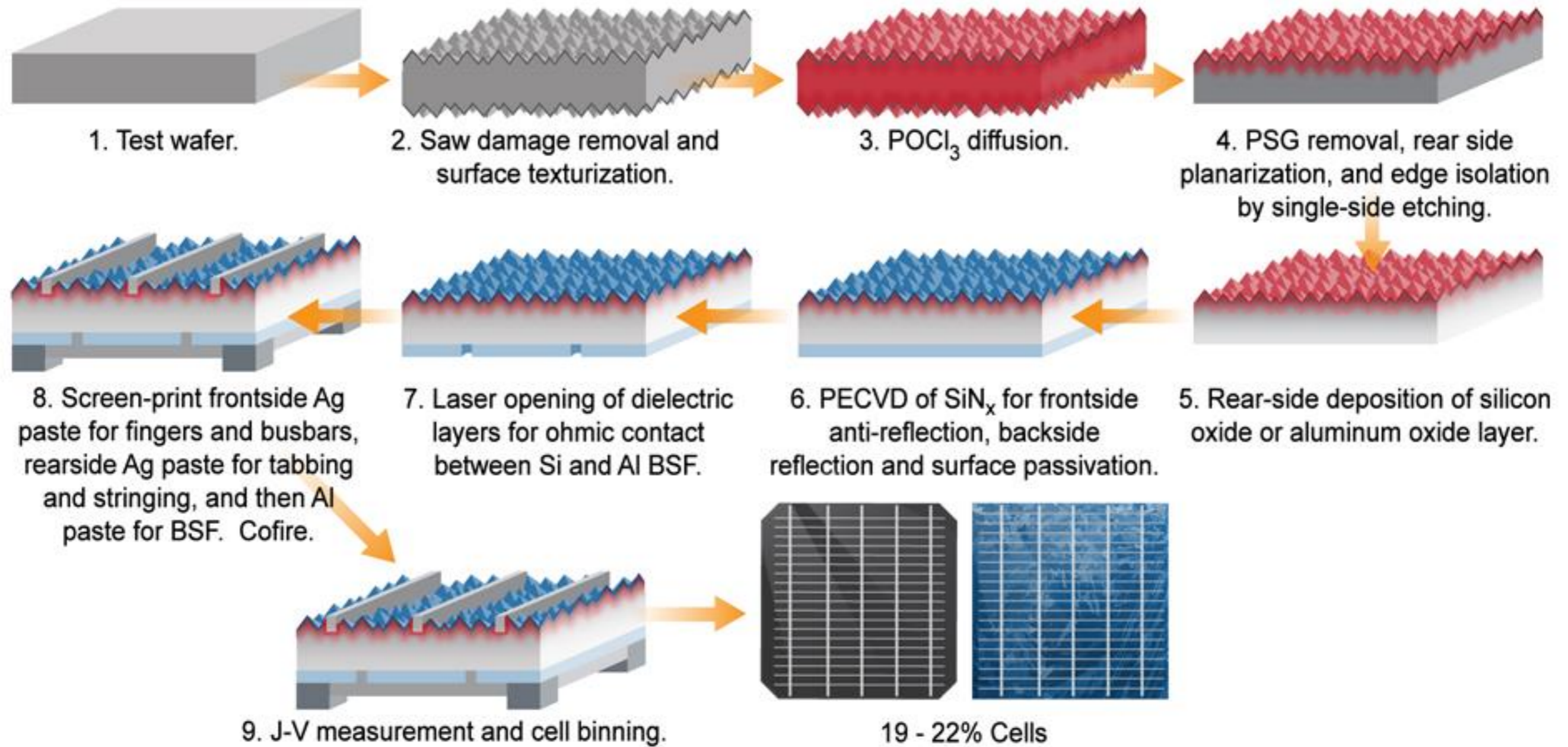


M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019

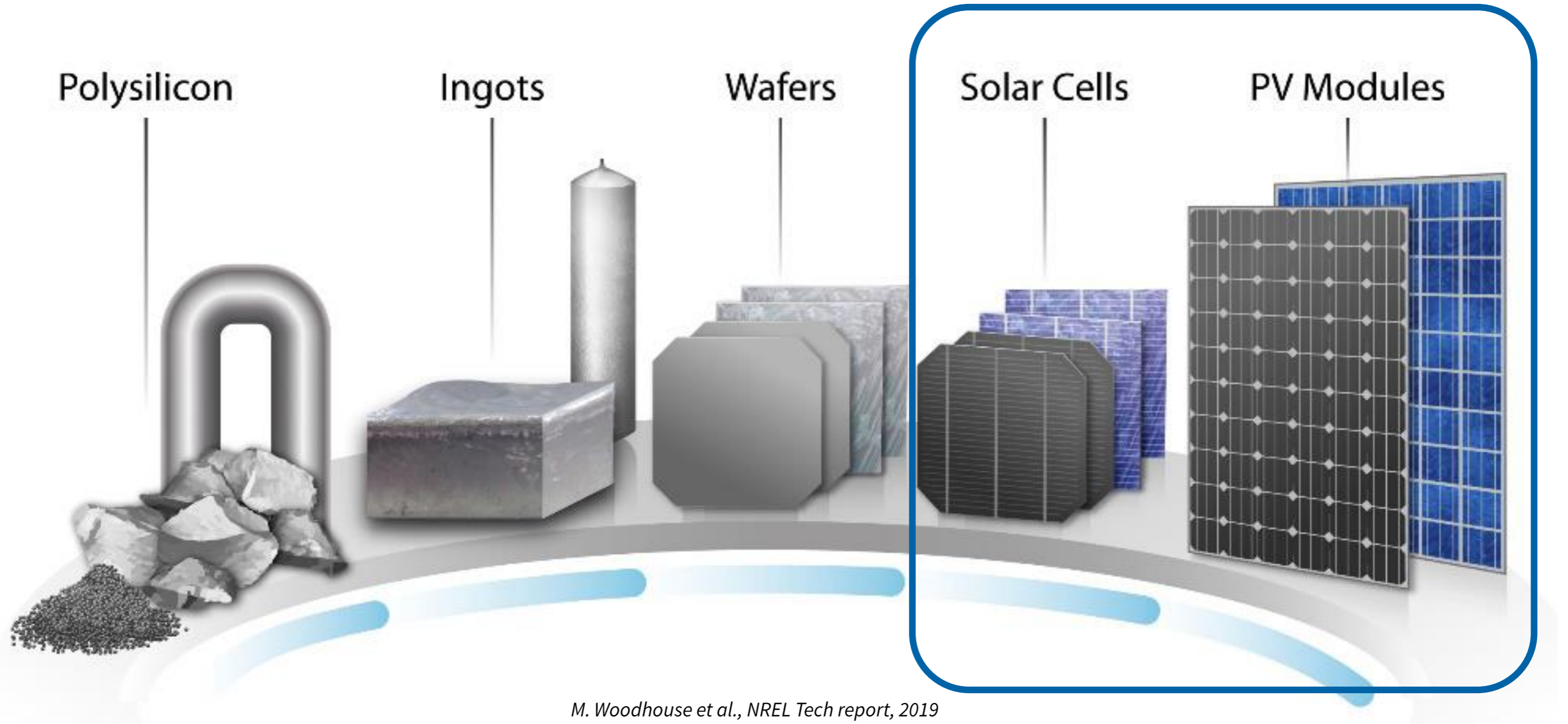


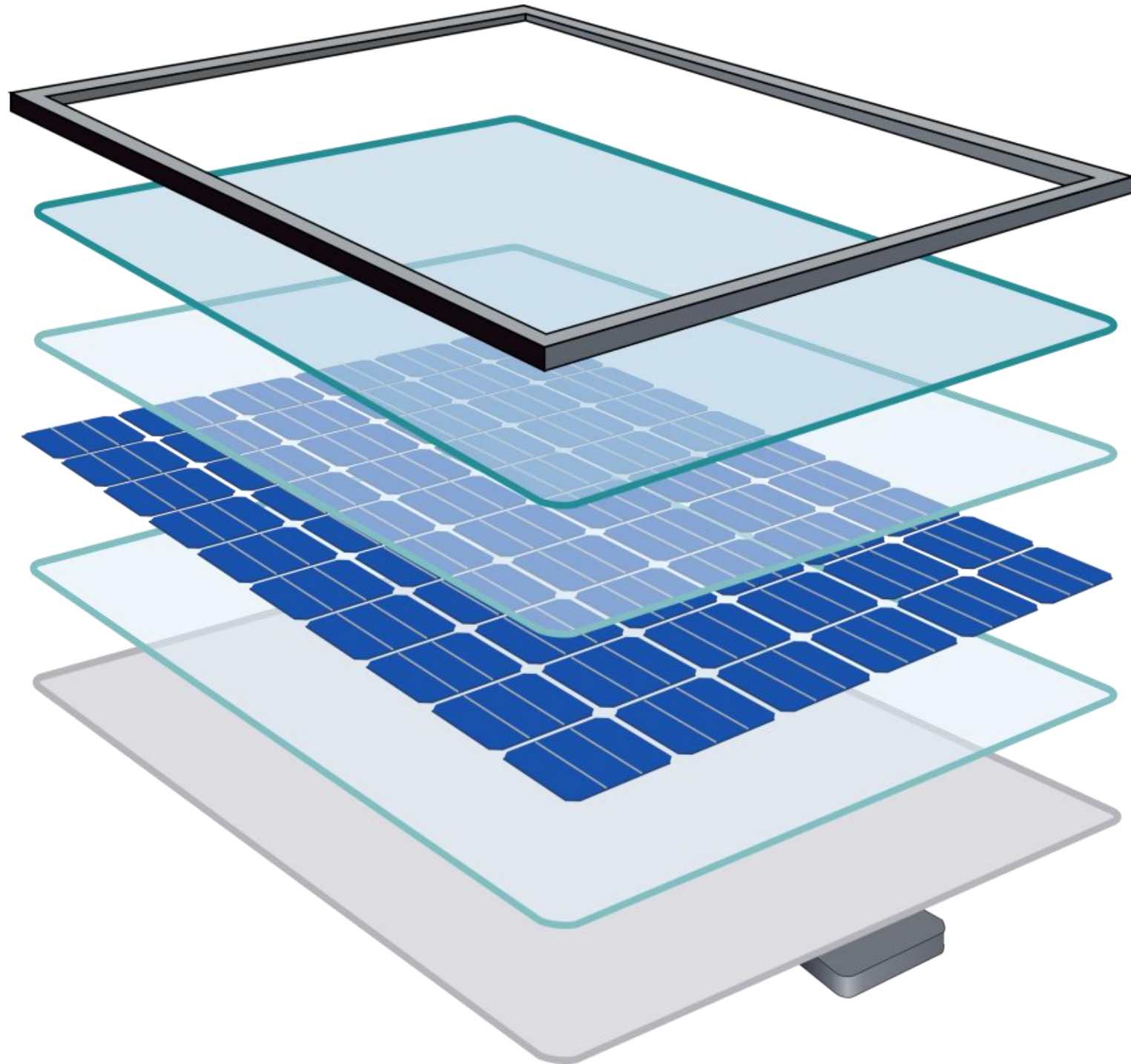


Du wafer à la cellule



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





Cadre en aluminium

Verre (2-3 mm)

Encapsulant (EVA)

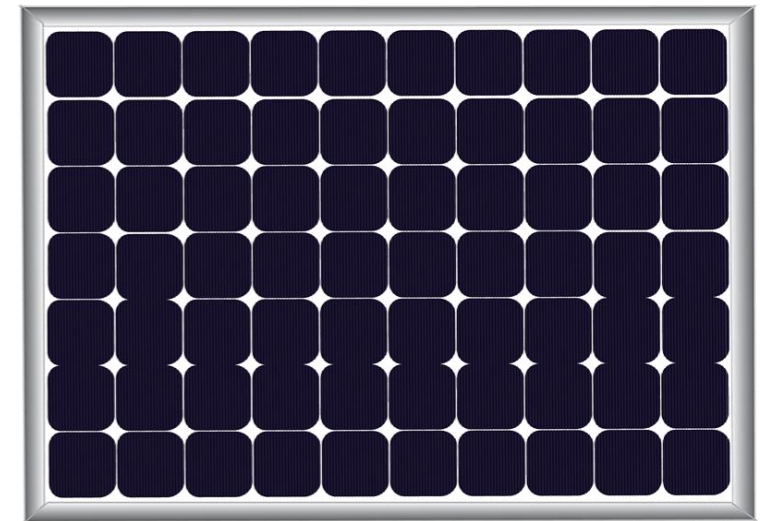
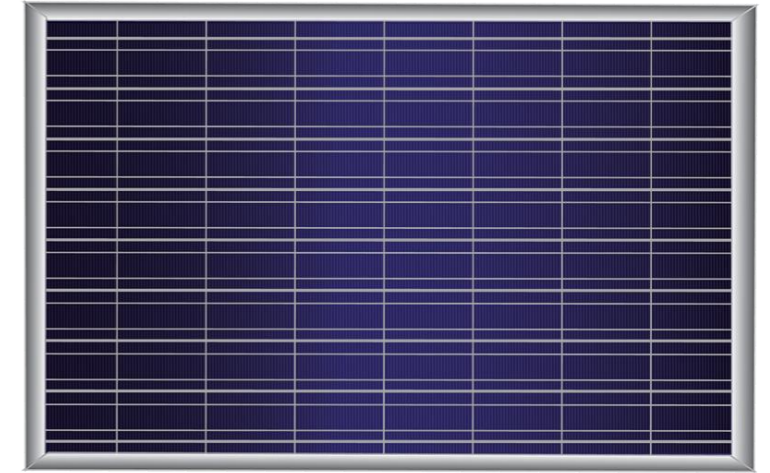
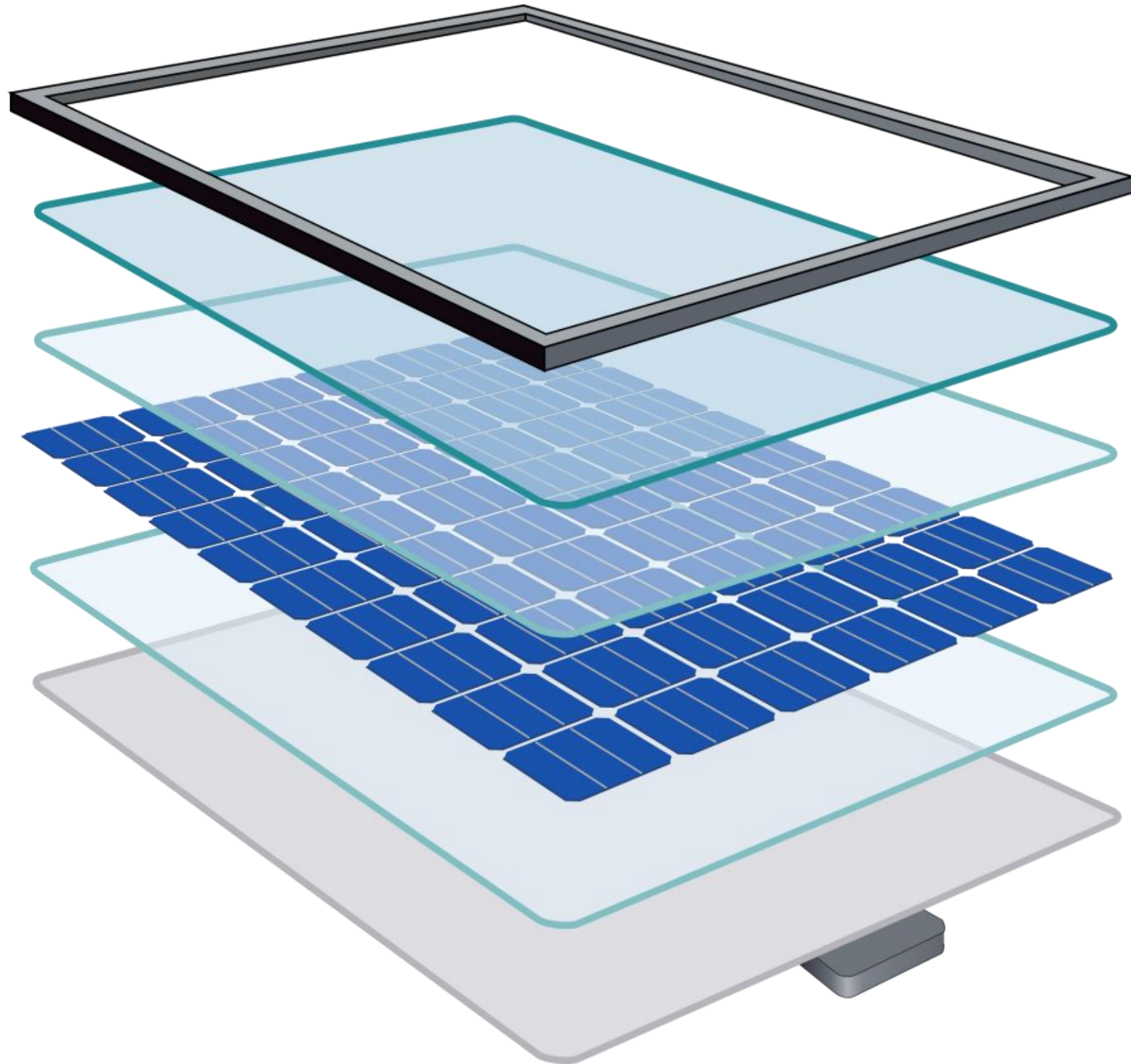
60 – 72 cellules connectées en série

Encapsulant (EVA)

Backsheet

Boîte de jonction

De la cellule au module



Domage

C'est ballot, les panneaux solaires n'aiment pas le chaud

Par Irène Inchauspé
12 octobre 2022 à 15h52

l'Opinion

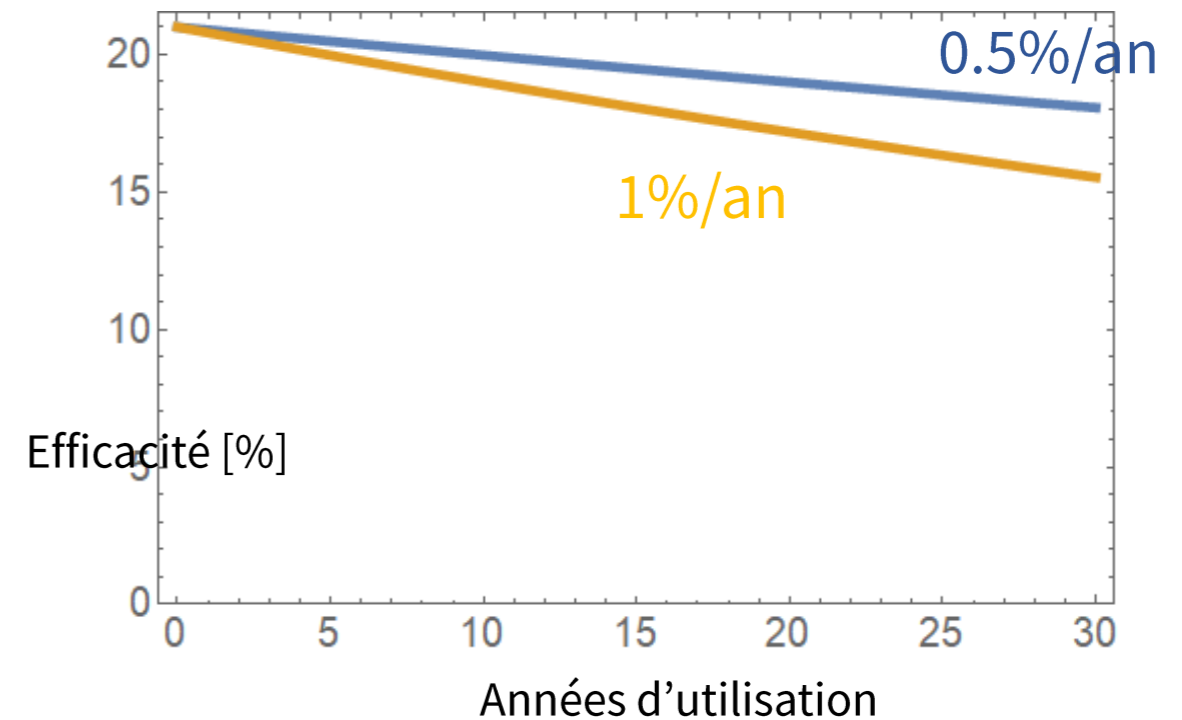
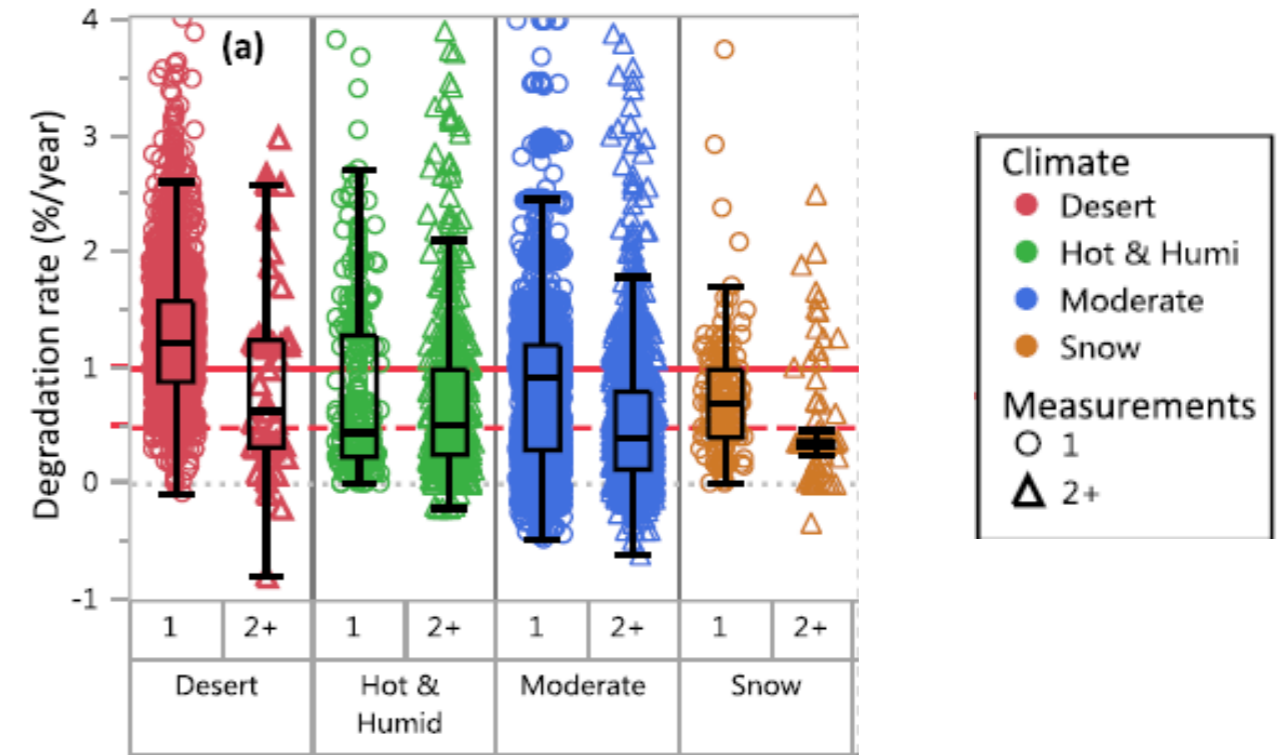
Ils fonctionnent bien jusqu'à 25 degrés et perdent en rendement au-delà

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.37 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42±2 °C

Conditions nominales
25°C ambiant
42°C module
20% de rendement

Canicule
35°C ambiant
62°C module
18,5% de rendement



I/ Le solaire photovoltaïque aujourd'hui

Rétrospective et état des lieux

II/ Du concept à la technologie

Principes et limites fondamentales

Panneau solaire : le making of

III/ Coûts économiques, coûts écologiques

IV/ Perspectives et défis à venir

Industrie du Terawatt

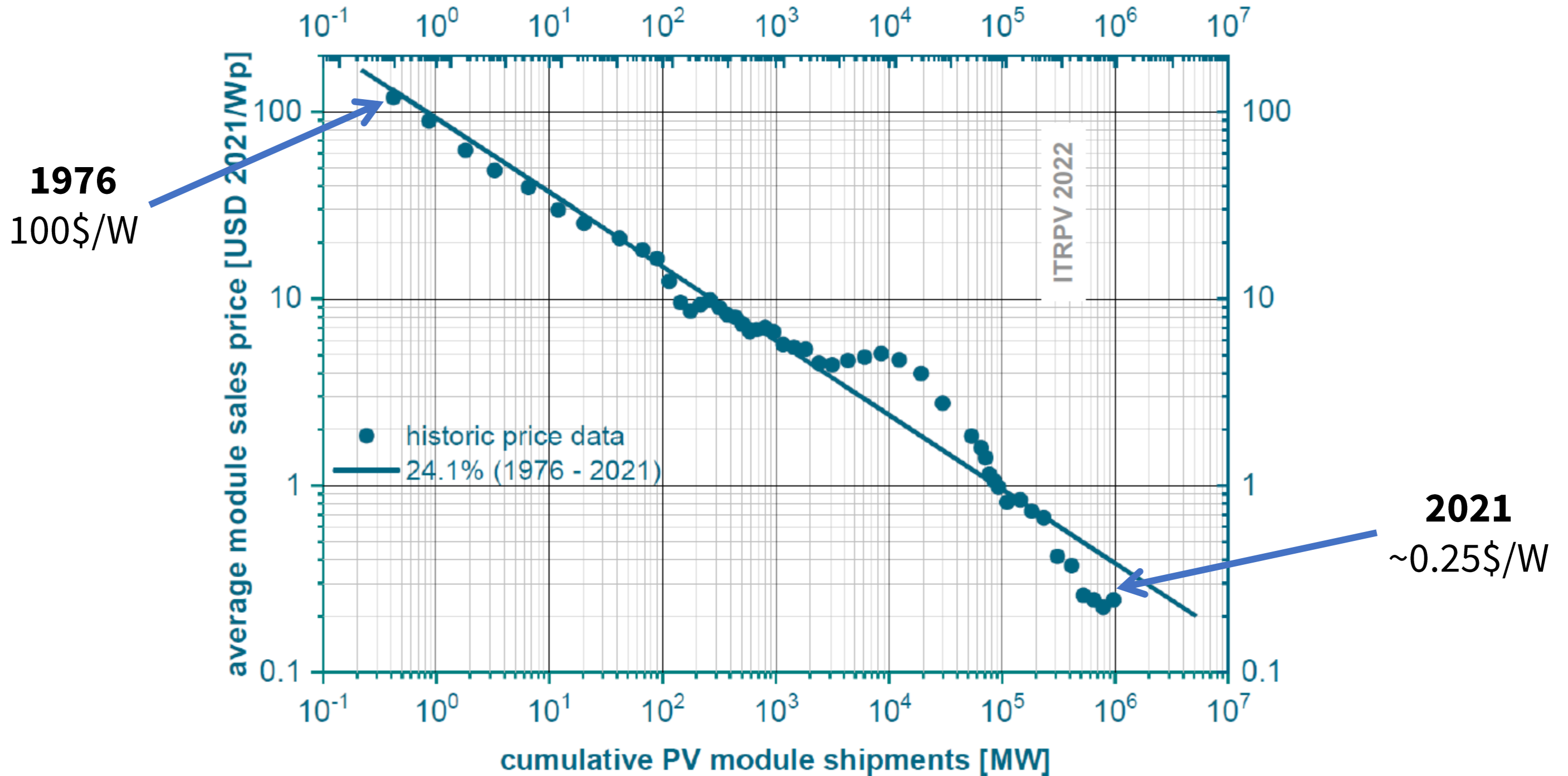
Dispositifs à haut rendement

Applications innovantes

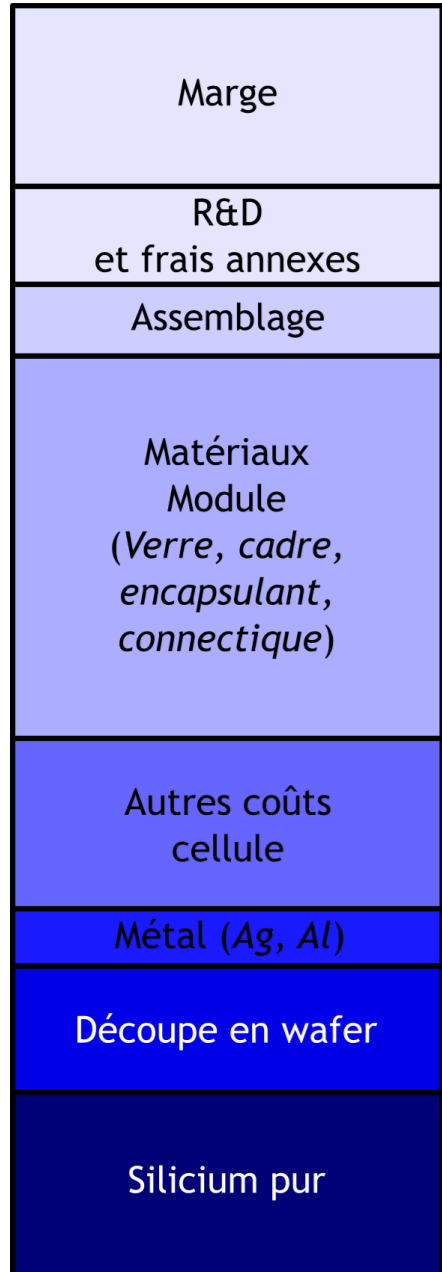
Intégration au réseau



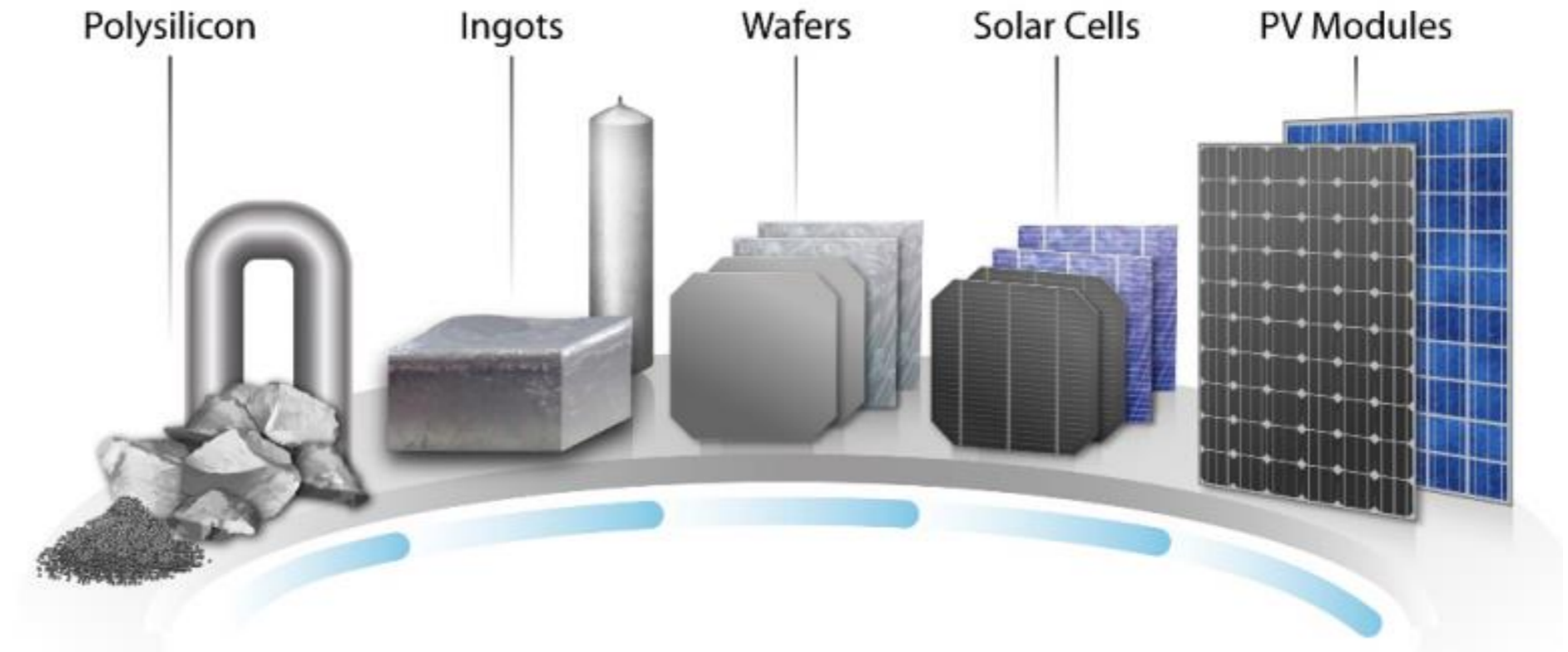
Evolutions des coûts (économiques) MODULE



Prix du module

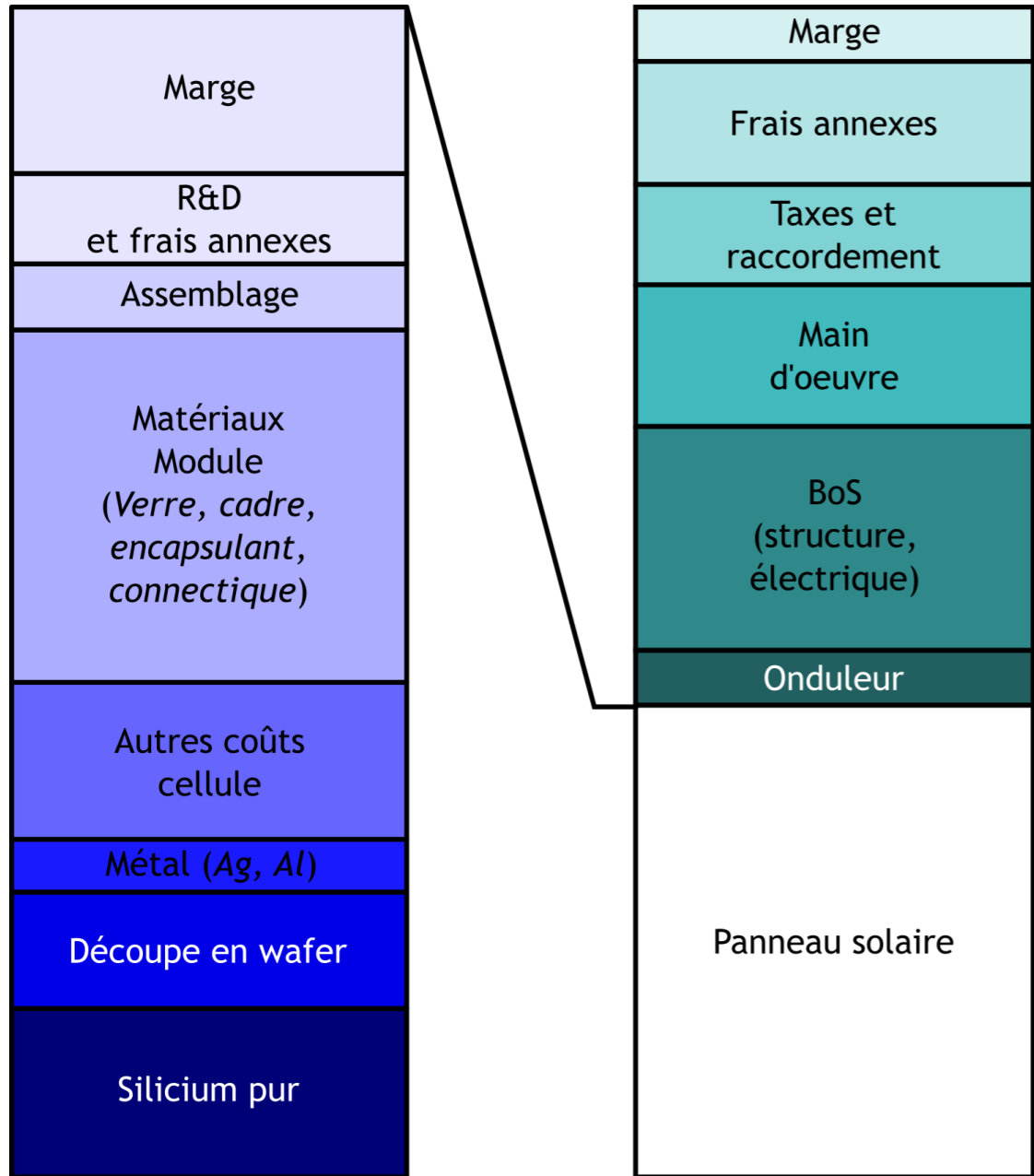


Prix des modules
0.3€/Wc



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

Prix de l'installation



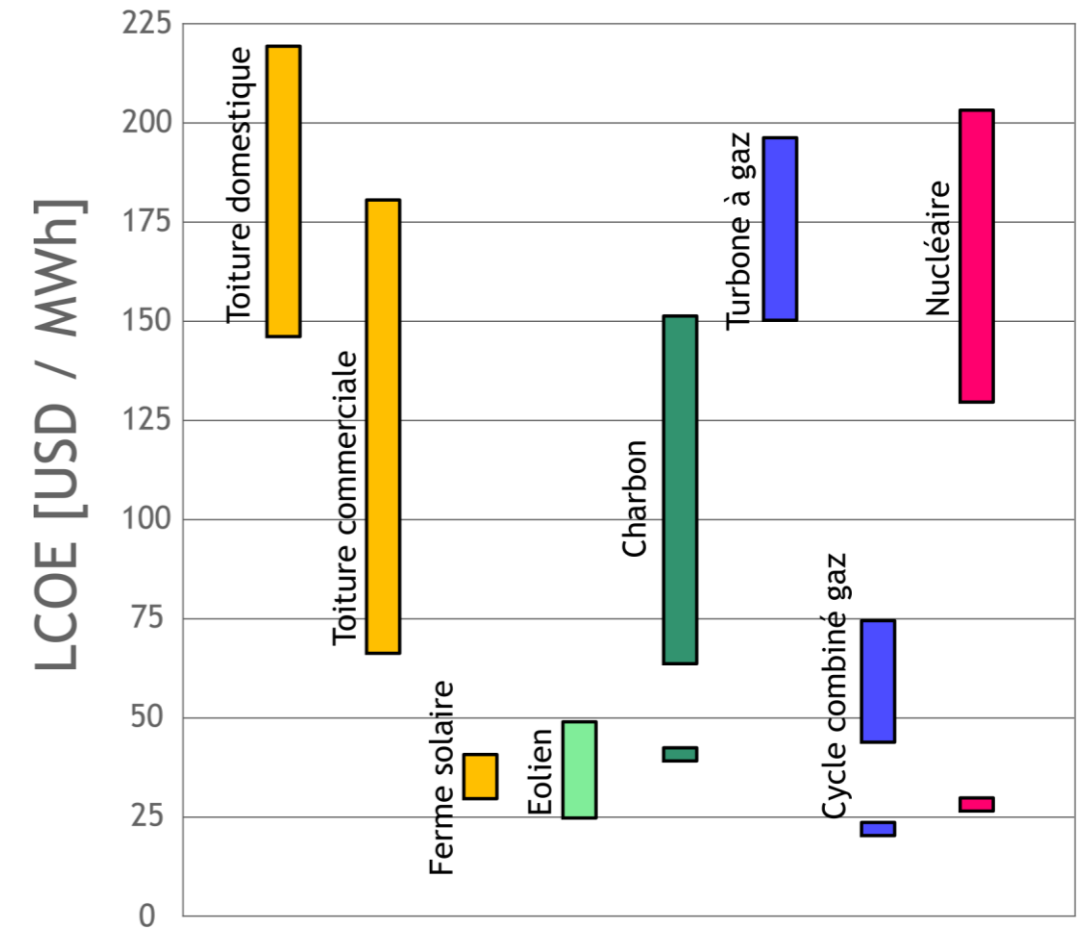
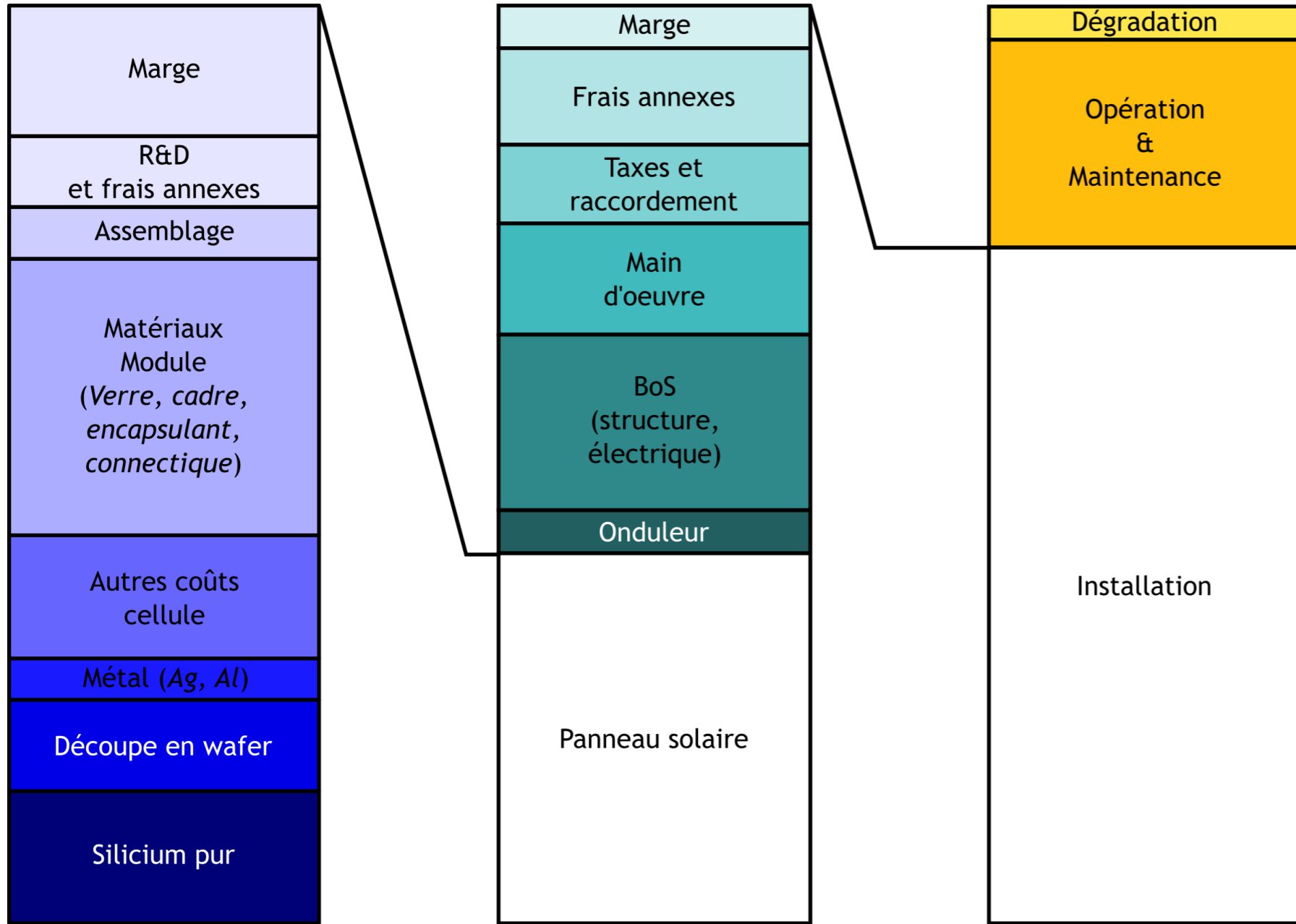
Prix des modules
0.3€/Wc

Prix installé
1€/Wc (ferme solaire)
1.5€/Wc (toit commercial)
2.5€/Wc (toit résidentiel)



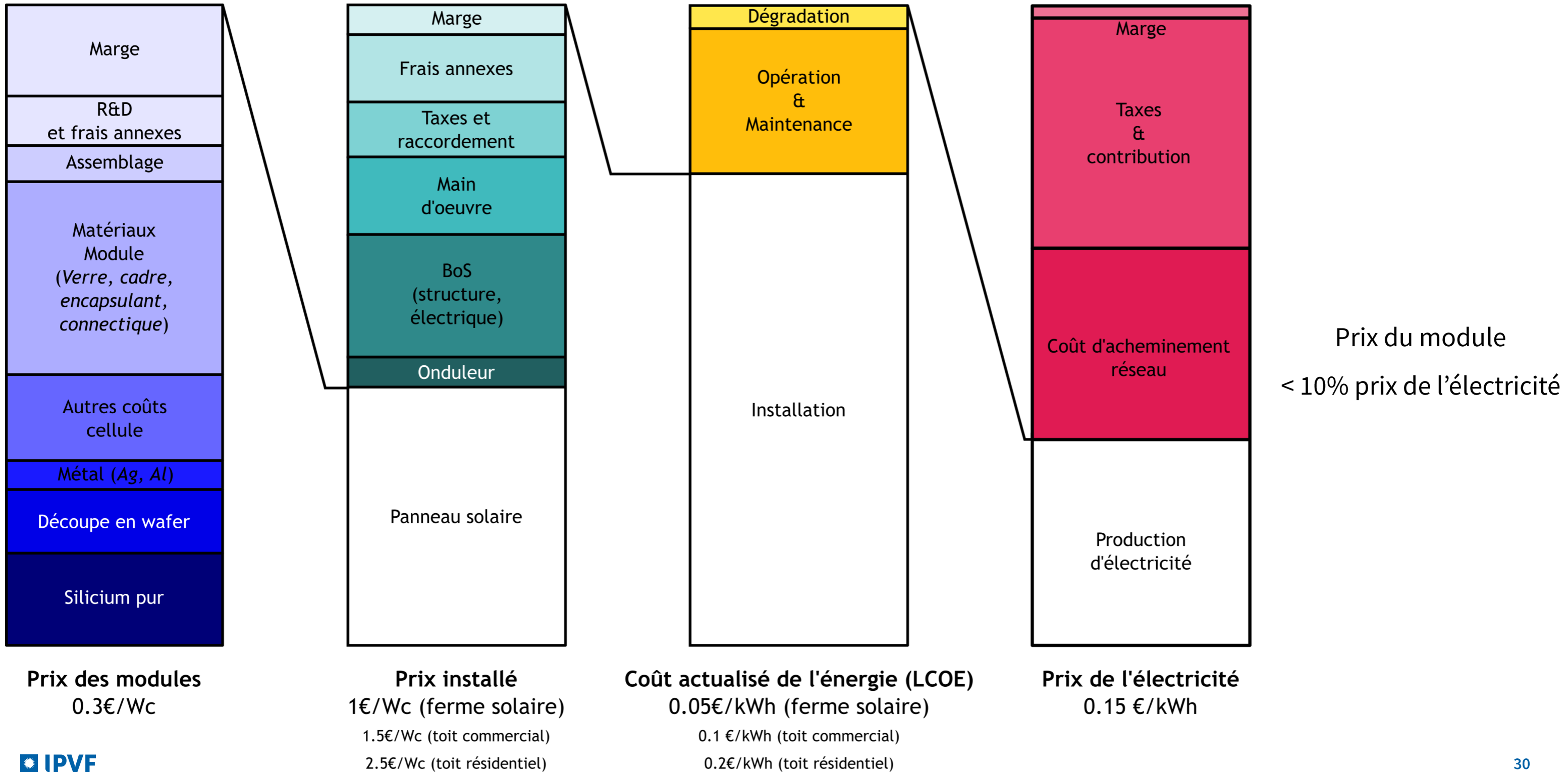
Ordre de grandeur :
1 hectare = 1 MWc = 1M€ = 1 GWh/an

Coût actualisé de l'énergie

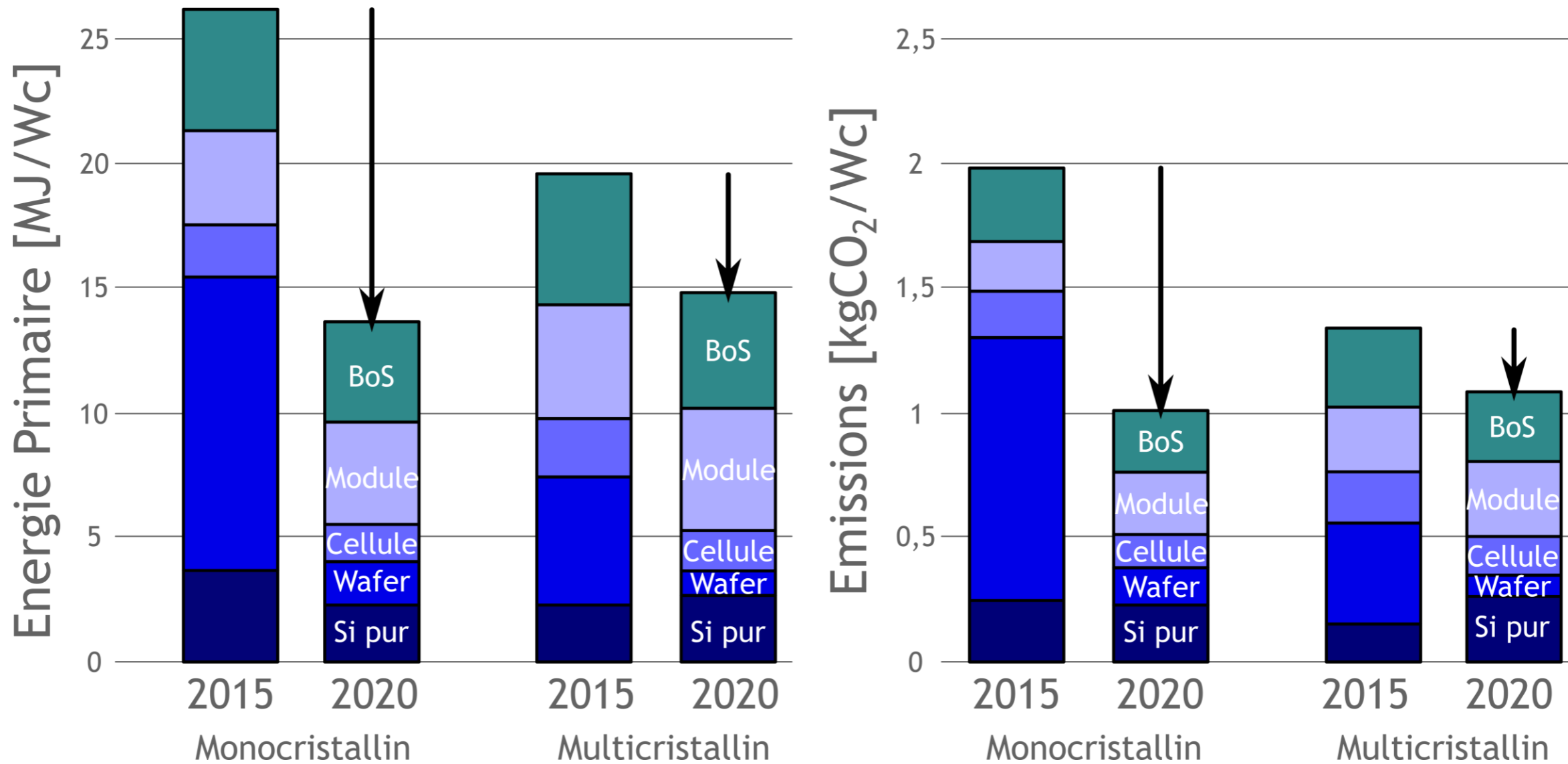


Limites de l'indicateur LCOE (installation marginale vs coût système)

Prix de l'électricité pour le consommateur



Evolutions des coûts (environnementaux)



Temps de retour énergétique (panneau + BOS) < 1 an (en France)

(Durée de vie d'un panneau > 25 ans)

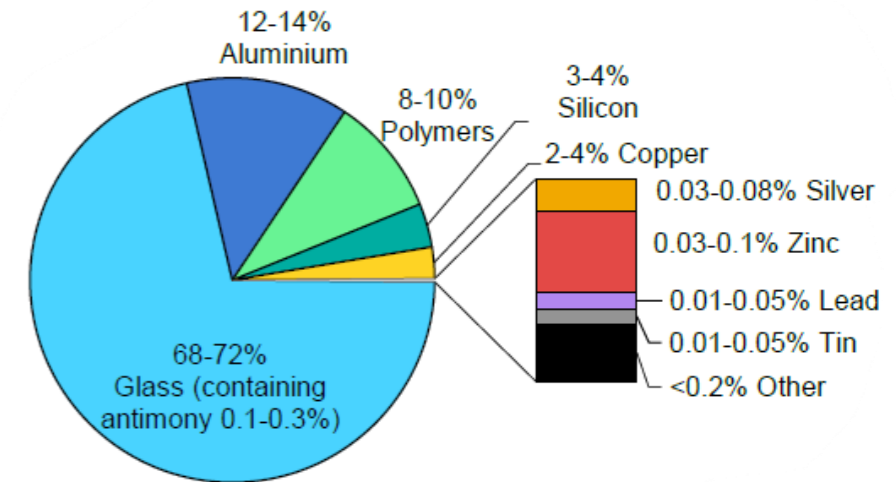
Liste de course pour un panneau silicium

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

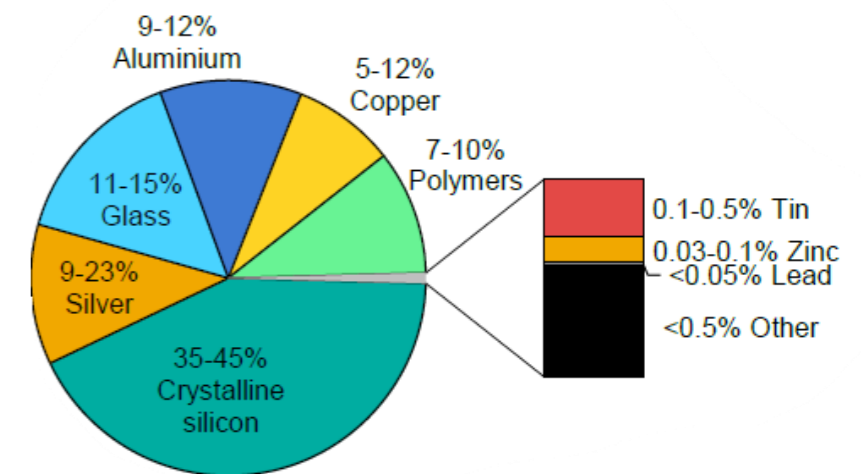
Hypothèses :

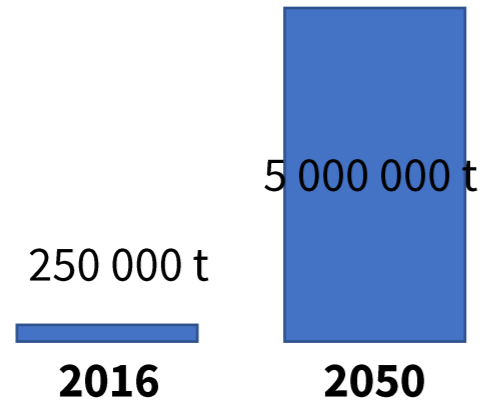
efficacité : 20%, ensoleillement 1700 kWh/m²/an, facteur de perf. 85%, Durée de vie 25 ans, dégradation -0.5%/an

c-Si – Weight-based



c-Si – Value-based





End of life management, IEA – IRENA, 2016



Europe's first solar panel recycling plant opens in France

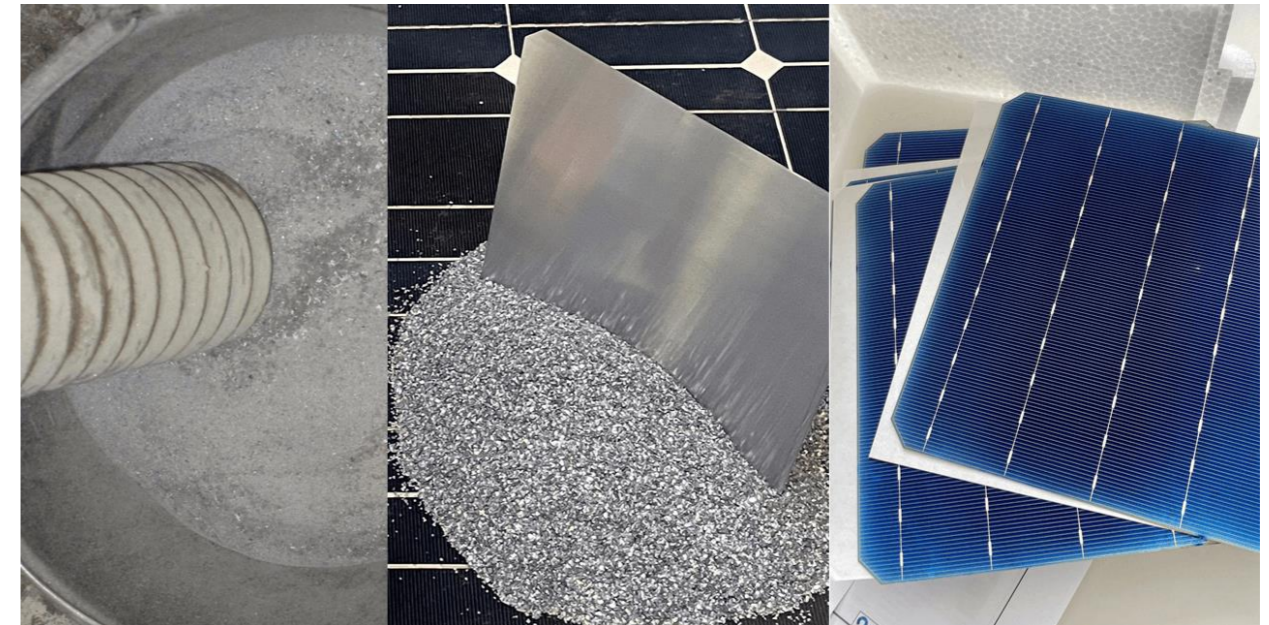
Geert De Clercq

3 MIN READ



“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



Press Release #1

PERC Solar Cells from 100 Percent Recycled Silicon

February 07, 2022

I/ Le solaire photovoltaïque aujourd'hui

Rétrospective et état des lieux

II/ Du concept à la technologie

Principes et limites fondamentales

Panneau solaire : le making of

III/ Coûts économiques, coûts écologiques

IV/ Perspectives et défis à venir

Industrie du Terawatt

Dispositifs à haut rendement

Applications innovantes

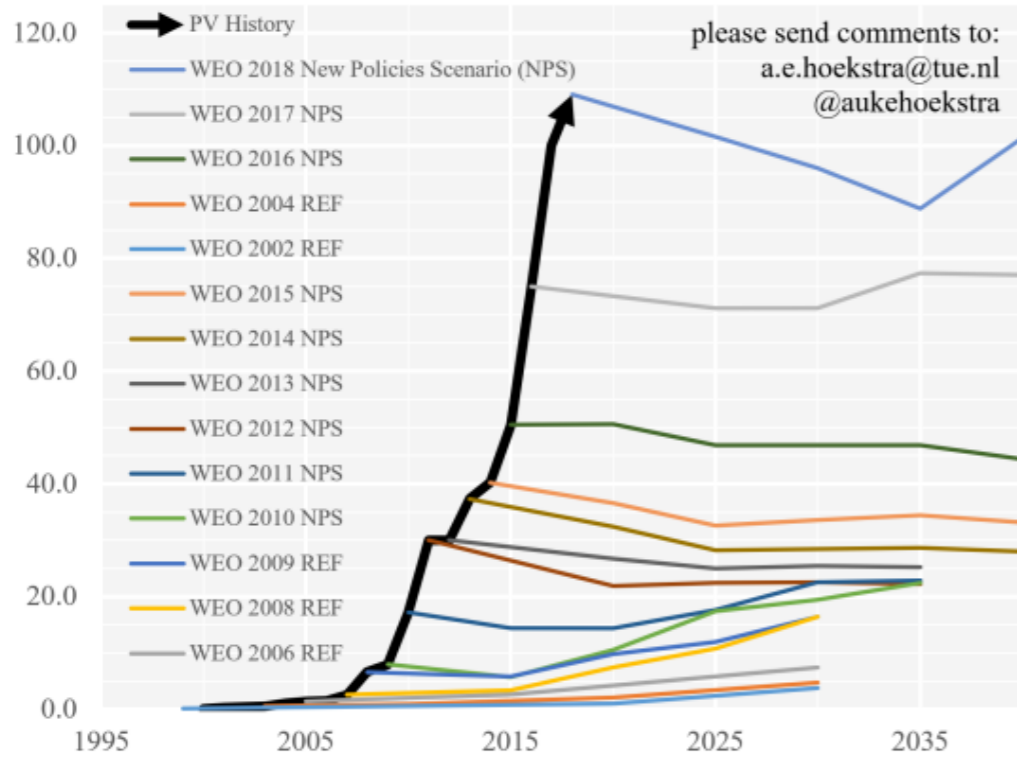
Intégration au réseau



Le solaire demain

Annual PV additions: historic data vs IEA WEO predictions

In GW of added capacity per year - source International Energy Agency - World Energy Outlook

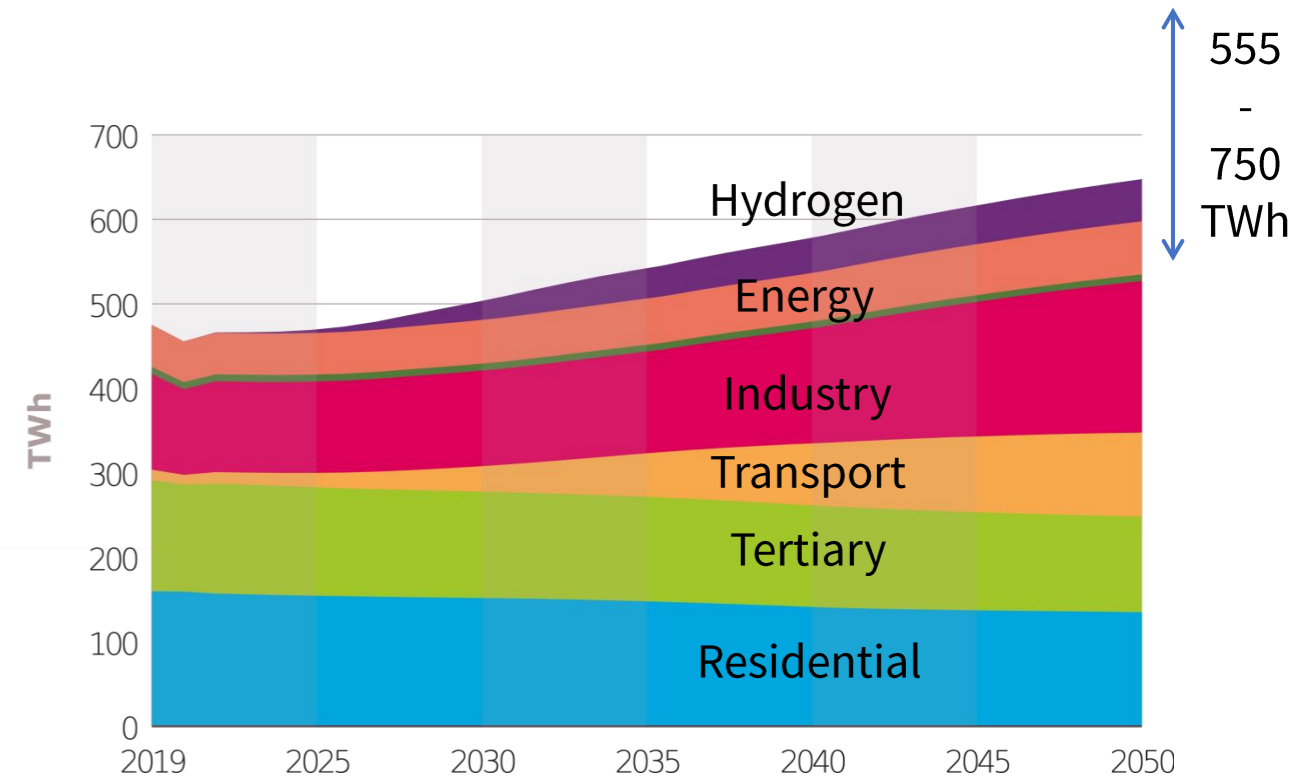
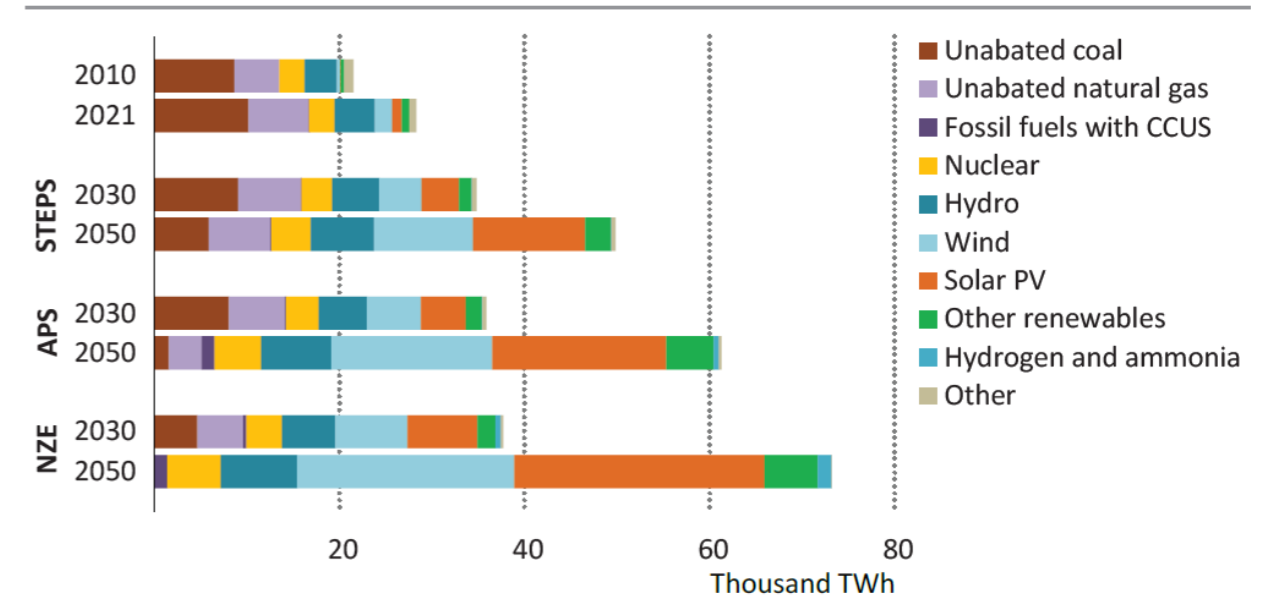


« La prévision est difficile surtout lorsqu'elle concerne l'avenir. »
(Niels Bohr, Pierre Dac)

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)

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



4 défis : une industrie du terawatt (1/4)

Augmenter les capacités de productions

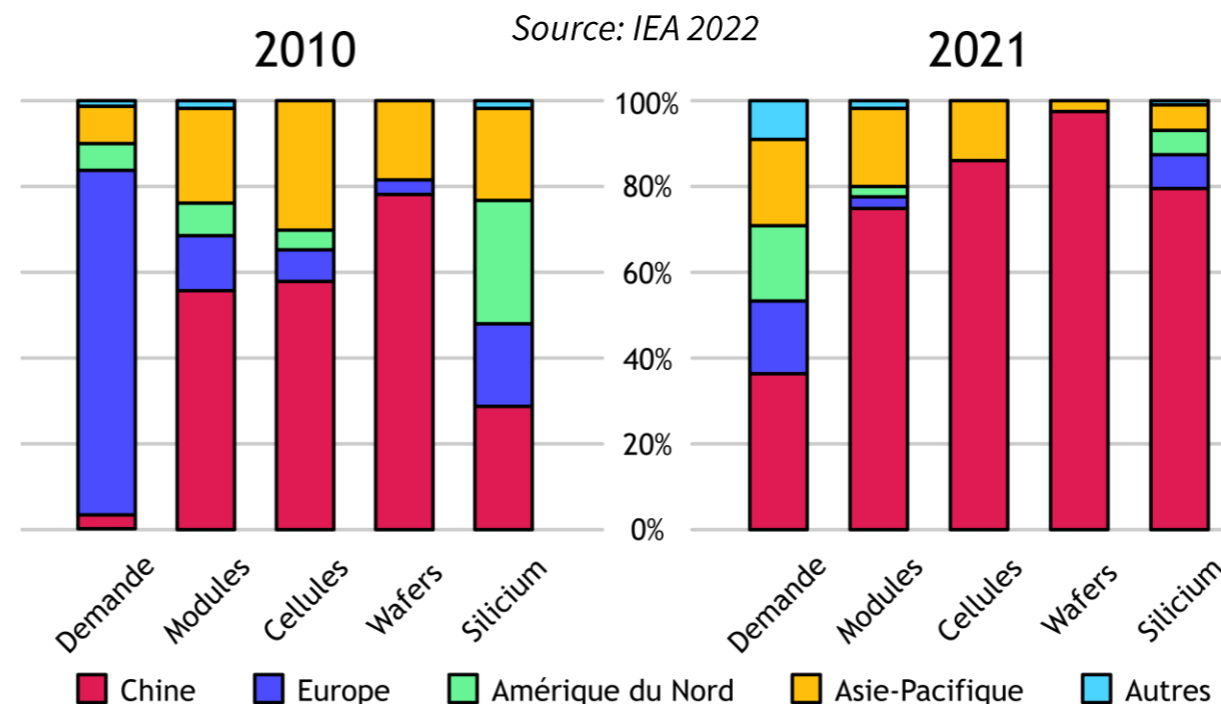
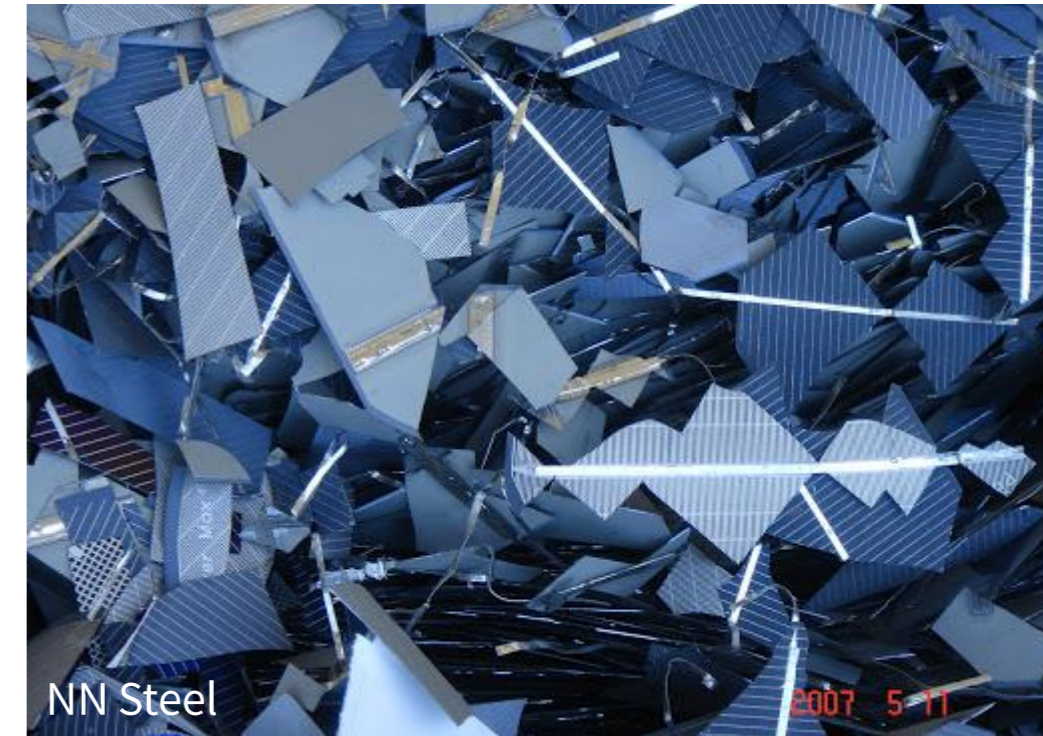
Prévoir la fin de vie dès la conception

Relocaliser la production

Souveraineté énergétique, économique & technologique

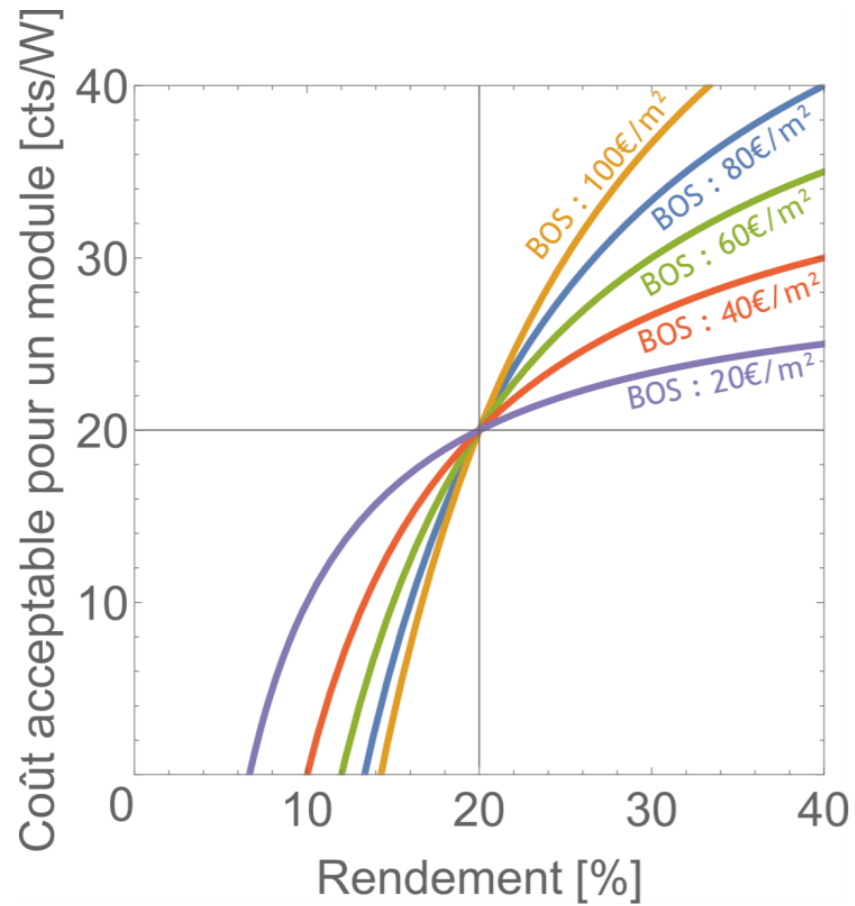
Conditions de production (social, environnemental)

Filière intégrée (installation, maintenance...)

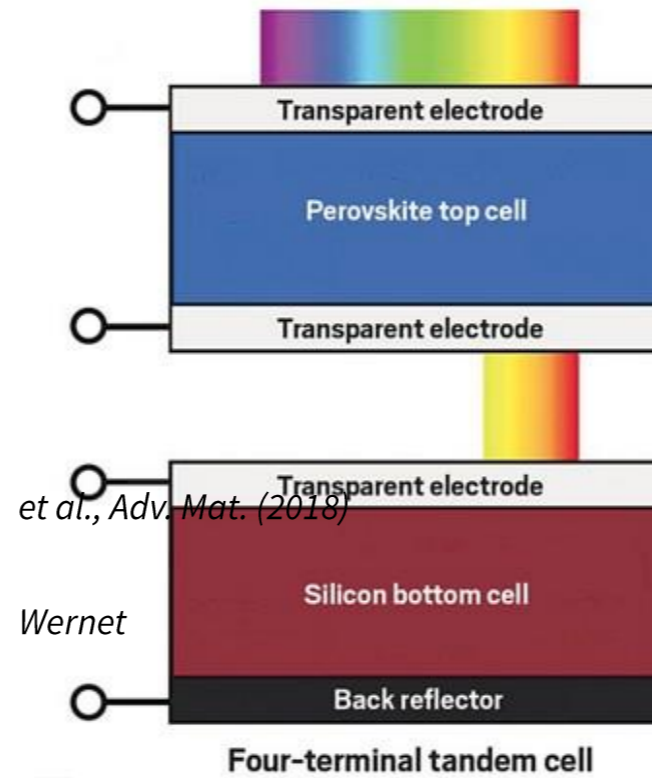


4 défis : viser des (très) hauts rendements (2/4)

Gagner en rendement pour
baisser les prix



Modifier l'architecture
des cellules

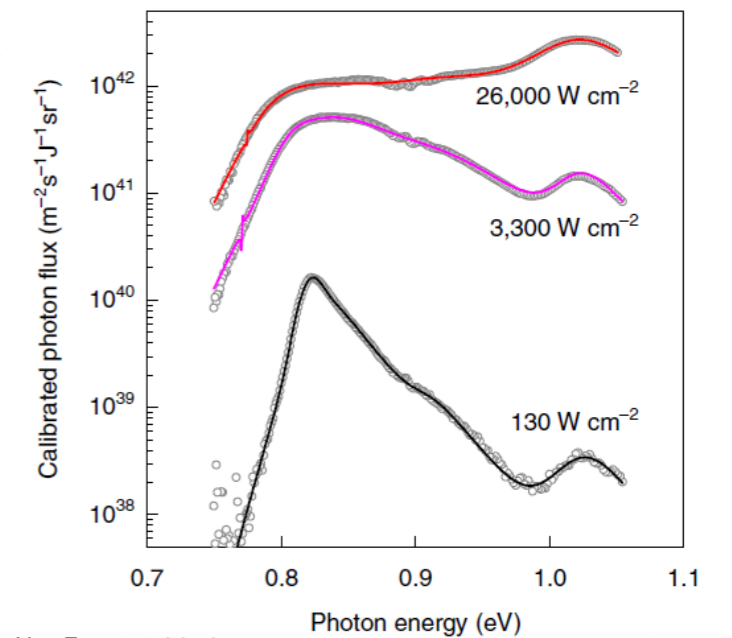


Concepts avancés

Jouer sur la lumière



Jouer sur les électrons

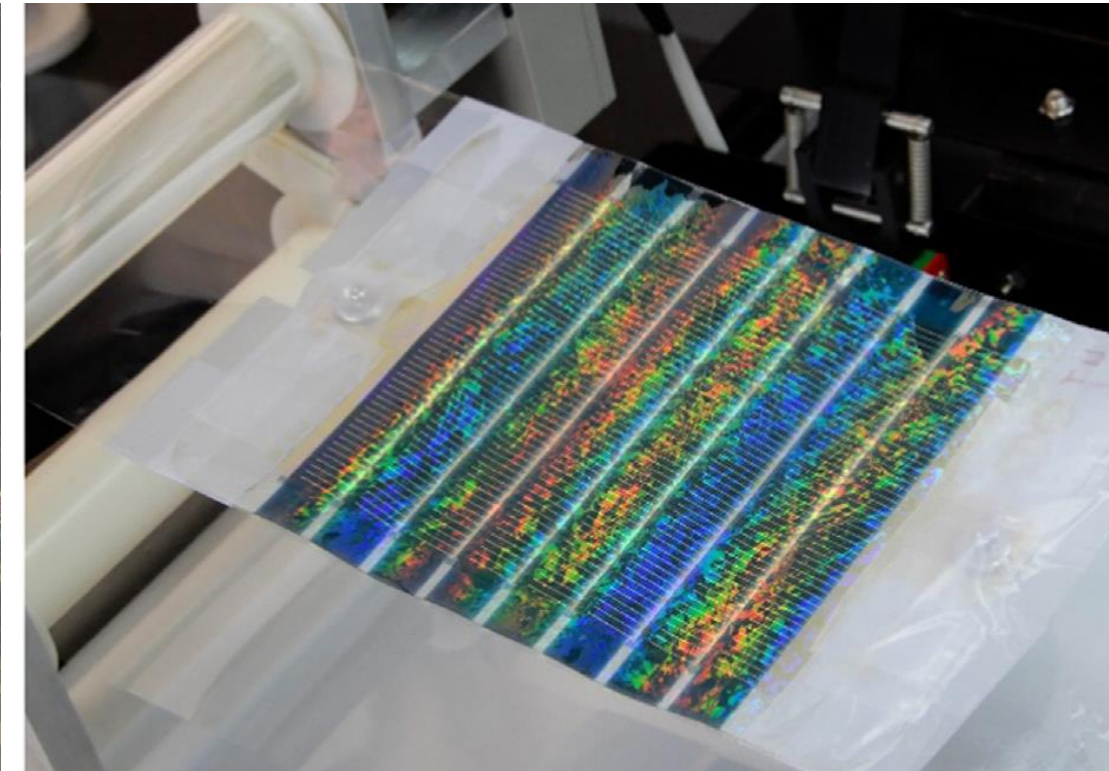
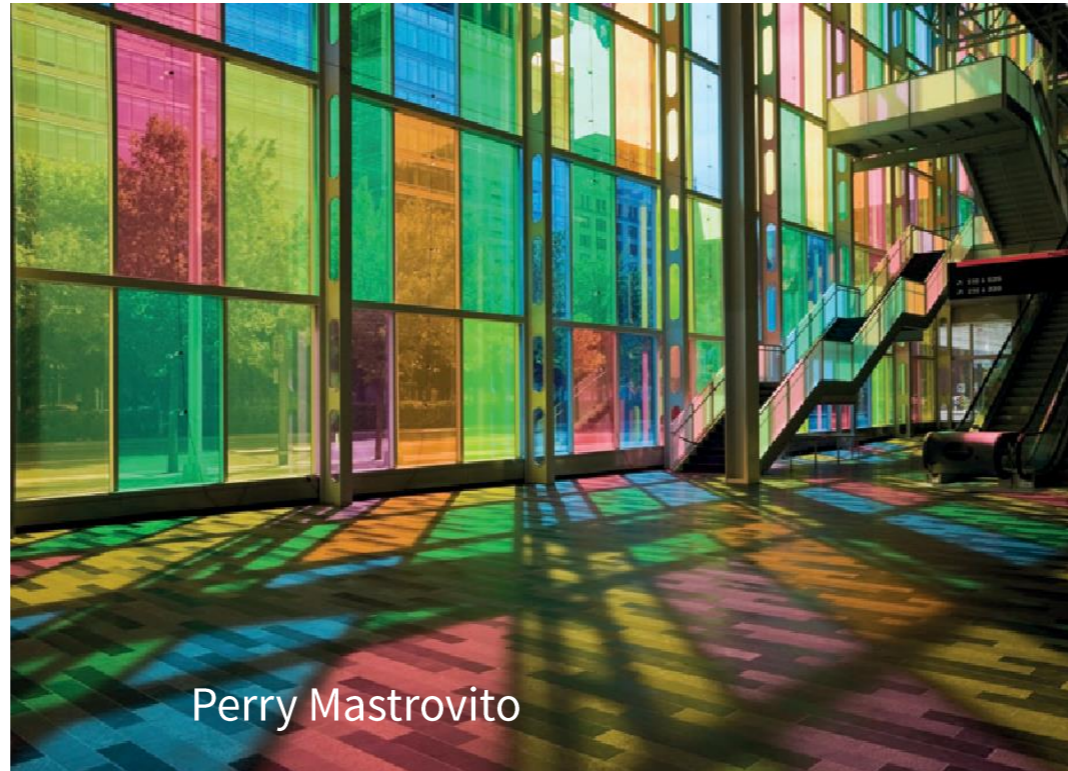


4 défis : développer des usages spécifiques (3/4)

Mechanical properties

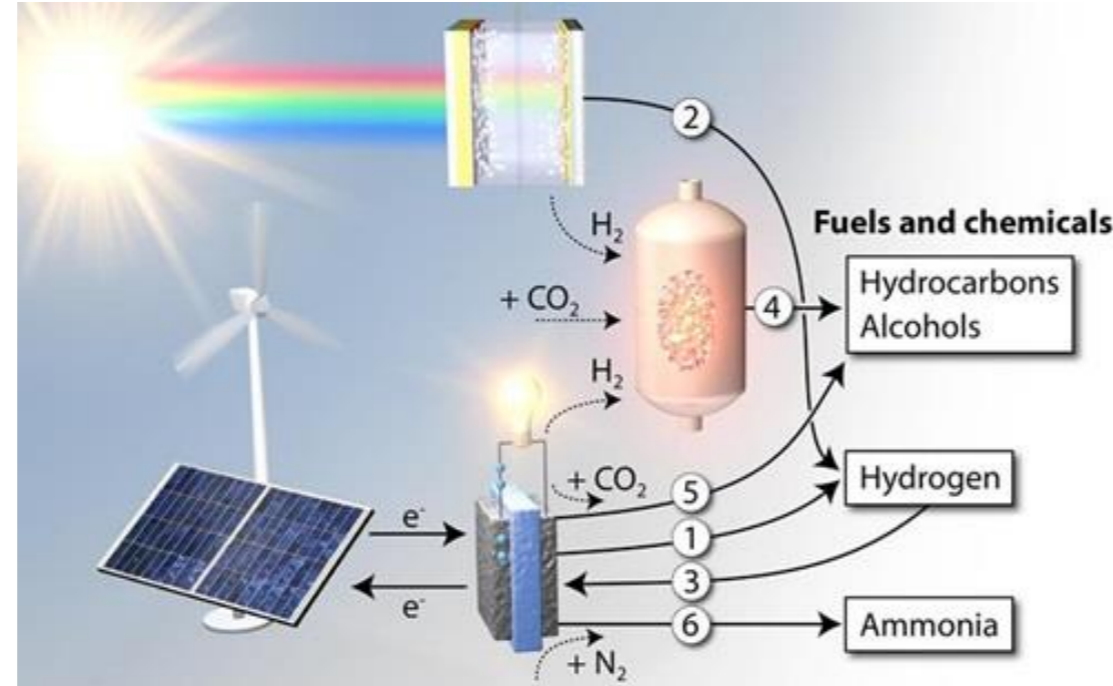


Optical properties



Energie multi-vecteurs

Solaire
↓
Chimie (H₂)



Solaire
↓
Thermique



Adapter usage et production



Une initiative CNRS + FedPV

<https://solairepv.fr/>

Le solaire photovoltaïque en France

réalité, potentiel et défis

Accueil Fiches Ressources

Solaire PV

Des chercheuses et des chercheurs du CNRS et de la Fédération PV répondent à toutes vos questions sur le solaire PV en France.

TÉLÉCHARGER LE GUIDE SOLAIRE PV
(version du 13 juin 2022)

TESTEZ VOS CONNAISSANCES !

AVANT-PROPOS QUI SOMMES NOUS ?

Cellule
Module

Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis

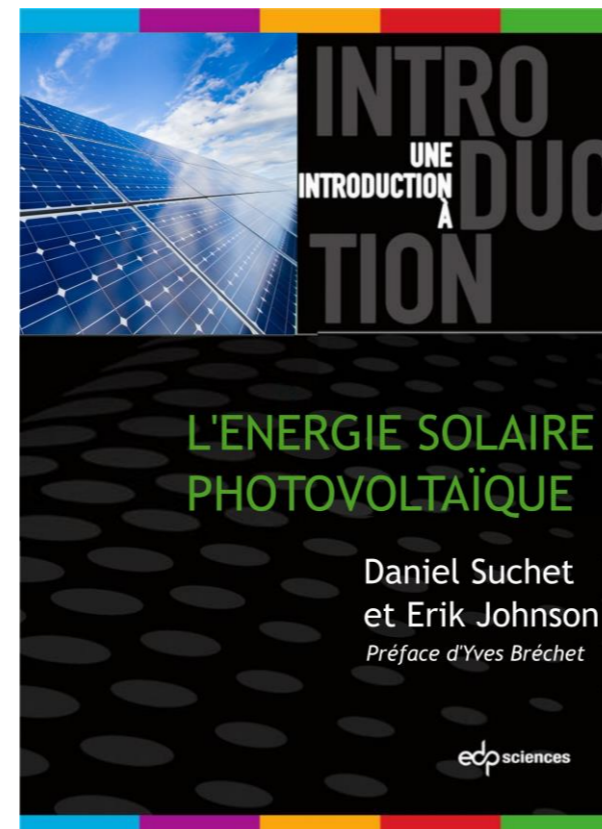
Des questions... ?

...et des réponses

préparées par des chercheurs et des chercheuses du CNRS et de la Fédération de recherche du Photovoltaïque

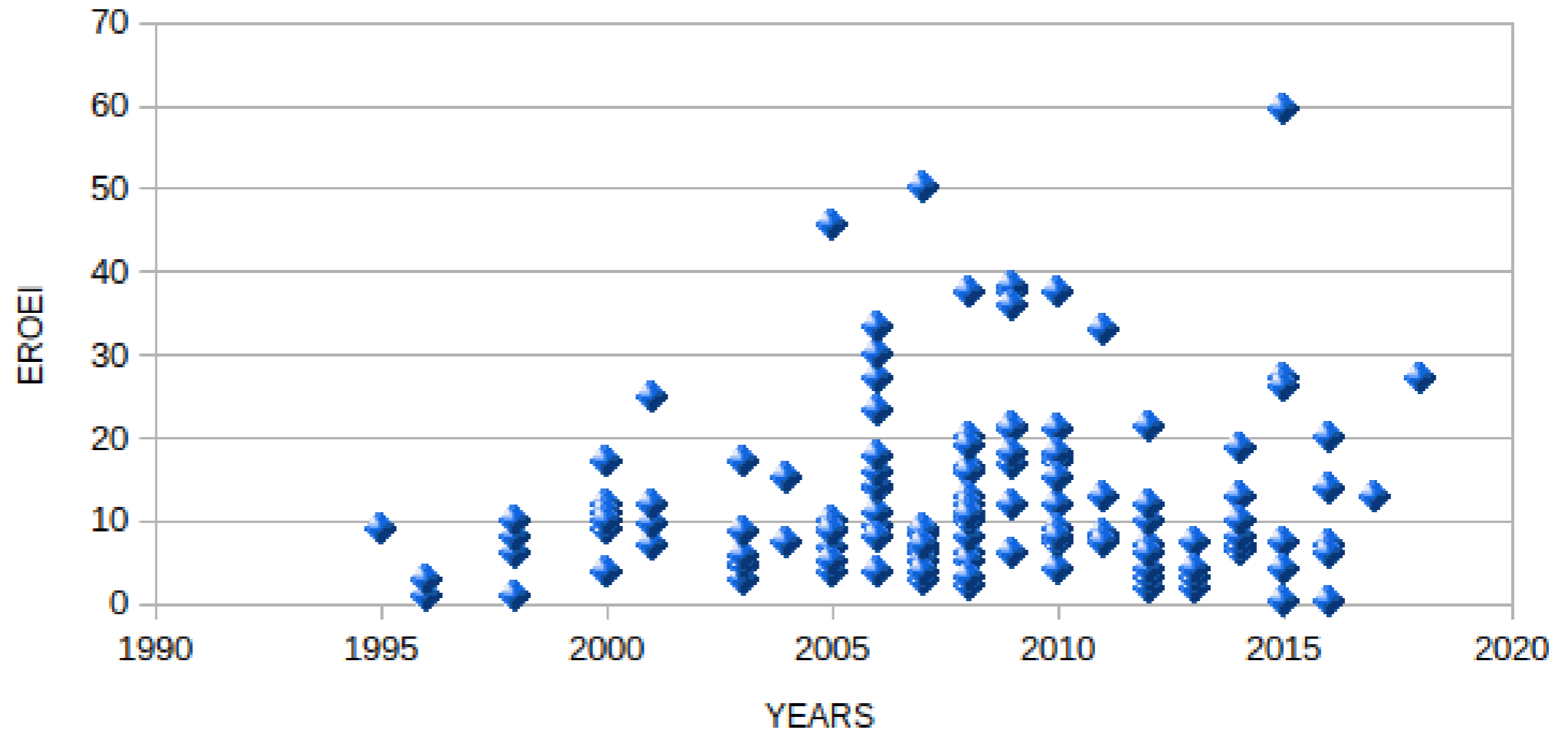
Version du 13/06/2022 Disponible sur : <https://solairepv.fr>

A paraître chez EDP Sciences (début 2023)



$$\text{Energy Return On Investement (EROI)} = \frac{\text{Energie totale produite par le dispositif}}{\text{Coût énergétique de la production du dispositif}}$$

EROEI OF PV FROM 1995 TO 2018.



Quel EROI pour le PV ?

Revue de la littérature
par Fatoumata Diallo
(stage de M2),
encadré par José Halloy (LIED) et DS

