

Energie solaire photovoltaïque des principes fondamentaux aux enjeux industriels

Daniel Suchet
daniel.suchet@polytechnique.edu

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 photovoltaïque (PV) en France.

TÉLÉCHARGER LE GUIDE SOLAIRE PV
(version du 14 septembre 2023)

TESTEZ VOS CONNAISSANCES !

AVANT-PROPOS ?

QUI SOMMES NOUS ?



Version V3 provisoire du 14 juin 2025

Des questions... ?

...et des réponses

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

Troisième édition, mise à jour et enrichie
Version du 19/06/2025 Librement disponible sur <https://solairepv.fr>

9. QUELS SONT LES INGRÉDIENTS D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE (1/2) ?



En résumé

Un panneau PV requiert de nombreux éléments. Il faut à la fois des matériaux fonctionnels (Si, Ag...) qui participent directement à la conversion d'énergie ; et des matériaux de structure liés au module (Al, verre, plastiques...) et à l'installation (acier, béton...). Les matériaux fonctionnels représentent 50 % du coût, mais moins de 5 % de la masse.

Pour aller plus loin

Les quantités exactes de matière dépendent du type d'installation (au sol, en toiture, flottant...) et du périmètre considéré (par unité de surface, par watt installé ou par kWh produit). On donne ici des ordres de grandeur [1-5] pour des panneaux silicium installés au sol, sans inclure l'électronique de raccordement.

Matériau	Usage	Rôle	Poids en grammes		
			par m ²	par W efficacité : 20 %	par kWh ensoleillement 1700 kWh/m ² /an facteur de perf. 85 % 25 ans, -0,5 %/an
Silicium	Cellule	Absorbeur	600	3	0,1
Gallium ou Bore	Cellule	Dopant	0,0002	0,000001	0,000000003
Argent	Cellule	Contact	4	0,02	0,0006
Aluminium	Module (+ cellule)	Cadre (+ contact)	1600	8	0,24
Plastique	Module	Encapsulant + support arrière	1700	8,5	0,25
Verre	Module	Face avant	8000	40	1,2
Cuivre	Module	Connexion	900	4,5	0,14
Béton	Installation (sol)	Fondation	12000	60	1,8
Acier	Installation (sol)	Rack	14000	70	2,1

- Sources
1. European Commission, Joint Research Centre, S. Carrara et al., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, 2020. <https://doi.org/10.2760/160859>
 2. R. Frischknecht et al., Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, IEA-PVPS, 2020
 3. J. Jean et al., Pathways for solar photovoltaics, Energy Environ. Sci., 2015, IEA-PVPS, 2020 <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>
 4. E. Genies et al., Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics, Renewable and Sustainable Energy Reviews 113, 110589, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110589>
 5. D. Suchet & E. Johnson, Une introduction à l'énergie solaire photovoltaïque, EDP Sciences Ed., 2023.

Travail académique, collectif et bénévole,

sous la direction de Stéphane Collin (C2N) & Jean François Guillemoles (IPVF)

46 fiches format web ou livret, licence creative common

Prix Lumières Arnulf Françon de la Société Française d'Optique en 2023

V3 en ligne depuis hier !



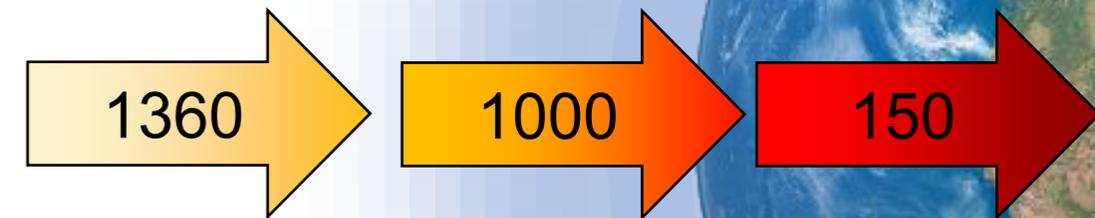
Prix Lumières Arnulf-Françon 2023

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)

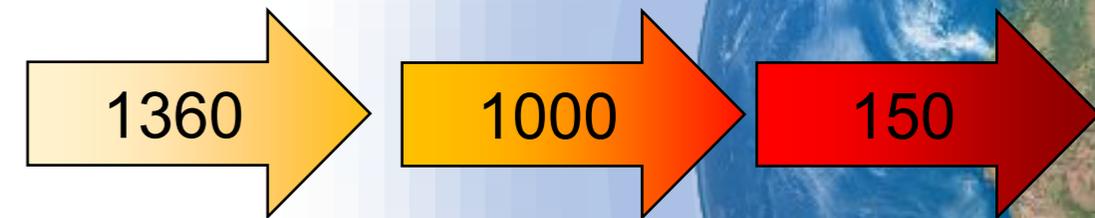
150 W/m² en moyenne en
France
*(Rotation terrestre : $\cos(\text{lattitude}) / \pi$
Météo : $\sim 2/3$)*



Pourquoi l'énergie solaire ?

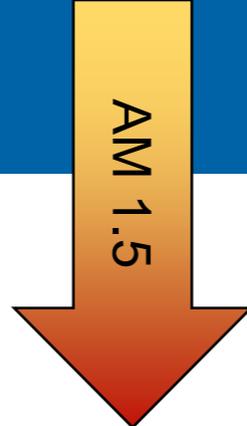
Potentiel solaire annuel
(terres émergées, avec météo)
23 000 TWy

1 an conso primaire mondiale
18 TWy = 600 EJ = 15 Gtep



Convertir l'énergie solaire...

Eclairement direct
 $G_{\max} = 1000 \text{ W/m}^2$



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



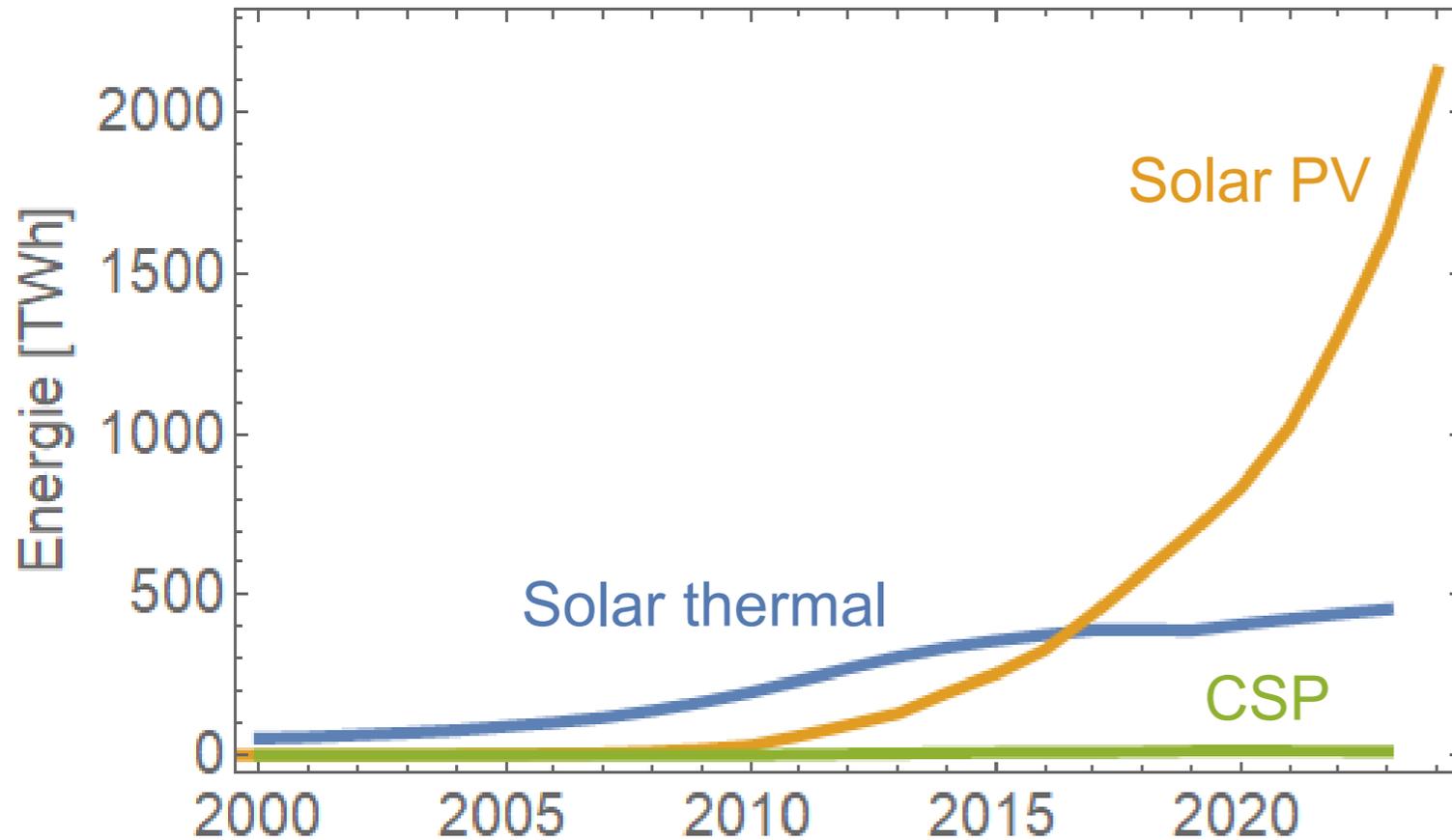
... en énergie chimique
Photo-synthèse
Efficacité 0.1 - 1%

... en énergie thermique
Solaire thermique
Efficacité 80%

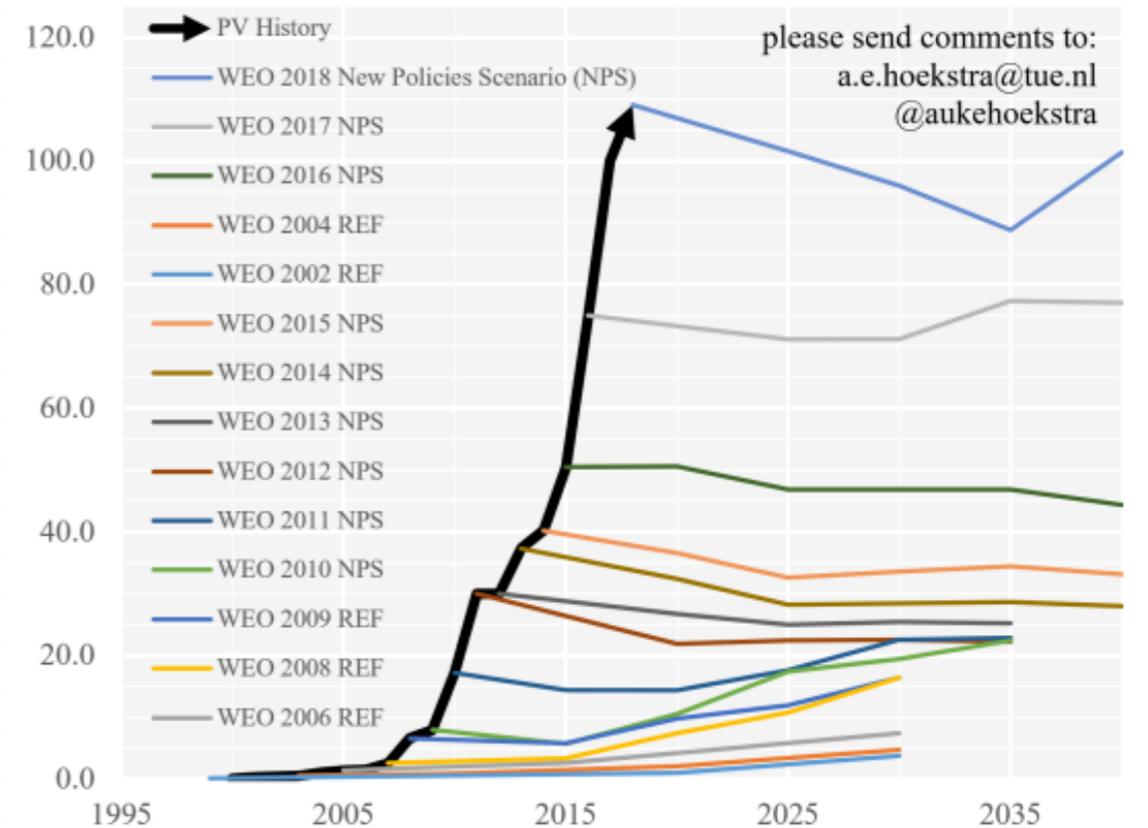
... en chaleur, puis en électricité
Solaire à concentration
Efficacité 20%

... directement en électricité
Solaire photovoltaïque
Efficacité 20%

Solaire photovoltaïque : conversion **directe** de la lumière en électricité.



Annual PV additions: historic data vs IEA WEO predictions
In GW of added capacity per year - source International Energy Agency - World Energy Outlook



Dynamique spectaculaire du solaire photovoltaïque

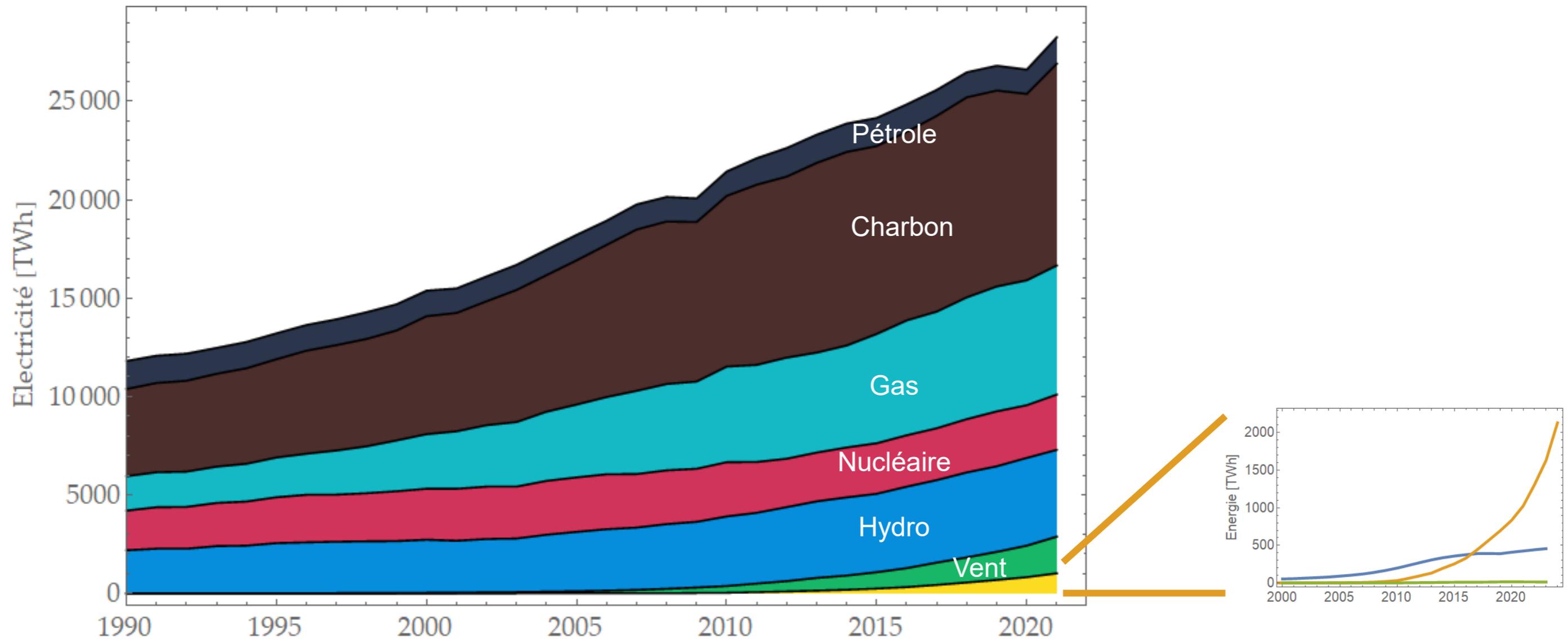
Techniques: modulaire, simple, sans carburant ni pièces mobiles, mature

Economique: *dans les bonnes conditions*, "électricité la moins chère de l'histoire" (IEA)

Une dynamique solaire à mettre en perspective !

2200 TWh produits en 2024 !

~ 7% de l'électricité produite dans le monde

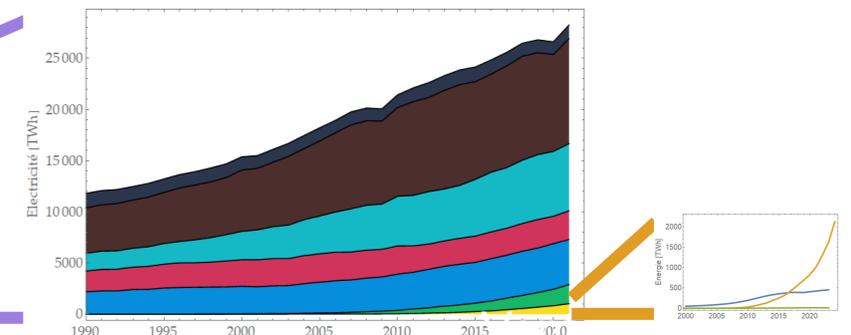
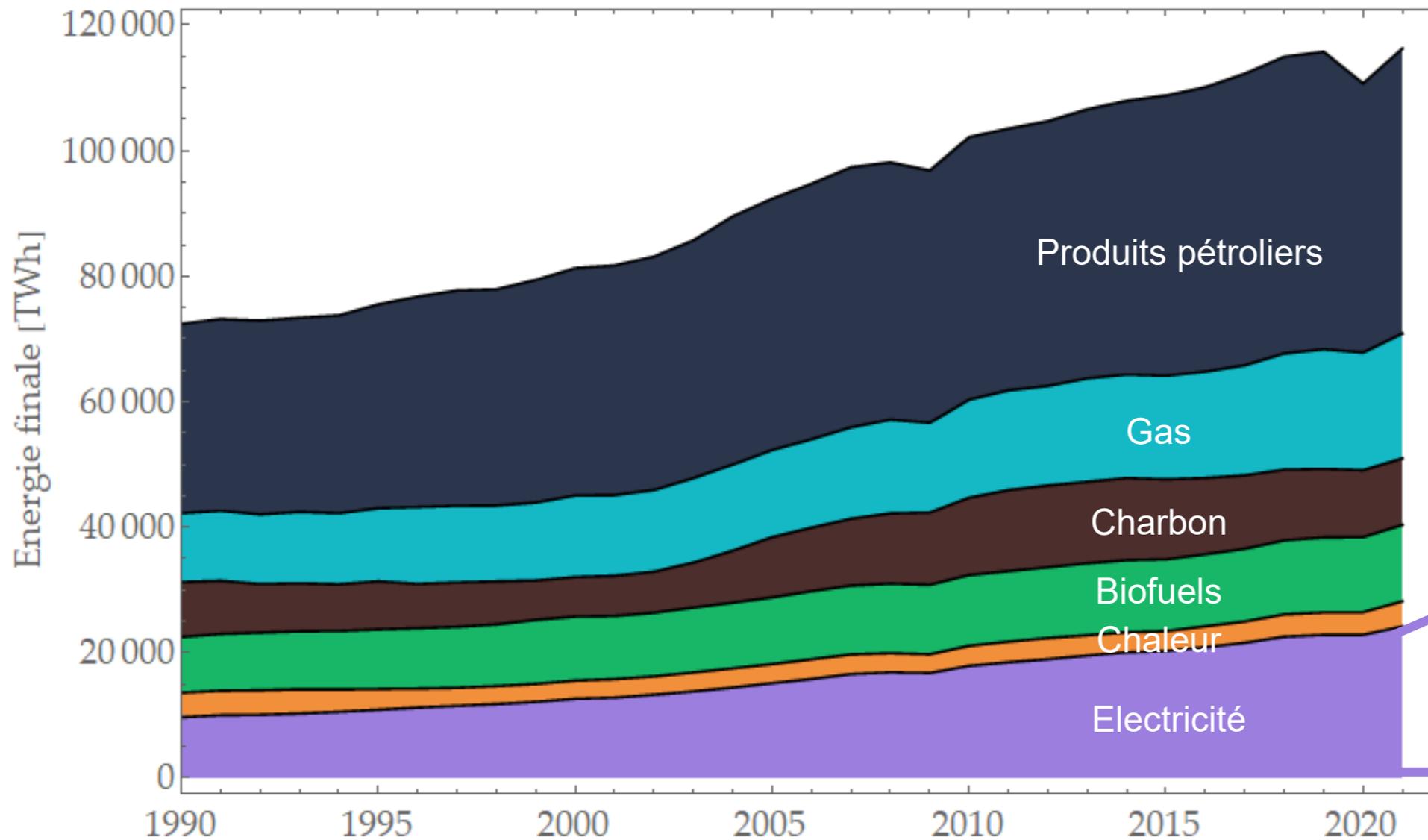


La route est encore très longue !

2200 TWh produits en 2024 !

~ 7% de l'électricité produite dans le monde

~2% de l'énergie consommée dans le monde



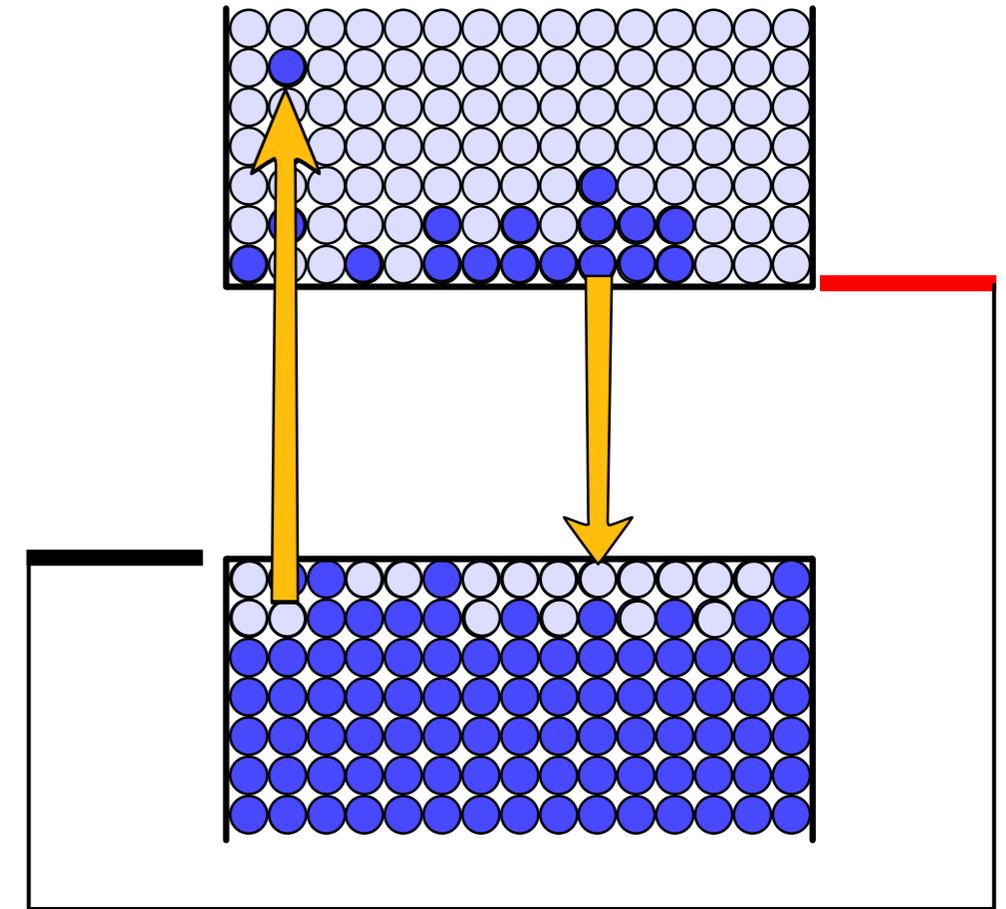
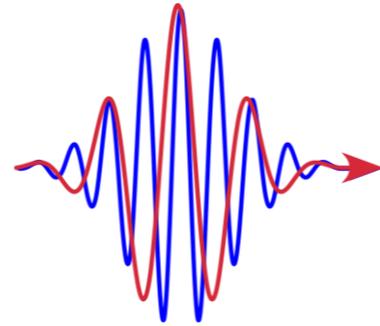
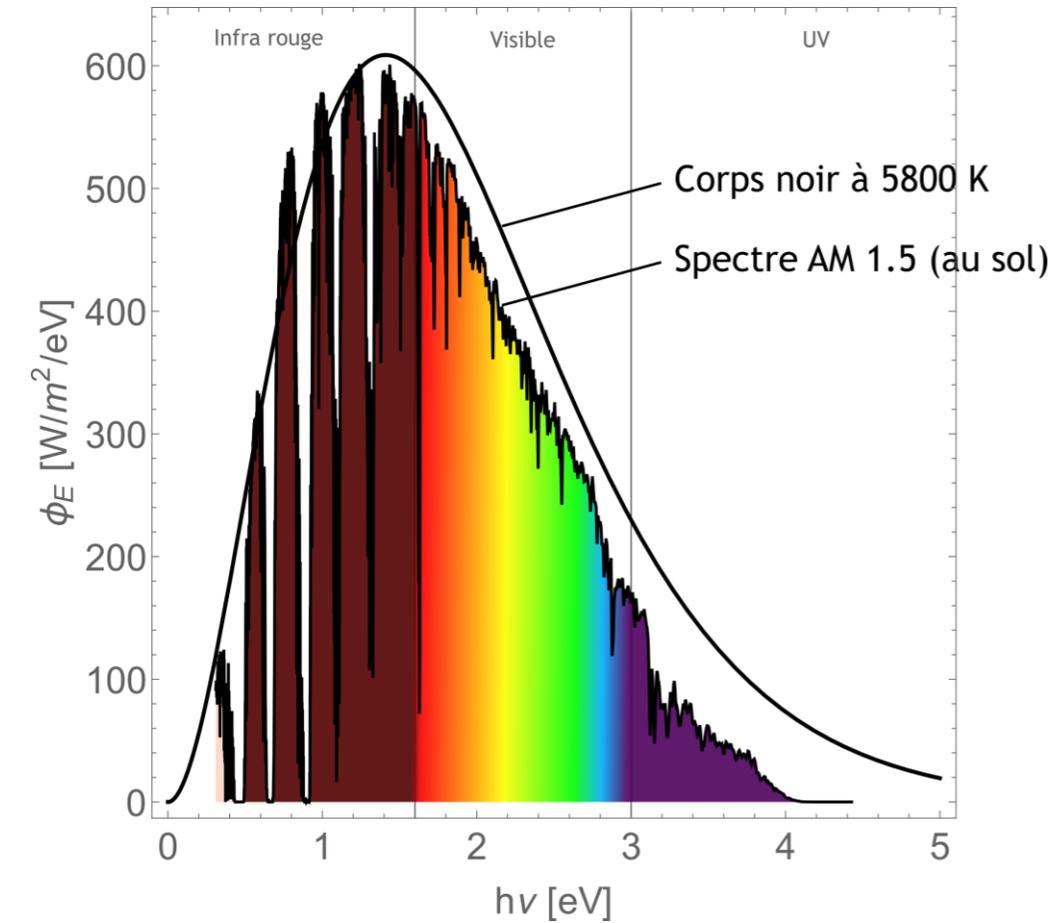
Principes fondamentaux – du photon à l'électron

Technologies photovoltaïques en 2025

Perspectives et défis à venir



Photovoltaïque : 4 fonctions fondamentales



Chaque photon d'énergie $> E_g$ excite un électron dans la bande de conduction

Les électrons de la bande de conduction ont une probabilité de se désexciter

Les électrons doivent pouvoir bouger de l'absorbeur vers la surface

Tous les électrons doivent spontanément aller dans le même sens

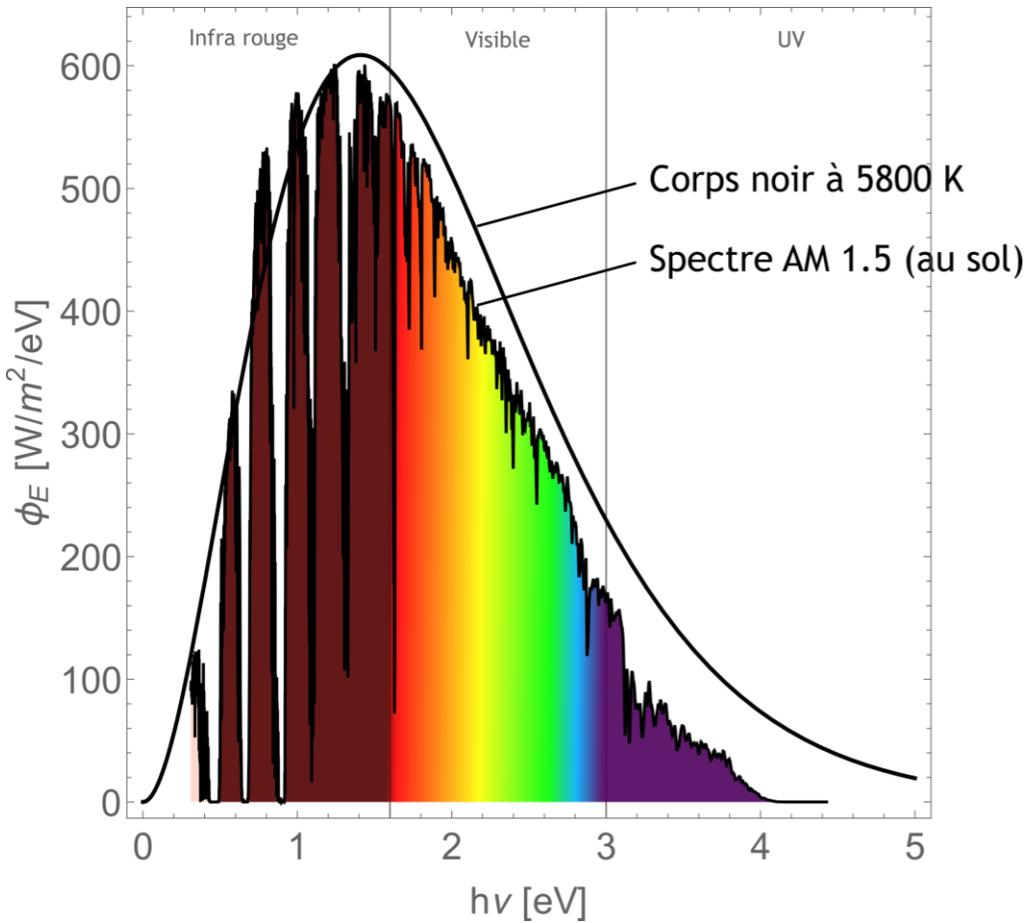
Absorption optique

Temps de vie

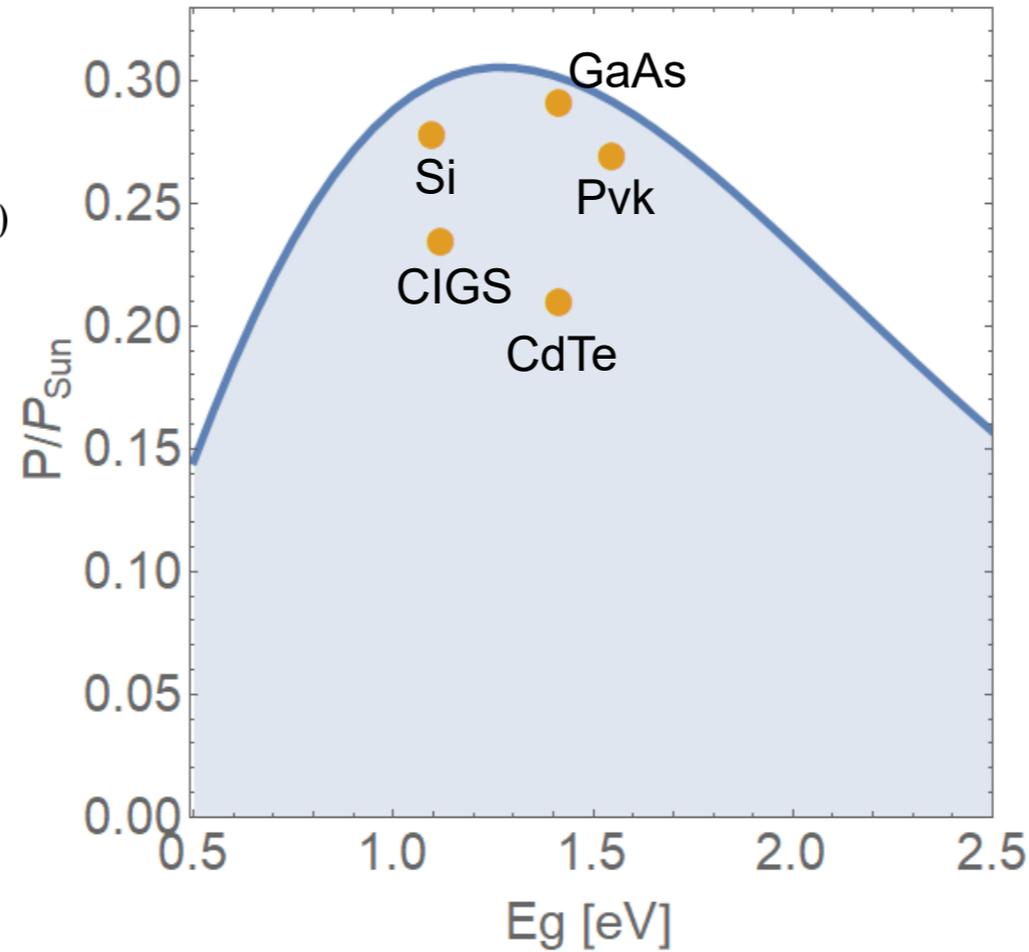
Mobilité

Sélectivité

Photovoltaïque : limite de conversion

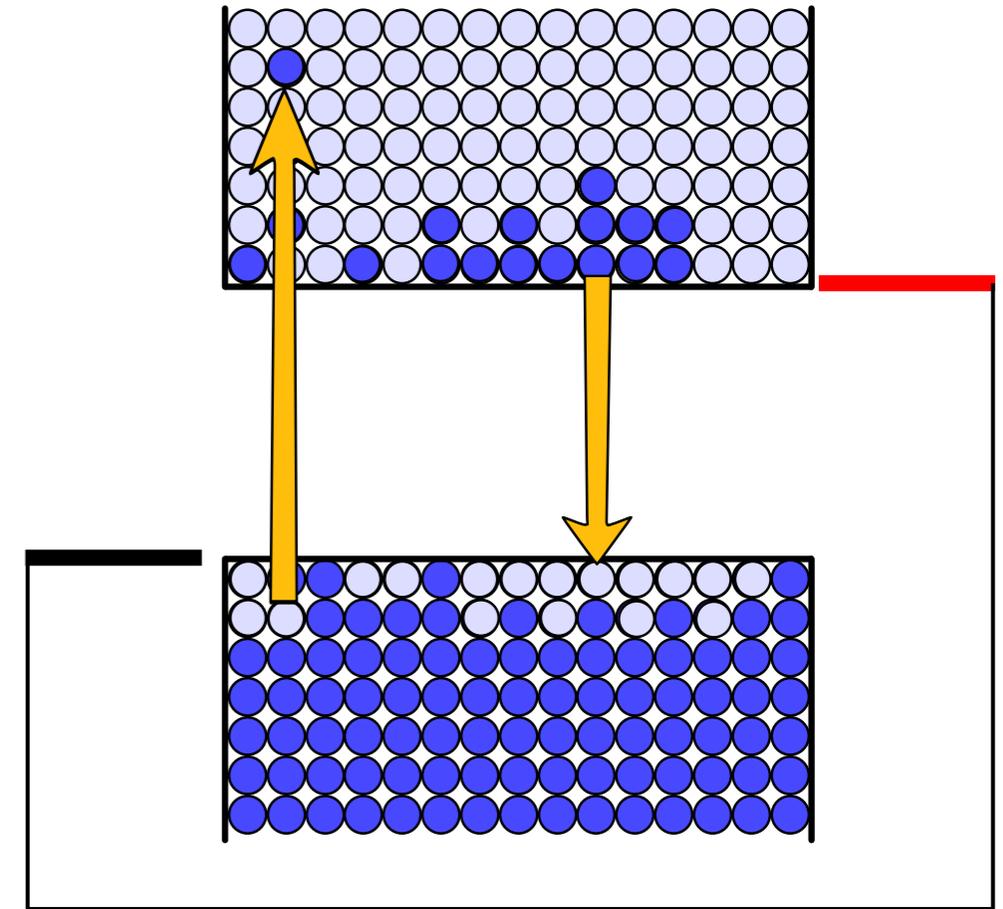


Absorption optique



Temps de vie

Mobilité



Sélectivité

Le gap ne doit pas être trop grand (sinon, pas de courant)

Le gap ne doit pas être trop petit (sinon, pas de tension)



Il existe un gap optimum ($\sim 1\text{eV}$ pour le spectre solaire sur Terre)

Pour ce gap optimum, le rendement peut atteindre $\sim 30\%$

Une analogie hydraulique



Absorption optique

Temps de vie

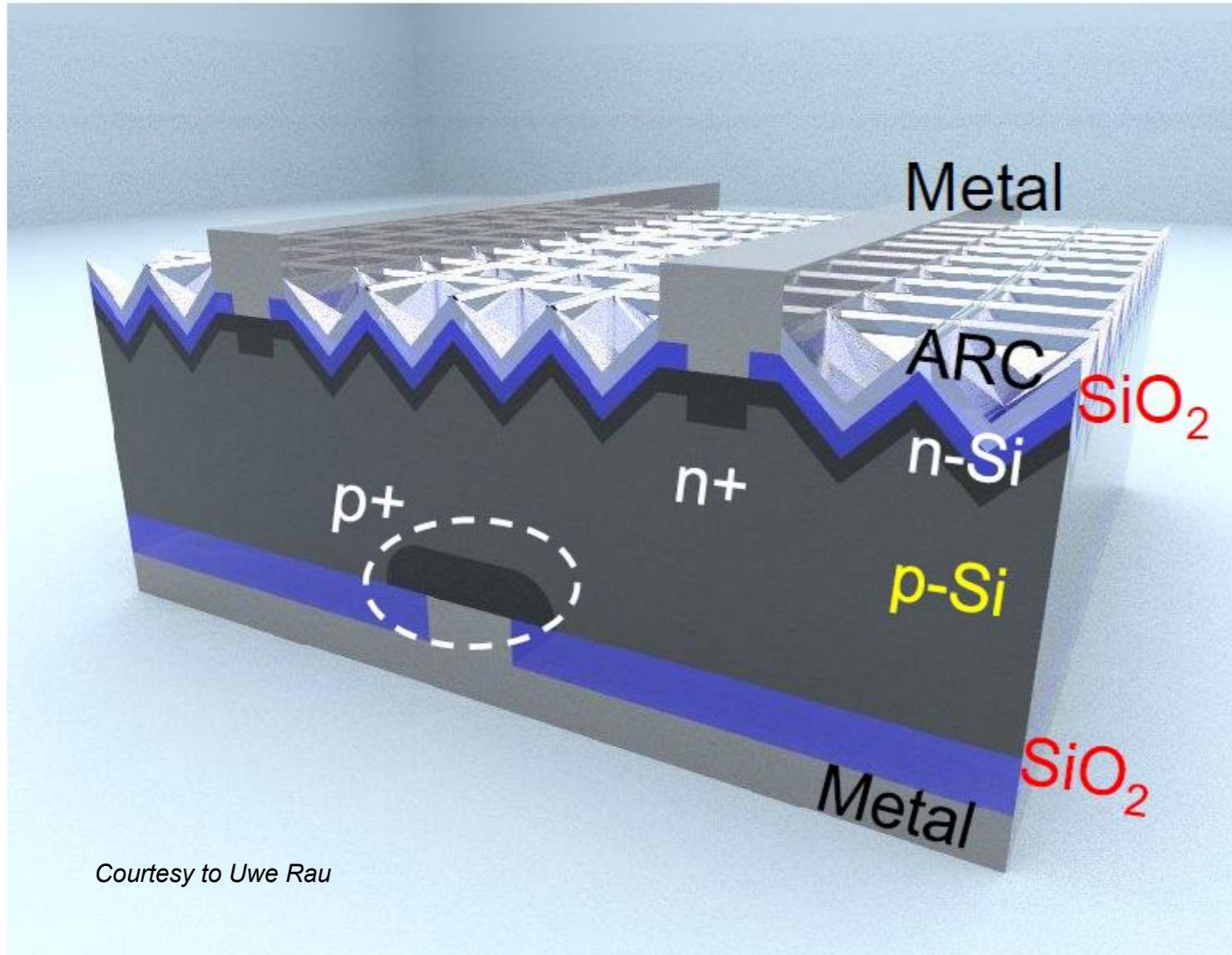
Mobilité

Sélectivité

Limite de conversion

Gap optimal à 1 eV

rendement de 30%



Absorption optique

Coef d'absorption faible
→ absorbeur épais ($150 \mu\text{m}$)
+ texturation
+ couche anti reflet

Temps de vie

Excellent temps de vie dans l'absorbeur
Passivation des surfaces

Mobilité

Excellente mobilité
→ Courant de diffusion

Sélectivité

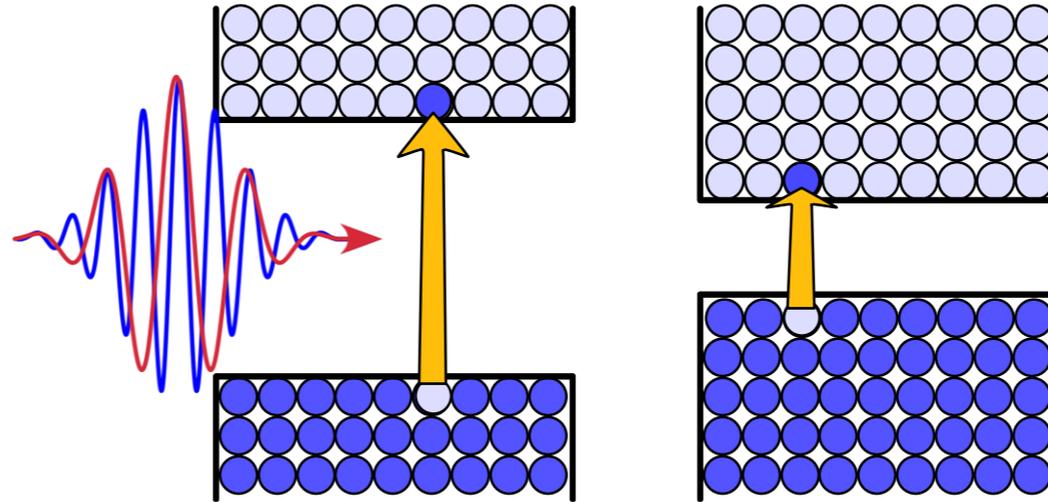
Dans l'absorbeur (homojonction)
ou aux interfaces (heterojonction)

Comment dépasser la limite des 30%?

En jouant sur la lumière

Conversion photonique

Concentration optique



En jouant sur les électrons

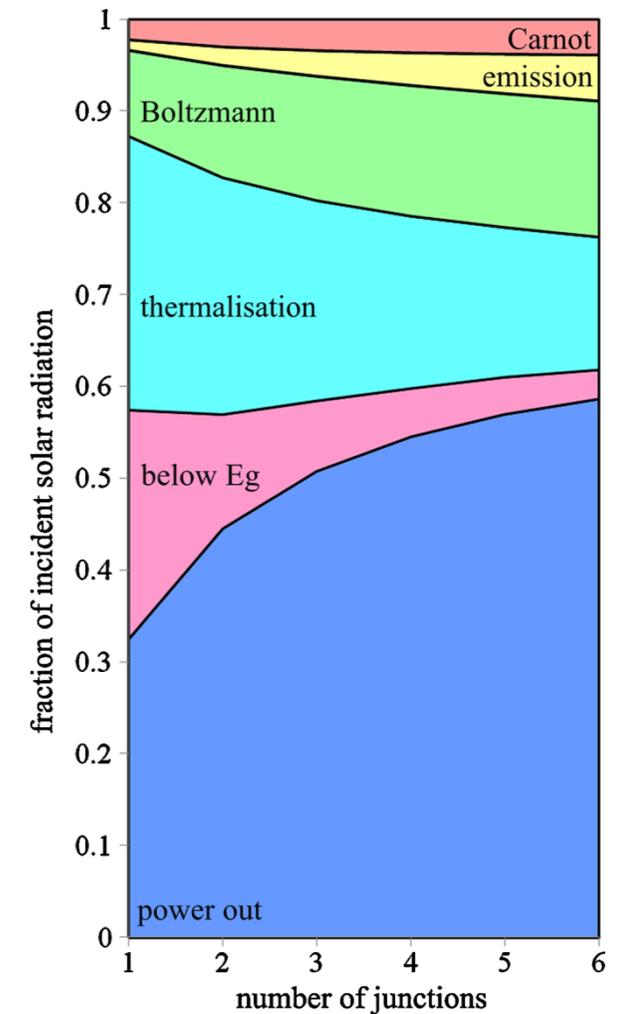
Cellules à bandes intermédiaires

Cellules à porteurs chauds

En jouant sur l'architecture

Cellule tandem

Cellule multijonction

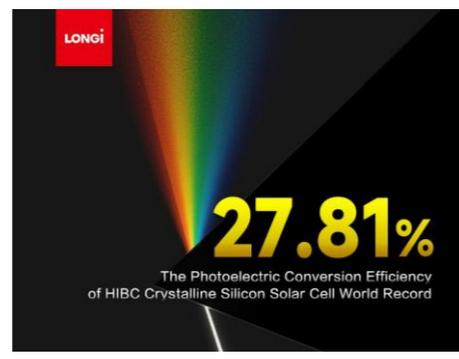


Hirst & Ekins-Daukes,
Prog. In PV 2011

Power conversion efficiencies

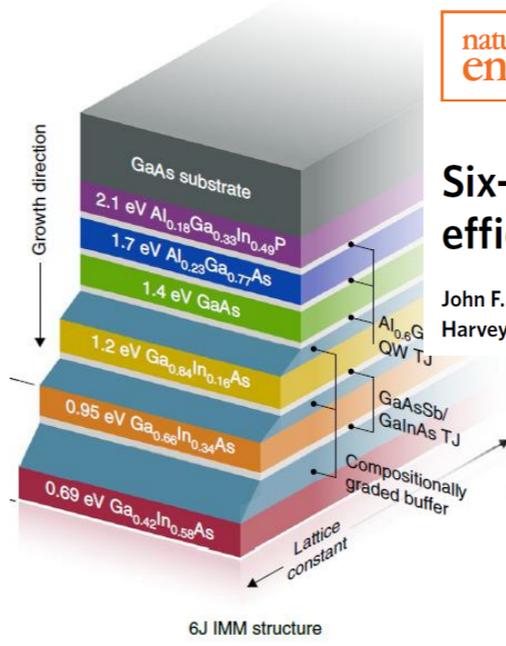


Commercial systems



Best Silicon solar cell
(Longi, April 2025)

World record
(multijunction)
Geisz JF, Nature Energy (2020)



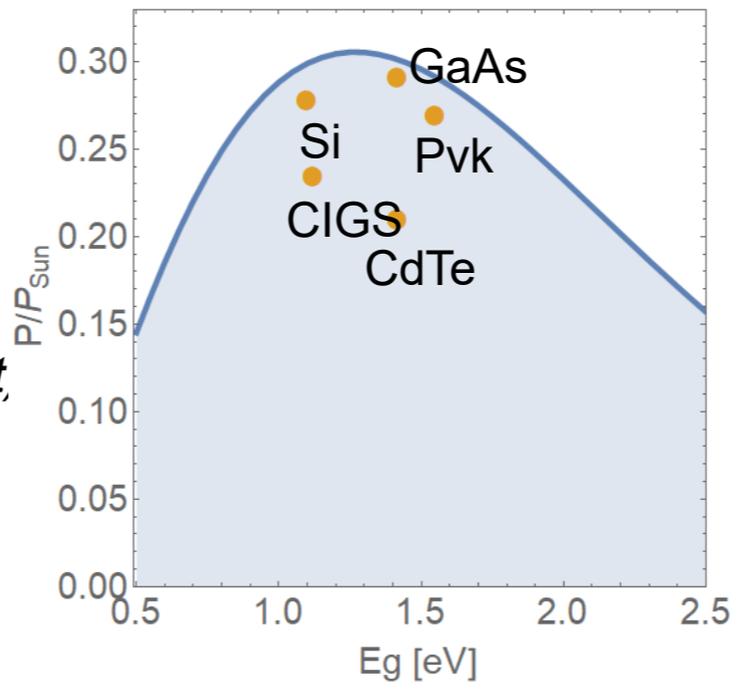
nature energy ARTICLES
<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
Check for updates

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



Single junction theoretical limit
(Shockley Queisser limit)



Thermodynamics upperbond

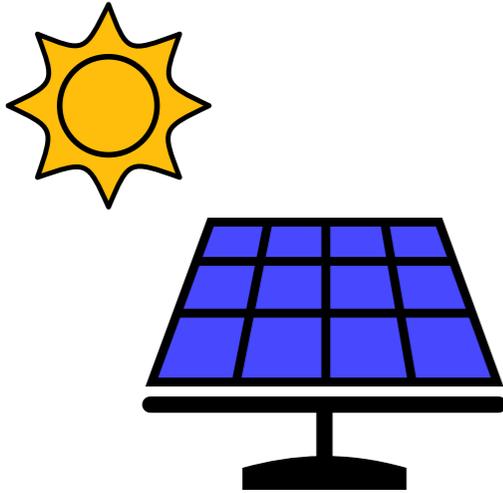
Principes fondamentaux – du photon à l'électron

Technologies photovoltaïques en 2025

Perspectives et défis à venir



Puissance installée fin 2024

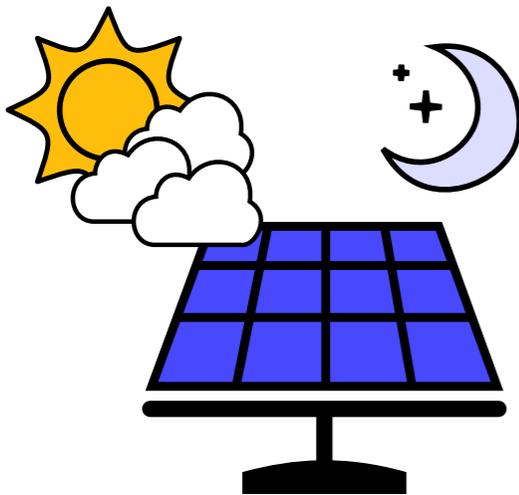


Monde : 2 200 GW
(+600 GW par rapport à 2023)

France: 24.3 GW
(+ 5 GW par rapport à 2023)

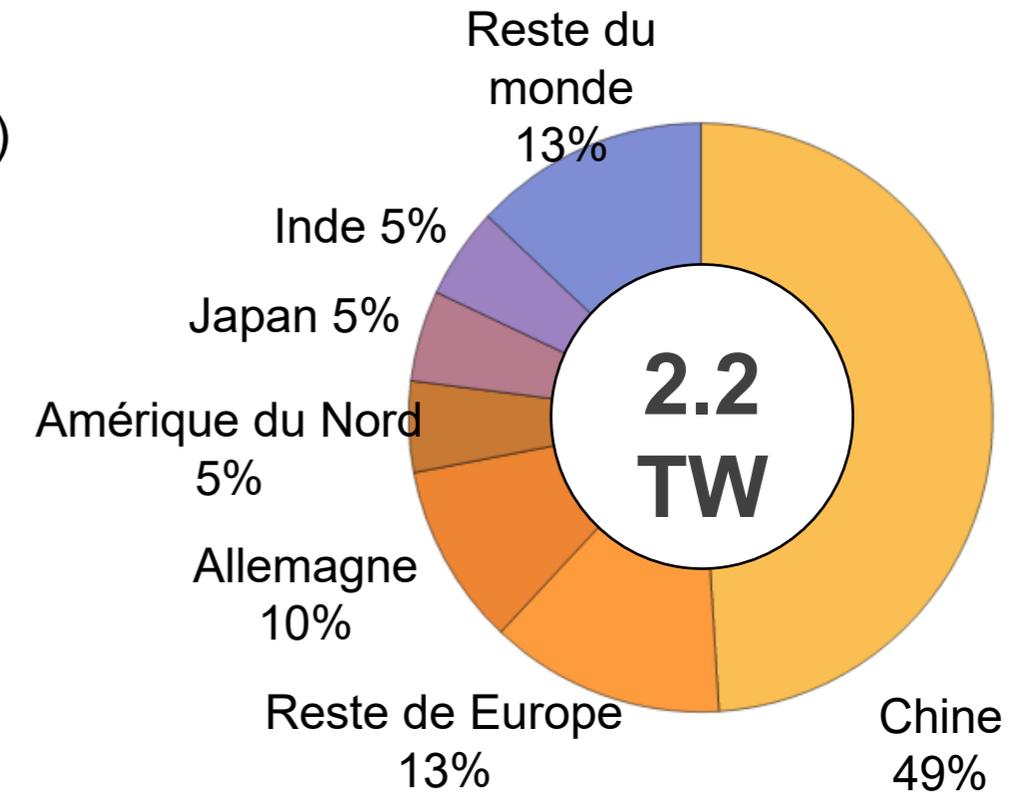
*IEA PVPS 2025
RTE 2025*

Electricité produite sur l'année 2024



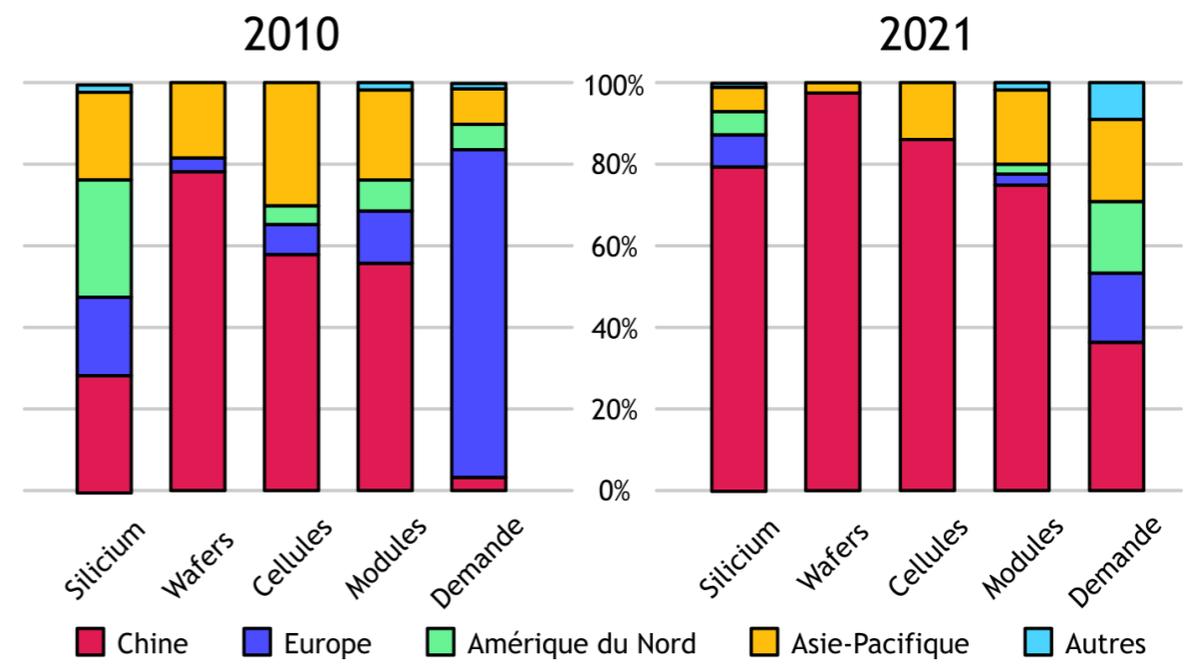
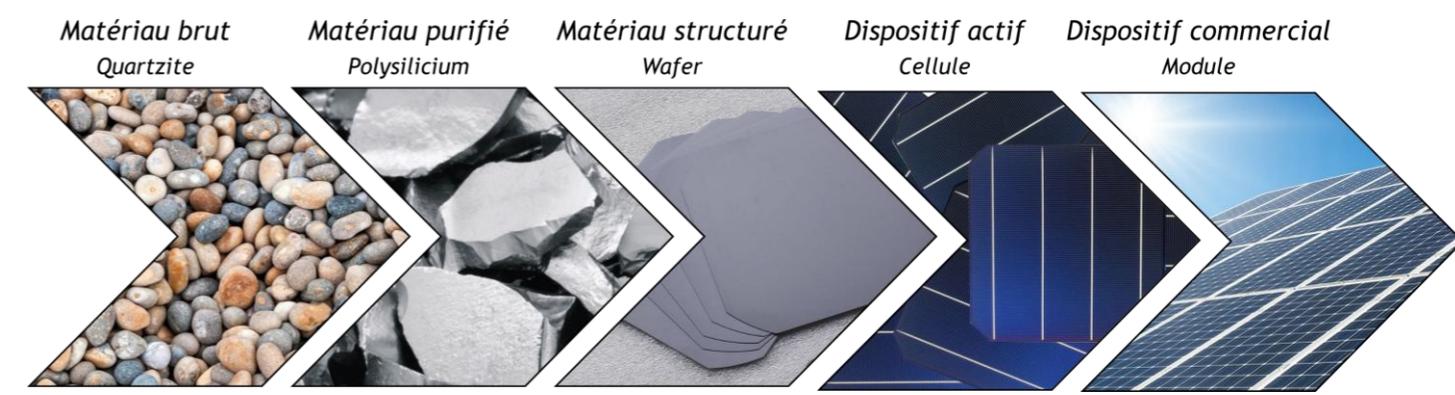
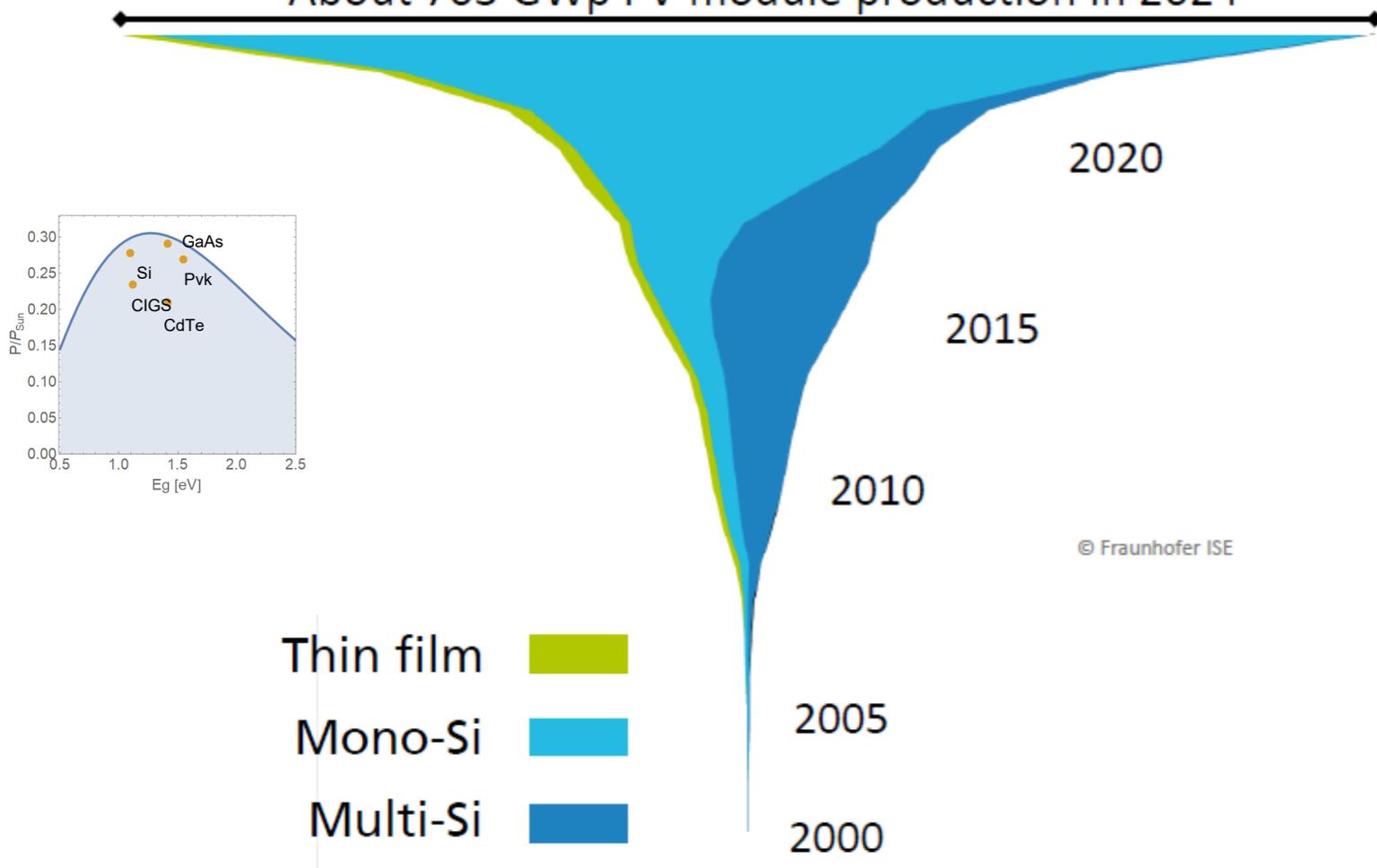
Monde : 2100 TWh
(=6.7% de l'électricité)

France: 25 TWh
(=4.6% de l'électricité)



Le roi silicium

About 703 GWp PV module production in 2024

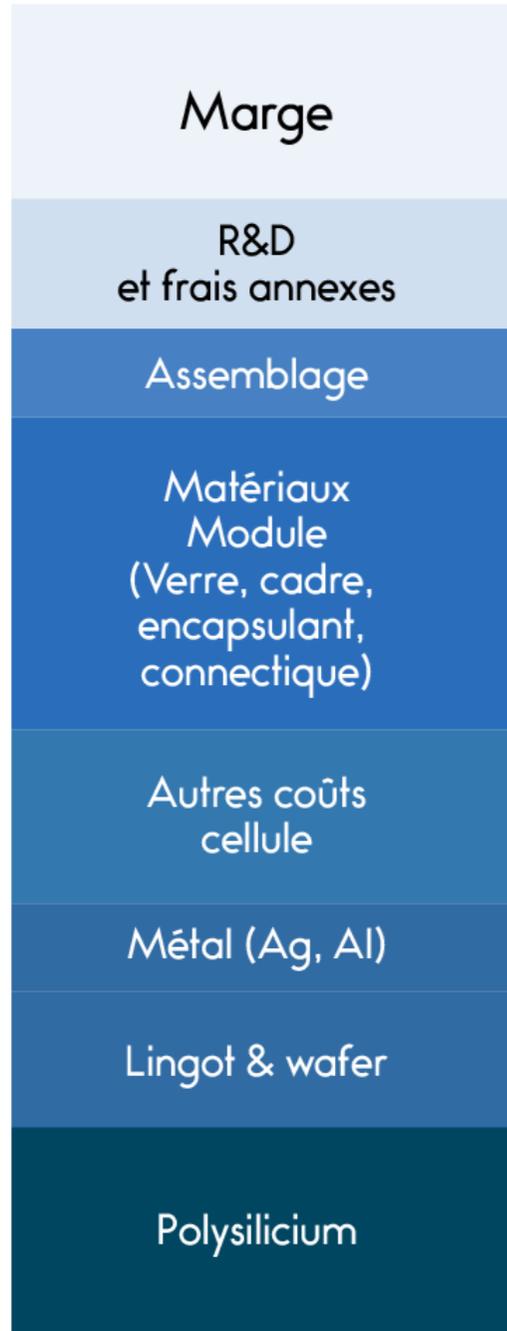


Source: IEA 2022

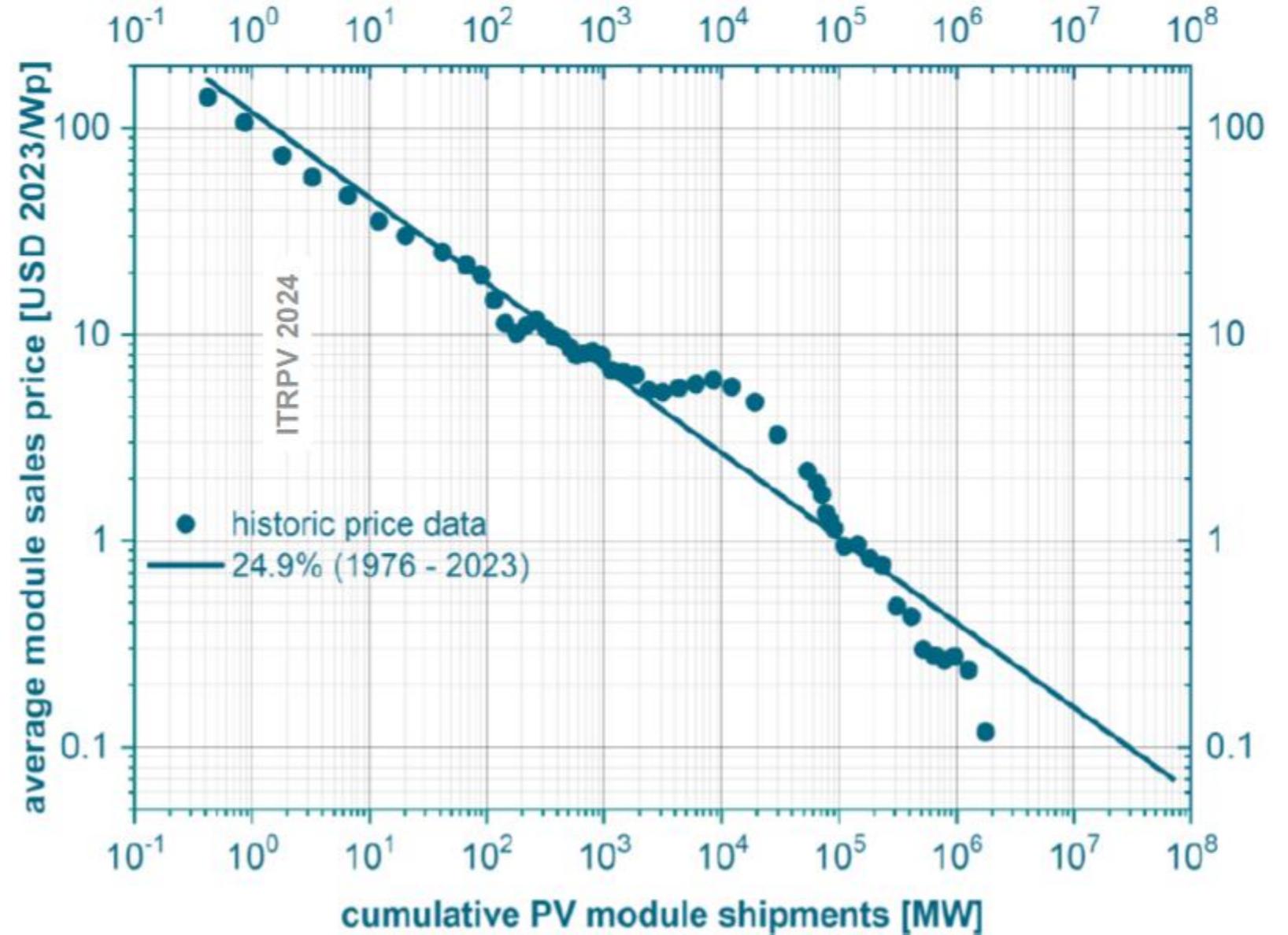
A l'heure actuelle, solaire photovoltaïque = cellules en silicium produites en Chine

Prix des modules

Suchet & Johnson, Introduction à l'énergie solaire photovoltaïque, EDP Sciences, 2020

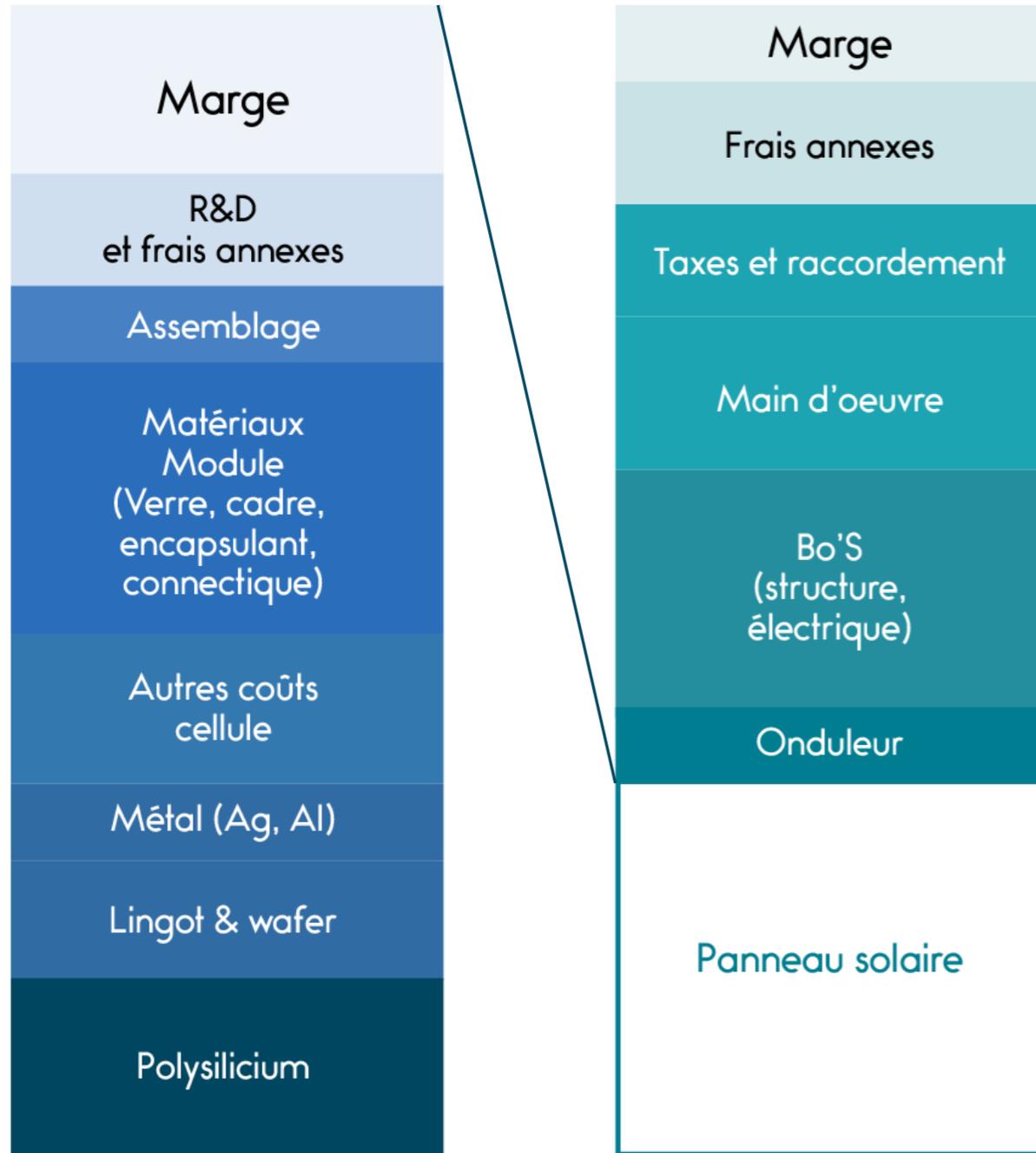


Prix des modules
0.3 €/Wc



Prix installé

Suchet & Johnson, Introduction à l'énergie solaire photovoltaïque, EDP Sciences, 2020



Prix des modules
0.3 €/Wc

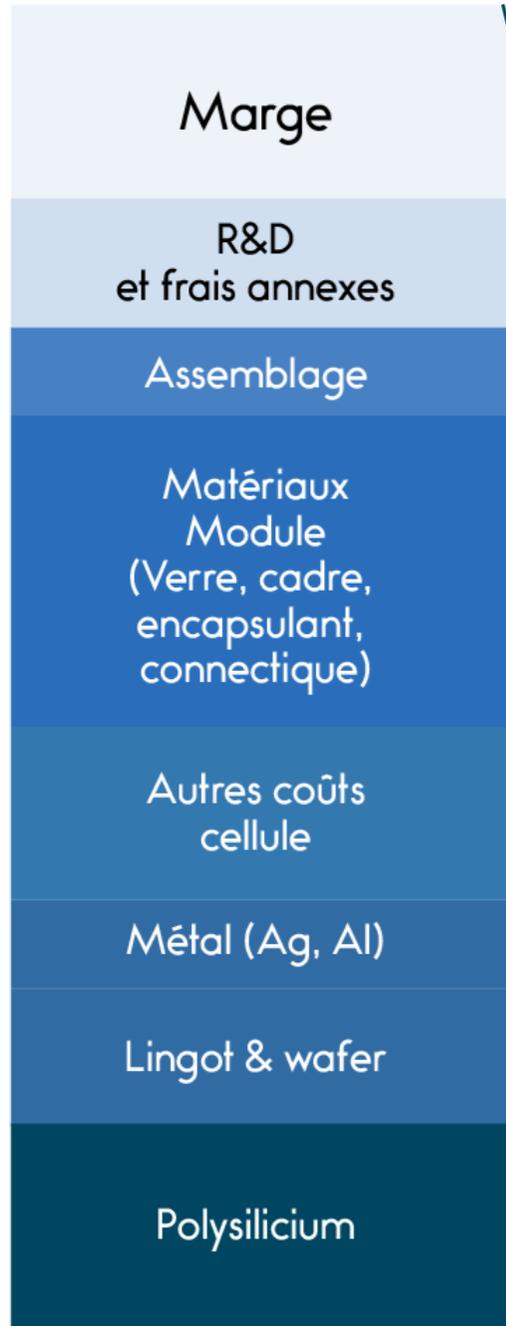
Prix installé
1 €/Wc (ferme solaire)
1.5 €/Wc (toit commercial)
2.5 €/Wc (toit résidentiel)



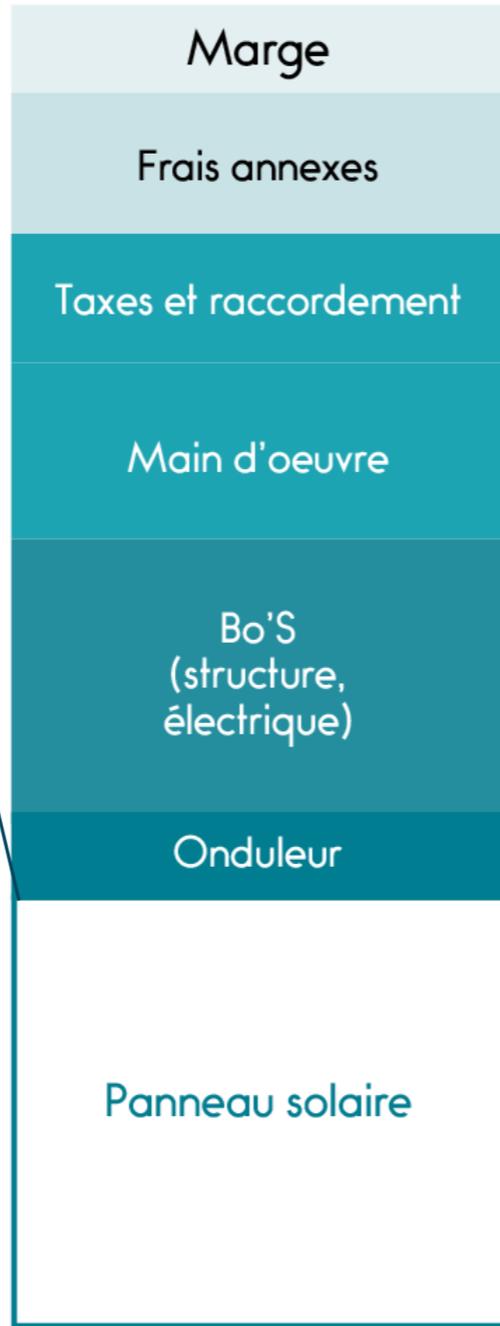
Ordre de grandeur (à 20% près) :
1 hectare = 1 MWc = 1M€ = 1 GWh/an

Coût de production

Suchet & Johnson, Introduction à l'énergie solaire photovoltaïque, EDP Sciences, 2020



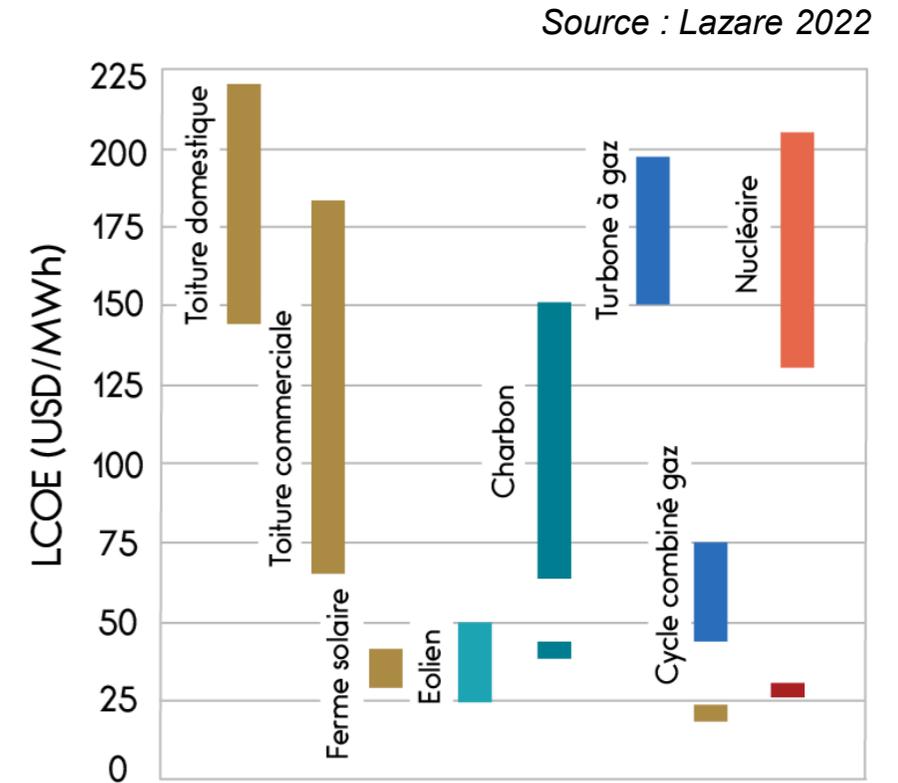
Prix des modules
0.3 €/Wc



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



Coût actualisé de l'énergie (LCOE)
0.05 €/ kWh (ferme solaire)
0.1 €/kWh (toit commercial)
0.2 €/ kWh (toit résidentiel)

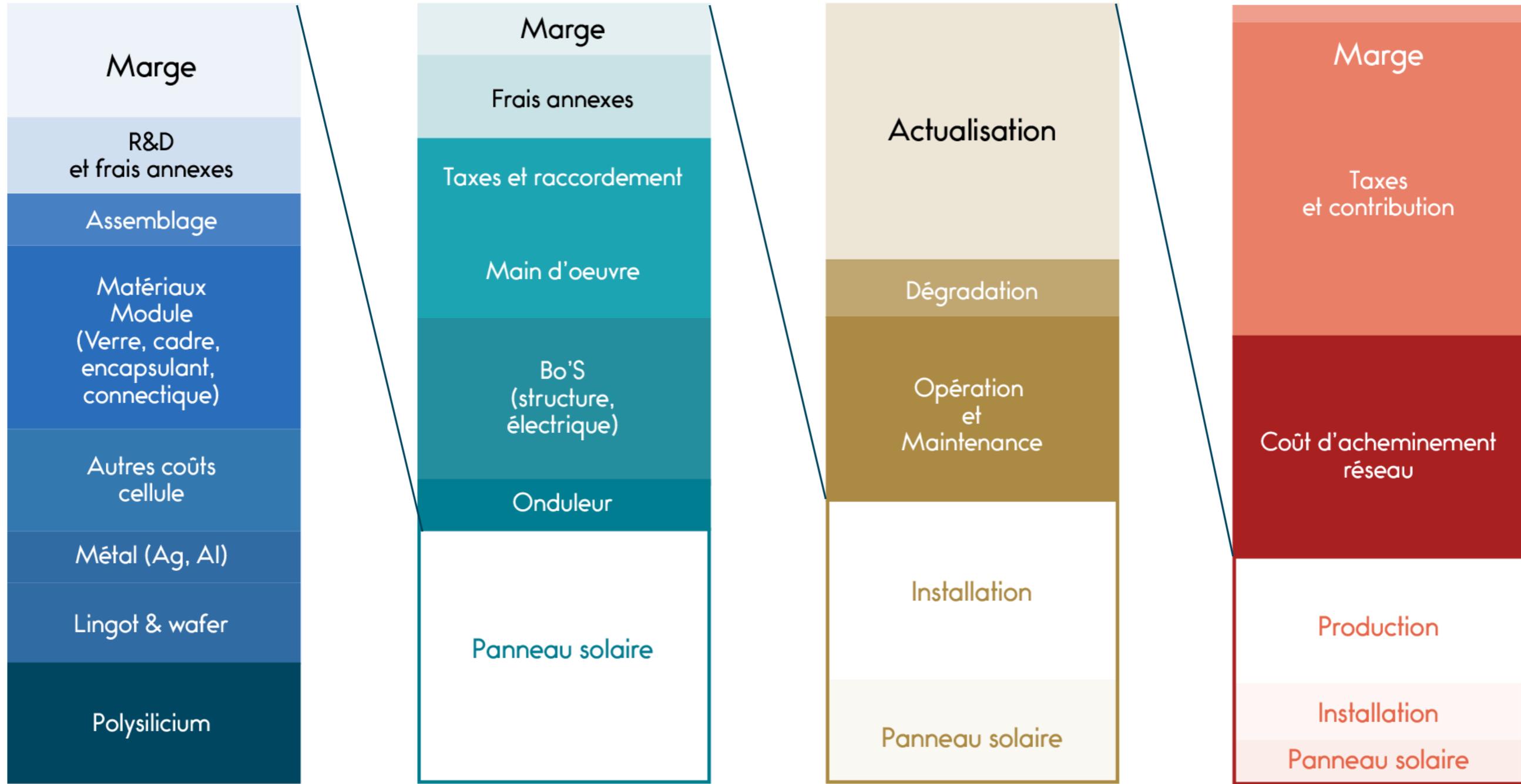


Source : Lazare 2022

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

Coût complet?

Suchet & Johnson, Introduction à l'énergie solaire photovoltaïque, EDP Sciences, 2020



Prix des modules
0.3 €/Wc

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

Coût actualisé de l'énergie (LCOE)
0.05 €/ kWh (ferme solaire)
0.1 €/kWh (toit commercial)
0.2 €/ kWh (toit résidentiel)

Prix de l'électricité
0.15 €/kWh

Liste de course pour un panneau solaire

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

Temps de retour énergétique du **module photovoltaïque** < 1 an en Europe

Durée de vie garantie d'une installation PV > 25 ans !

Hypothèses :

efficacité : 20%, ensoleillement 1700 kWh/m²/an, facteur de perf. 85%,

Durée de vie 25 ans, dégradation -0.5%/an

Principes fondamentaux – du photon à l'électron

Technologies photovoltaïques en 2025

Perspectives et défis à venir



Un avenir solaire

France 2050 :

solaire entre x7 et x20

selon la part de nucléaire

(Futurs Energétiques 2050, RTE 2022)

Monde 2050 :

solaire PV x25 = 1/3 du total,

~ +1TW installé/an

(scénario Net Zero, IEA WEO 2022)

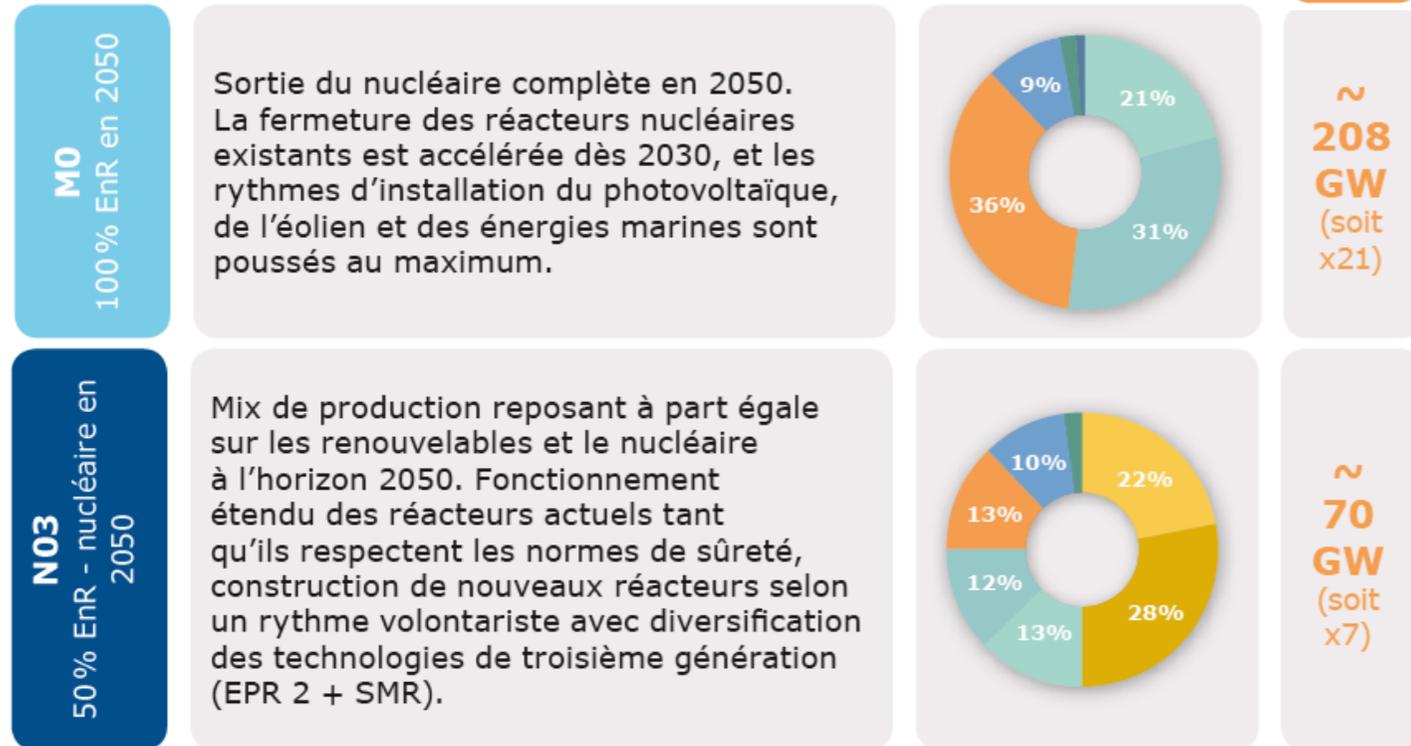
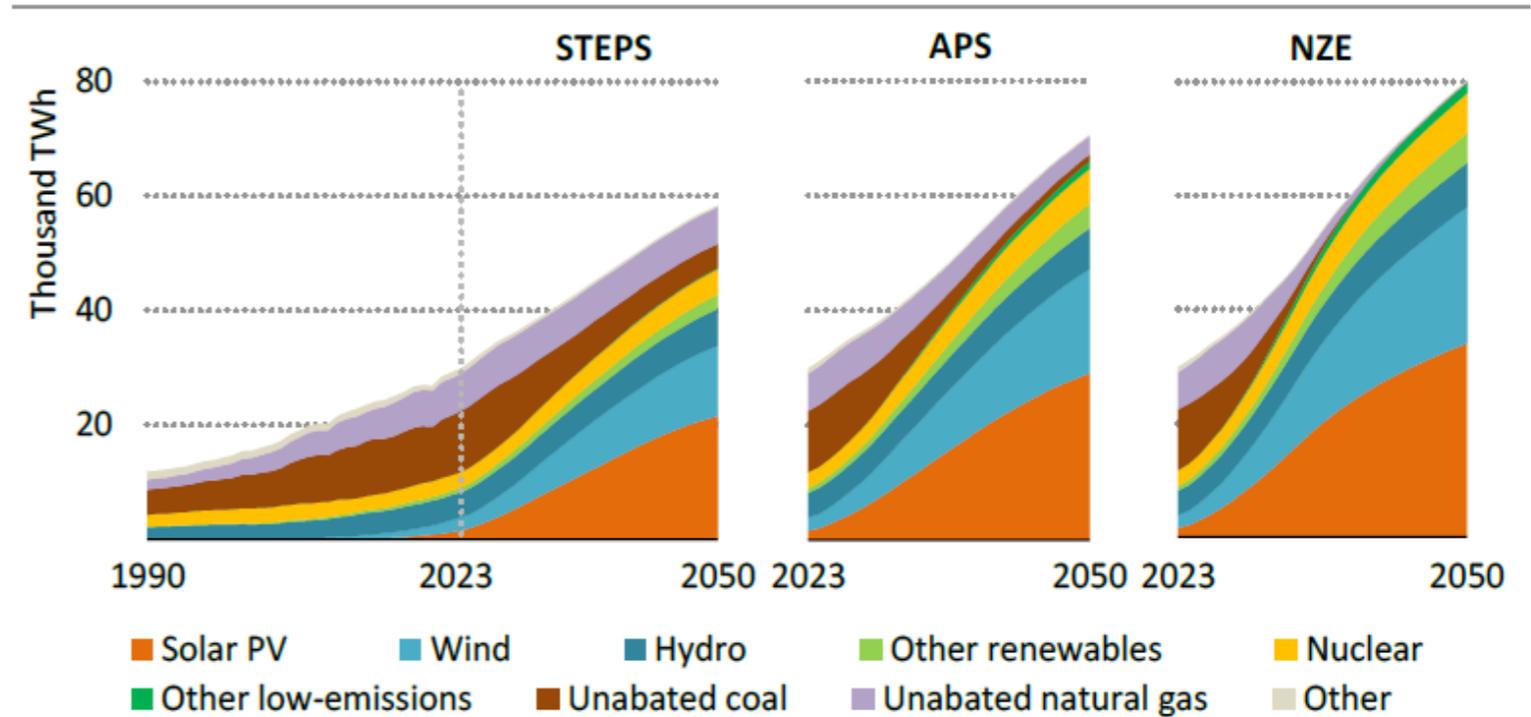


Figure 3.21 ▶ Global electricity generation by source and scenario, 1990-2050

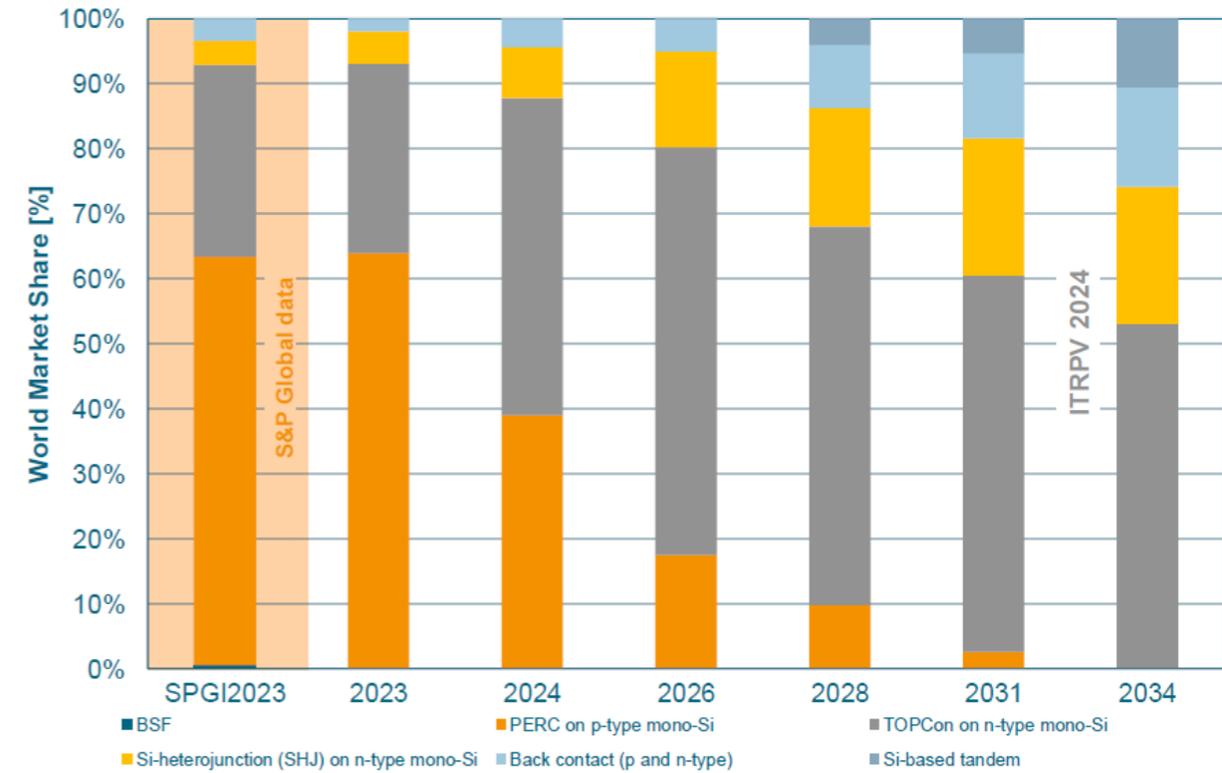
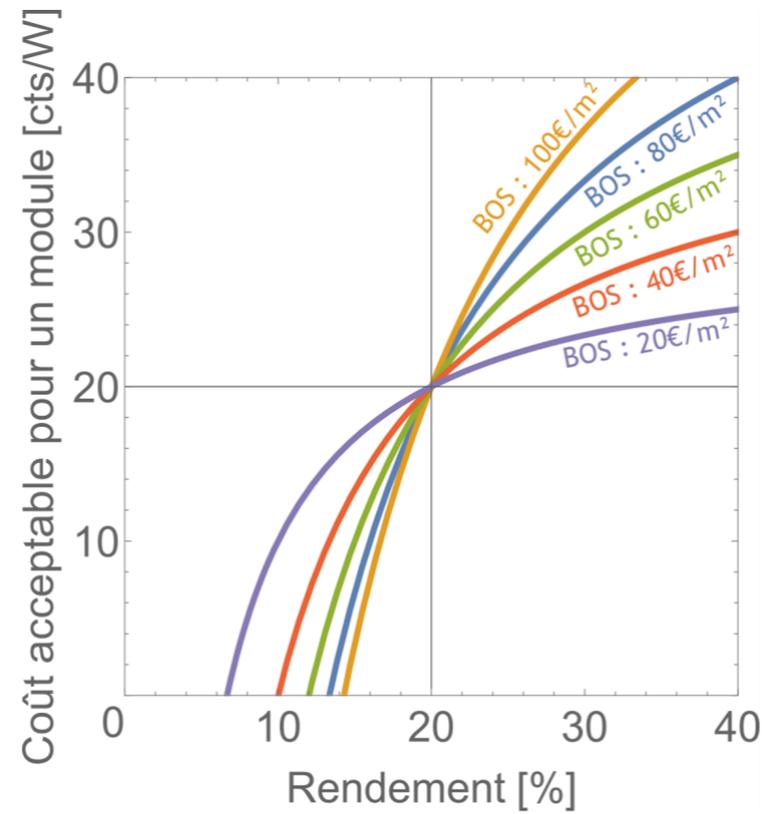
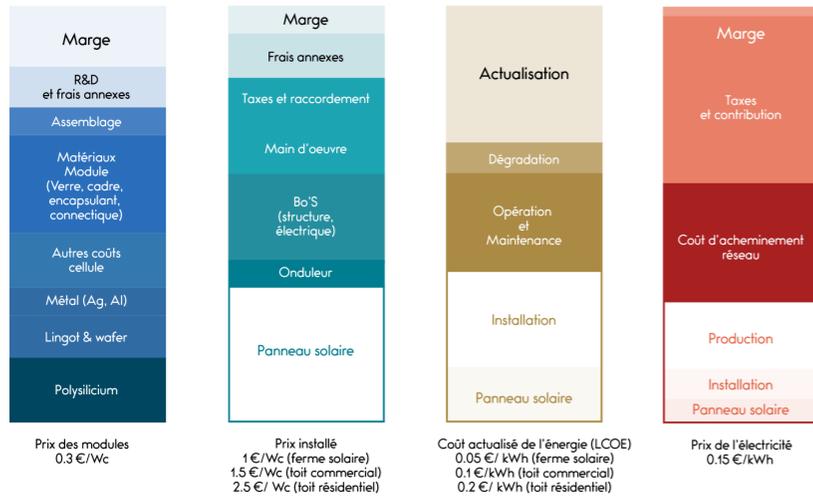


IEA. CC BY 4.0.

Energies renouvelables (solaire en particulier) indispensables au **niveau mondial**.

Les défis de la filière doivent de toutes façons être levés !

Défi 1: augmenter les rendements pour baisser les coûts

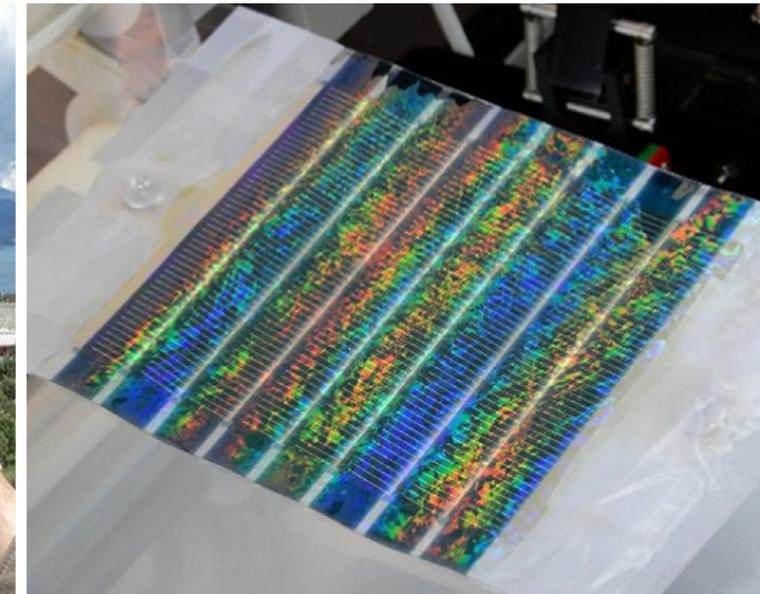
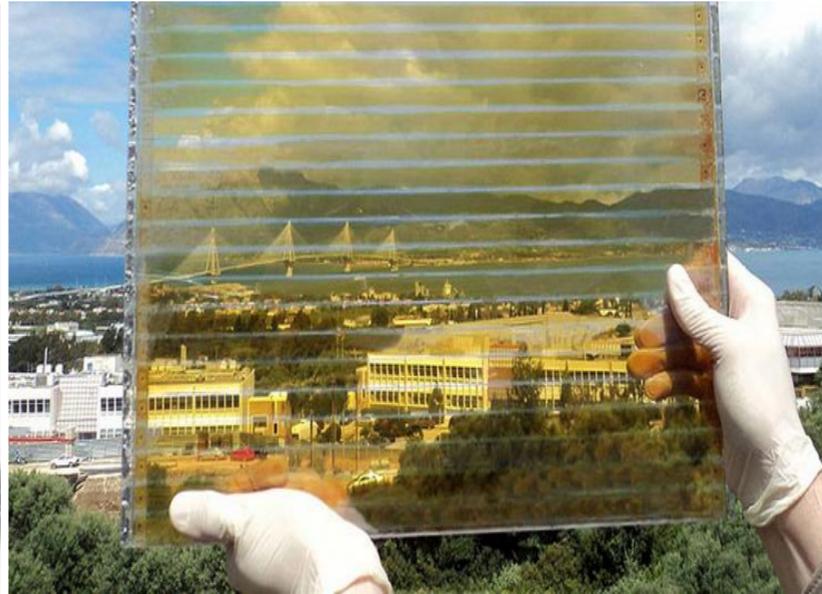
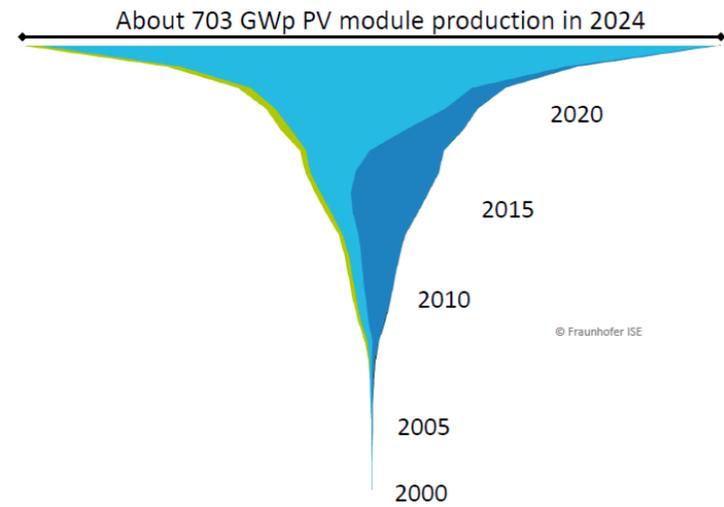


Le coût de fabrication des cellules contribue peu au coût total pour le consommateur

Pour réduire le coût de l'électricité, il vaut mieux une cellule plus efficace, quitte à ce qu'elle soit plus chère

Effort important pour le développement industriel de cellules tandem

Défi 2: éviter la monoculture



A l'heure actuelle, solaire photovoltaïque = cellules en silicium produites en Chine

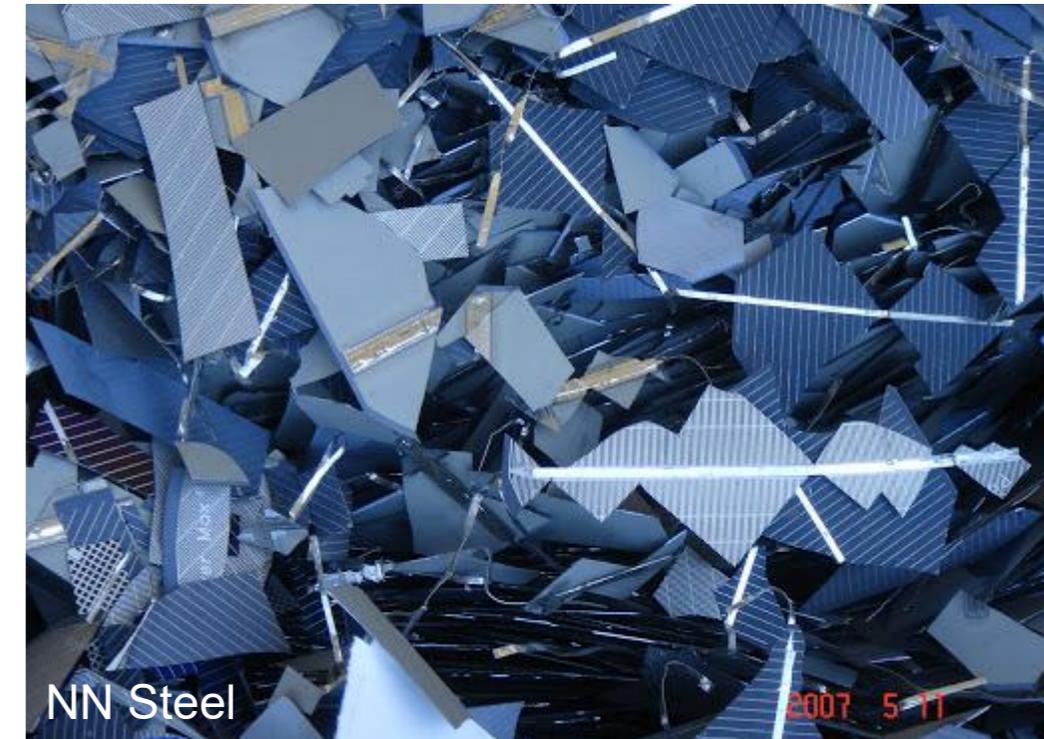
Diversifier les matériaux, les propriétés optiques, mécaniques, les applications...

L'objectif n'est **pas de produire des TWh**, mais de nourrir l'innovation.

Défi 3: une industrie à l'échelle du téraWatt

Capacité de production
et de recyclage

Anticiper la fin de vie
dès la conception



Défi 3: une industrie à l'échelle du téraWatt

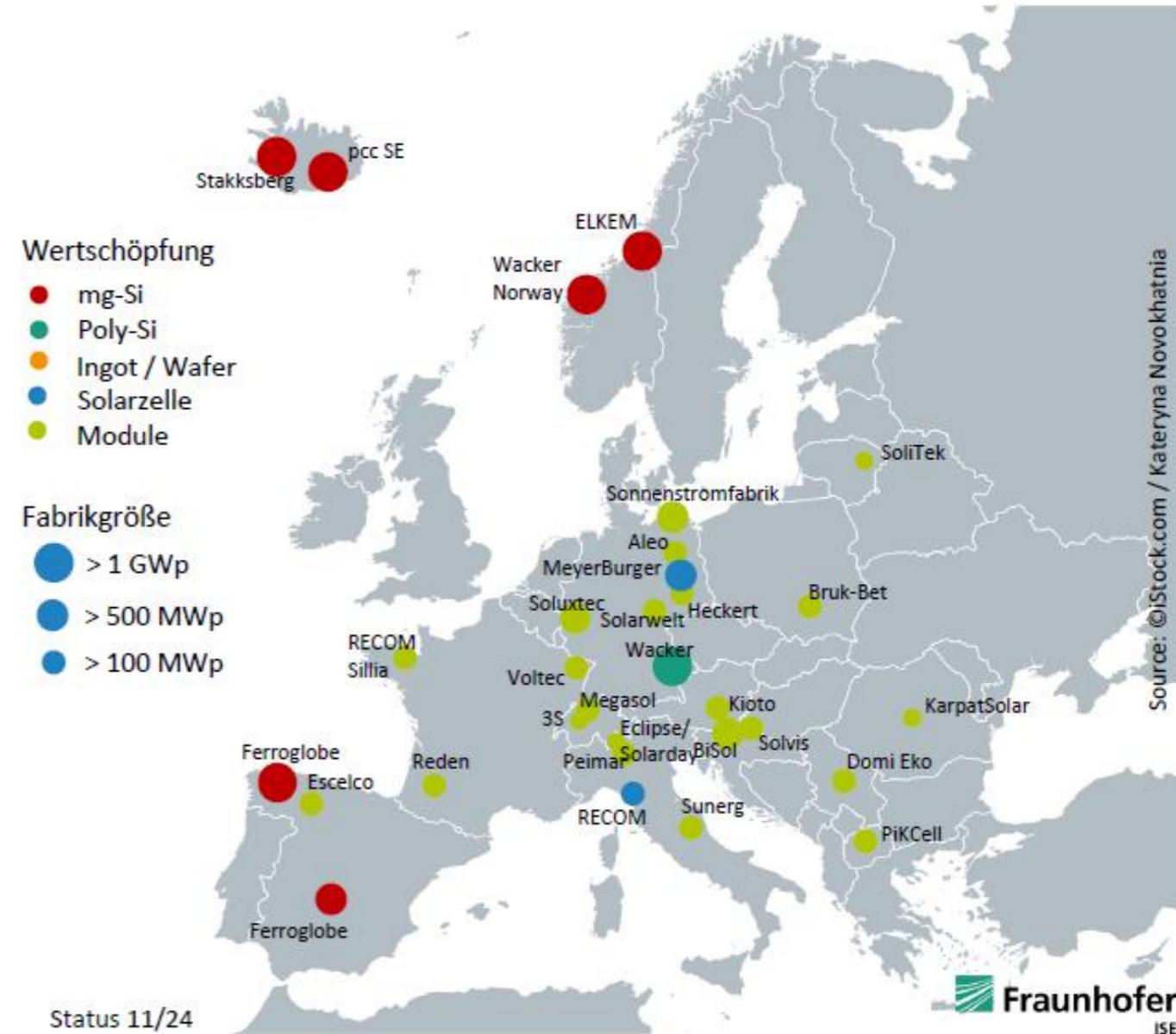
Capacité de production
et de recyclage

Anticiper la fin de vie
dès la conception

Relocaliser la production
*Souveraineté énergétique,
industrielle & économique*

*Conditions de production
(sociales, environnementales)*

Filière intégrée
*(production, conception, installation, entretien,
démantèlement, recyclage...)*



Module	Cell	Inverter	Polysilicon
14.1 GW	2 GW	81.1 GW	26.1 GW

Production line : 1GW = 300M€ CAPEX = 1000 jobs

Défi 4: intégration dans le réseau électrique

Difficulté : équilibre production – consommation à **chaque instant**.



*Suchet et al., 2020, <https://www.coursera.org/learn/outsmarting-intermittency>
Suchet et al., Energies, 2020*

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

Ces effets n'ont pas été bloquants jusqu'à présent (seuil = 50 GWc = 2025 ?).

Ils deviennent perceptibles et ne peuvent plus être ignorés.

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

Ni parfait, ni inutile

Difficulté : équilibre production – consommation à **chaque instant**.

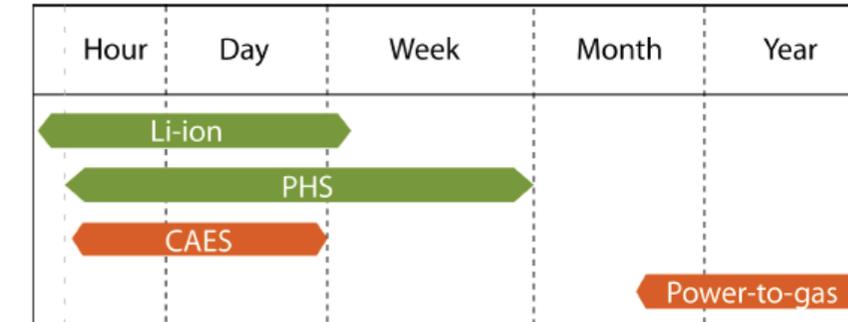


Technologies de stockage

Clerjon et al., Energy Environ. Sci., 2018

Cycles fréquents : efficace élevée, même si CAPEX élevé

Cycles lents : CAPEX faible, même si efficacité faible

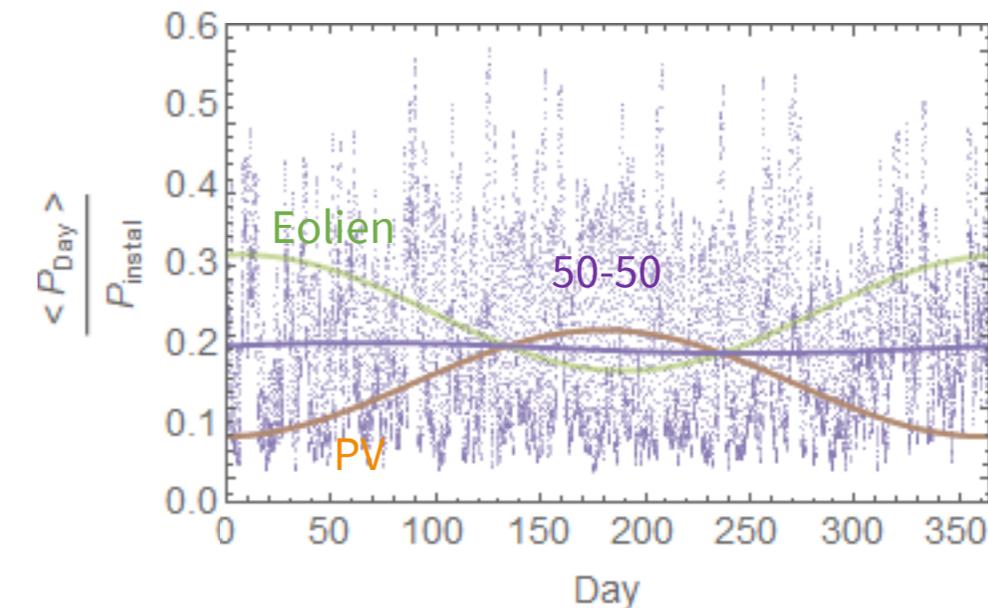


Complémentarité entre solaire et éolien

Suchet et al., Energies, 2020

Lisse les variations saisonnières

Peu d'effet sur l'intermittence

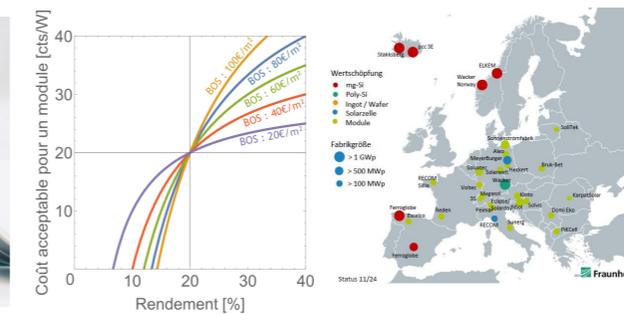
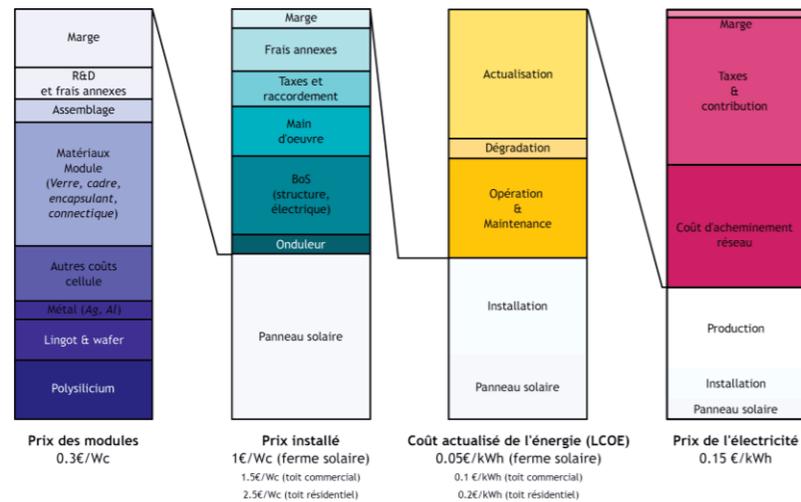
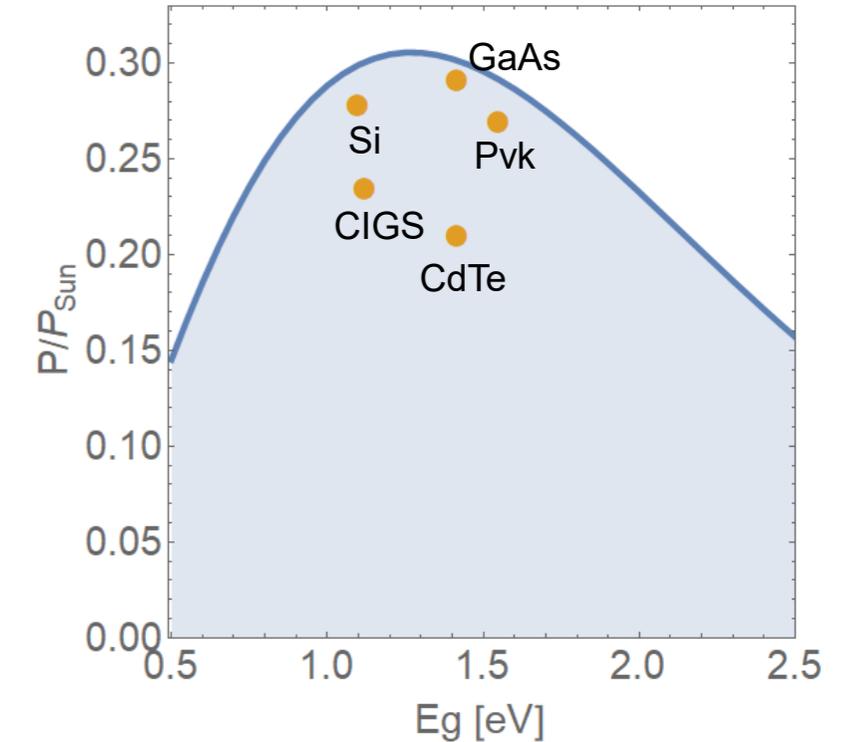
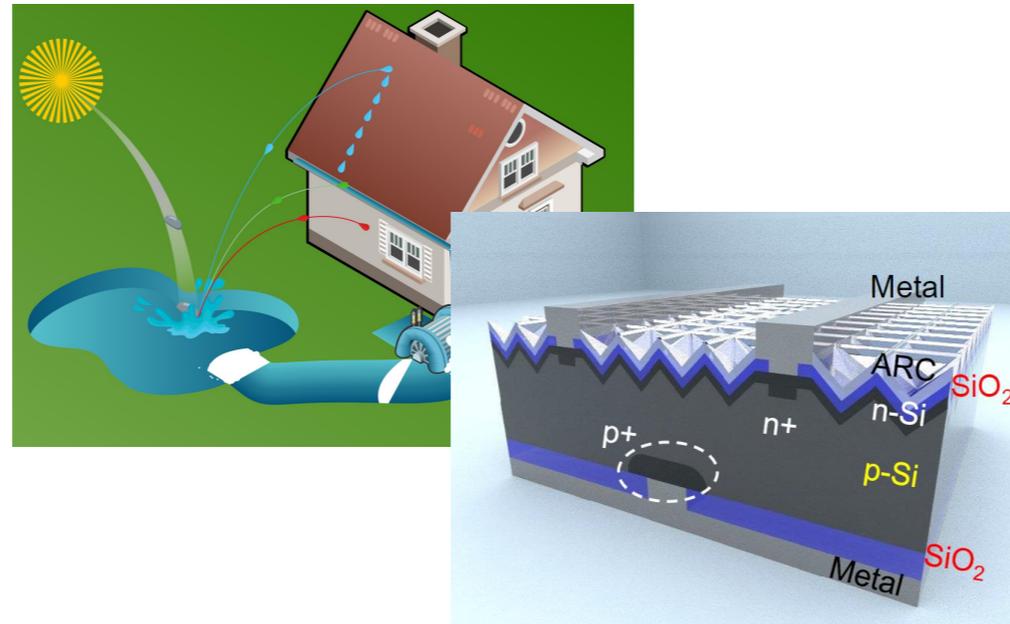


Les réponses techniques sont nécessaires, mais insuffisantes.

**Une transition énergétique n'est pas une simple substitution des sources
mais doit passer par une évolution du service énergétique.**

Solaire PV, des principes fondamentaux aux enjeux industriels

1 hec = 1 MWc = 1M€ = 1 GWh/an



Les réponses techniques sont nécessaires, mais insuffisantes.

Une transition énergétique n'est pas une simple substitution des sources mais doit passer par une évolution du service énergétique.