

# *L'apport des nouvelles générations de cellules solaires pour la décarbonation*

**Jean-François GUILLEMOLES**  
*IPVF, UMR 9006, CNRS-X-ENSCP, Palaiseau, France*

■ 24 Mars 2022 Colloque annuel de la F2S



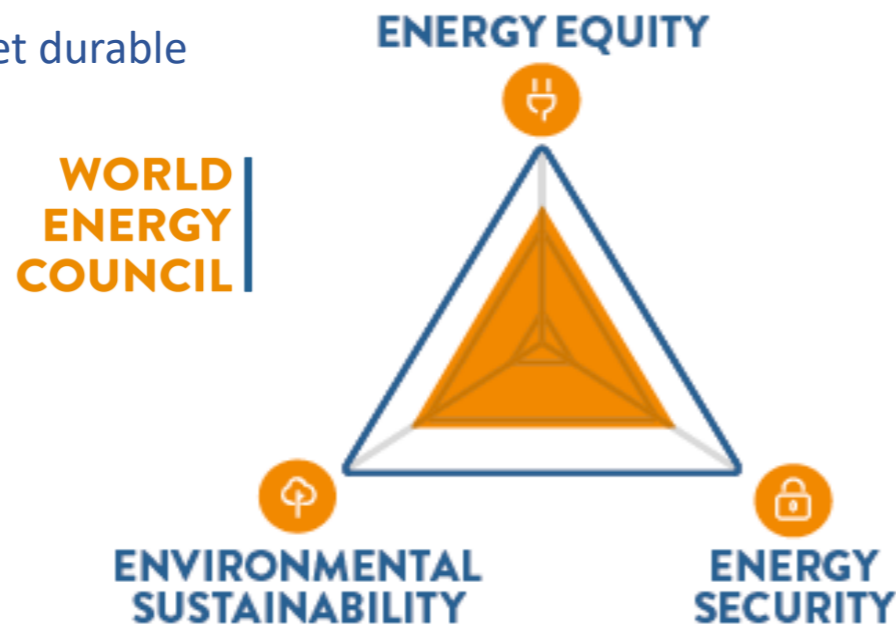
Fédération Française de Sociétés Scientifiques  
SEE · SFO · SFP · SFV

# De quoi allons nous parler

## TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Solutions et challenges technologiques ?

- Sécurité
  - Approvisionnement assuré et fiable
- Équité
  - Pour tous et économiquement accessible)
- Soutenabilité
  - Renouvelable et durable



1. L'énergie photovoltaïque aujourd'hui
2. Principe et procédés
3. Défis

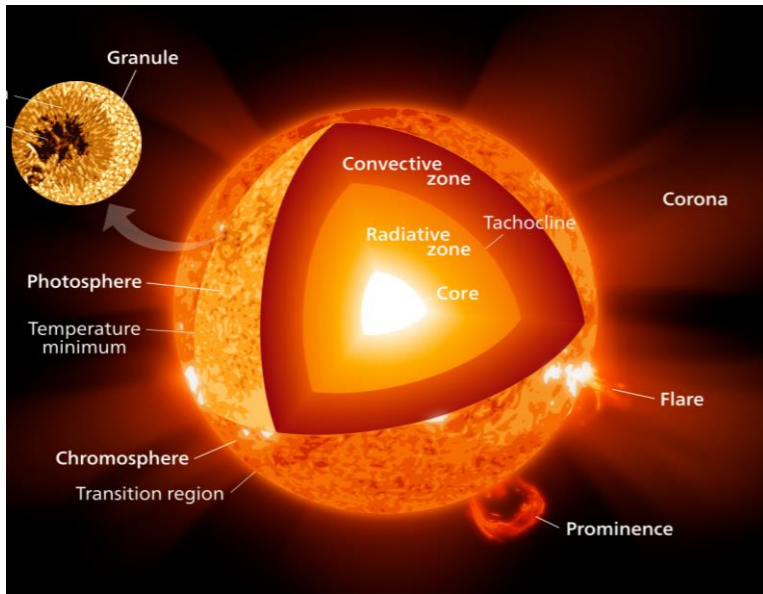
Pour en savoir plus:

<https://solairepv.fr/>

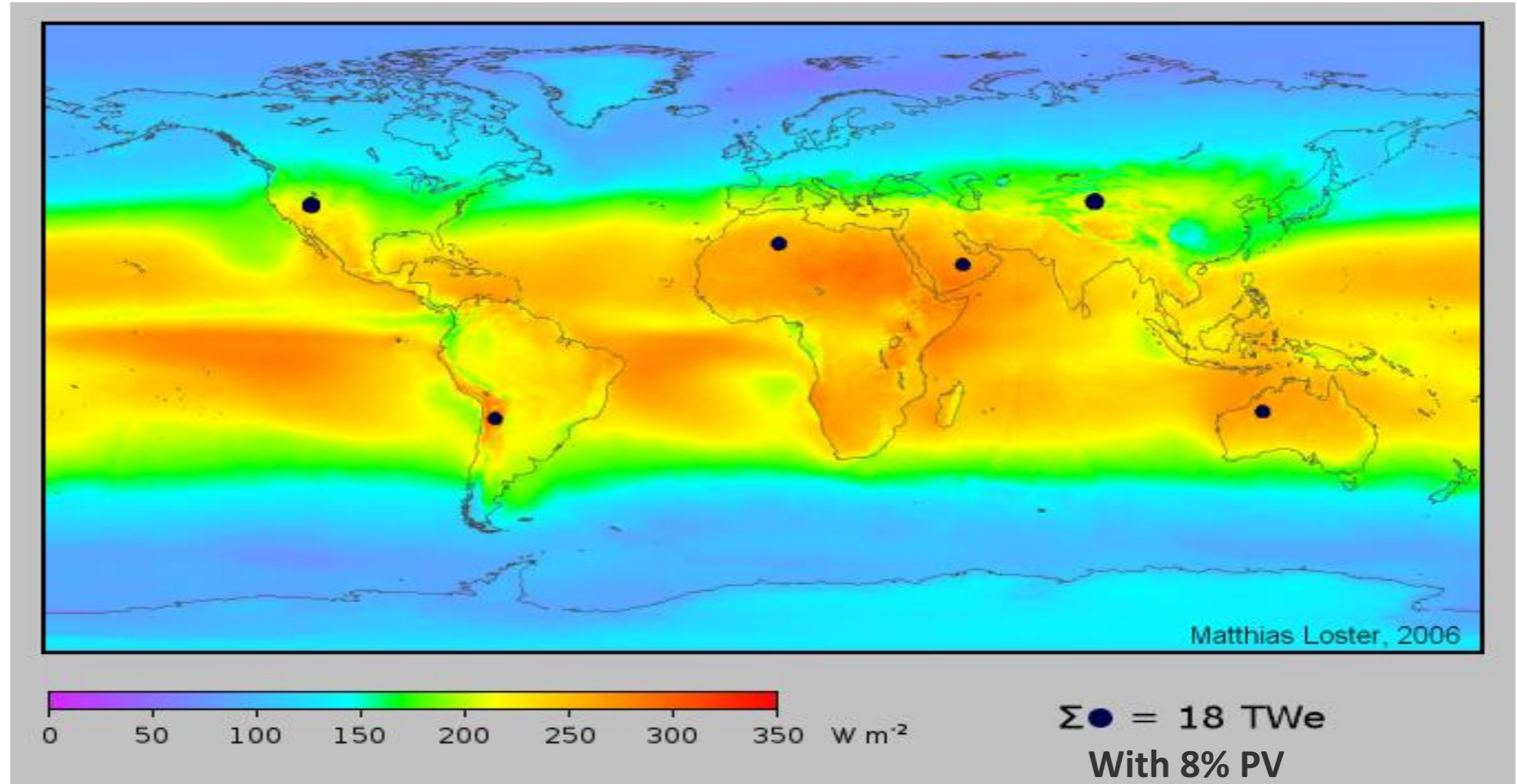
<https://www.college-de-france.fr/site/daniel-lincot/Lecon-inaugurale-de-Daniel-Lincot.htm>



# Ressource



600 Mt of Hydrogen/s



Potentiel solaire en 2018  
(terres émergées, avec météo)  
23 000 TWy



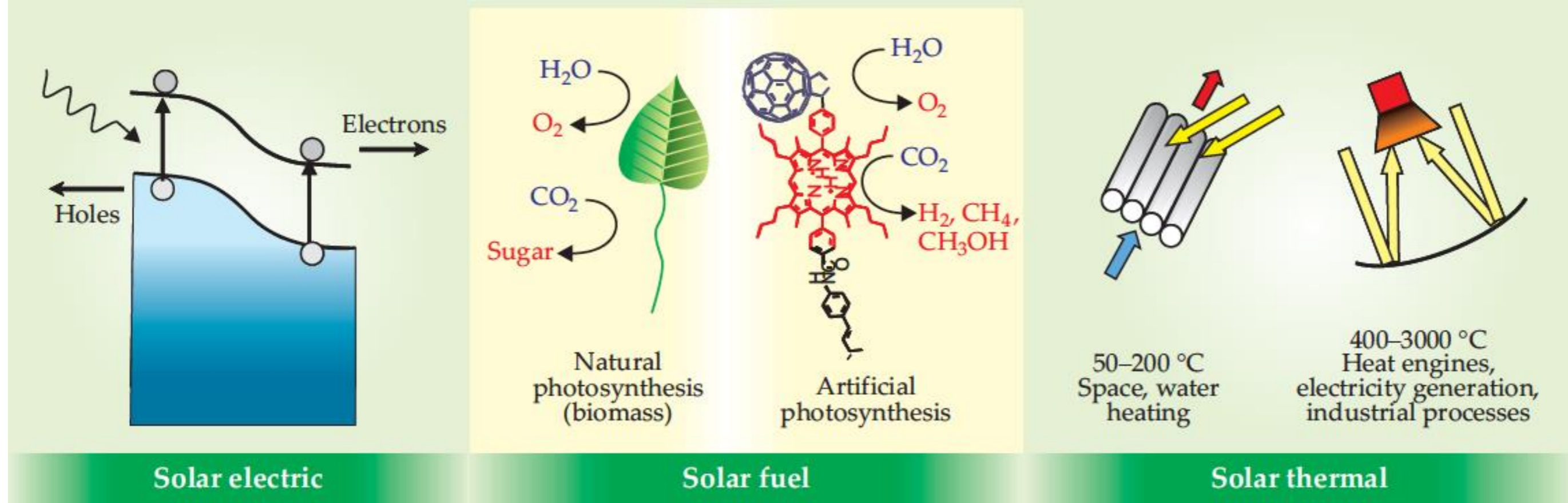
Energie primaire en 2018  
18 Twy (0,03W/m<sup>2</sup>)

En France,  
1000 W/m<sup>2</sup> en direct  
150 W/m<sup>2</sup> en moyenne

Diffus, intermittent... peut être !

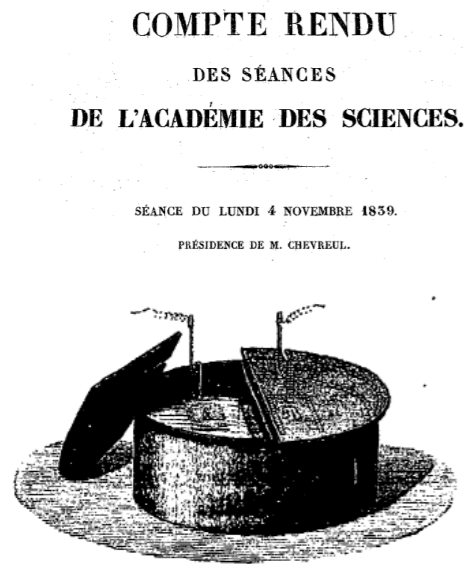
Mais véritable manne énergétique !

# Transition énergétique et conversion de l'énergie solaire



- Le premier geste c'est la sobriété! (« forçage » actuel :  $0,03\text{W}/\text{m}^2$ )
- Autres usages en conversion directe: Chimie (photosynthèse), Chaleur

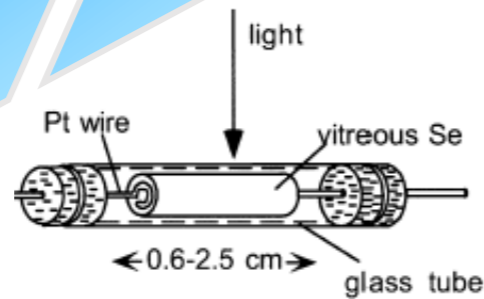
# Historique rapide



1939: First (electrochemical) solar cell by E. Becquerel

1839

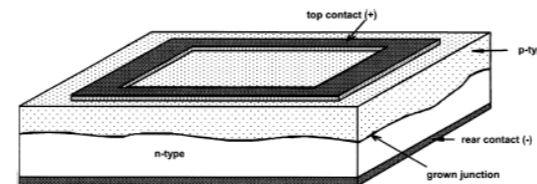
1870



Se° cell, Adam and Day

1954

1<sup>st</sup> cell using Si (5%) at Bell labs by Chapin, Fuller and Pearson



80's

90's

XXI<sup>st</sup>



c-Si is 95% of market

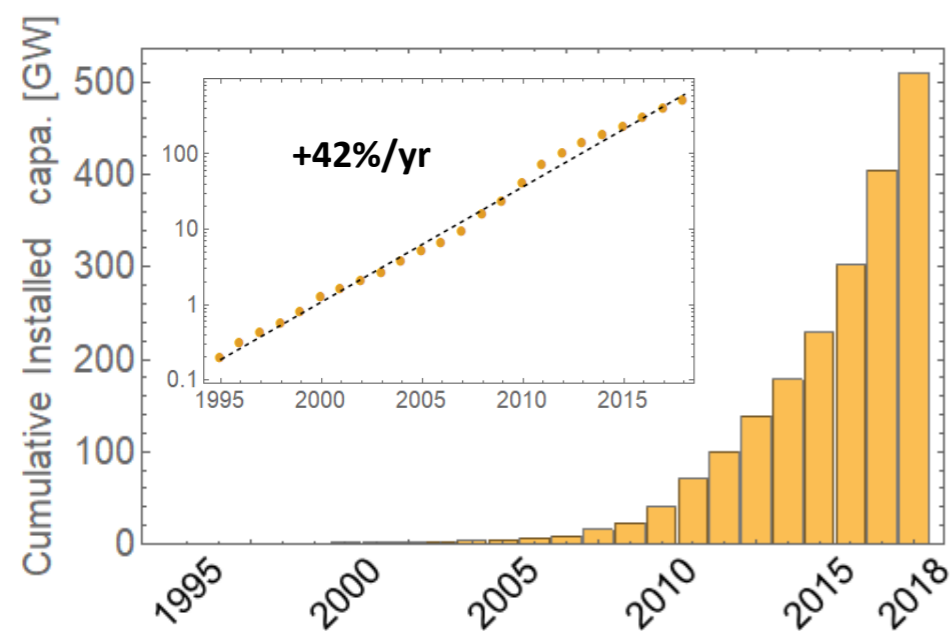


2022: Cumulated 1 TW installed PV capacity  
4% prod. électrique



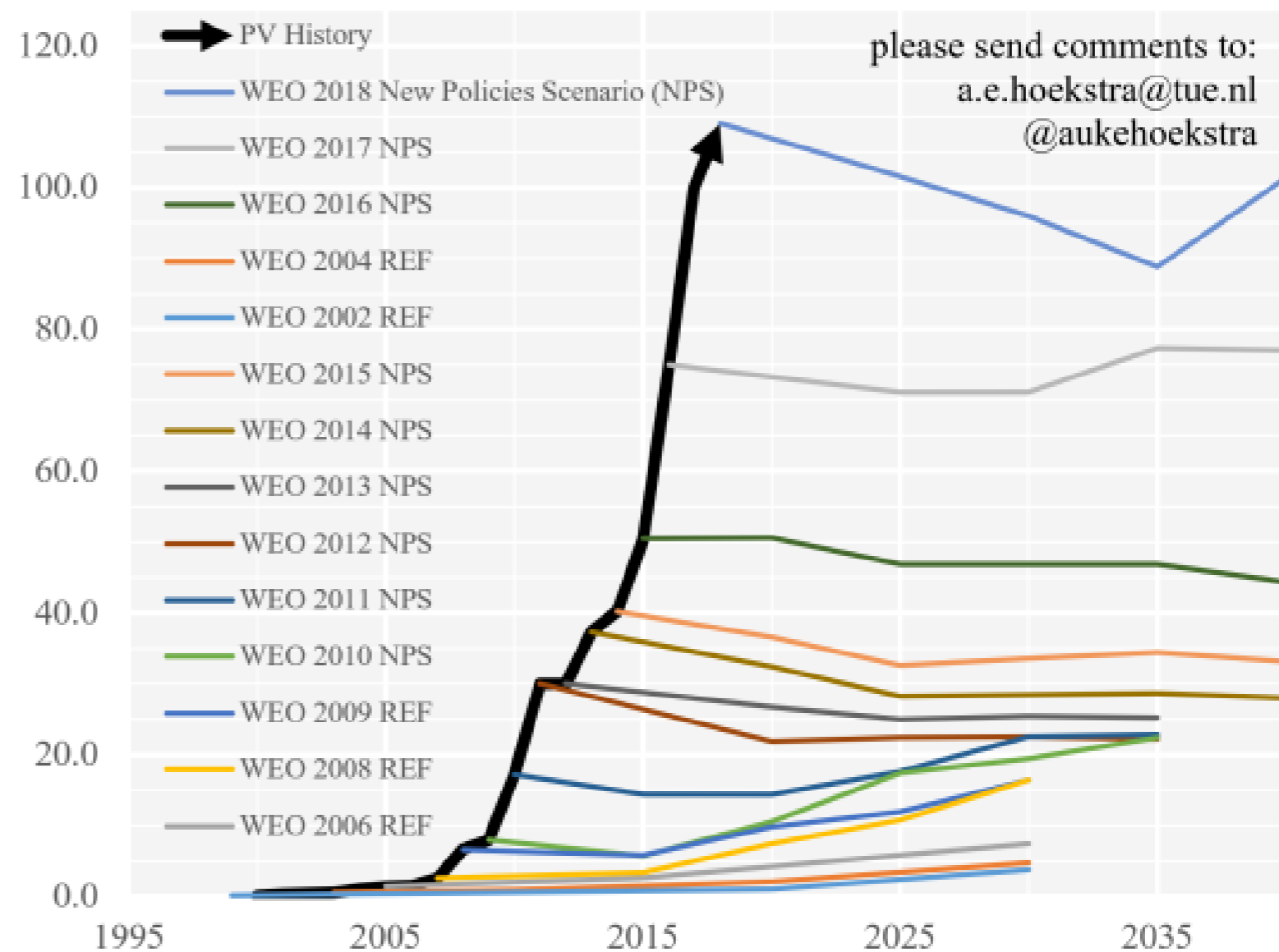
# Scenarios de développement

- Faux, avec beaucoup de régularité!



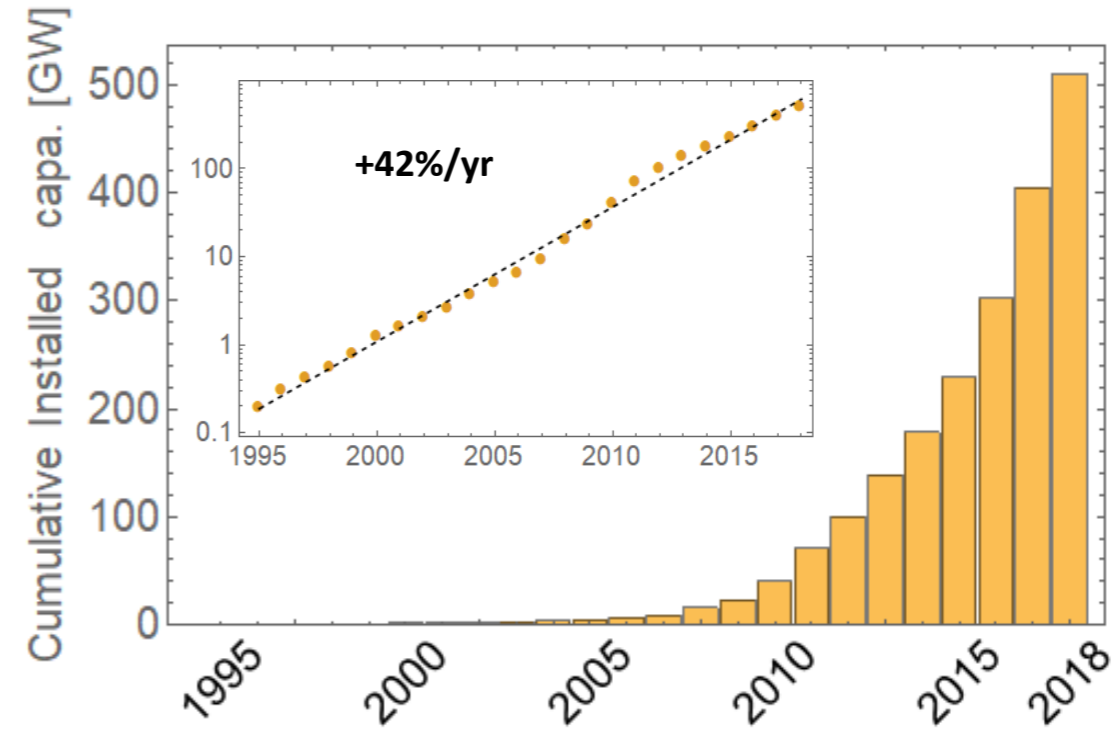
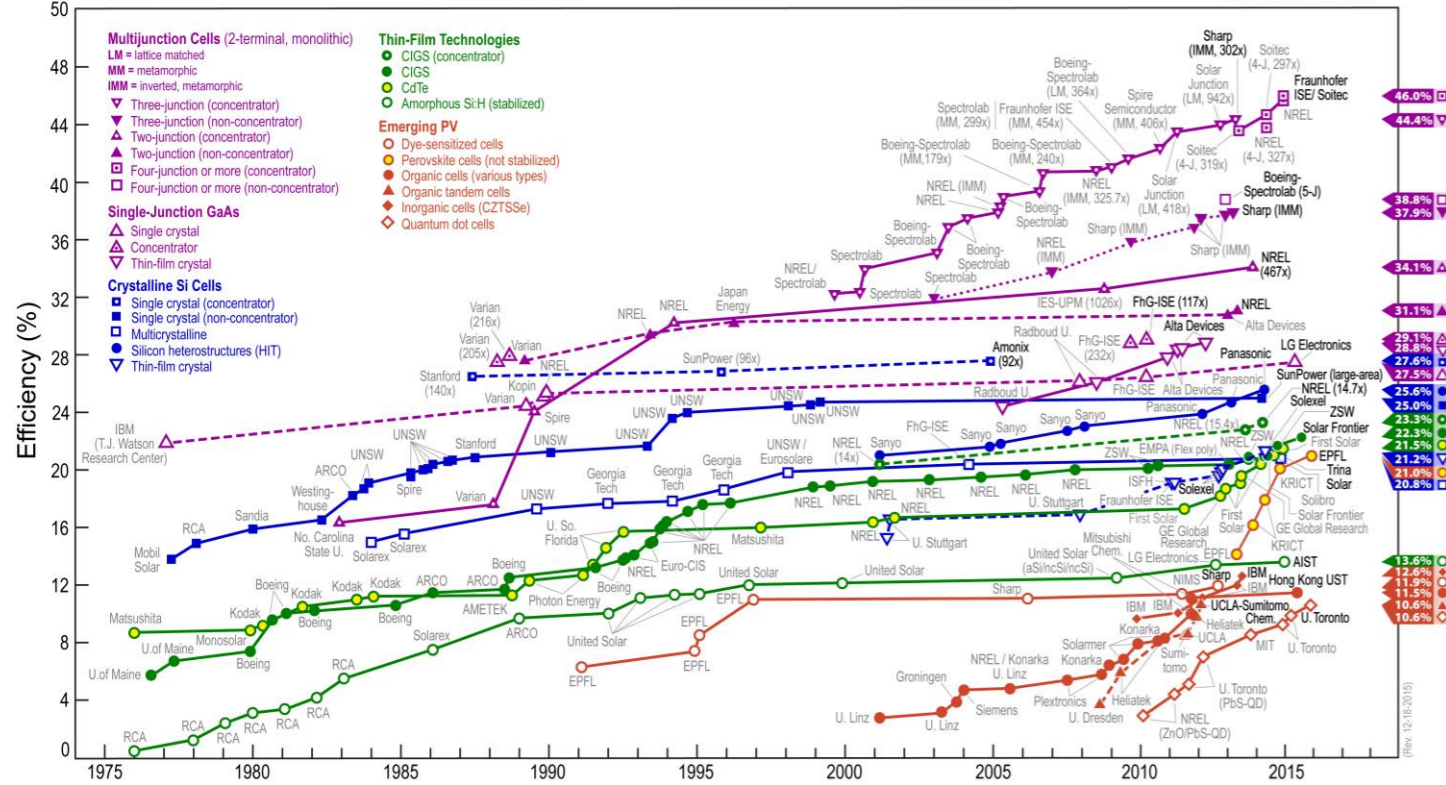
## Annual PV additions: historic data vs IEA WEO predictions

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



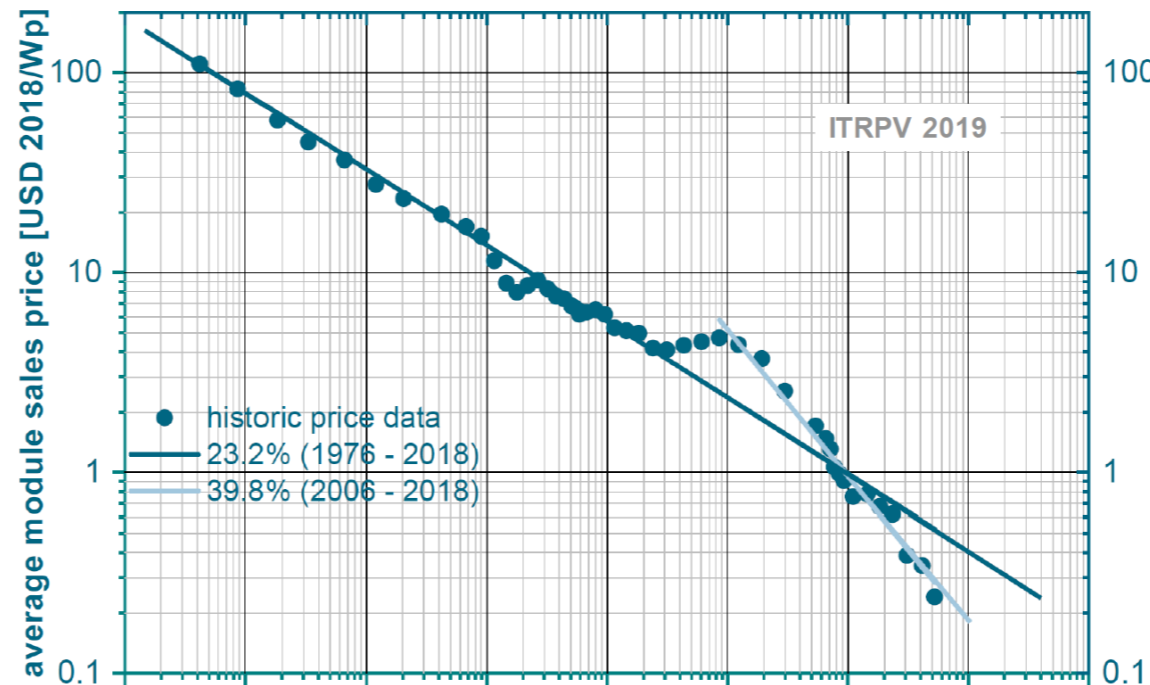
# Reaching maturity

## Best Research-Cell Efficiencies



## Synergies

- Performances (+0.5 %/y) ↗
- Volumes (+42%/y) ↗
- Cout ↘



**Cout/W:** < 0.2 cts/W (modules) +  
0.1 cts/W (électronique)

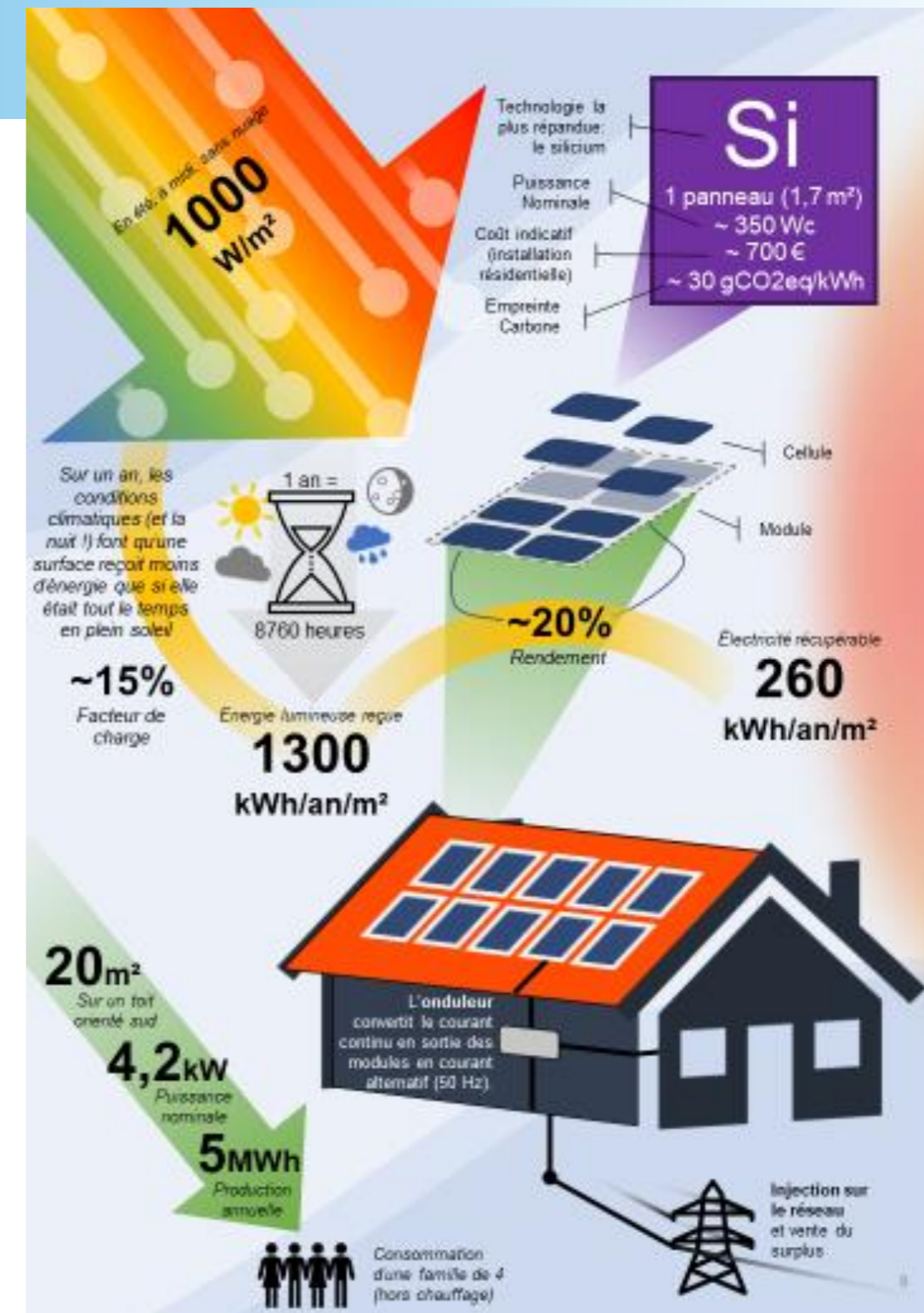
**LCOE 2018:** 4.3 cts/kWh  
(Allemagne), <2 cts/kWh (UAE)

# Production PV

- La production dépend de
  - L'insolation
  - Le facteur de charge (15-25%)
  - Le rendement du panneau et du système

Rendement: puissance électrique sur puissance lumineuse reçue, spectre de référence, 25°C, incidence normale, ...

- Performances
  - > 20% Commercial
  - > 45% Labos
  - ~+0.5%/an (lab & indus.)

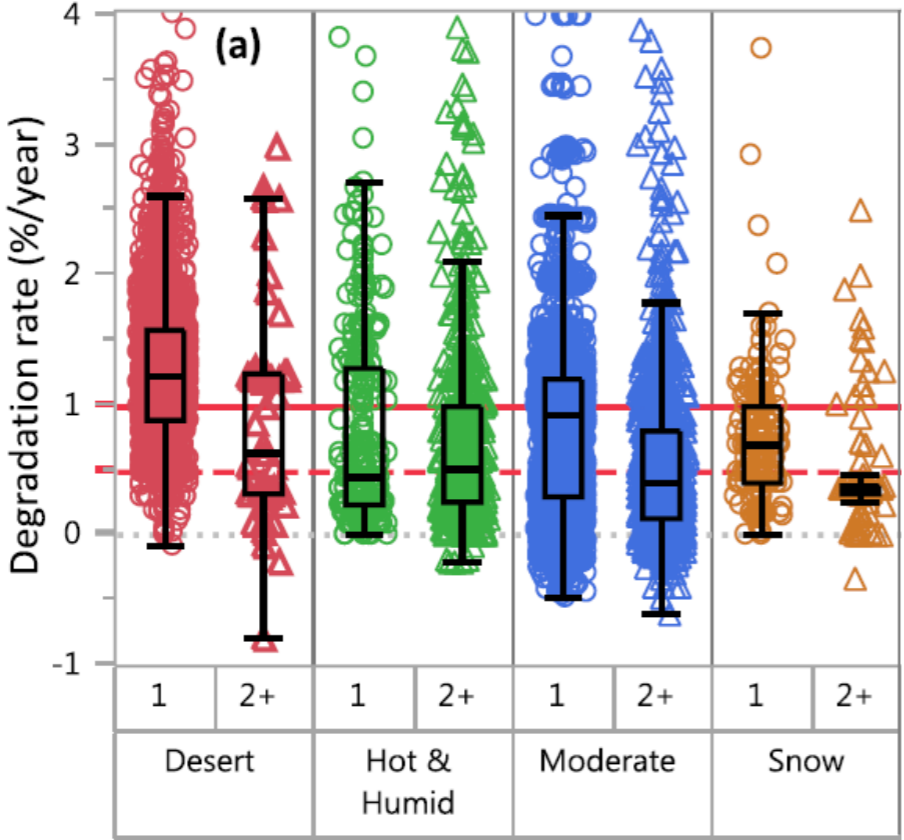




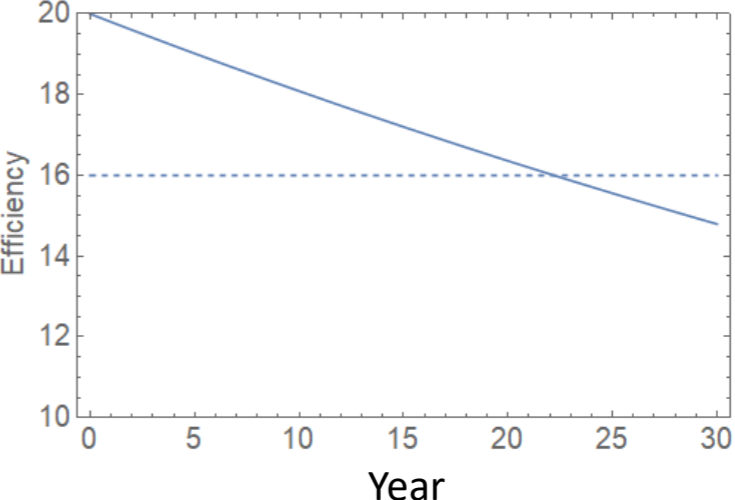
# Fiabilité

Durée de vie: 20-30 ans (< -1% /an)

OM : Degradation rate for Si  
 -1%/yr → 20 yr+ lifetime

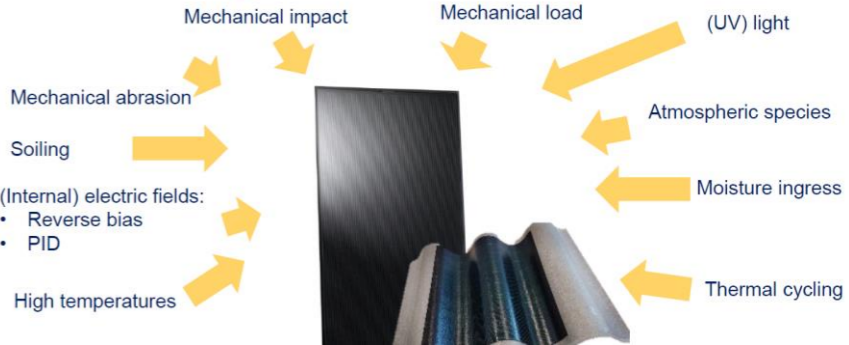


D. Jordan et al, Compendium of photovoltaic degradation rates, 2016



Degradation still a hot topic for perovskite technologies

**Lifetime limiting factors**



# En France

- Aujourd'hui 13 GW installés et 3% de l'électricité
  - La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit 20 GW installés en 2023 et entre 35 et 44 GW en 2028
  - Le système énergétique actuel peut fonctionner avec > 20% ENR variables

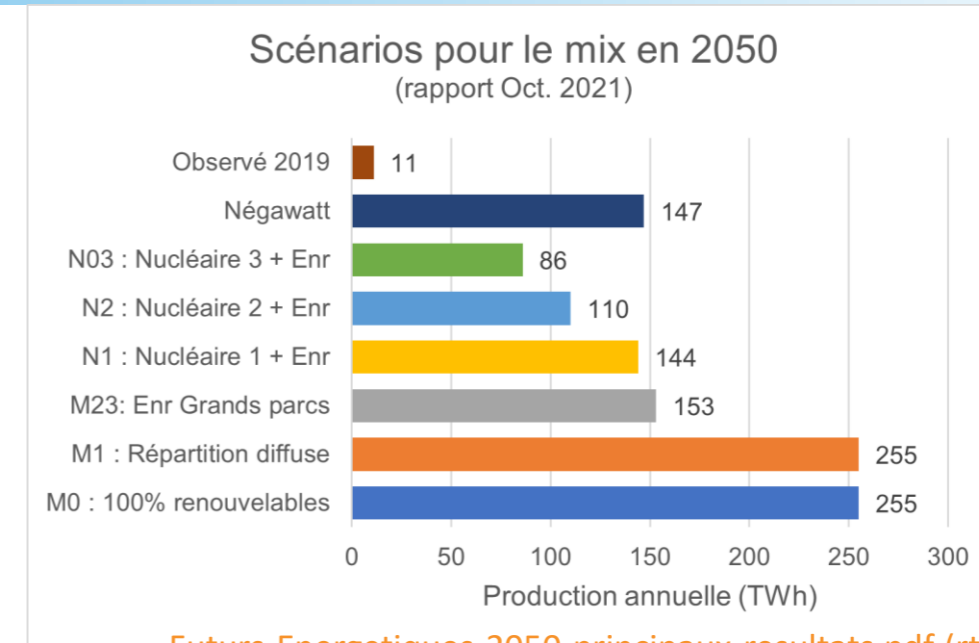
## Scenarios

- 100% renouvelable avec 36% PV
- Soit environ 1200 km<sup>2</sup> de panneaux
- 0.2% du territoire et 3% des surfaces artificialisées

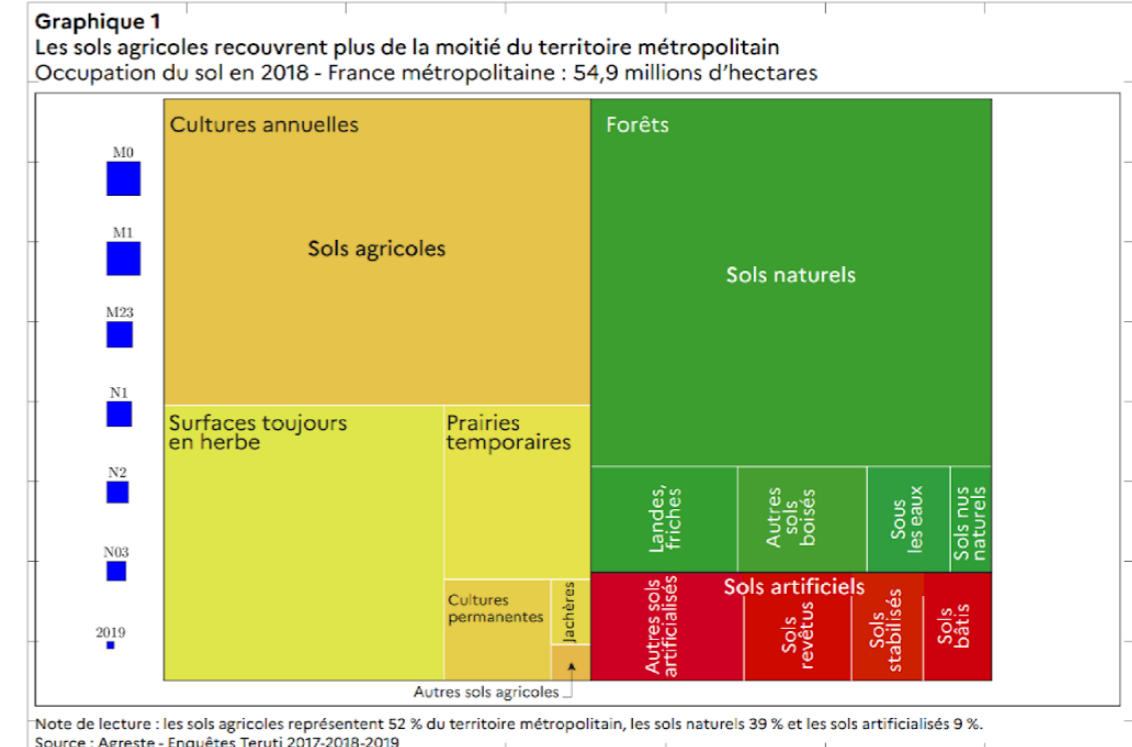
## Surfaces artificialisées

- Toitures : 1200 (satellite) à 2200 km<sup>2</sup> (IGN)
- Friches, parking: 53 GW
- Flottant (10 GW?) , agrivoltaïsme, vertical,...

<https://solairepv.fr/>

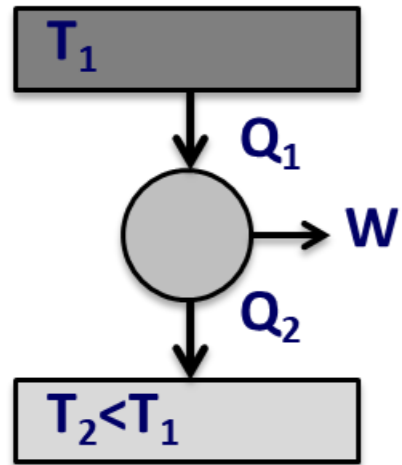


[Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf \(rte-france.com\)](https://www.rte-france.com/futurs-energetiques-2050-principaux-resultats.pdf)



# DÉFIS

# Limites de rendement et description des cellules solaires

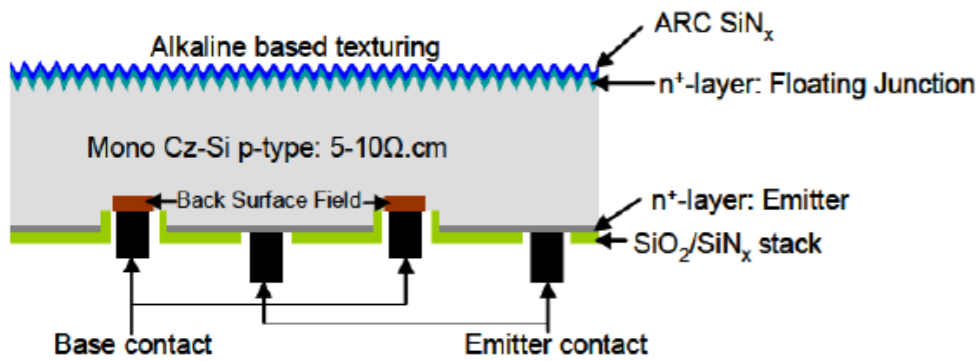
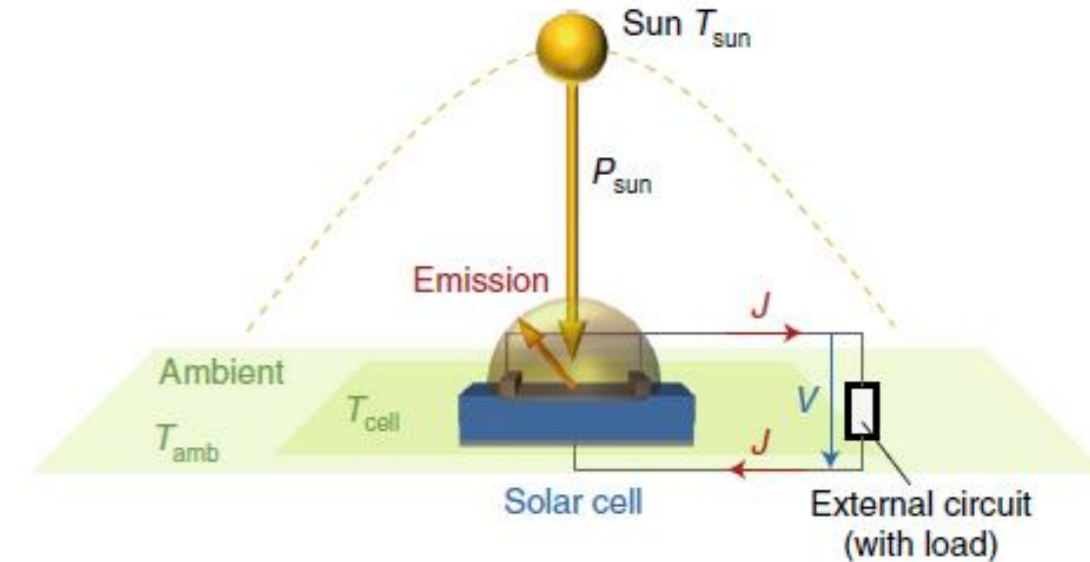


Description de cellules solaires:

Thermodynamique

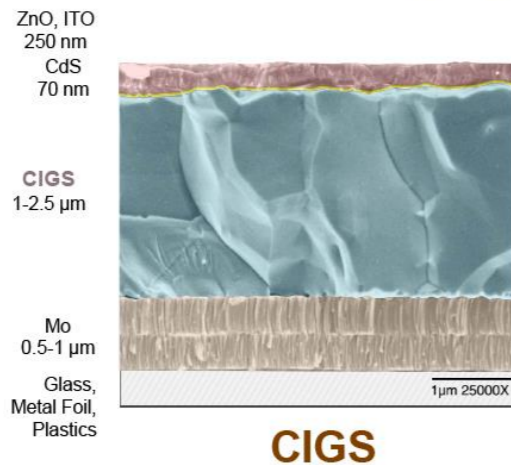
Optique

Optoelectronique



Carnot:  $\left(1 - T/T_s\right) \cong 95\%$

=> Mais c'est quoi la température du soleil, au fait?



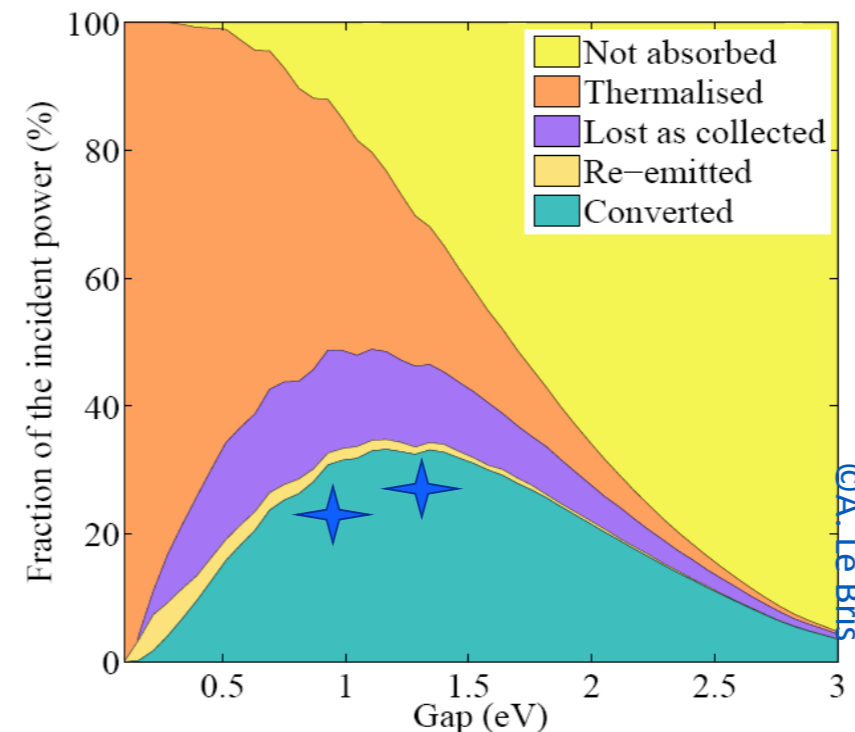
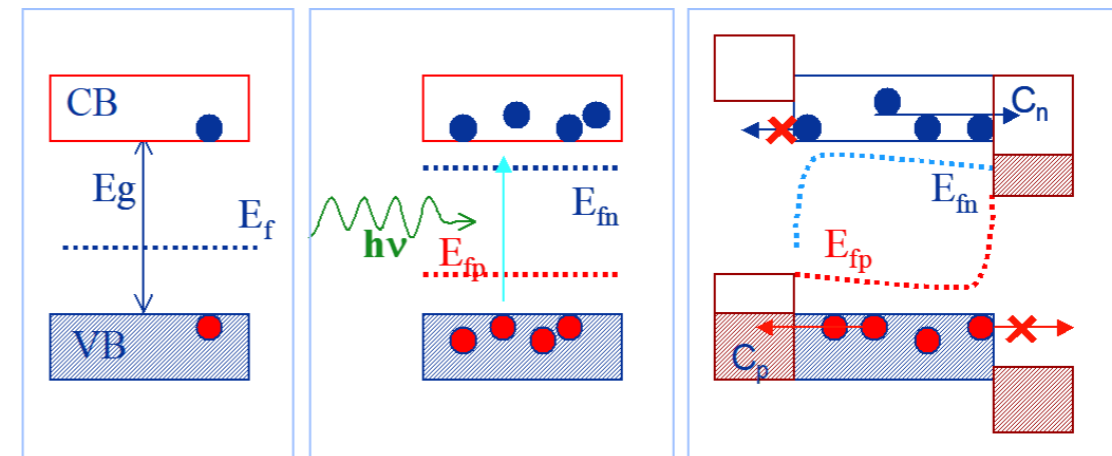
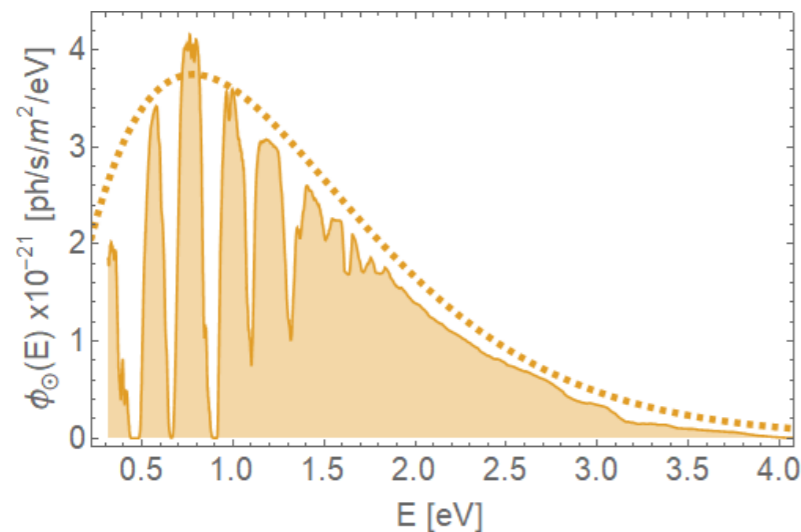
# Le futur du photovoltaïque: performance

- Le rendement de conversion sera le principal levier de baisse des coûts

- Rendements actuels < 30 %
- Rendements ultimes > 90 %

- Utilisation optimale du spectre solaire

- Absorber tout les photons du spectre
- Extraire le maximum d'énergie de chaque photon



Guide for the perplexed to the Shockley-Queisser model for solar cells

Jean-Francois Guillemoles, Thomas Kirchartz, David Cahen & Uwe Rau

Nature Photonics 13, 501-505 (2019) | Download Citation

# Evolutions des rendements



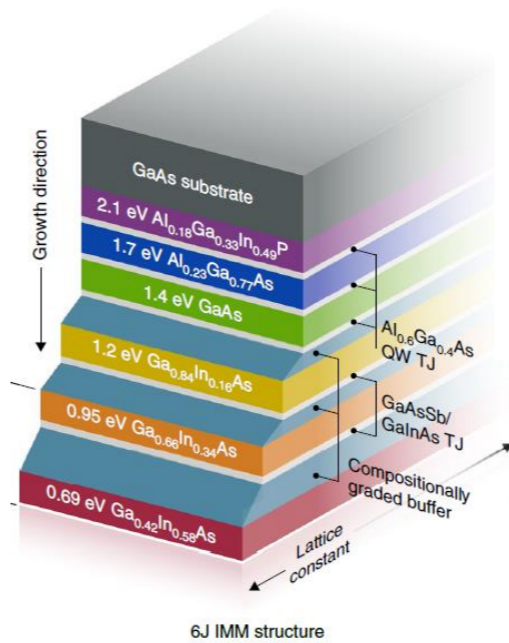
Systèmes commerciaux

Maximum théorique des cellules simples  
(limite de Shockley Queisser)

Record cellule silicium

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

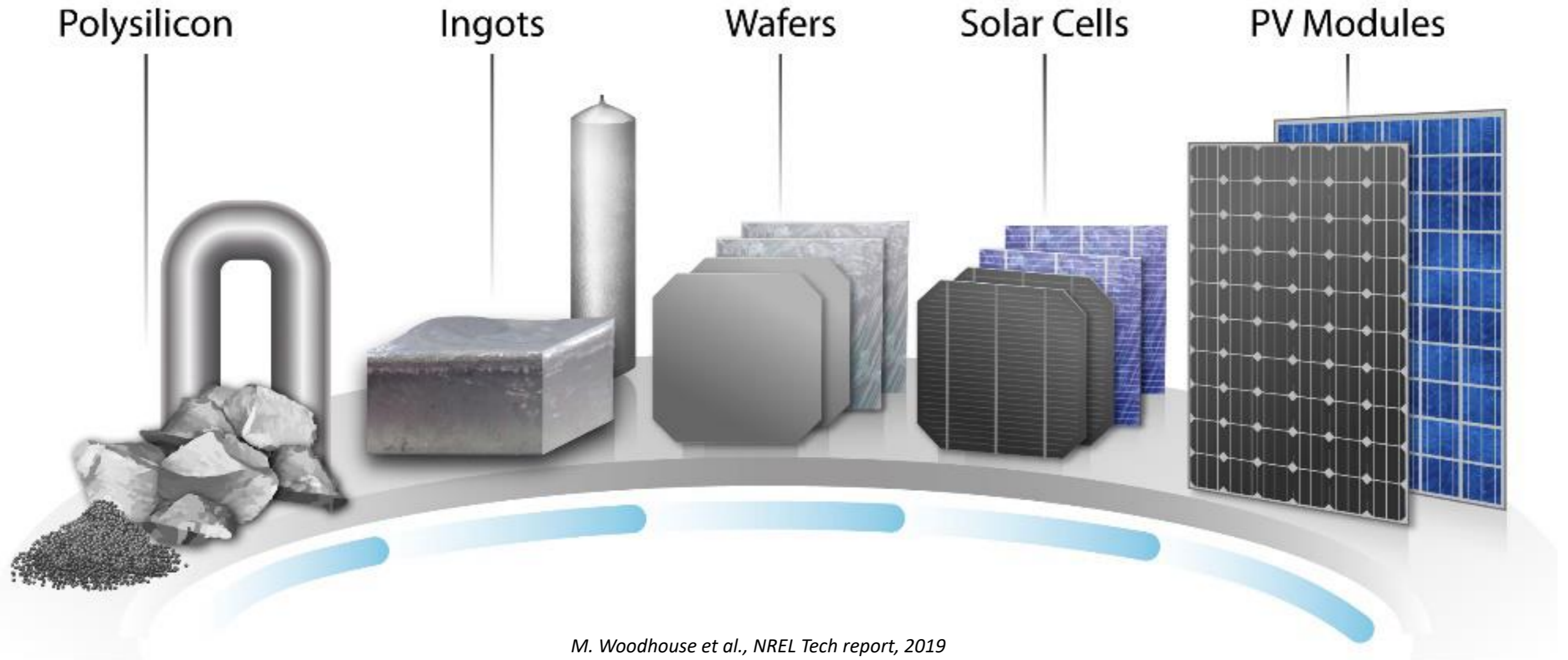
John F. Geisz, Ryan M. France, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Andrew G. Norman, Harvey L. Guthrey, Matthew R. Young, Tao Song and Thomas Moriarty



Rendement cellule tandem

Limite absolue de rendement

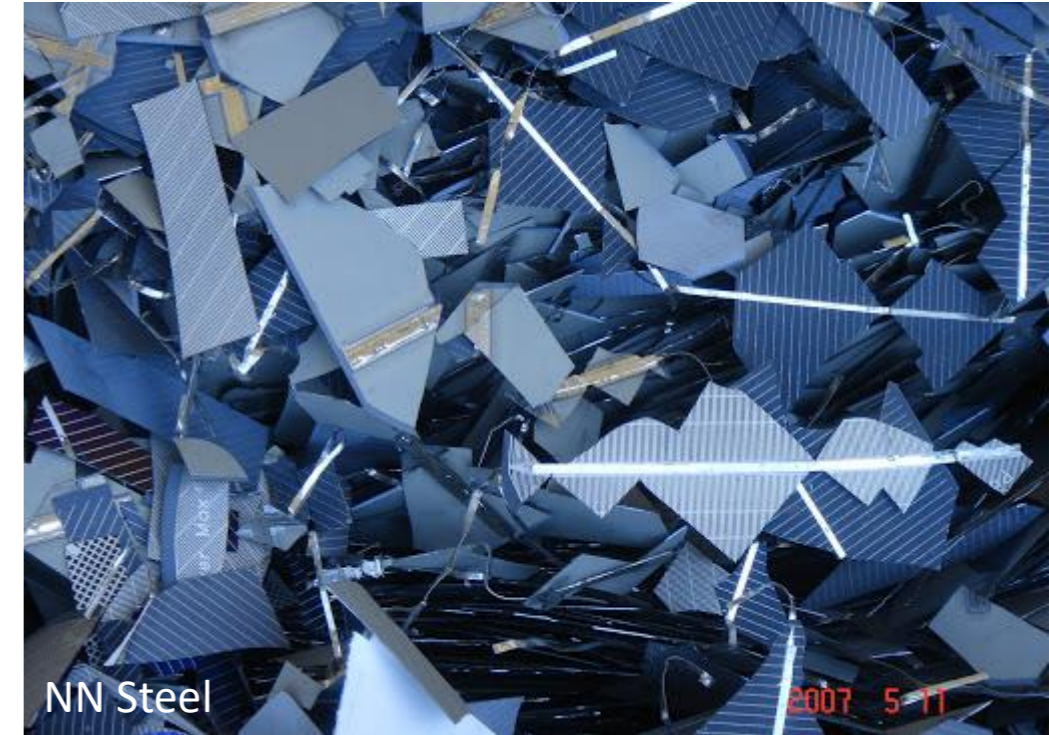
# De la cellule au module



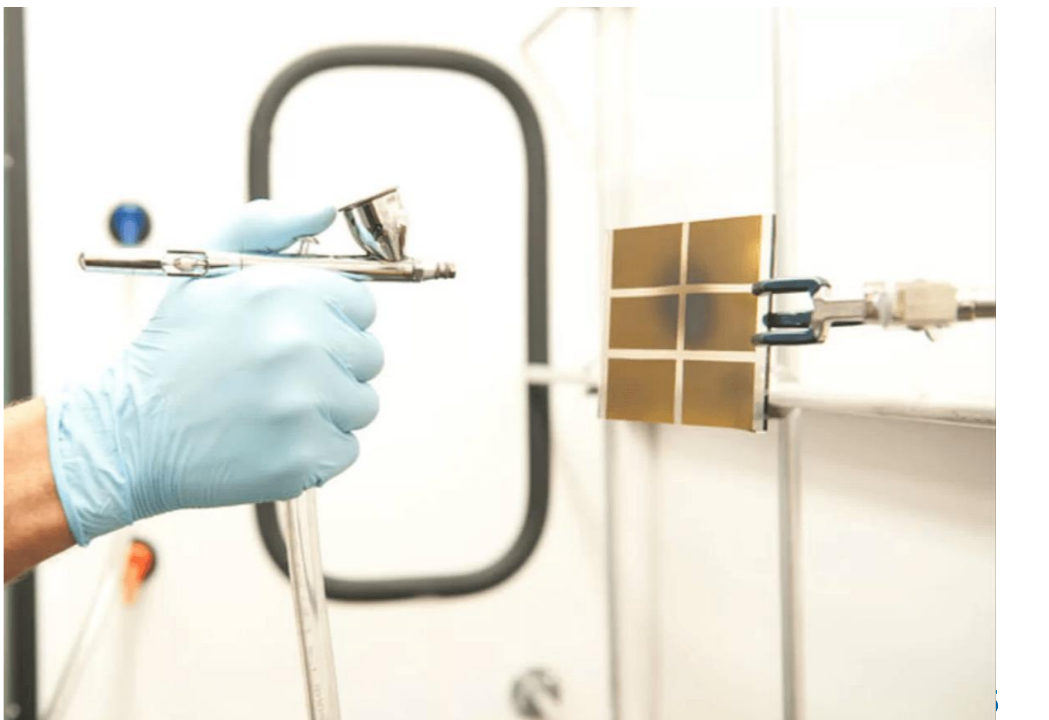
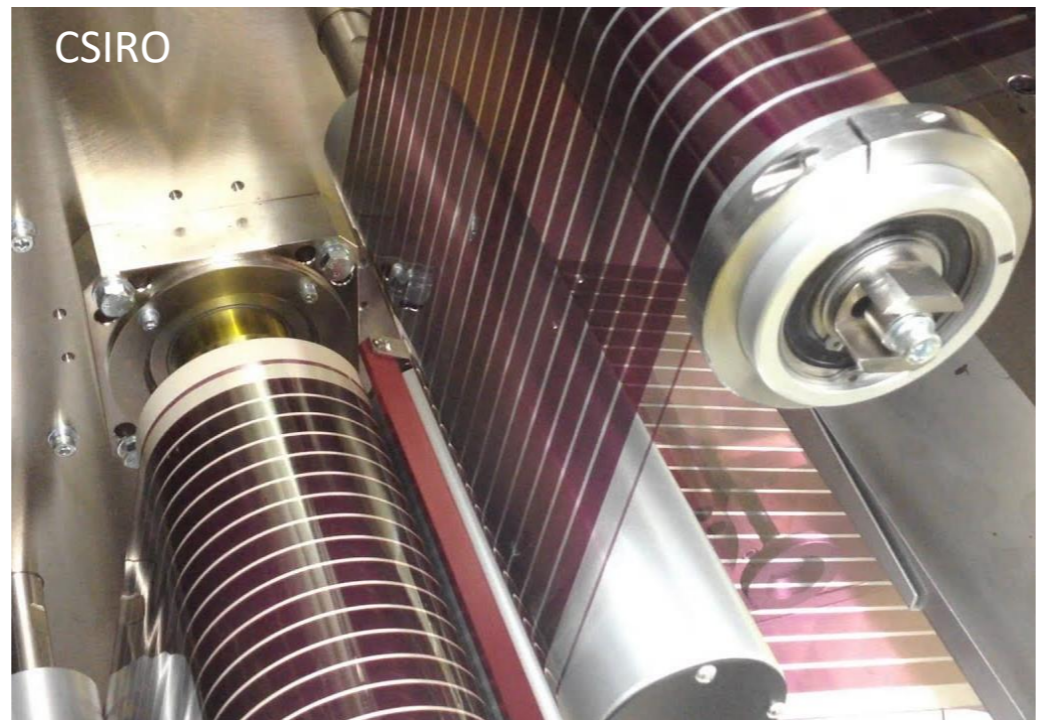
*M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019*

# Faire évoluer les procédés industriels

Augmenter les capacités  
de productions  
(objectif TW)



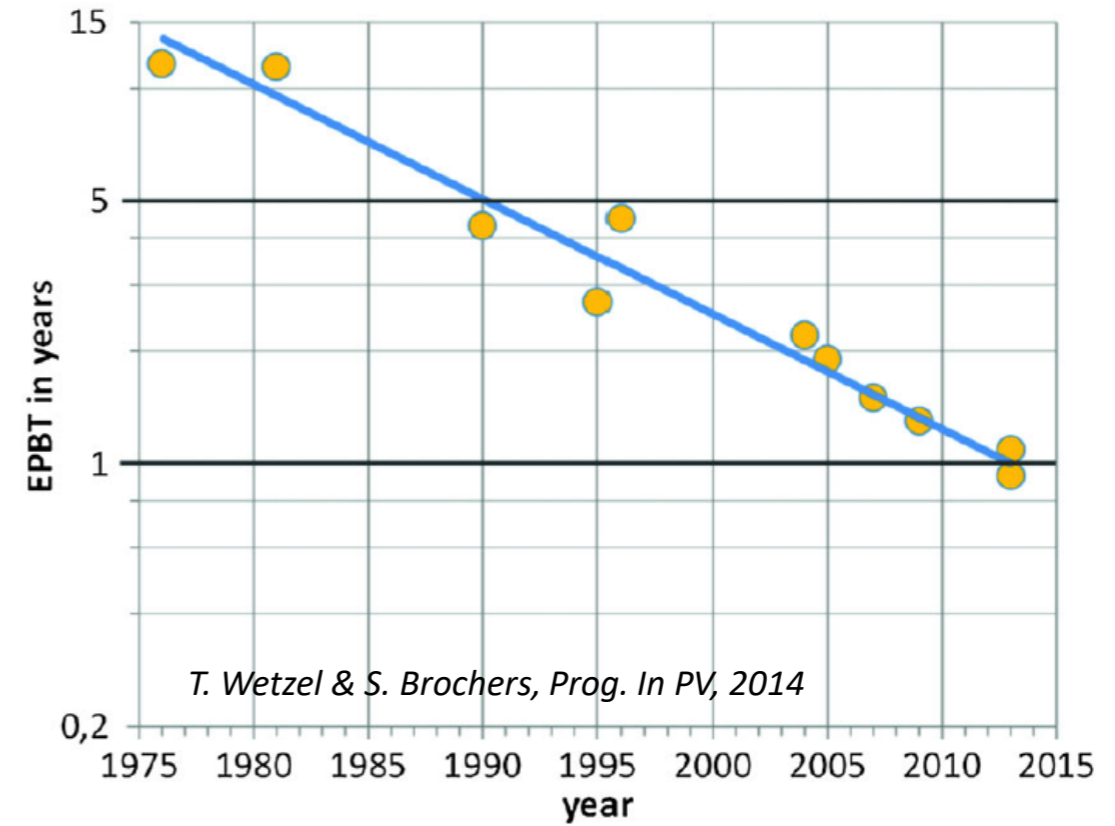
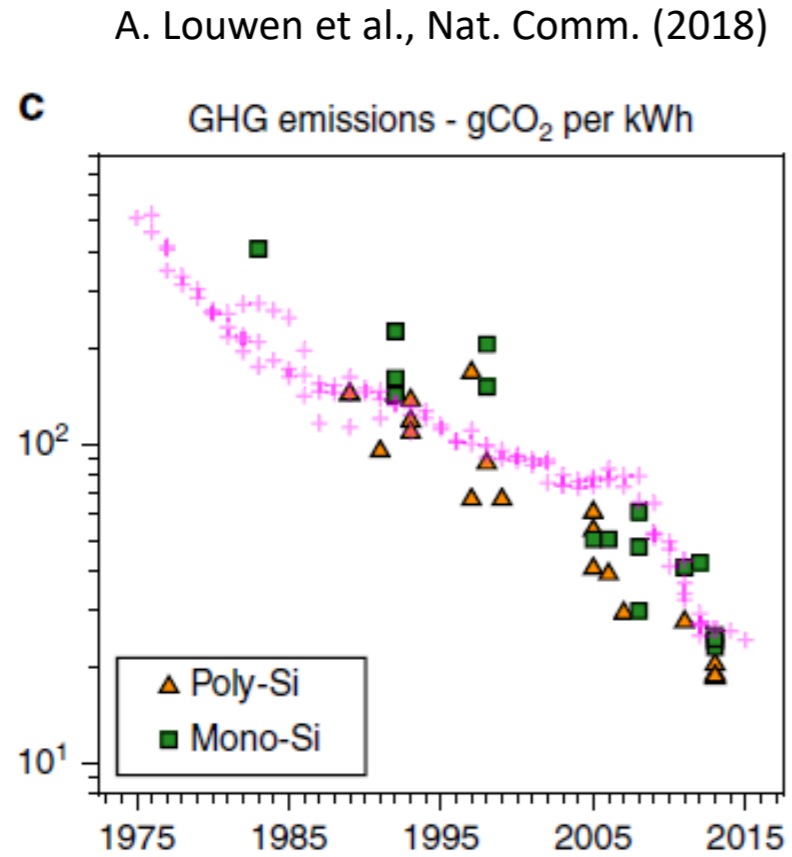
Technologies de pavage  
→  
technologies de revêtement ?



Prévoir la fin de vie  
dès la conception

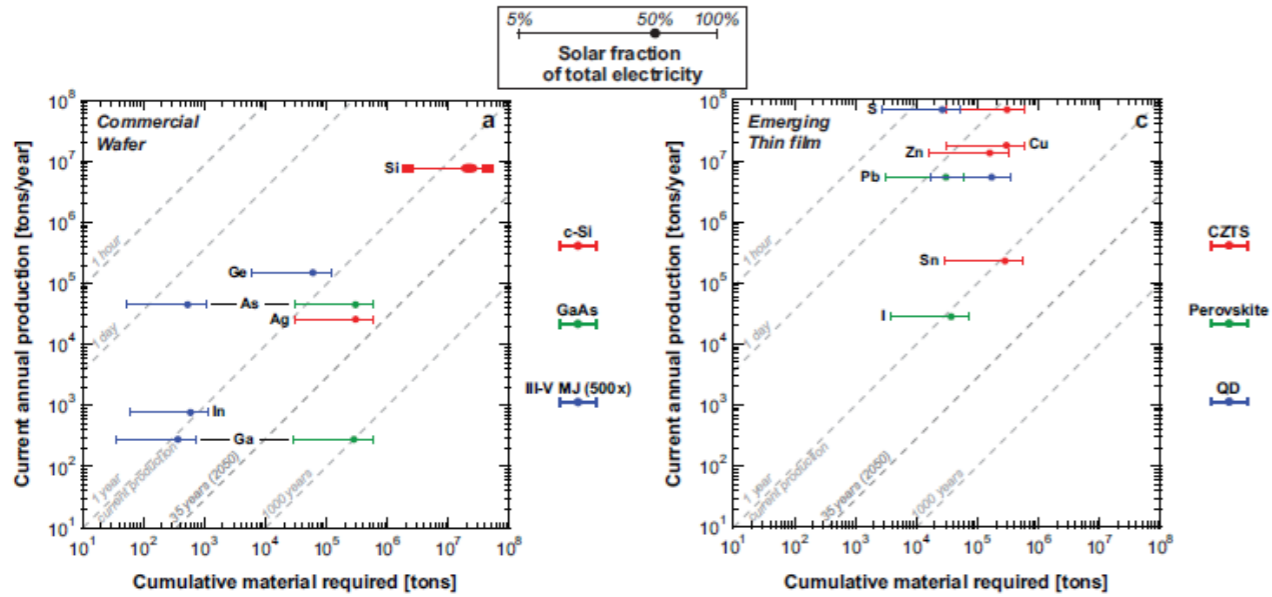


# Environmental footprint evolution



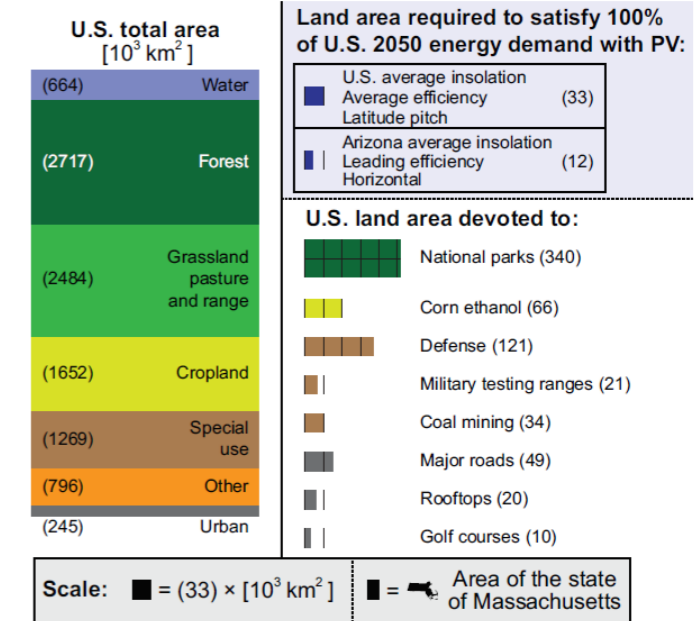
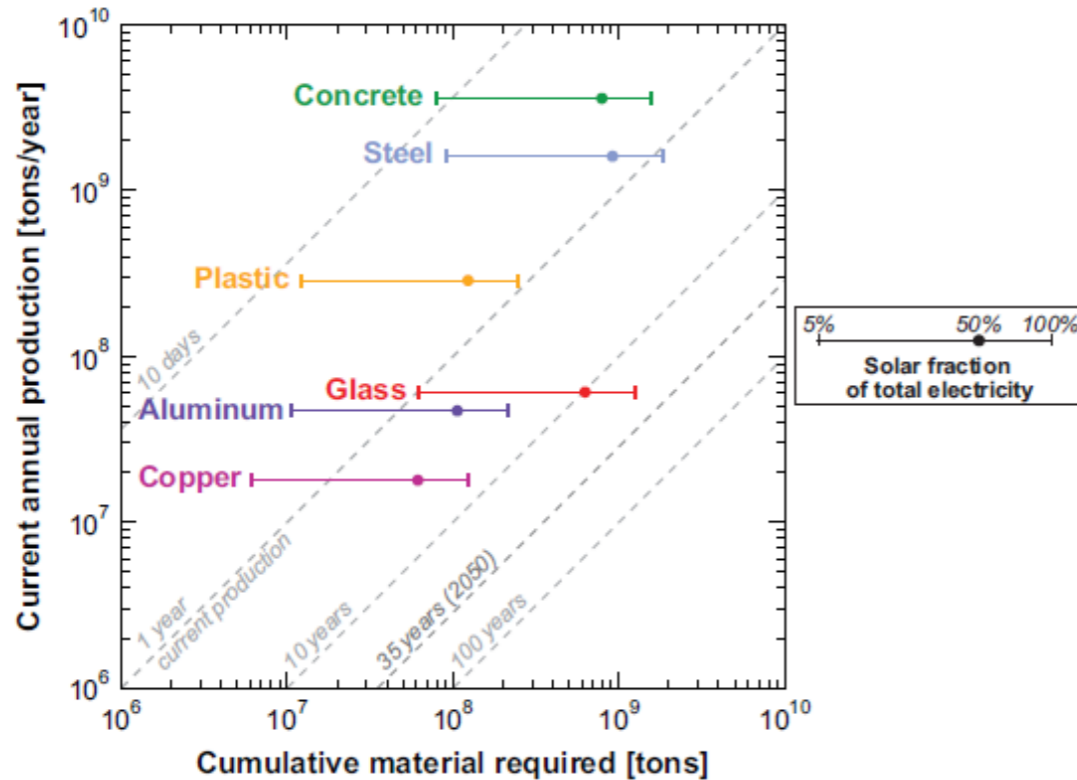
Retour énergétique : 0.7 à 2 ans (systèmes)

# Soutenabilité technologique



Main technology:

- Si is abundant but
- Purification costs (2 Mt c-Si)
- Ag (> 50% of demand), Pb, ...



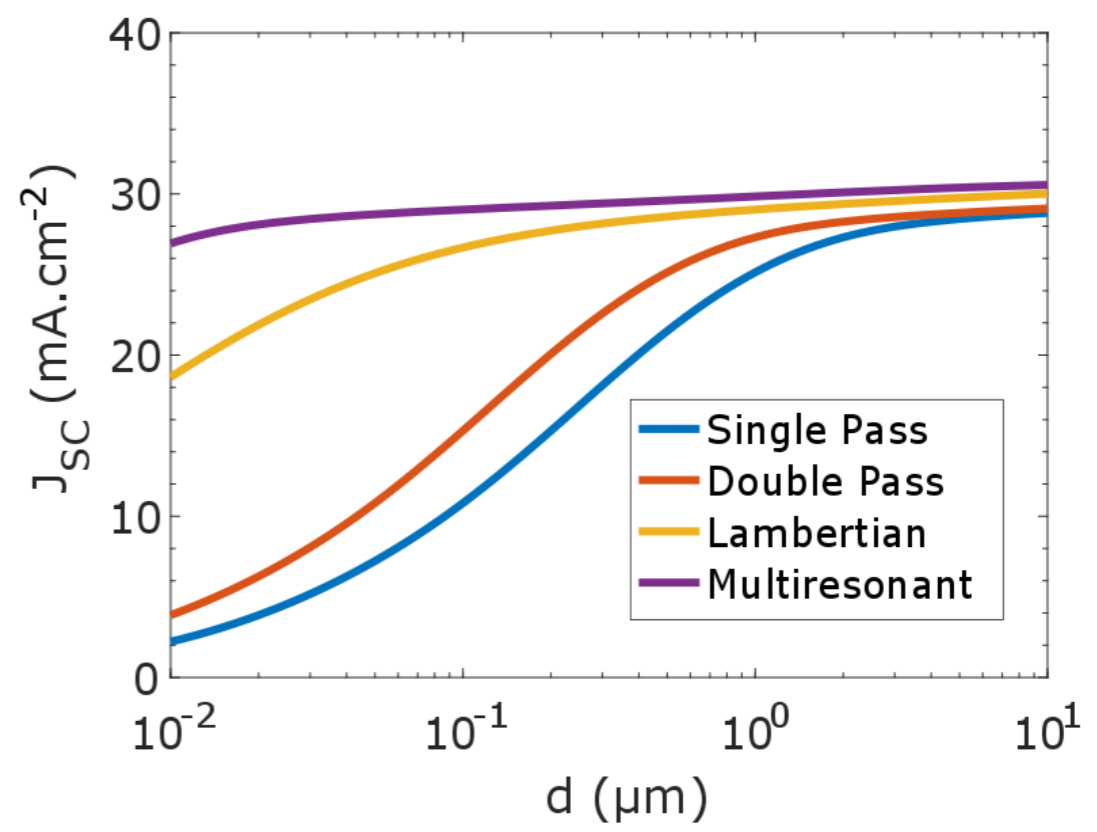
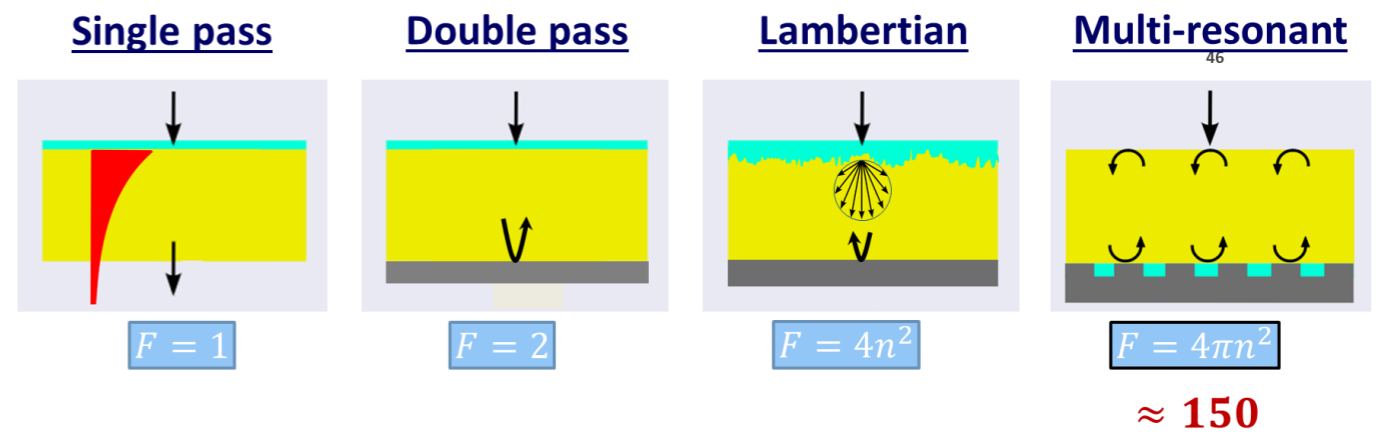
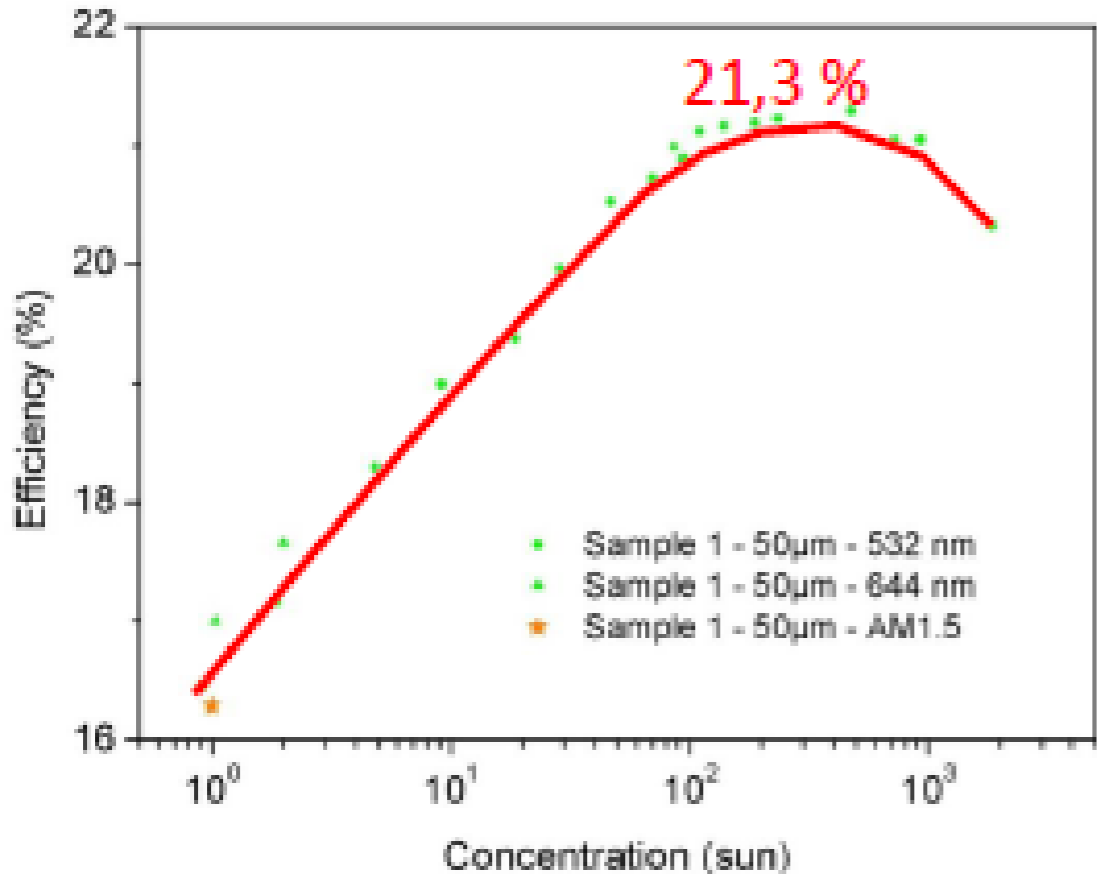
Note: The solar land requirement is calculated assuming that solar PV generation is used to meet 100% of projected 2050 U.S. electricity requirements (roughly 0.5 TW averaged over a year). Details of the calculation are given in Appendix A. Figures for other land areas represent actual current uses, and numbers in parentheses denote thousands of square kilometers of area. All elements of the figure are to scale.<sup>viii</sup>

MIT: 0.5 TW in 2050 (projection)

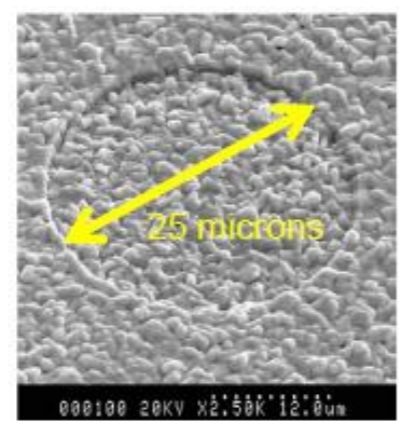
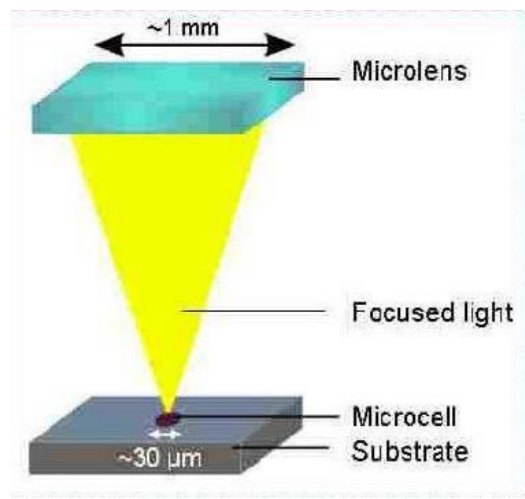
Installed PV : 1TW → 50 TW @ 10% capacity factor?

- Already some 5000 km<sup>2</sup>
- That 's > 50 Mt of glass

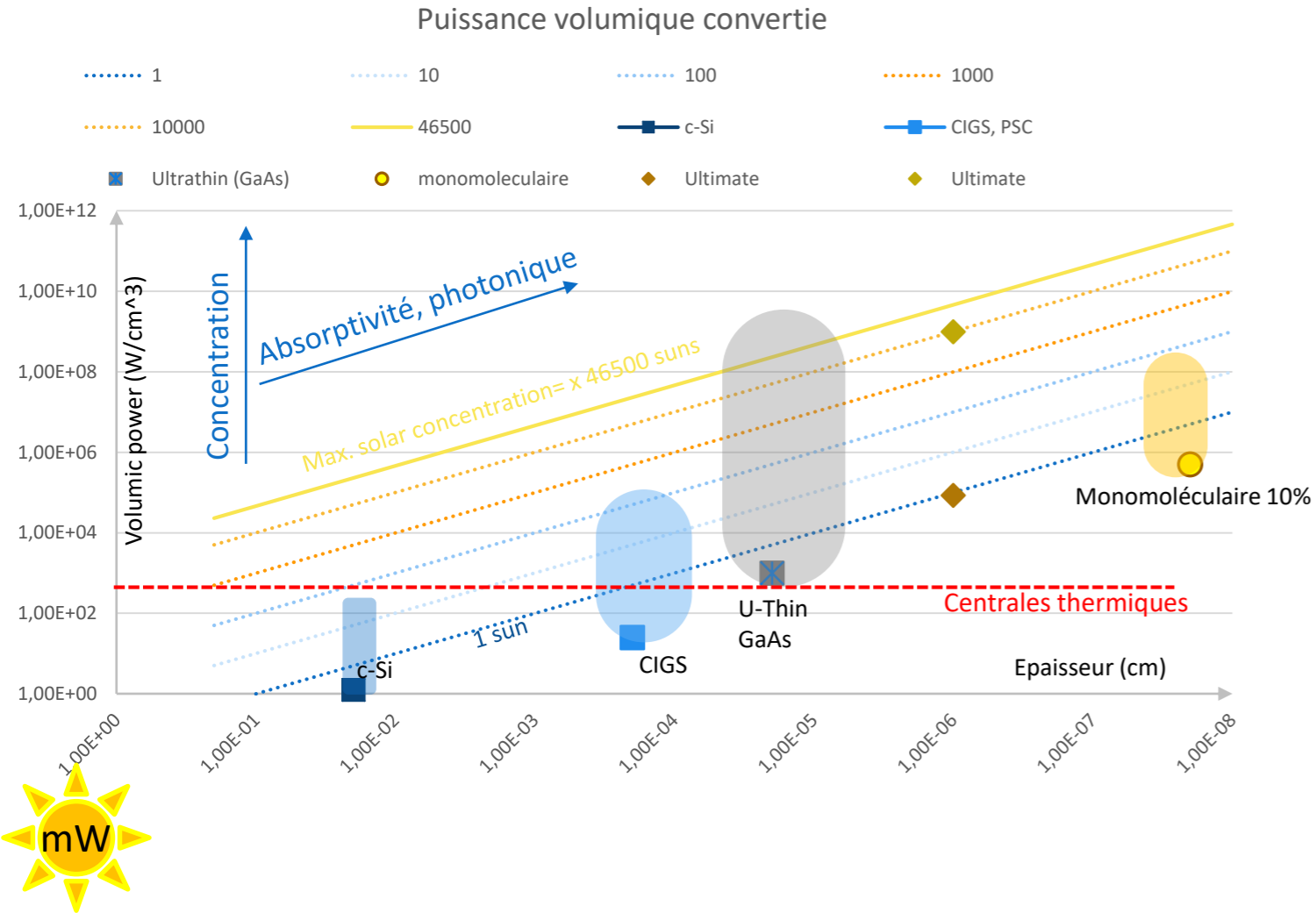
# Reducing material use: Limits to light trapping and concentration



$J_{sc} = 28 \text{ mA.cm}^{-2}$  in GaAs:  
**from 2  $\mu$ m down to 30 nm!**



# Ordres de grandeurs



Quelle puissance volumique dans les systèmes de conversion chaleur => électricité?

- Centrales thermiques et couches minces: 100-300 W/cm<sup>3</sup>
- Photovoltaïque: Valeurs ultimes au GW/cm<sup>3</sup>

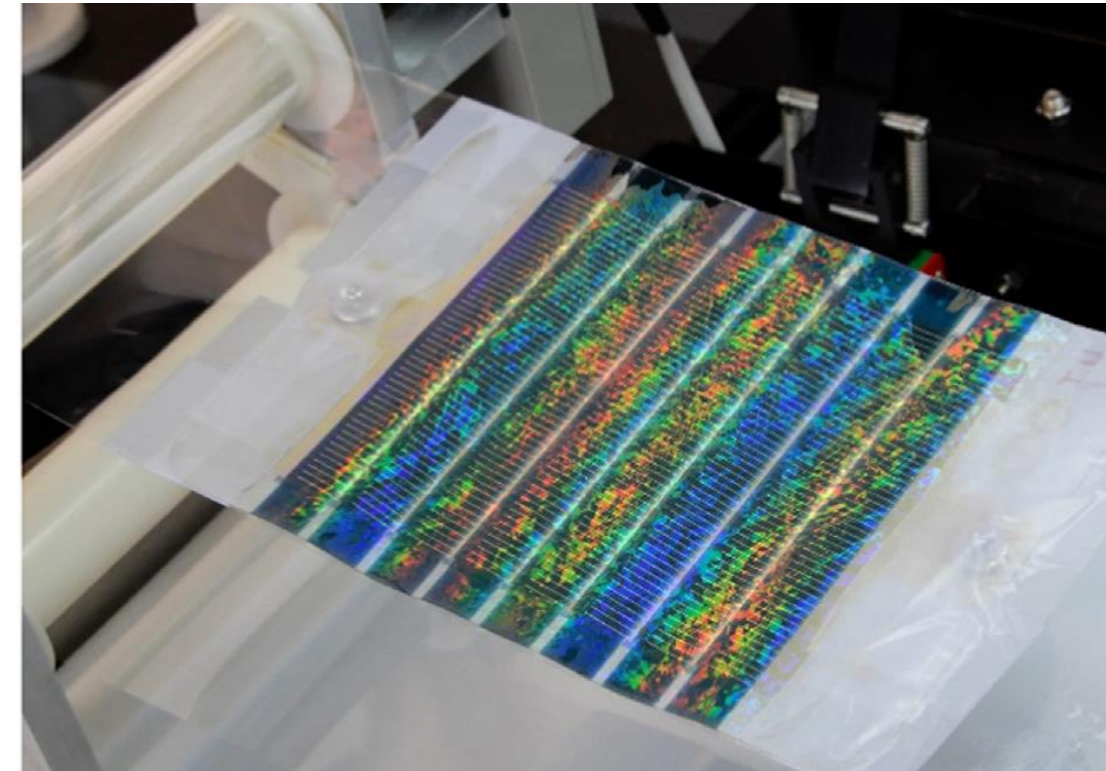
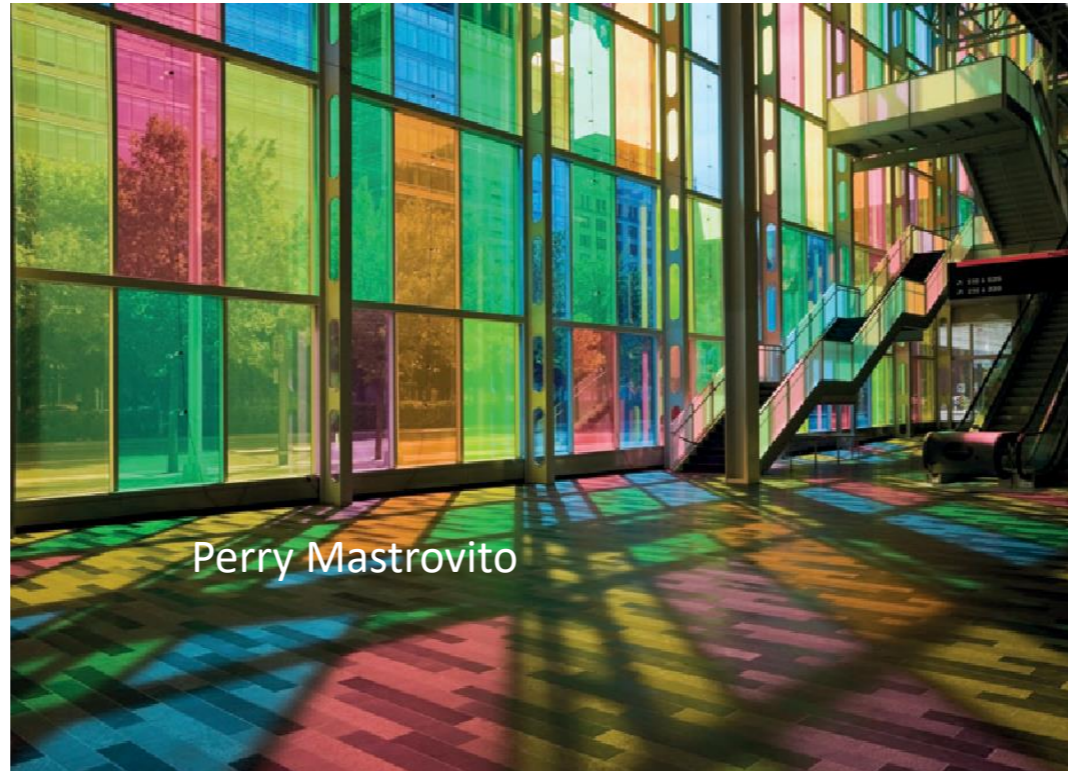
=> Les matériaux actifs ne sont pas un problème fondamental

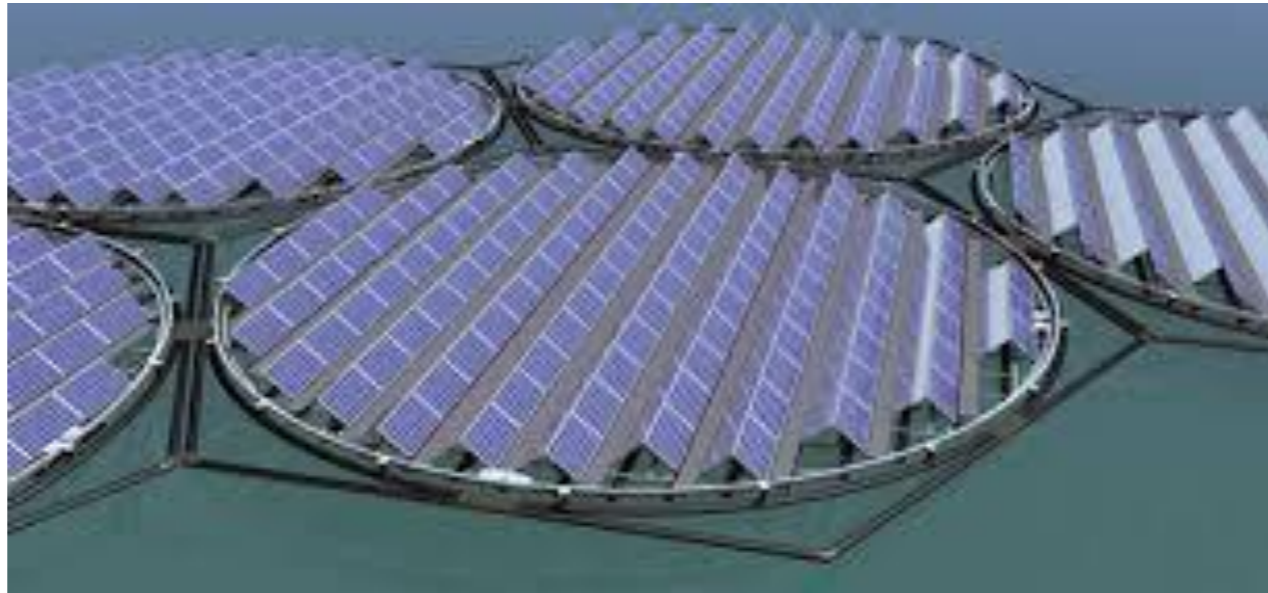
# Développer des usages spécifiques

## *Propriétés mécaniques*



## *Propriétés optiques*

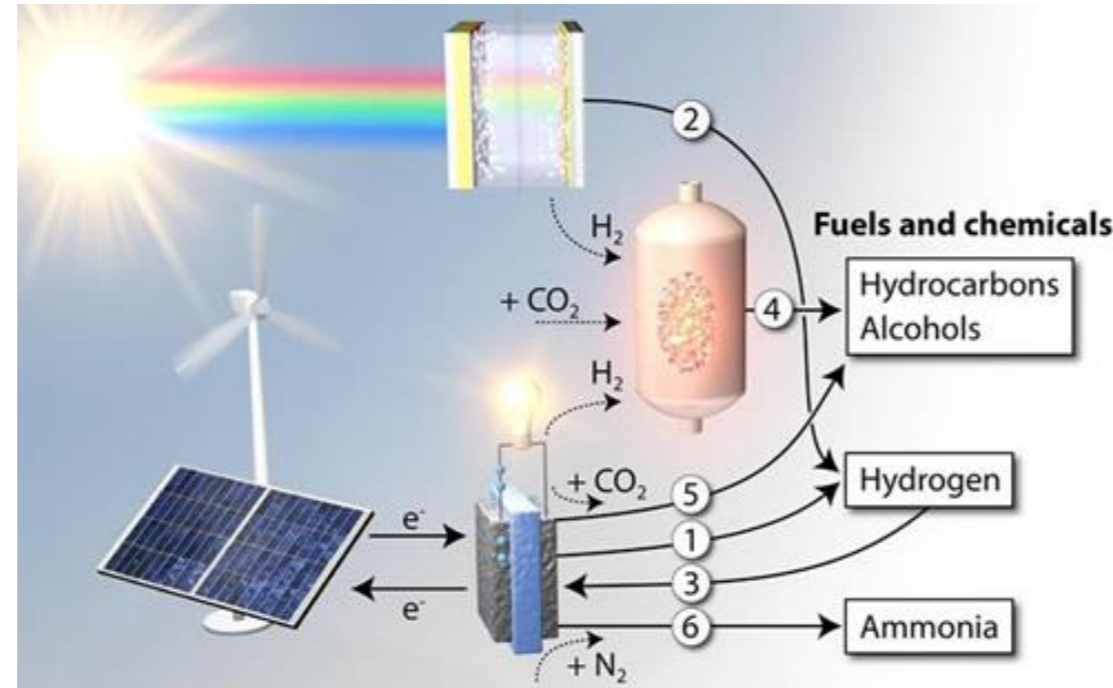




# Intégration au réseau

## Energie multi-vecteurs

Solaire  
↓  
Chimie (H<sub>2</sub>)



Solaire  
↓  
Thermique



## Adapter usage et production



# Capacity factor and Variability

- Day/night & Clouds
  - limits usage
- Has an impact in terms of capacity factor
  - 15% typically for flat plate
  - and therefore on energy mix penetration (without storage/smart grid)
- Can the capacity factor be improved?
  - Location
  - Tracking
  - Smartgrid, storage, ...

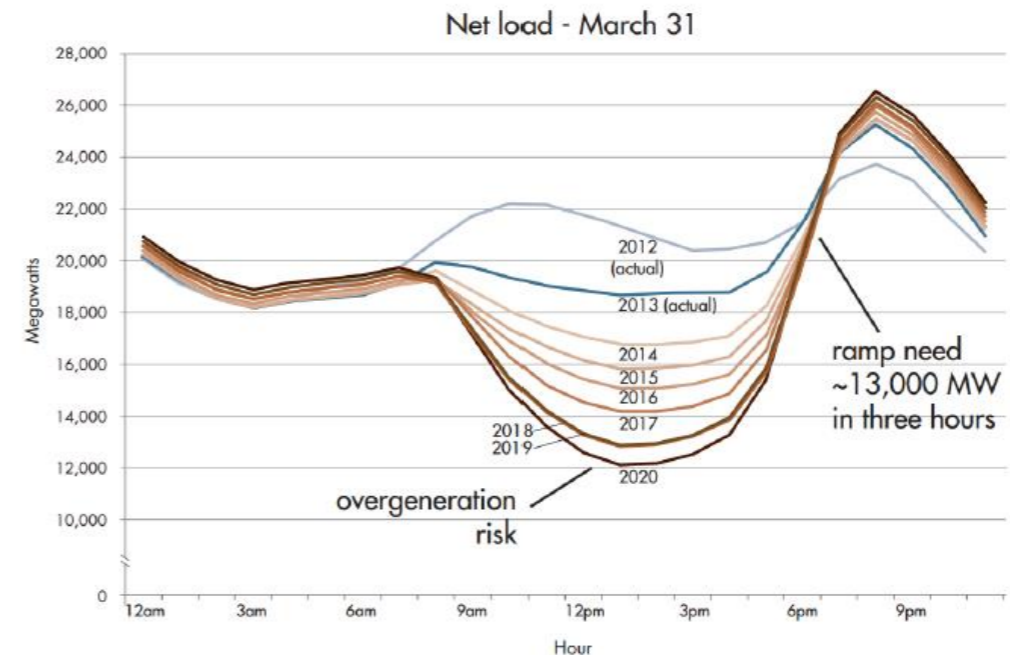
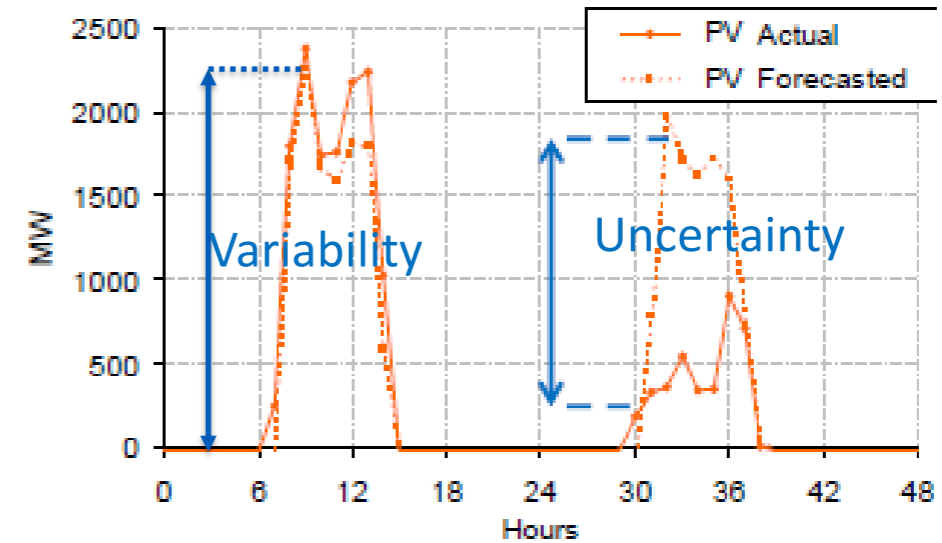
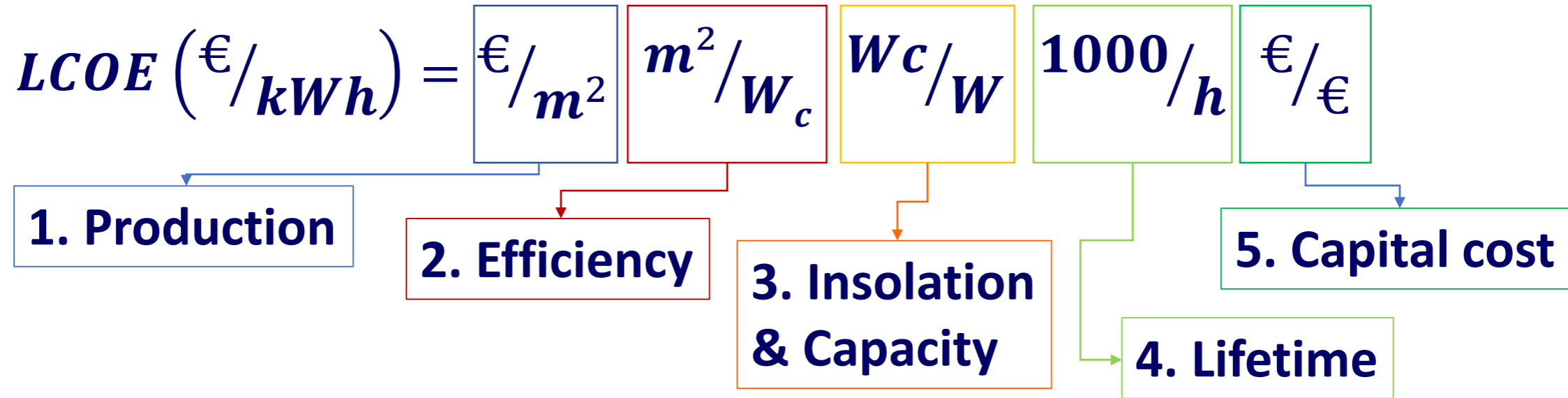


Figure 1. The CAISO duck chart

Source: CAISO 2013





1. Innovative processes, scale up, standardization => Down to 20€/m<sup>2</sup>
2. Abs/unit volume, low defect, new concepts => Up to 66 % (one sun)
3. Localisation, tracking, ... => Up to 50% capacity factor
4. Failure mech., operation conditions => Up to 50 years
5. Interest rates, business model => Free

⇒ LCOE: 40 à 120 €/MWh

⇒ modules < 1 €/MWh from best values ⇒ free energy?



Une source d'énergie:

Quasi gratuite...

Tout le temps...

A faible empreinte ...

⇒ Qu'en ferons nous?

Une énergie peut être gratuite et à faible impact à la production. Quels sont les coûts et les impacts de son utilisation?

# IPVF : qu'est ce que c'est?



Partenariat public-Privé

(Institut de la transition énergétique)

200 personnes, 8000 m<sup>2</sup> à Palaiseau



Chercheur CNRS, directeur de l'UMR de l'Institut Photovoltaïque Ile de France (IPVF),  
Pr chargé de cours à l'X

CV :

[https://www.researchgate.net/profile/Jean\\_Francois\\_Guillemoles](https://www.researchgate.net/profile/Jean_Francois_Guillemoles)

# Institut Photovoltaïque d'Île de France



HORIBA

RIBER

INSTITUT  
PHOTOVOLTAÏQUE  
D'ÎLE-DE-FRANCE

200

INDUSTRIAL & ACADEMICS  
RESEARCHERS

€14

MILLION  
ANNUAL BUDGET

100

STATE-OF-THE-ART R&D  
EQUIPMENT

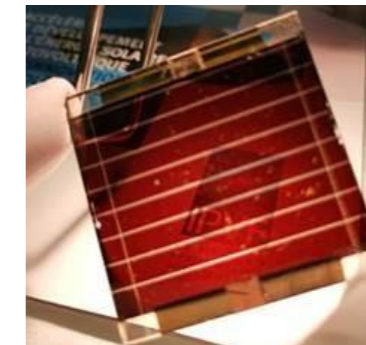
4000m<sup>2</sup>

OF CLEAN ROOM LABS  
NEW BUILDING in PARIS-  
SACLAY

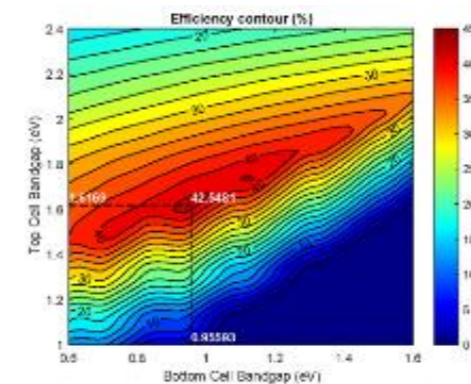
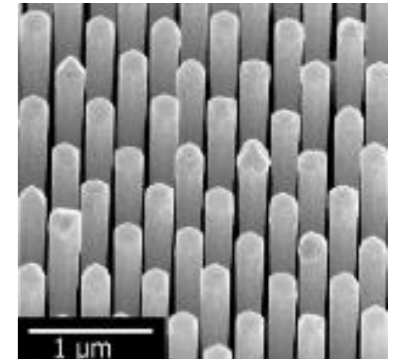
Technico-éco



Tandem pvk-Si



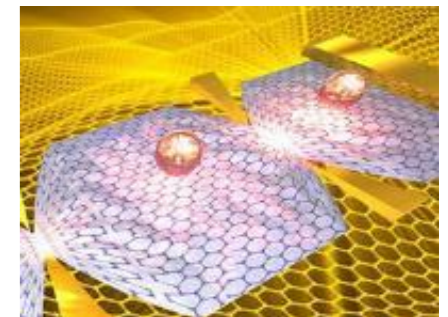
Tandem III-V-Si



Carac & models



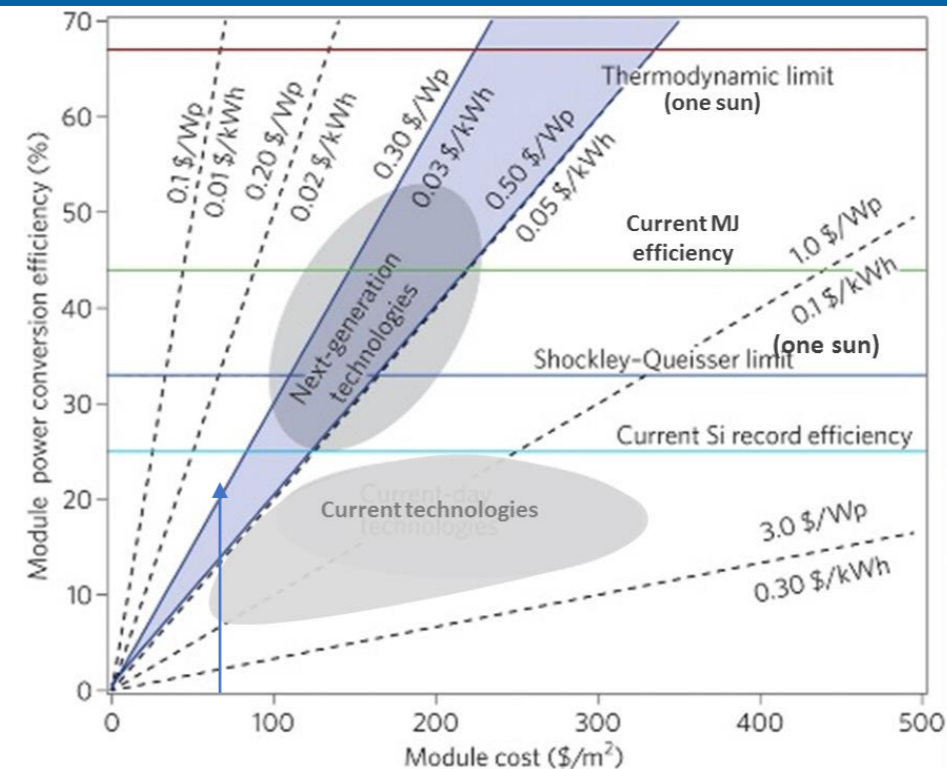
Solar to fuels



Nvx concepts

# Les défis sur les dispositifs de conversion

- Rendement => Levier coût
  - 20%
- Utilisation des matériaux => Soutenabilité
  - Quelques g/W
- Facteur de charge => Intégration
  - 15% en moyenne en France



Adapted from Beard & Green

