



# De la conservation à la conversion d'énergie : le solaire, une énergie propre et sûre

François VERNAY

Université de Perpignan Via Domitia  
Laboratoire PROMES (UPR-8521) CNRS

Lycée Arago – 11 avril 2023

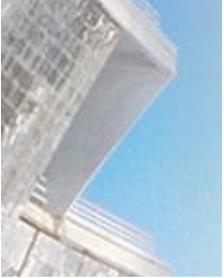
Laboratoire PROcédés, Matériaux et Energie Solaire



# Université de Perpignan

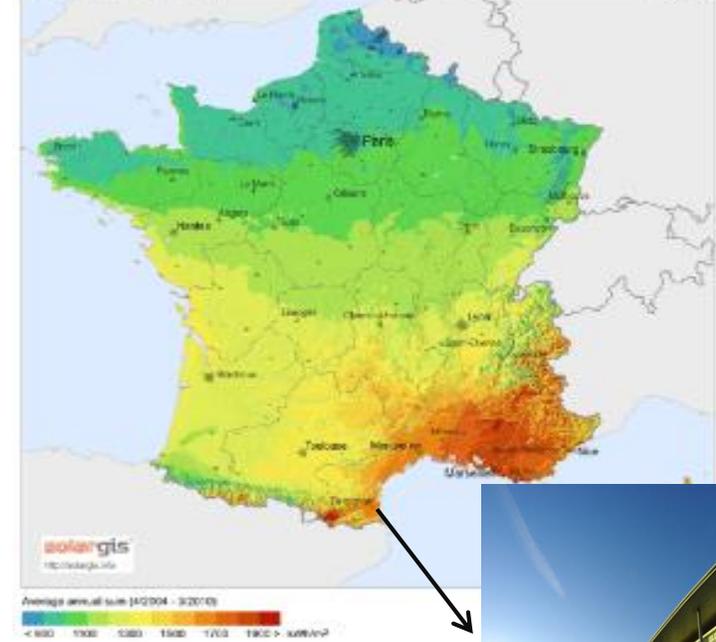


Université  
Perpignan  
Via Domitia  
CRÉATRICE D'AVENIRS DEPUIS 1350



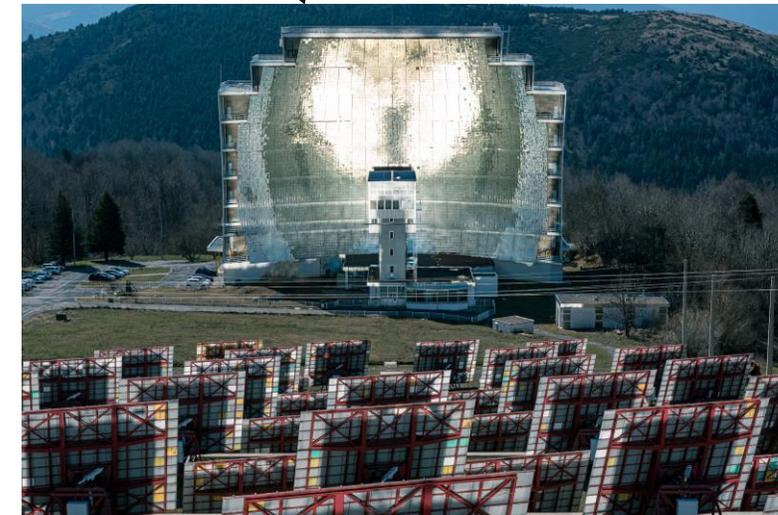
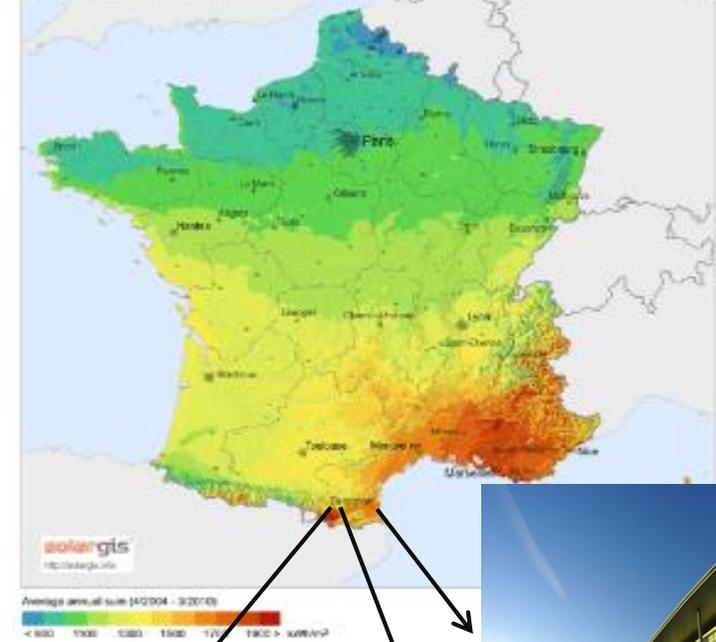
# PROMES

- 2 localisations : Perpignan et Odeillo (+ Targassone)
- 150 personnes, dont 90 permanents
  - 50 C/EC, 40 ITA/BIATSS
  - 40 doctorants/post-doctorants
  - 10 Master, 20 CDD + stagiaires



# PROMES

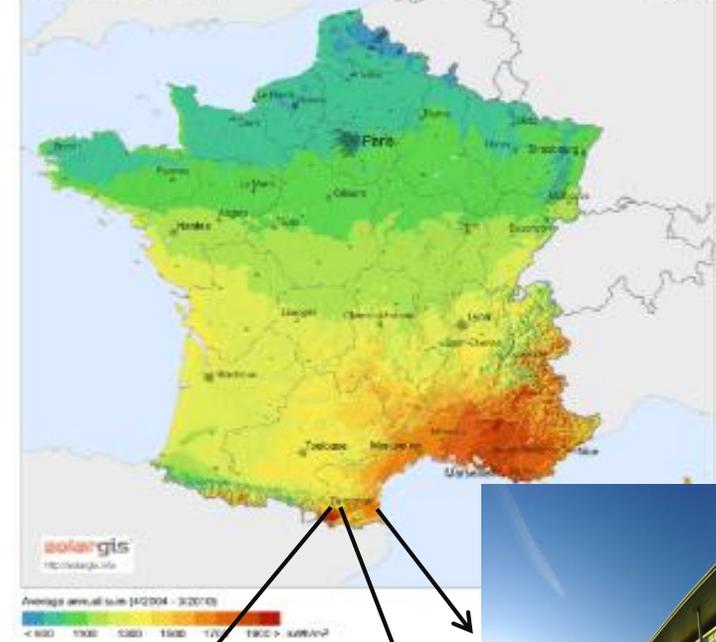
- 2 localisations : Perpignan et Odeillo (+ Targassone)
- 150 personnes, dont 90 permanents
  - 50 C/EC, 40 ITA/BIATSS
  - 40 doctorants/post-doctorants
  - 10 Master, 20 CDD + stagiaires



Université  
Perpignan  
Via Domitia

# PROMES

- 2 localisations : Perpignan et Odeillo (+ Targassone)
- 150 personnes, dont 90 permanents
  - 50 C/EC, 40 ITA/BIATSS
  - 40 doctorants/post-doctorants
  - 10 Master, 20 CDD + stagiaires
- Trois axes thématiques :
  - Centrales Solaires de Prochaine Génération (CSPG)
  - Stockage et Chimie Solaire (SCS)
  - **Matériaux pour l'Énergie et l'Espace (MEE)**



# Plan de l'exposé

1. Puissance et énergie : définitions
2. Le principe de la conservation de l'énergie
3. Electricité & mix énergétique
4. Le solaire : thermique, photovoltaïque
5. Les bénéfices de la concentration
6. Conclusion et perspectives

# Puissance et énergie : définitions

Que doit faire Sisyphe pour que le rocher arrive au sommet de la montagne ?



# Puissance et énergie : définitions

Que doit faire Sisyphe pour que le rocher arrive au sommet de la montagne ?



Sisyphe doit appliquer une force

# Puissance et énergie : définitions

Que doit faire Sisyphe pour que le rocher arrive au sommet de la montagne ?



Sisyphe doit appliquer une force sur une certaine distance

# Puissance et énergie : définitions

Que doit faire Sisyphe pour que le rocher arrive au sommet de la montagne ?



Sisyphe doit appliquer une force  
sur une certaine distance...  
Alors, Sisyphe travaille (au sens physique)

# Puissance et énergie : définitions

On appelle travail de la force, la grandeur :

$$W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{\text{distance}}$$



# Puissance et énergie : définitions

On appelle travail de la force, la grandeur :

$$W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{\text{distance}}$$

Ou bien, si le chemin est tortueux

$$W = \int_C \vec{F} \cdot \overrightarrow{d\ell}$$



# Puissance et énergie : définitions

On appelle travail de la force, la grandeur :

$$W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{\text{distance}}$$

Cette quantité, « travail » s'exprime en joule (J)



James P. Joule

# Puissance et énergie : définitions

Par définition, l'énergie est la grandeur qui mesure la capacité à produire un travail

# Puissance et énergie : définitions

Par définition, l'énergie est la grandeur qui mesure la capacité à produire un travail, ou un rayonnement électromagnétique, ou de la chaleur, ou une différence de masse

# Puissance et énergie : définitions

Par définition, l'énergie est la grandeur qui mesure la capacité à produire un travail, ou un rayonnement électromagnétique, ou de la chaleur, ou une différence de masse

L'énergie est donc homogène à un travail et s'exprime en joule (unité SI)

# Puissance et énergie : définitions

Par définition, l'énergie est la grandeur qui mesure la capacité à produire un travail, ou un rayonnement électromagnétique, ou de la chaleur, ou une différence de masse

L'énergie est donc homogène à un travail et s'exprime en joule (unité SI)

... mais il existe d'autres unités : pouvez-vous en citer ?

# Puissance et énergie : définitions

Par définition, l'énergie est la grandeur qui mesure la capacité à produire un travail, ou un rayonnement électromagnétique, ou de la chaleur, ou une différence de masse

L'énergie est donc homogène à un travail et s'exprime en joule (unité SI)

... mais il existe d'autres unités : pouvez-vous en citer ?

Cal, N.m, eV, tep, Wh, ...

# Puissance et énergie : définitions

Intéressons nous à cette unité d'énergie :

kWh

kilo x Watt x heure

# Puissance et énergie : définitions

Intéressons nous à cette unité d'énergie :

kWh

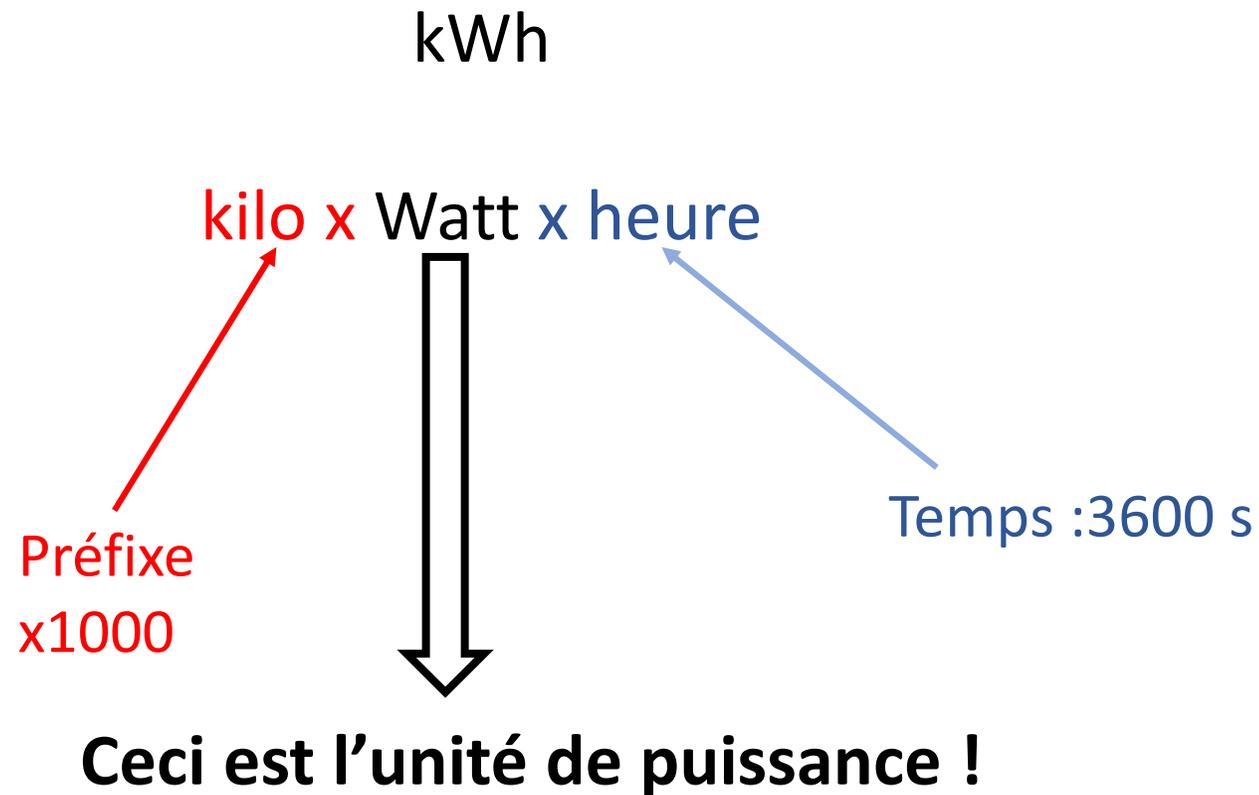
kilo x Watt x heure

Préfixe  
x1000

Temps :3600 s

# Puissance et énergie : définitions

Intéressons nous à cette unité d'énergie :



# Puissance et énergie : définitions

La puissance  $P$  est l'énergie par unité de temps ( $P=E/t$ )

$$P = \frac{dE}{dt}$$

Donc, si on dissipe une énergie d'1 Joule en 1 seconde, on a une puissance d'1 Watt

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

# Plan de l'exposé

1. Puissance et énergie : définitions
2. Le principe de la conservation de l'énergie
3. Electricité & mix énergétique
4. Le solaire : thermique, photovoltaïque
5. Les bénéfices de la concentration
6. Conclusion et perspectives

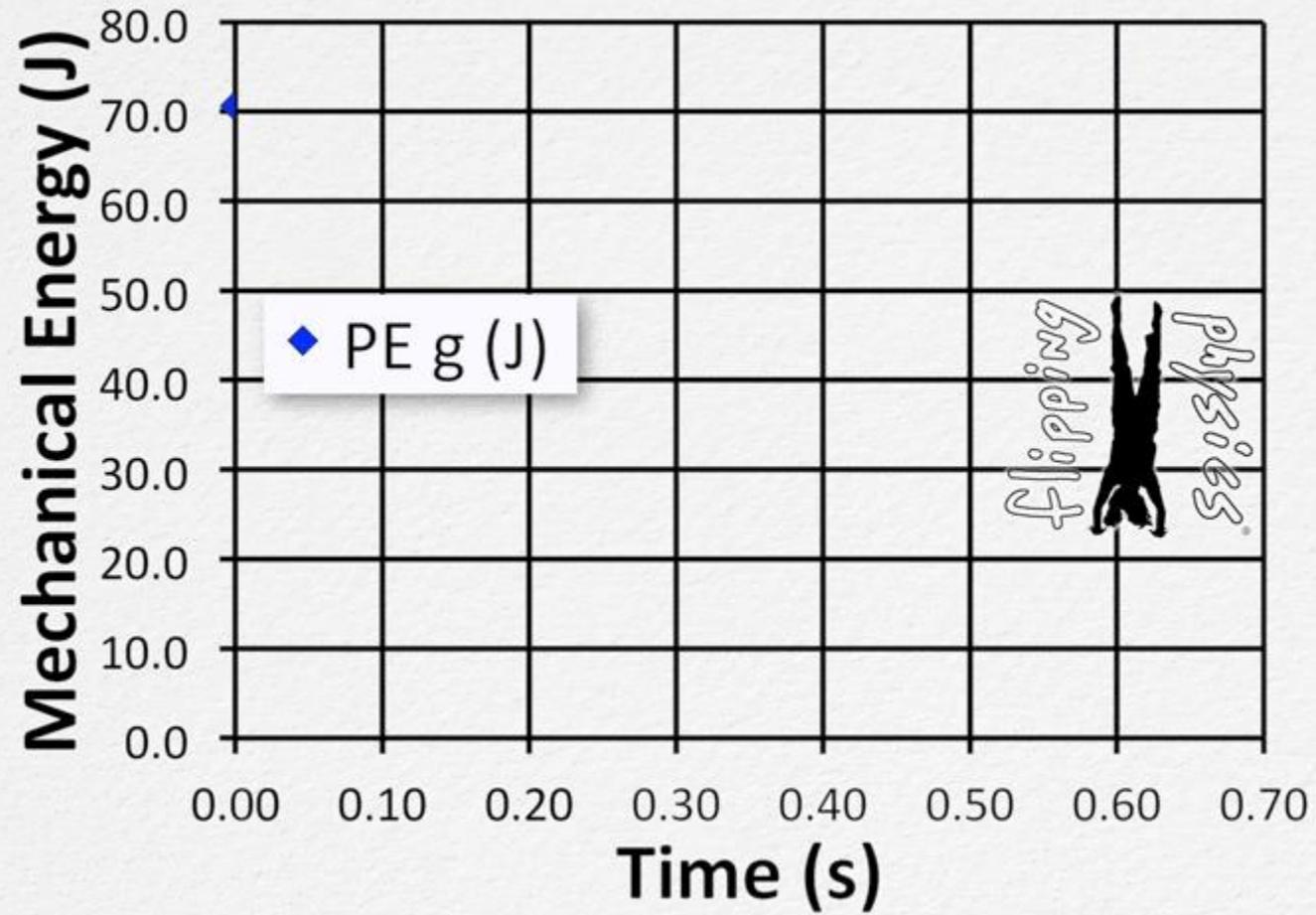
# Conservation de l'énergie

Intéressons nous à la chute libre d'un corps de masse  $m$

Energie du système = énergie potentielle + énergie cinétique

$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2$$

# Conservation de l'énergie



# Conservation de l'énergie

Intéressons nous à la chute libre d'un corps de masse  $m$

Energie du système = énergie potentielle + énergie cinétique

$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2$$

Nous constatons que l'énergie mécanique  $E$  est conservé, mais qu'il peut y avoir conversion d'énergie cinétique en énergie potentiel

C'est le principe de conservation de l'énergie  
L'énergie ne peut être ni produite, ni détruite

# Energie : une autre façon de voir

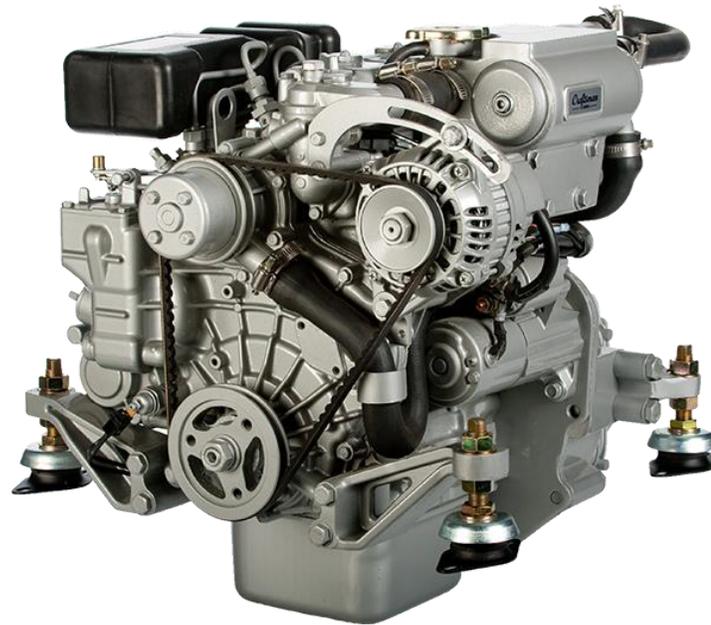
**Energie = capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système avec lequel il interagit**

**par des voies : mécanique, radiative, chimique, massique, thermique, ...**

# Energie : une autre façon de voir

Energie = capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système avec lequel il interagit

par des voies : mécanique, radiative, chimique, massique, thermique, ...



**Principe de conservation : on ne fait que transformer l'énergie**

# Energie : une autre façon de voir

**Energie = capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système avec lequel il interagit**

**par des voies : mécanique, radiative, chimique, massique, thermique, ...**

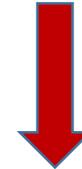
**Principe de conservation : on ne fait que transformer l'énergie**

# Energie : une autre façon de voir

Energie = capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système avec lequel il interagit

par des voies : mécanique, radiative, chimique, massique, thermique, ...

Principe de conservation : on ne fait que transformer l'énergie



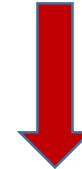
Notion de rendement, d'efficacité  
du processus de conversion

# Energie : une autre façon de voir

Energie = capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système avec lequel il interagit

par des voies : mécanique, radiative, chimique, massique, thermique, ...

Principe de conservation : on ne fait que transformer l'énergie



Notion de rendement, d'efficacité  
du processus de conversion



On peut classer les différentes formes d'énergies selon des stades plus ou moins nobles

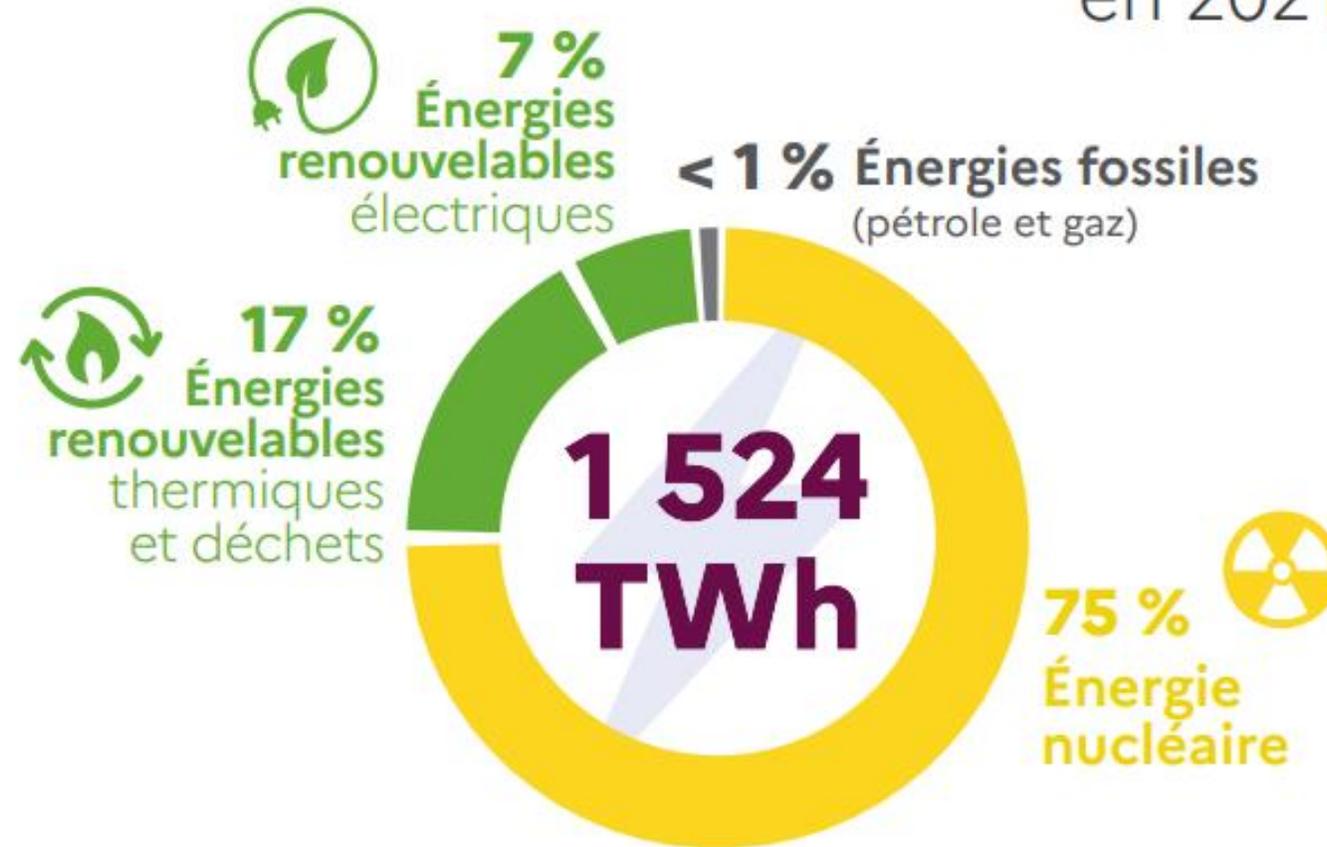
*« La chaleur est la forme la plus dégradée de l'énergie »*

# Plan de l'exposé

1. Puissance et énergie : définitions
2. Le principe de la conservation de l'énergie
- 3. Electricité & mix énergétique**
4. Le solaire : thermique, photovoltaïque
5. Les bénéfices de la concentration
6. Conclusion et perspectives

# Electricité et mix énergétique

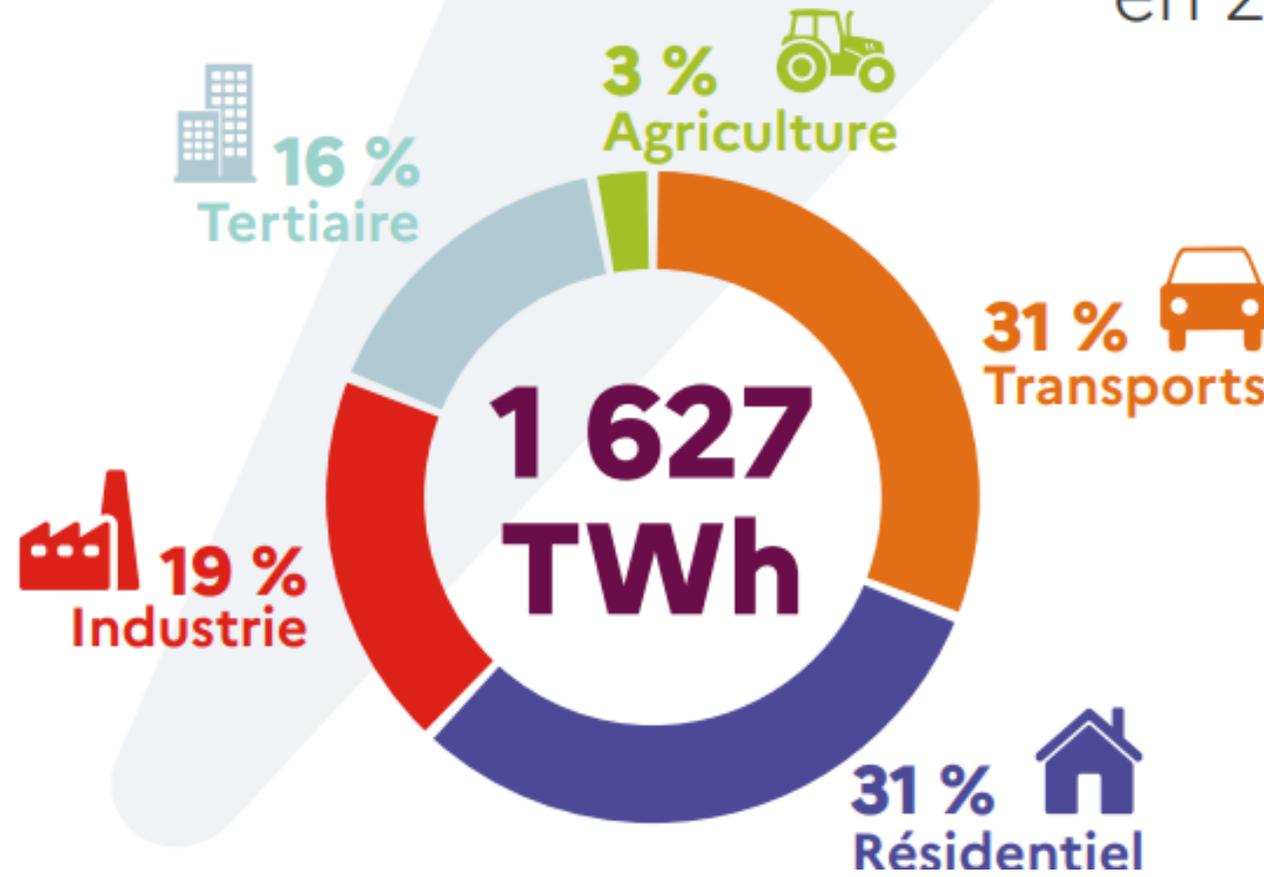
## Production d'énergie primaire en 2021



# Electricité et mix énergétique

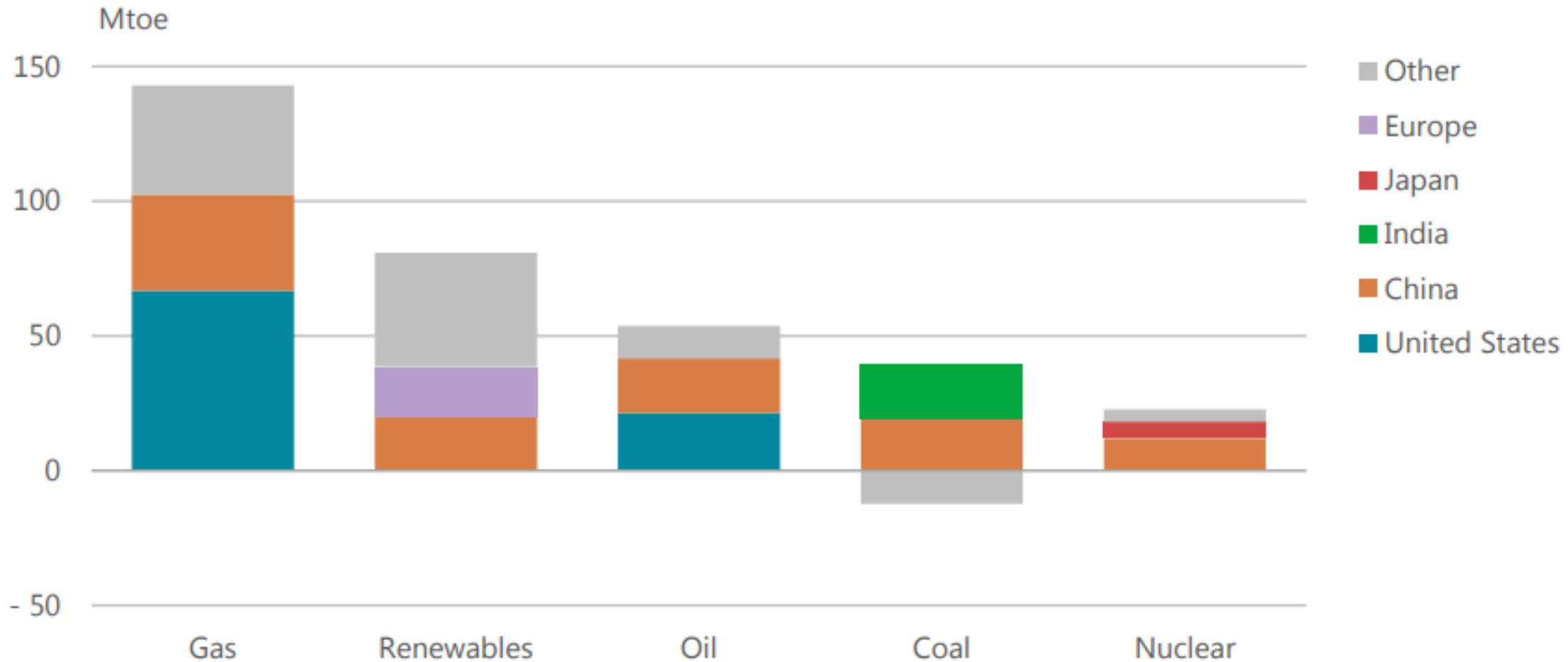
## Consommation finale énergétique

en 2021



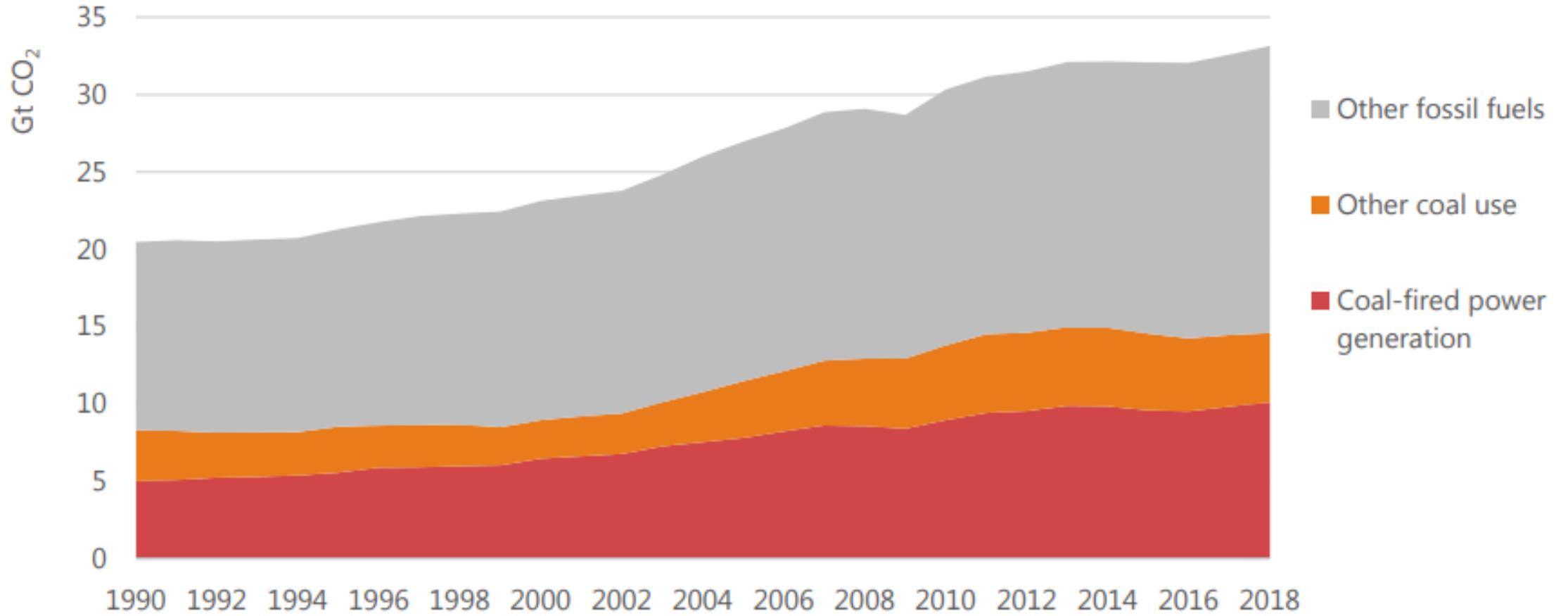
# Mix énergétique à l'échelle mondiale

Figure: Global primary energy demand growth by fuel and leading regions, 2017-18



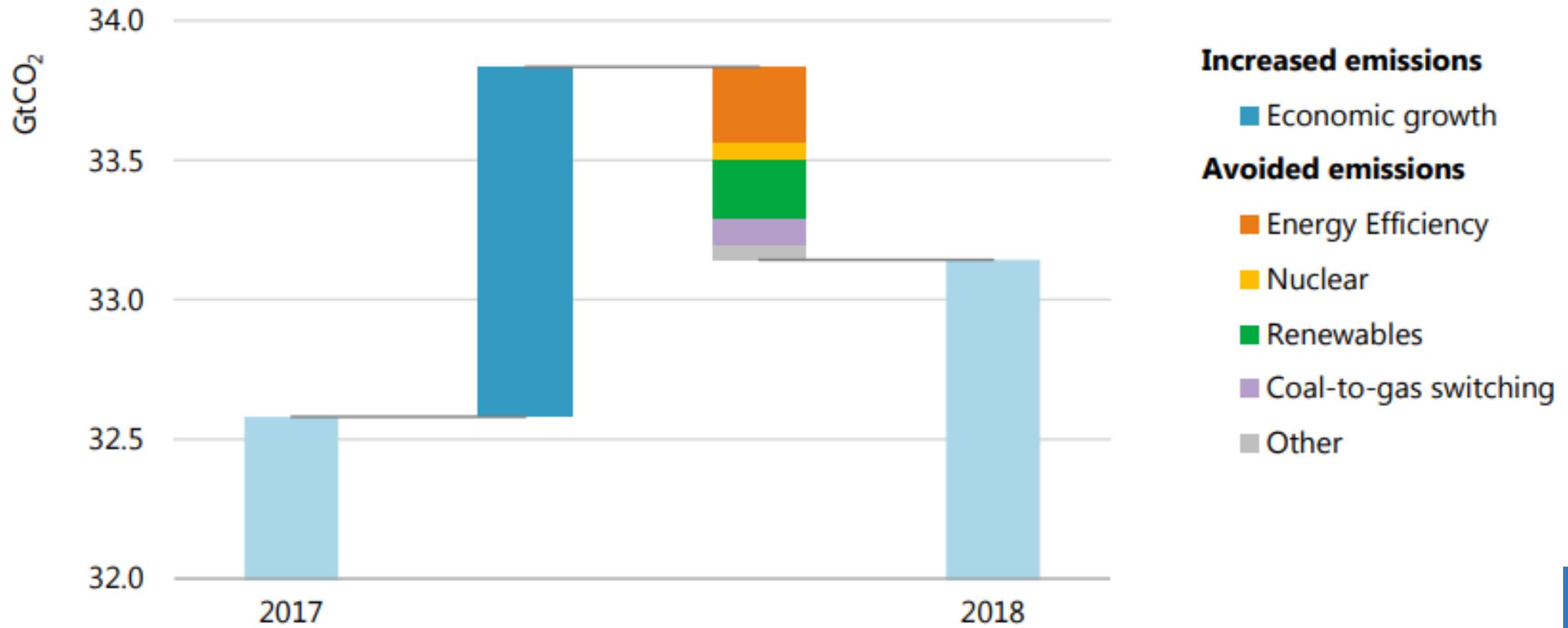
# Mix énergétique à l'échelle mondiale

Global energy-related carbon dioxide emissions by source, 1990-2018



# Mix énergétique à l'échelle mondiale

Change in global energy related CO<sub>2</sub> emissions and avoided emissions, 2017-18

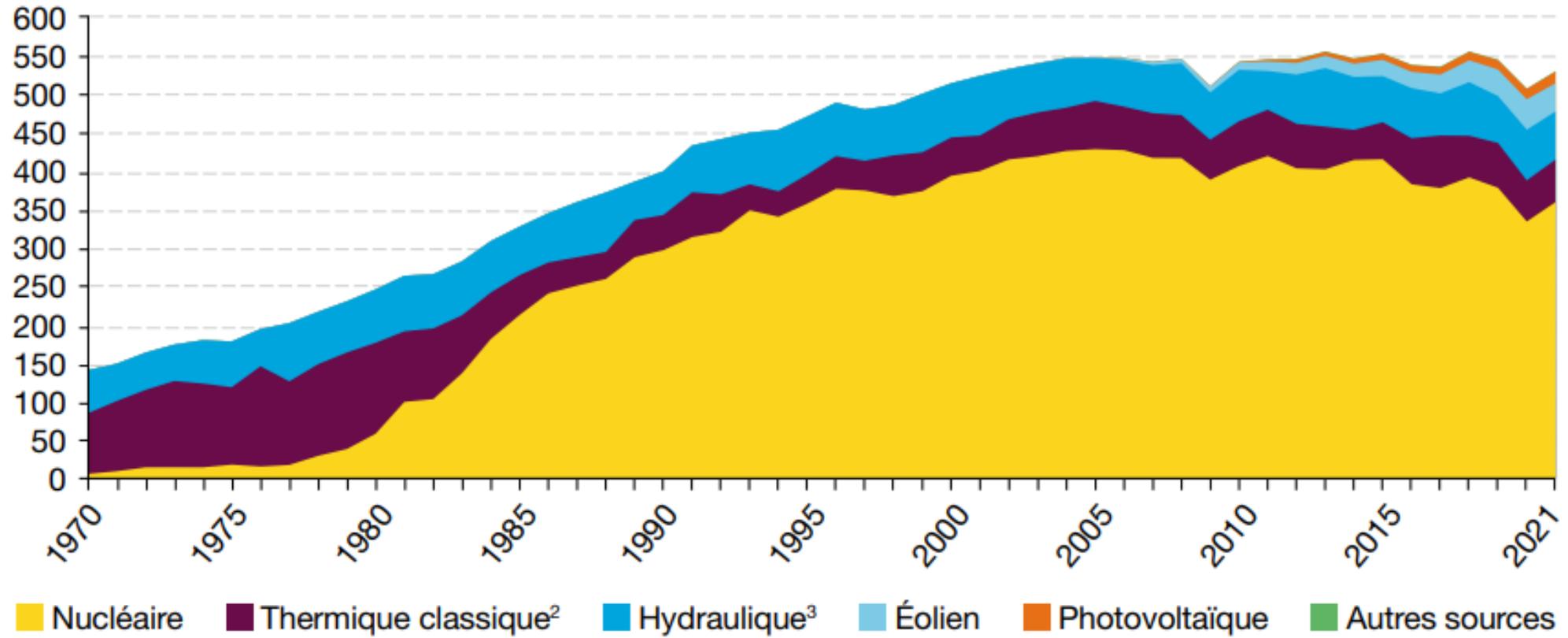


# Electricité, mix énergétique : retour en France

## PRODUCTION NETTE D'ÉLECTRICITÉ

TOTAL : 532 TWh en 2021

En TWh<sup>1</sup>



Nucléaire

Thermique classique<sup>2</sup>

Hydraulique<sup>3</sup>

Éolien

Photovoltaïque

Autres sources

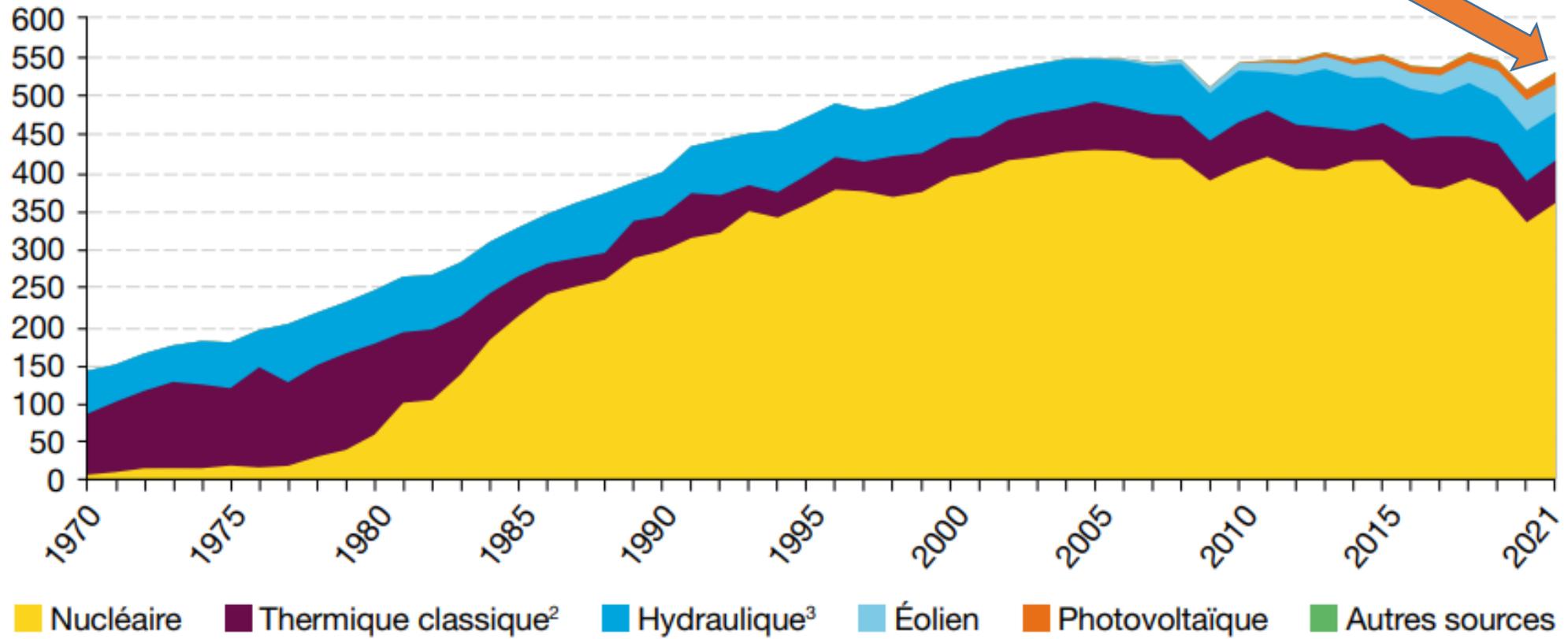
# Electricité, mix énergétique : retour en France

## PRODUCTION NETTE D'ÉLECTRICITÉ

TOTAL : 532 TWh en 2021

En TWh<sup>1</sup>

Intéressons nous au solaire



Nucléaire

Thermique classique<sup>2</sup>

Hydraulique<sup>3</sup>

Éolien

Photovoltaïque

Autres sources

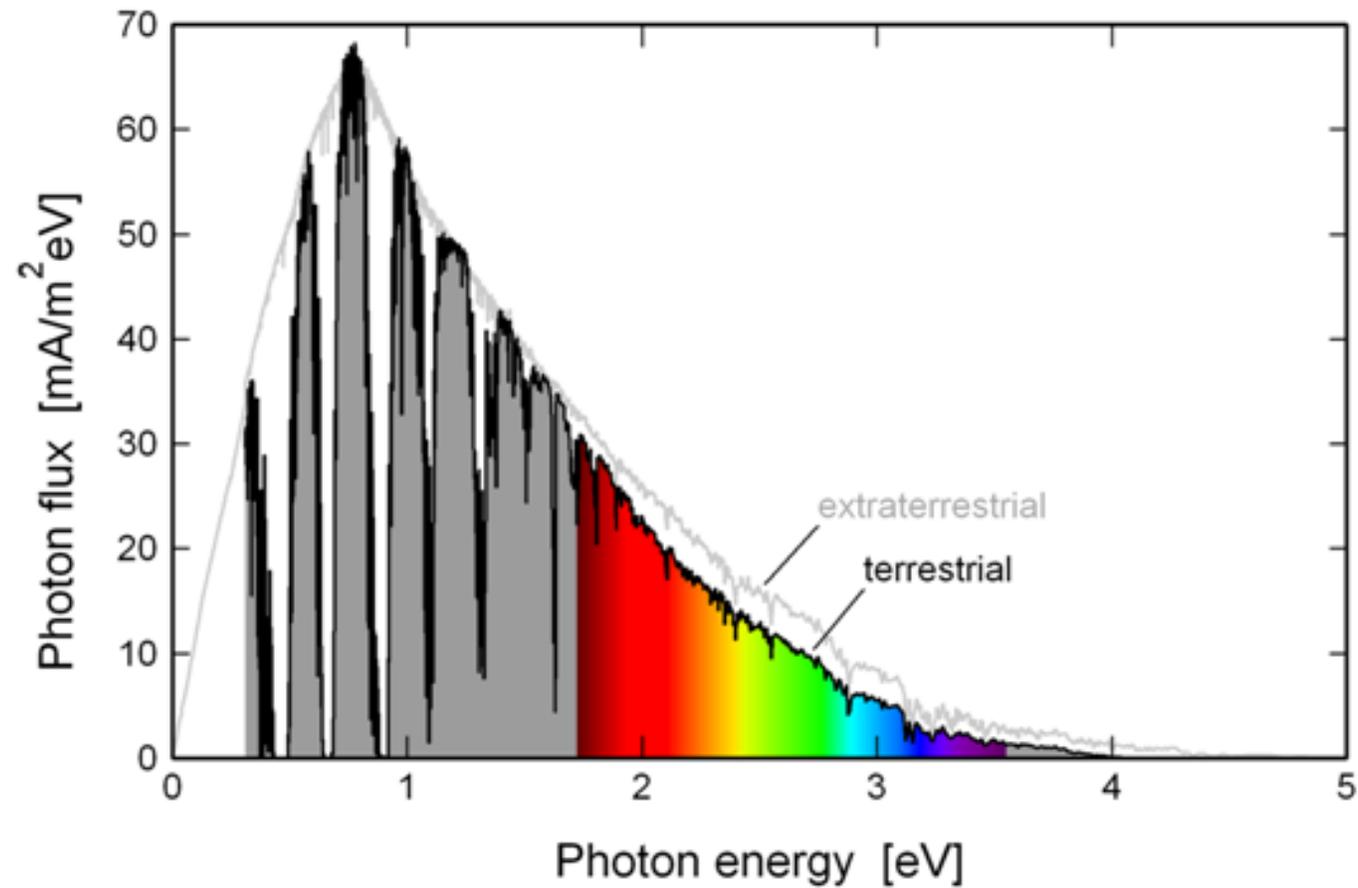
# Plan de l'exposé

1. Puissance et énergie : définitions
2. Le principe de la conservation de l'énergie
3. Electricité & mix énergétique
4. Le solaire : photovoltaïque, thermique
5. Les bénéfices de la concentration
6. Conclusion et perspectives

# Le solaire photovoltaïque



# Le spectre solaire



Au mieux, on reçoit environ 1kW/m<sup>2</sup>

**Il faut optimiser la récolte de photons !**

# Le solaire photovoltaïque

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 32, NUMBER 3

MARCH, 1961

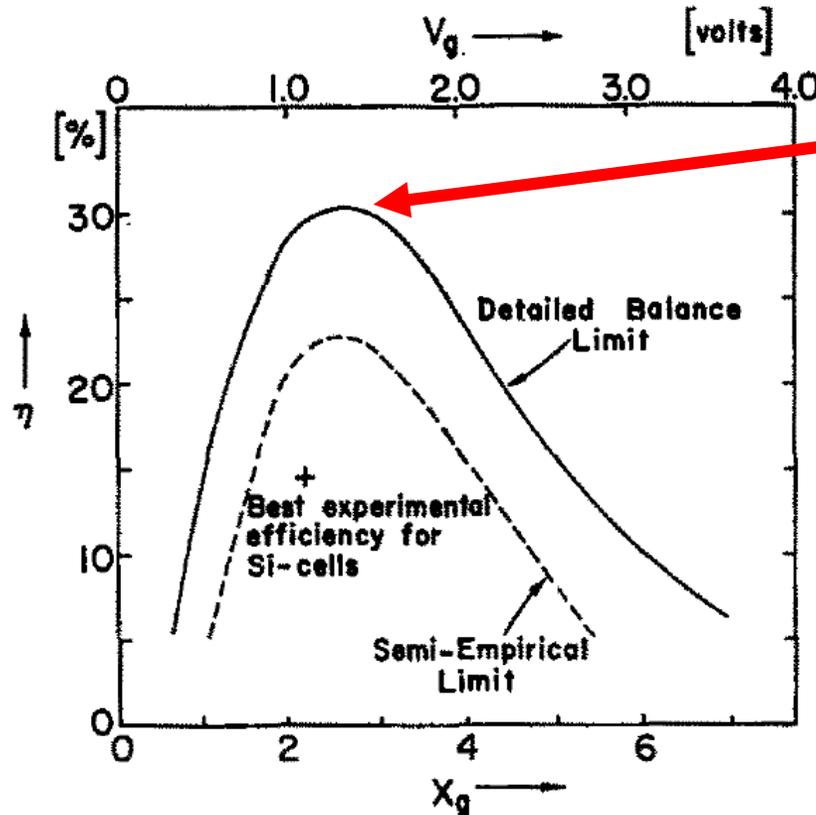


## Detailed Balance Limit of Efficiency of $p$ - $n$ Junction Solar Cells\*

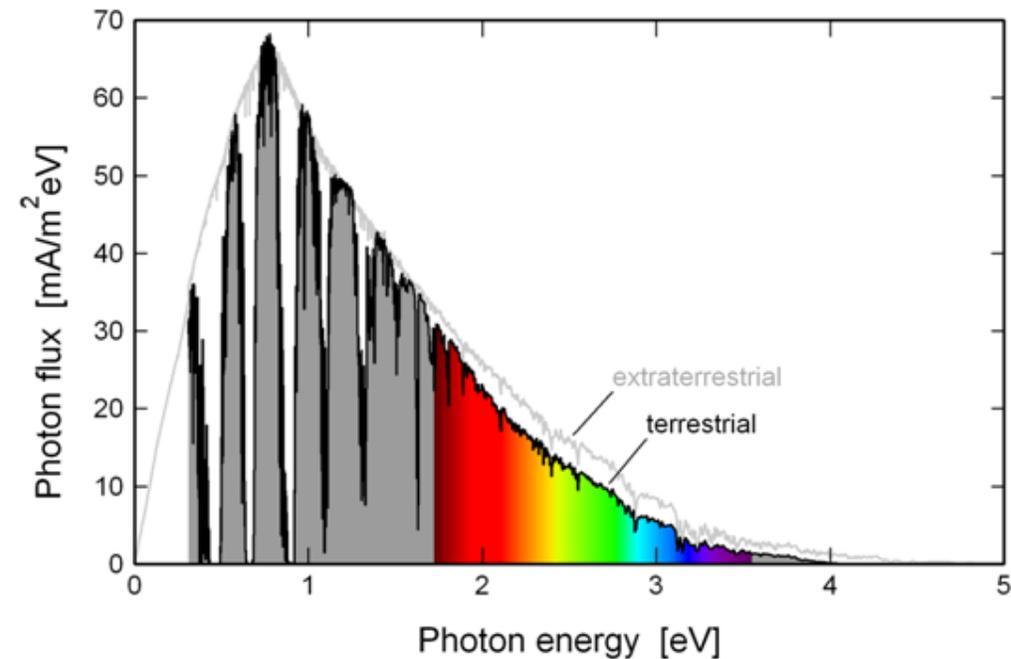
WILLIAM SHOCKLEY AND HANS J. QUEISSER

*Shockley Transistor, Unit of Clevite Transistor, Palo Alto, California*

(Received May 3, 1960; in final form October 31, 1960)



Gap du Silicium  $\sim 1,1$  eV



# Le solaire photovoltaïque

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 32, NUMBER 3

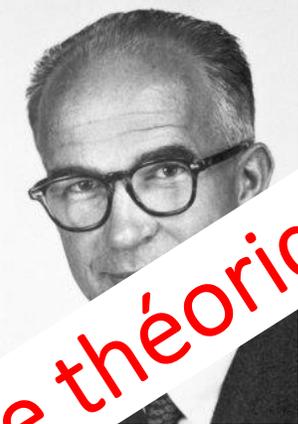
MARCH, 1961

## The Detailed Balance Limit of Efficiency of $p$ - $n$ Junction Solar Cells\*

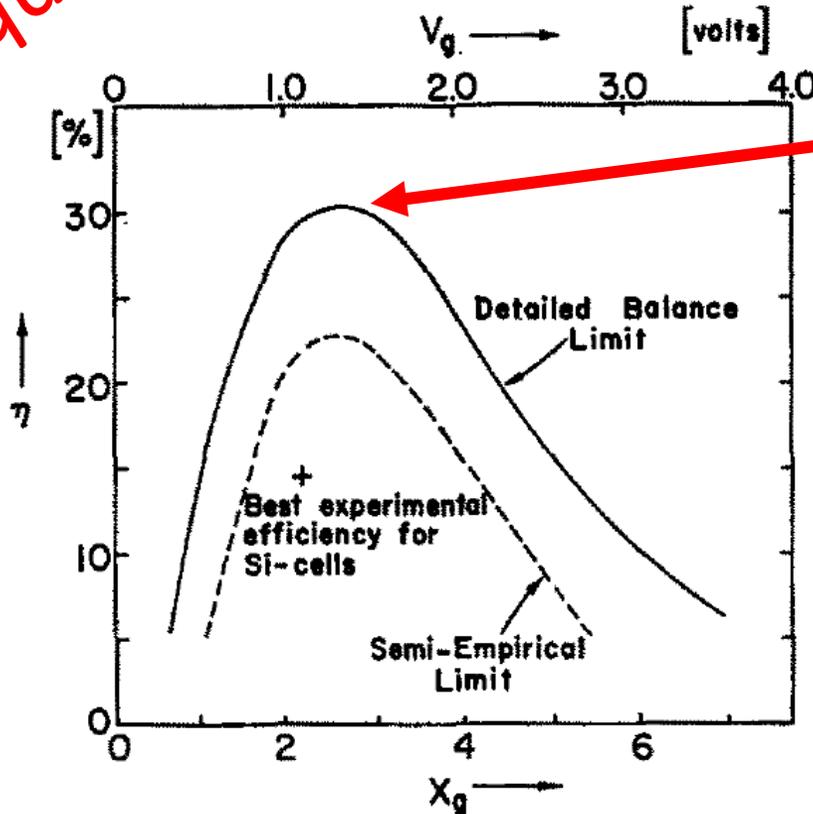
WILLIAM SHOCKLEY AND HANS J. QUEISSER

*Shockley Transistor, Unit of Clevite Transistor, Palo Alto, California*

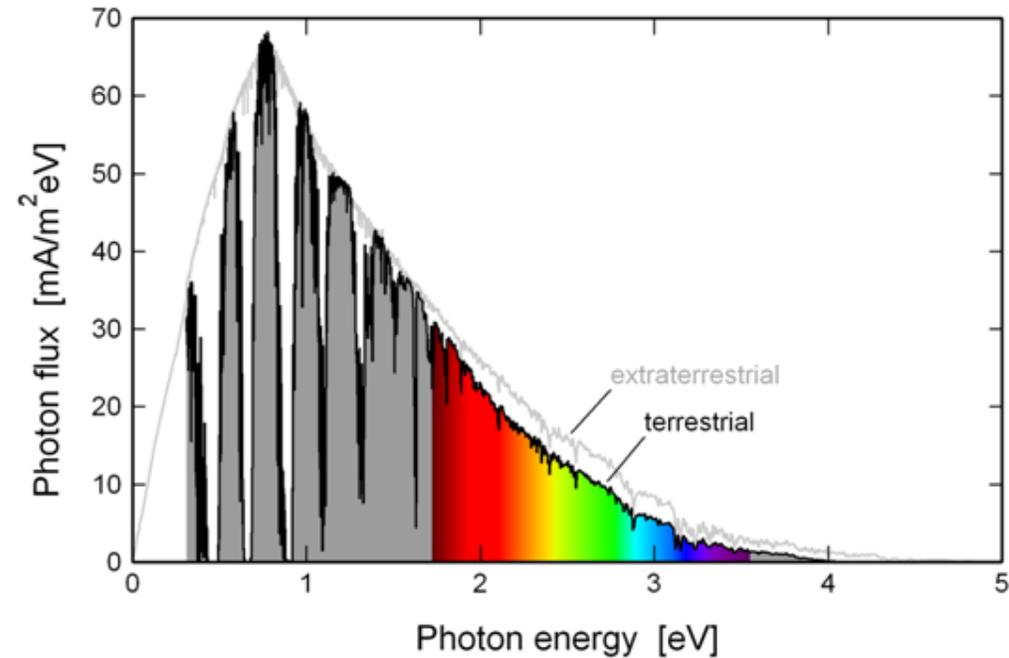
(Received May 3, 1960; in final form October 31, 1960)



limite théorique 30% de rendement



Gap du Silicium ~1,1 eV



# Le solaire photovoltaïque

## → augmenter le rendement

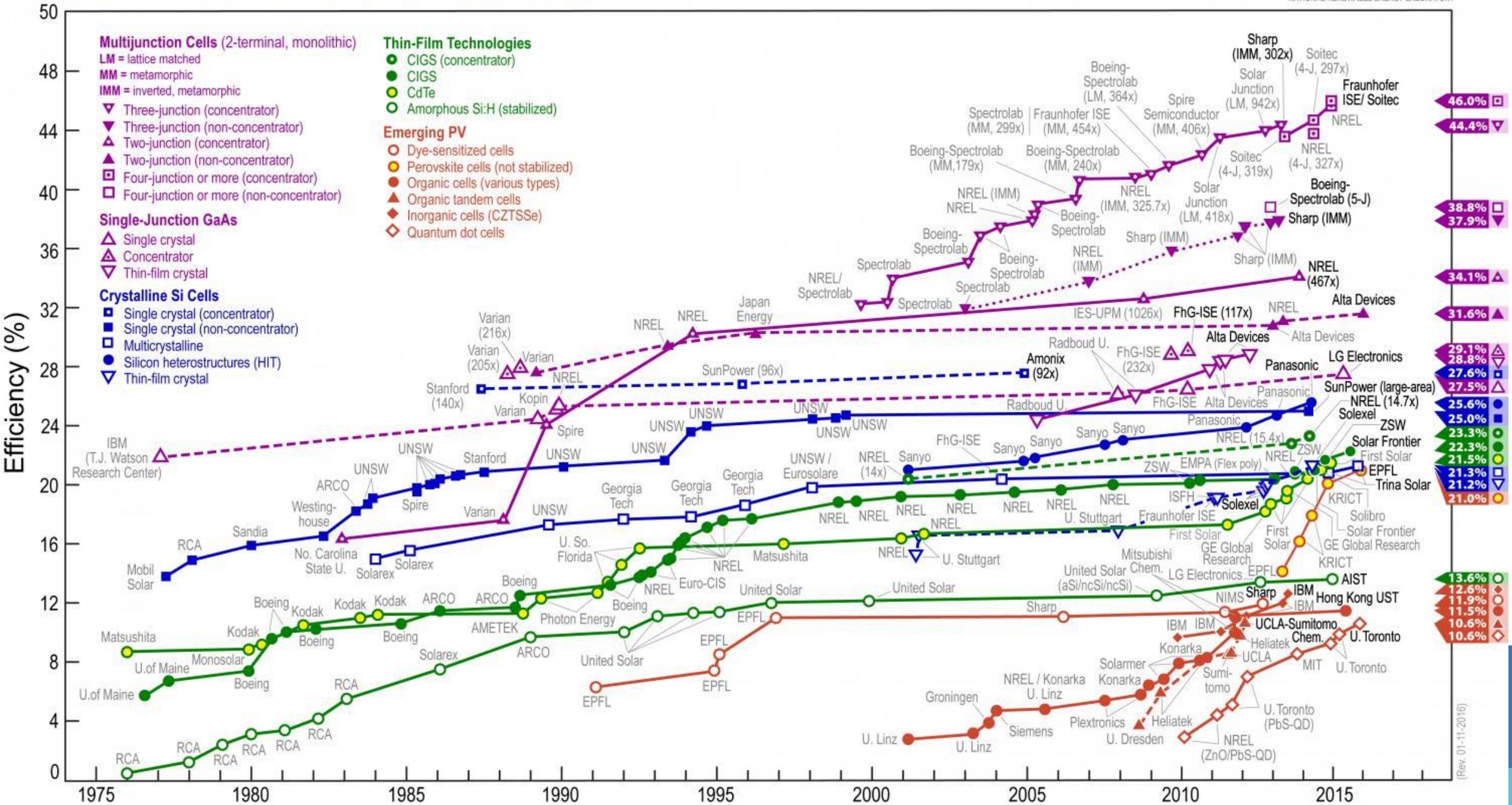
### Travail sur les matériaux :

- Différents semi-conducteurs (par ex: AsGa)
- Des semi-conducteurs organiques
- Des cellules multi-jonctions

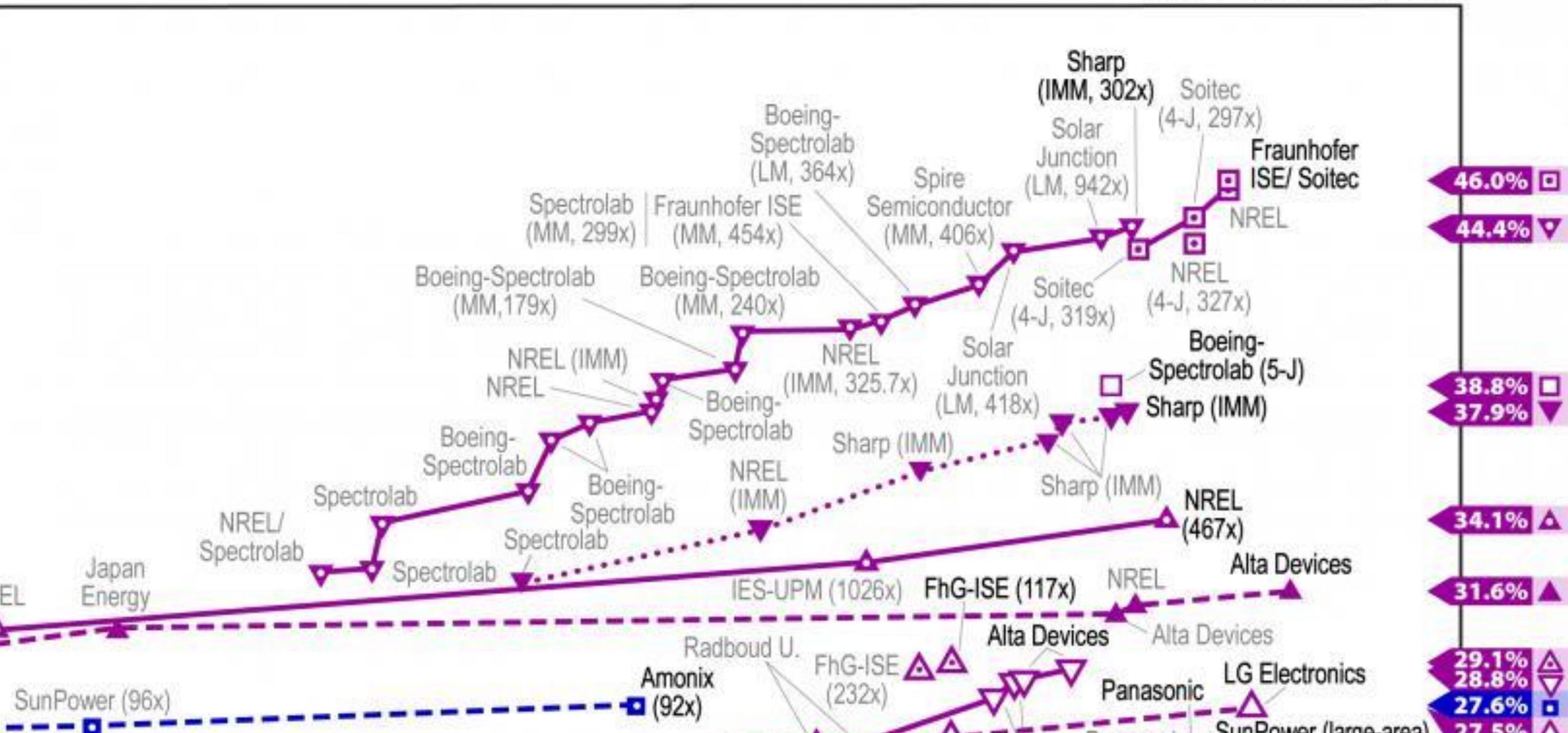
### Travail sur l'optique :

- Concentration
- Sélections des longueurs d'ondes

# Best Research-Cell Efficiencies



# Solaire concentré





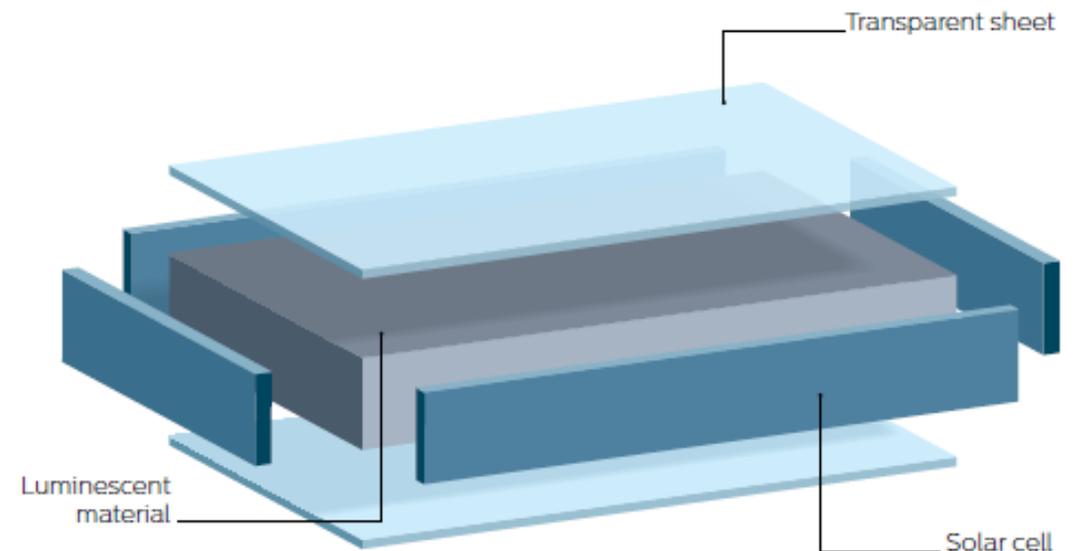
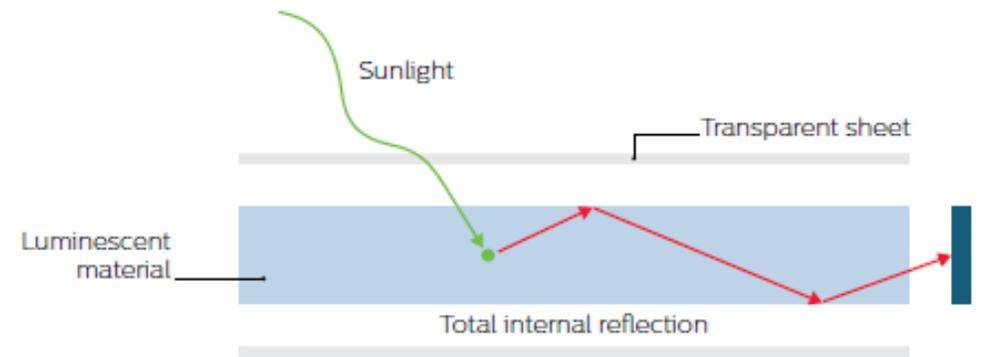


**PHILIPS**

Luminescent  
Solar Concentrator

## How a luminescent solar concentrator works

LSCs consist of large flat sheets of transparent material with luminescent material inside. They enable sunlight to be harvested over large areas, as the materials absorb incoming light and then re-emit it at a preferred wavelength. The emitted light is trapped within the luminescent sheet and guided to its edge where solar cells convert the trapped light into power.



# Le solaire thermique (partie I)

Car parfois, il n'est pas utile d'avoir de l'électricité...

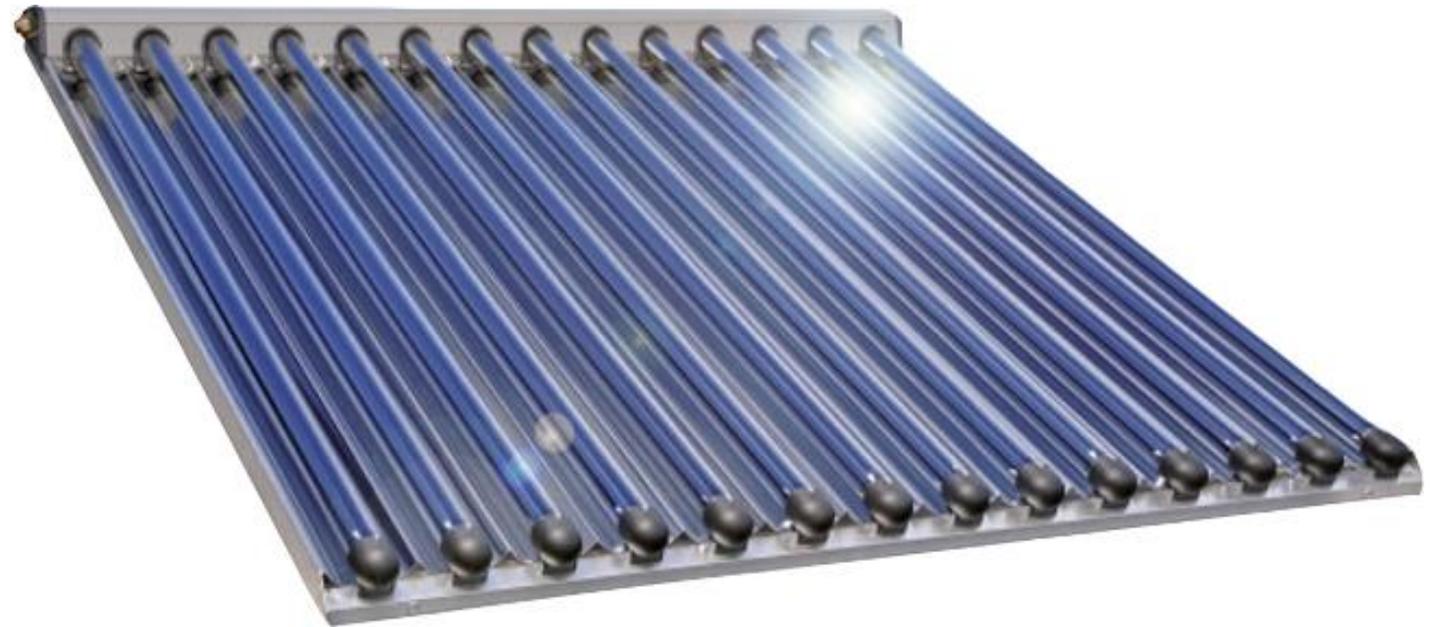
Que veut-on chez soi ?

# Le solaire thermique (partie I)



Capteur plan

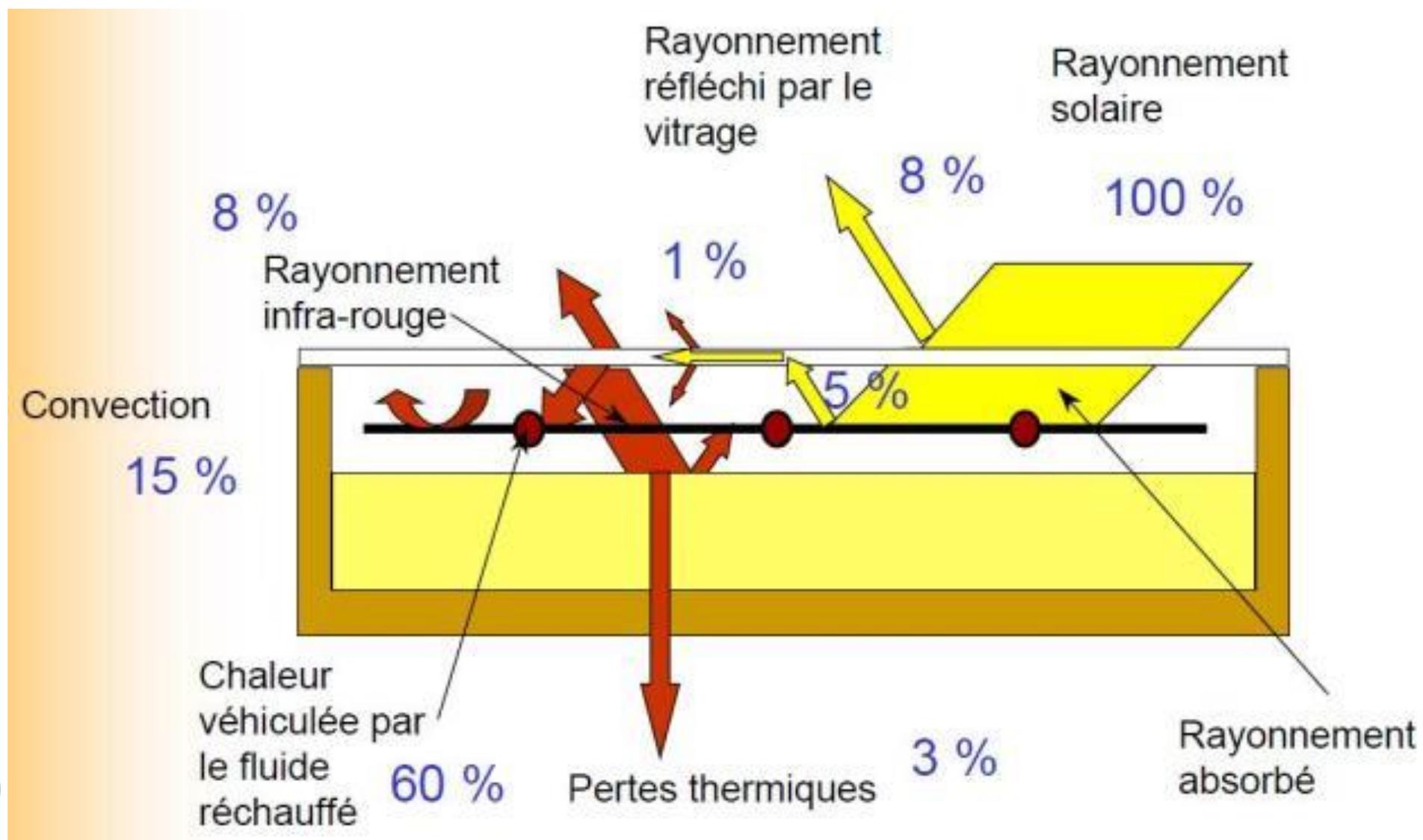
- *Temp. Max. 140°C*
- *Convient parfaitement au climat méditerranéen*



Capteur à tube sous vide

- *Temp. Max. 240°C*
- *Destiné aux régions moins ensoleillées*

# Le solaire thermique (partie I)



# Le solaire thermique (partie II)

Parfois on veut tout de même de l'électricité...

alors, il faut concentrer et changer d'échelle !

→ les centrales solaires à tour

# Le solaire thermique (partie II)



# Le solaire thermique (partie II)



Centrale solaire d'Ivanpah (USA)

# Le solaire thermique (partie II)

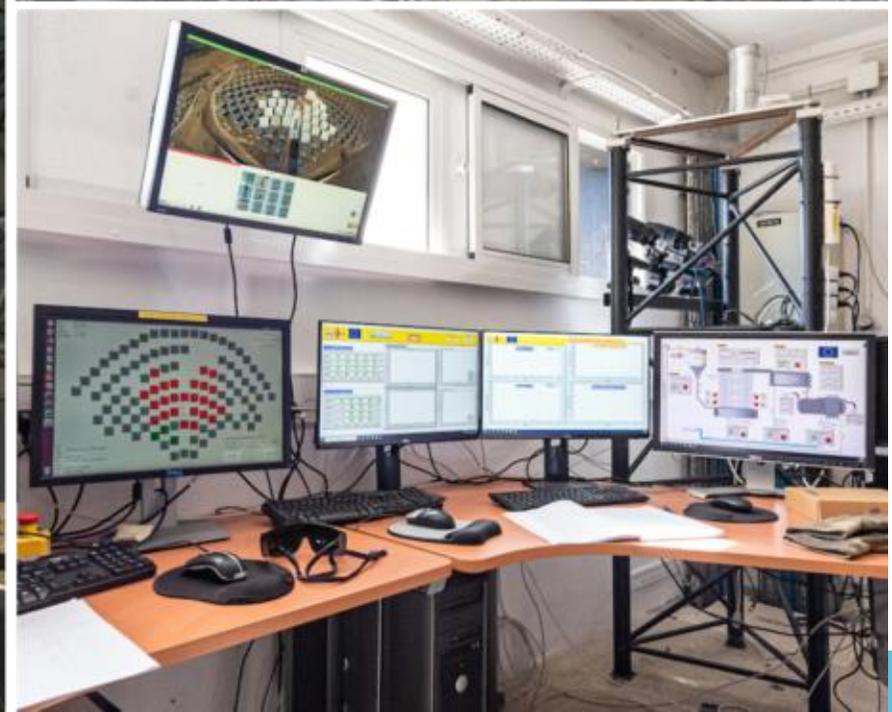


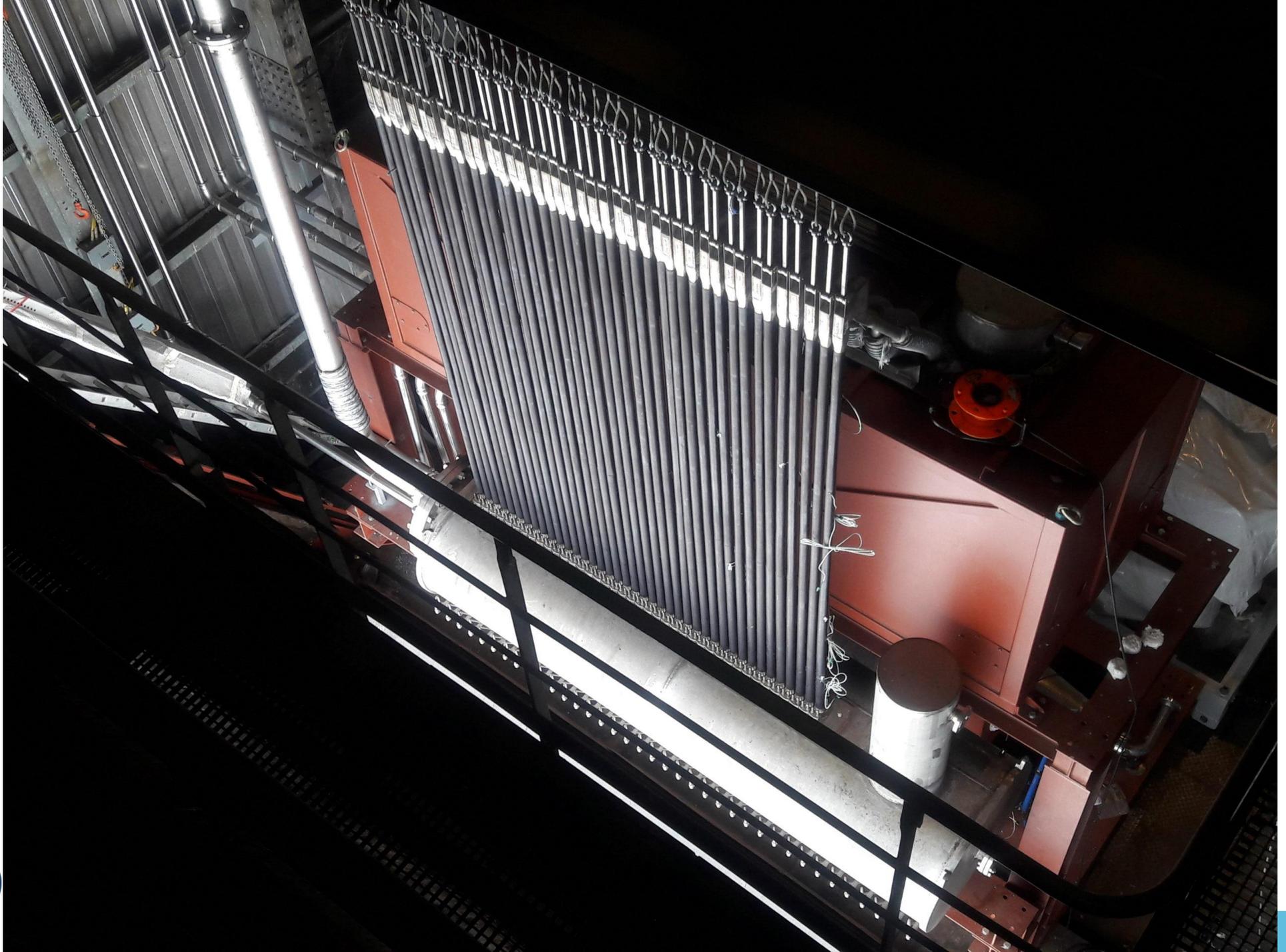
Plus près de chez nous : Targassone



# Le solaire thermique (partie II)







# Le solaire thermique (partie II)

Une autre géométrie : la centrale de Llo



# Le solaire thermique (partie II)

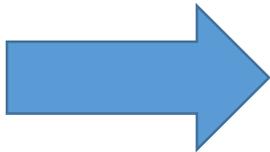
Pour avoir un bon rendement de conversion, il faut une source froide et une source chaude (très chaude)

$$\eta \propto 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

# Le solaire thermique (partie II)

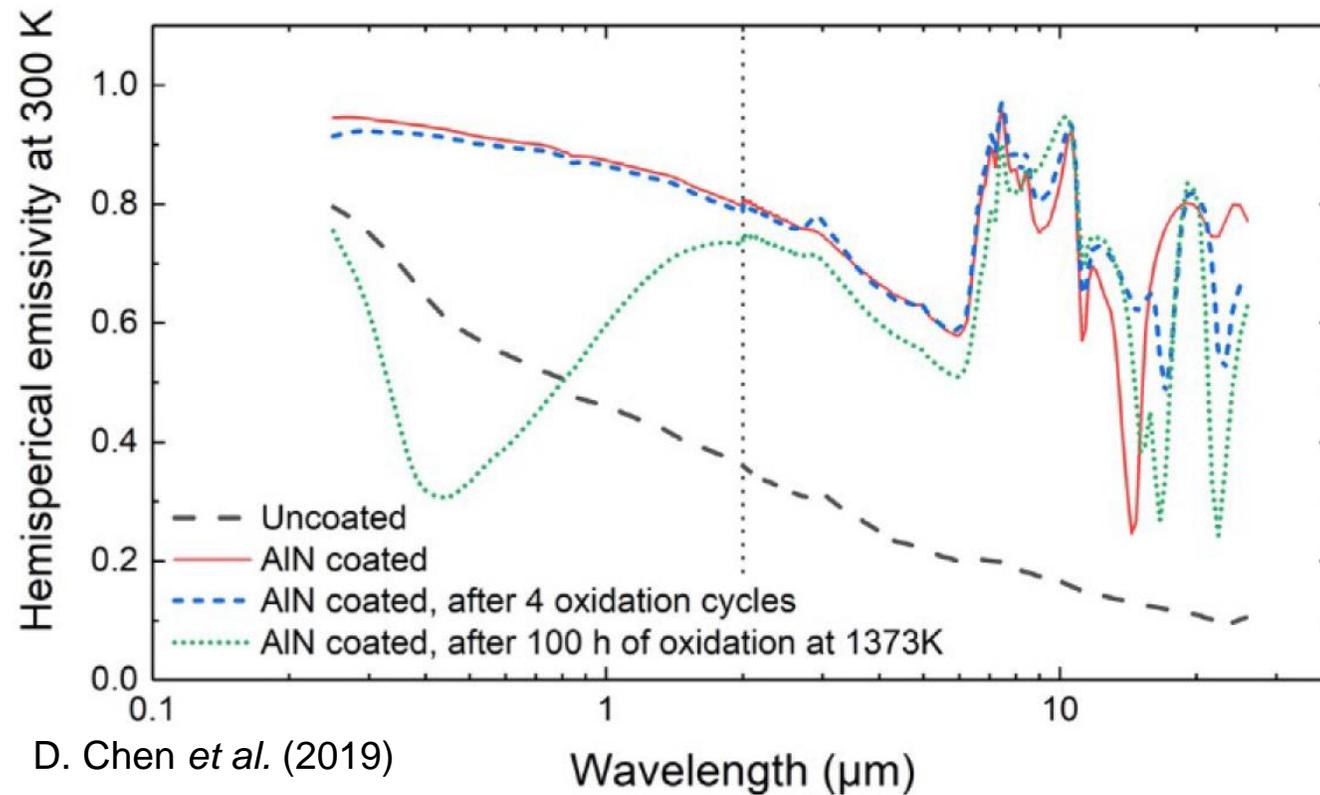
Pour avoir un bon rendement de conversion, il faut une source froide et une source chaude (très chaude ; on essaie d'aller à ~1000°C)

$$\eta \propto 1 - \frac{T_f}{T_c}$$



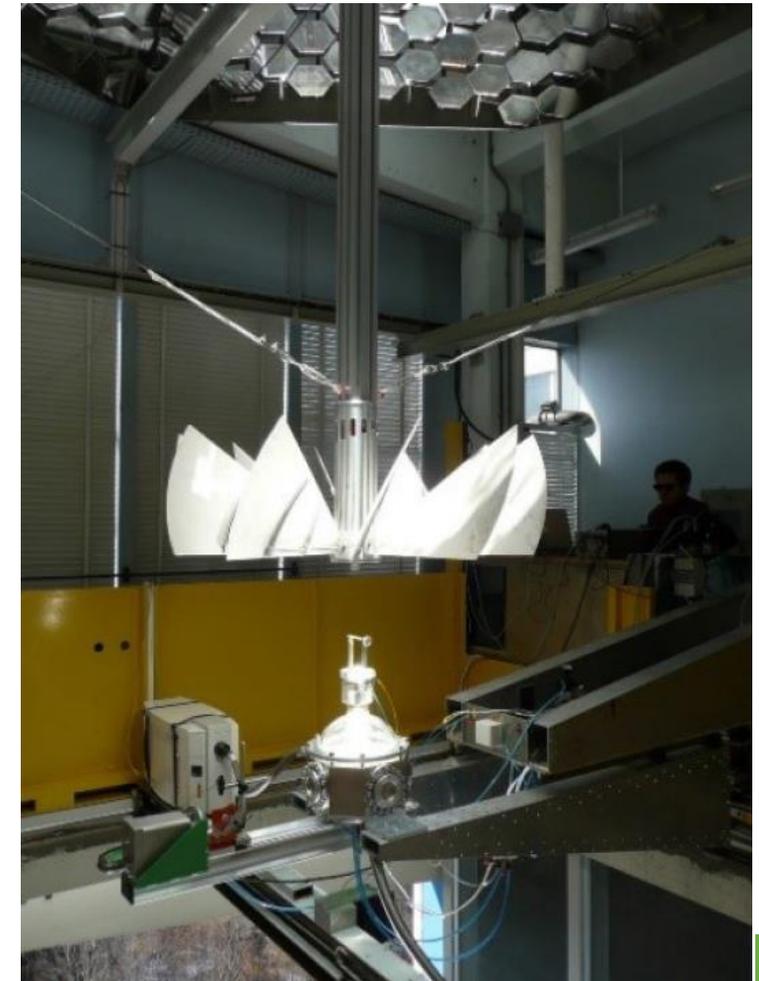
**Problème : il faut des matériaux susceptibles de supporter ces hautes températures**

# Recherche : détermination des propriétés hautes T de revêtements $AlN$ pour les récepteurs solaires



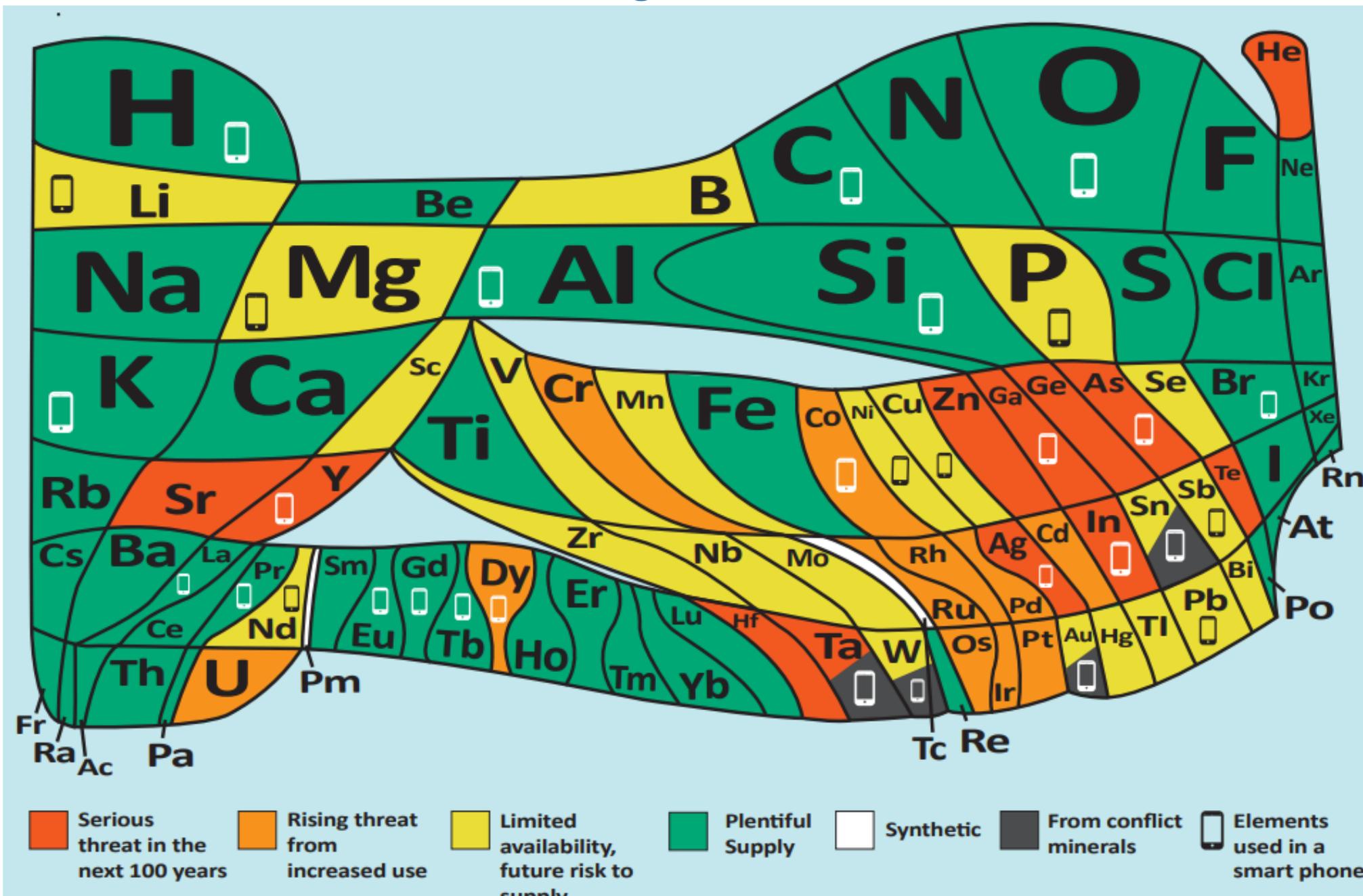
D. Chen *et al.* (2019)

→ Peu de dégradation des propriétés optiques à l'air et haute T, mais comportement différent après oxydation



Réacteur Haute Pression et Température Solaire (REHPTS)

# Recherche sur les matériaux et frugalité



# Conclusion & Perspectives

- Il existe des voies « propres et sûres » pour avoir accès à l'énergie (*e.g.* solaire)
- Au vu des besoins, il est nécessaire d'avoir un mix énergétique

# Conclusion & Perspectives

- Il existe des voies « propres et sûres » pour avoir accès à l'énergie (*e.g.* solaire)
- Au vu des besoins, il est nécessaire d'avoir un mix énergétique
- Pour le solaire, il est possible d'optimiser la récolte de photons et donc d'augmenter le rendement

# Conclusion & Perspectives

- Il existe des voies « propres et sûres » pour avoir accès à l'énergie (*e.g.* solaire)
- Au vu des besoins, il est nécessaire d'avoir un mix énergétique
- Pour le solaire, il est possible d'optimiser la récolte de photons et donc d'augmenter le rendement
  - Recherche sur les matériaux (Semi-conducteurs, réflecteurs, absorbeurs)
  - Travail à haute température
  - Penser aux ressources à moyen terme