



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

Jeudi 20 janvier 2022

# Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique

**DANIEL LINCOT**

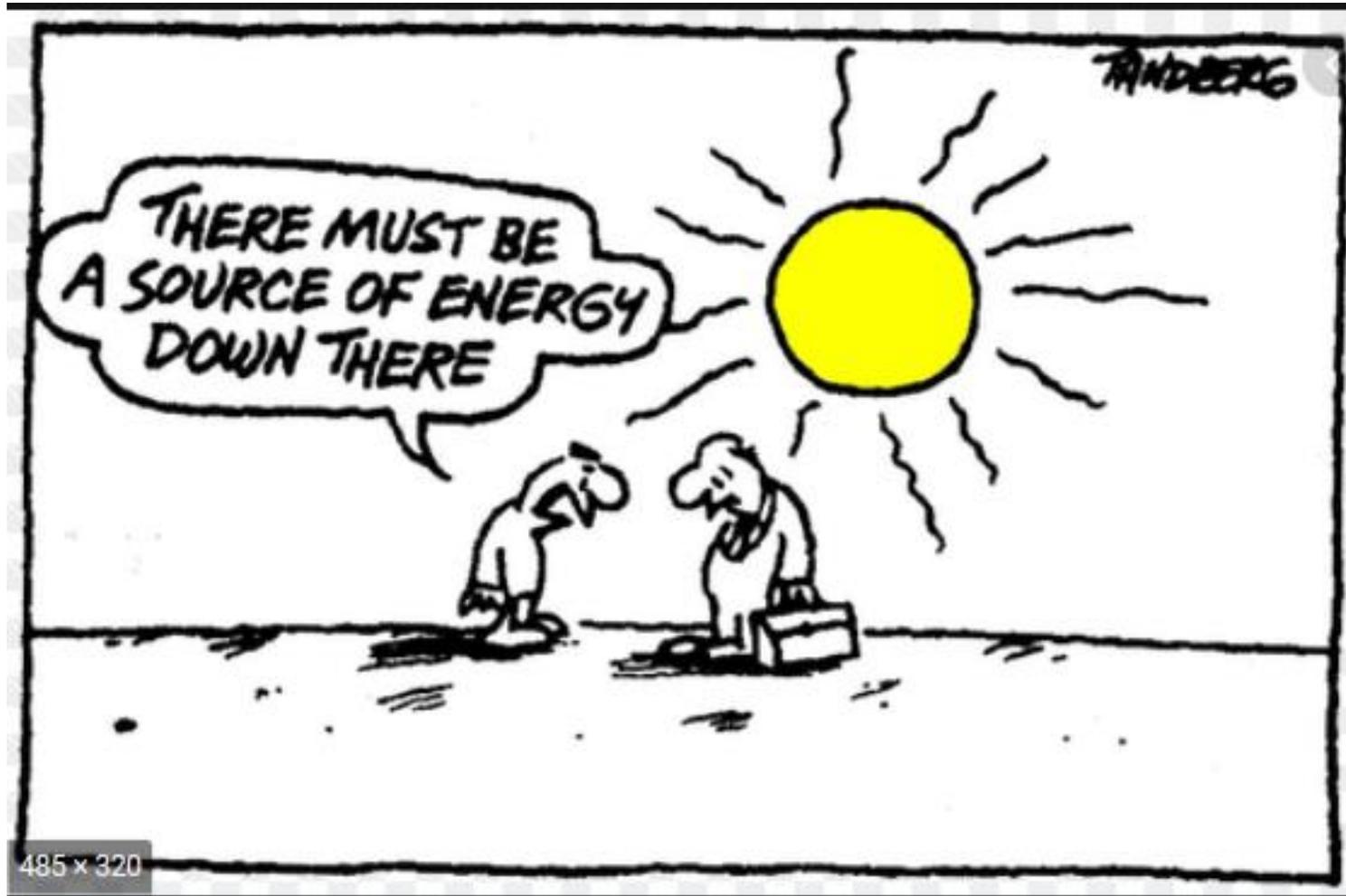
Innovation technologique Liliane Bettencourt  
(chaire annuelle 2021-2022)



Fondation  
Bettencourt  
Schueller

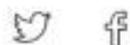
*Reconnue d'utilité publique depuis 1987*

[daniel.lincot@cnsr.fr](mailto:daniel.lincot@cnsr.fr)



9 novembre 2015

# Solaire photovoltaïque : une énergie majeure de la transition énergétique



Climat, énergie et société :  
le Collège de France et la  
COP21

Le renard et la Cigogne : lorsque une fable de Jean de la Fontaine (1621-1695) nous parle aussi d'énergie et de la COP21



Source : [fergant.clg61.ac-caen.fr](http://fergant.clg61.ac-caen.fr)

- 1- Avoir une source d'énergie
- 2- Développer des technologies adaptées pour l'utiliser : Savoir s'adapter !

 D Lincot, Collège de France, COP 21, 9-11-15



COLLÈGE DE FRANCE  
1793

Daniel Lincot

Daniel Lincot , Collège de France, 20-1-2022

# La ressource solaire

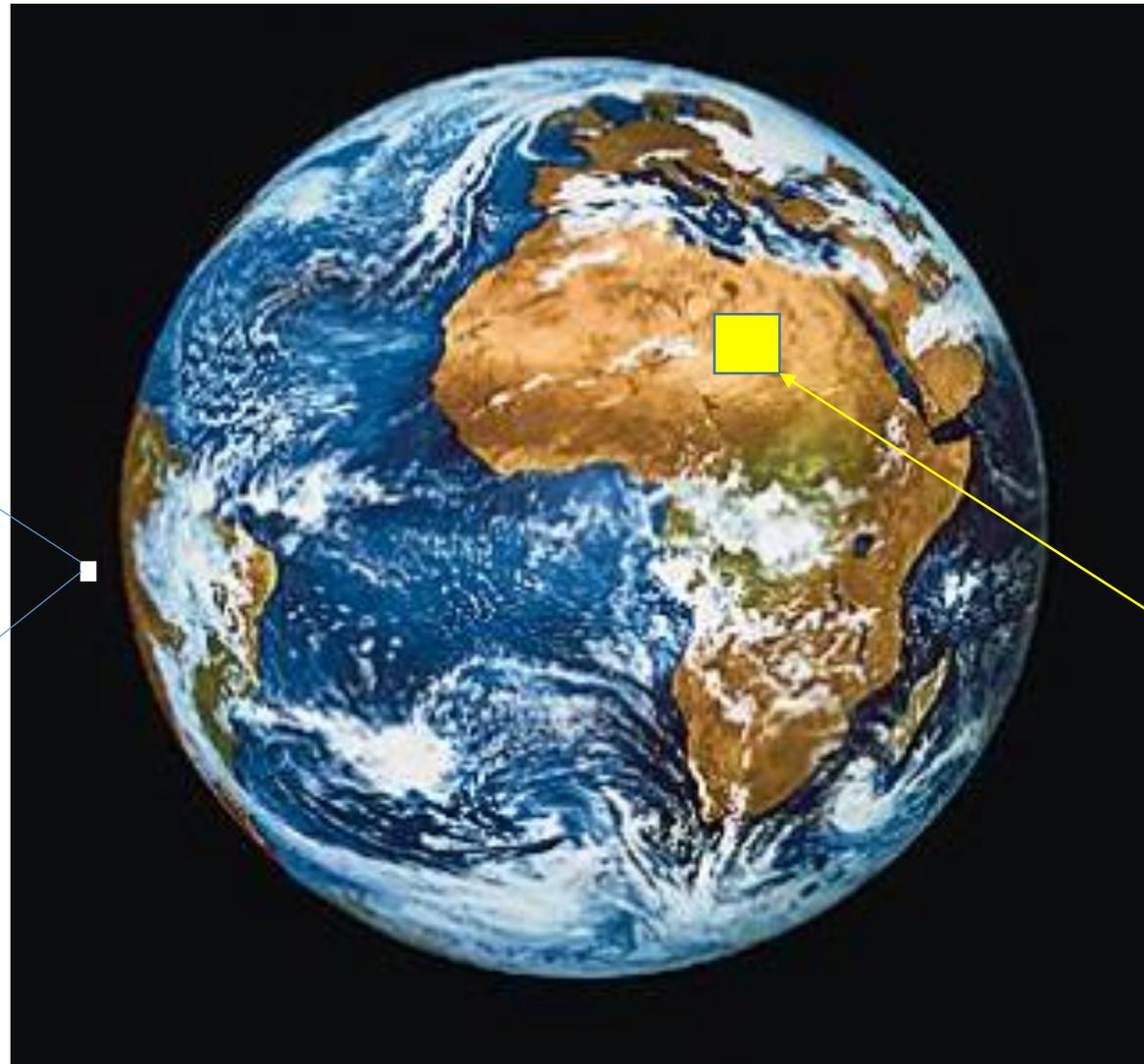
# Comparaison ressource solaire / consommation Humanité (17 TW)

Puissance solaire espace

1360 W/m<sup>2</sup>

12500 km<sup>2</sup>

110 km  
110 km



Puissance solaire au sol

1000 W/m<sup>2</sup>



Moyenne : 200 W/m<sup>2</sup>

17 TW → 85 000 km<sup>2</sup>  
Surface : 290 km x 290 km

Convertisseur R=20%  
650 x 650 km<sup>2</sup>

Source Larousse

# Comparaison ressource solaire / consommation Humanité (17 TW)

Puissance solaire espace

1360 W/m<sup>2</sup>

12500 km<sup>2</sup>

110 km  
110 km



Puissance solaire au sol

1000 W/m<sup>2</sup>



Moyenne : 200 W/m<sup>2</sup>

17 TW → 85 000 km<sup>2</sup>  
Surface : 290 km x 290 km

Convertisseur R=20%

425 000 km<sup>2</sup>  
650 km x 650 km

Consommation  
primaire finale France  
1562 TWh / 0,18 TW  
(elec. 500 TWh / 570 GW  
→ 4000 km<sup>2</sup>)

Source Larousse

## Cartographie de la ressource solaire au niveau local : Exemple des cadastres solaires

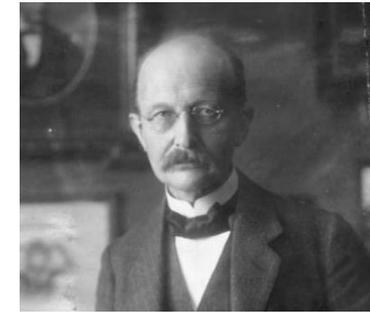
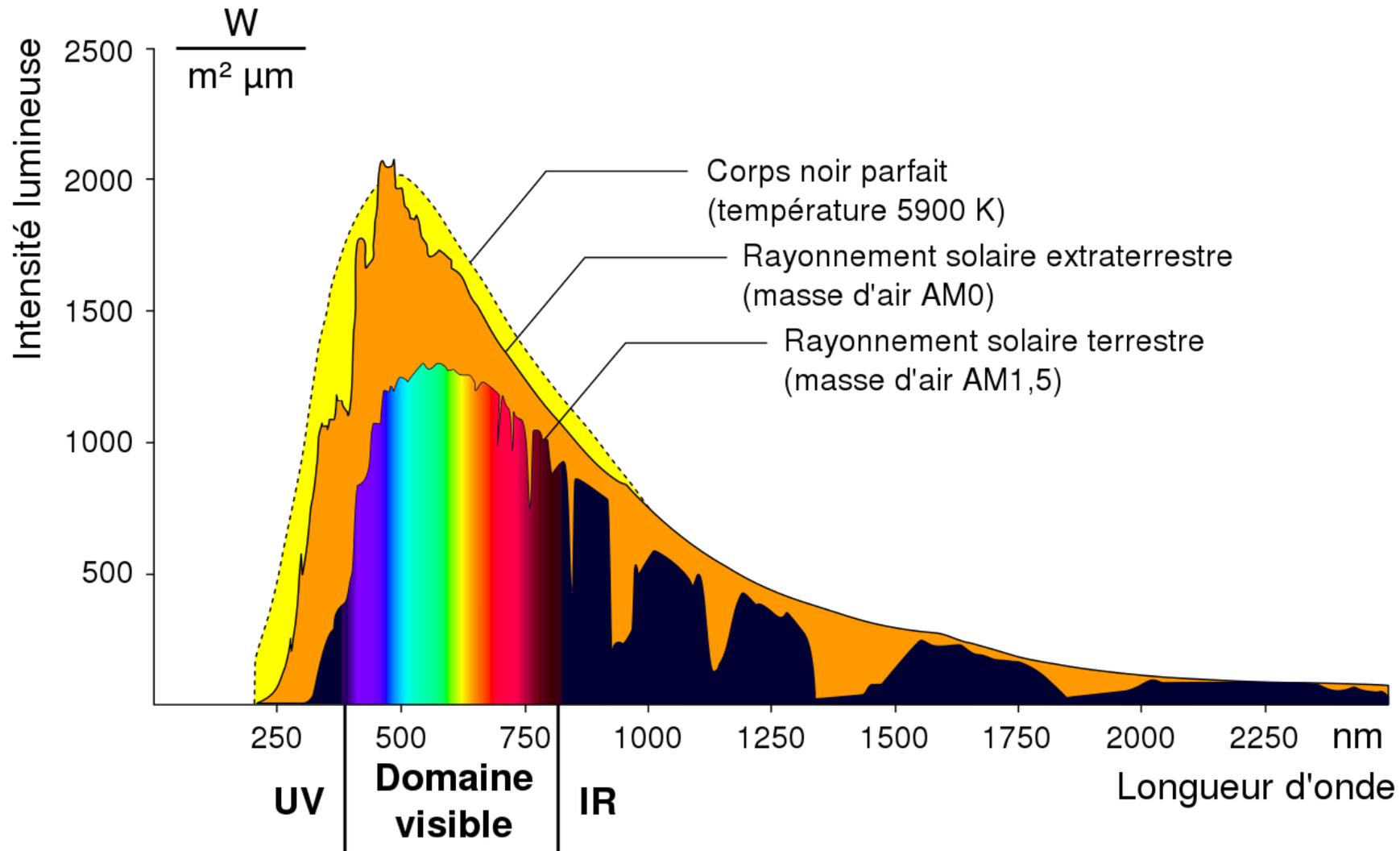


A consulter :

<https://capgeo.sig.paris.fr/Apps/CadastreSolaire/>  
<https://enjeux-ecologiques.fr/2020/05/grand-paris-potentiel-solaire/>

Source 2020 : <https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/lile-de-france-accelere-sur-lenergie-solaire-1186192>

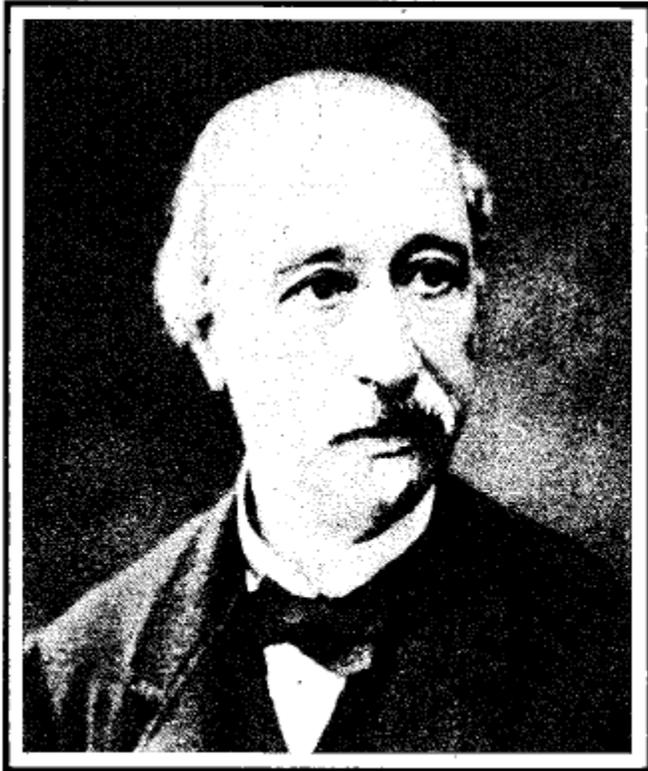
## La lumière solaire est multicolore



Hors atmosphère (AM0)  
1360 W/m<sup>2</sup>  
Au niveau du sol (AM1,5):  
1000 W/m<sup>2</sup>

EDMOND BECQUEREL

The Discoverer of Photovoltaics



COMPTE RENDU  
DES SÉANCES  
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 4 NOVEMBRE 1839.

PRÉSIDENTE DE M. CHEVREUL.

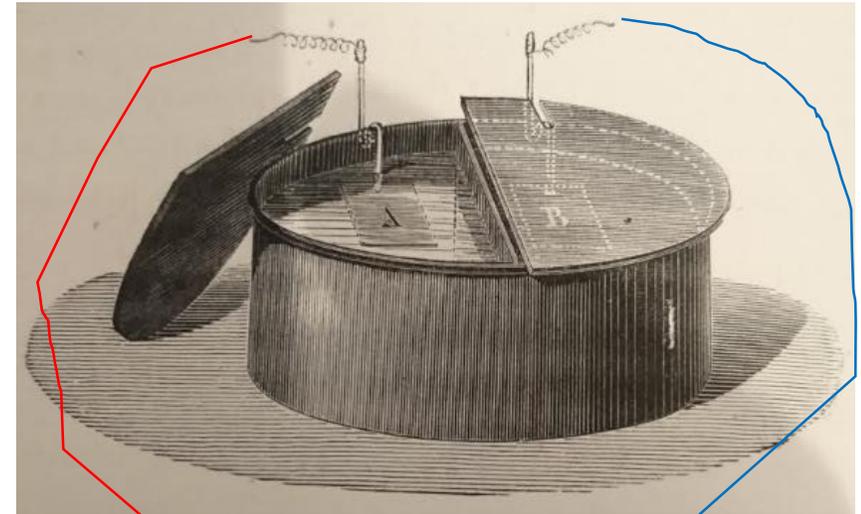
MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS  
DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

MÉMOIRES LUS.

*Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires; par M. EDMOND BECQUEREL.*

§ 1<sup>er</sup>. *Action de la radiation sur les lames métalliques.*

« Dans le dernier Mémoire que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie, dans sa séance du lundi 29 juillet 1839, je me suis attaché à mettre en évidence, à l'aide des courants électriques, les réactions chimiques qui ont lieu au contact de deux liquides, sous l'influence de la lumière solaire. Le procédé que j'ai employé nécessitait l'emploi de deux lames de platine, en relation avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur très sensible et qui plongeaient chacune dans une des dissolutions superposées. Or comme ces deux lames éprouvaient elles-mêmes les effets de la radiation, il a dû en résulter des phénomènes composés, dont je vais m'occuper dans ce nouveau Mémoire. On sera à même ensuite de faire la part de chacun des effets produits.



Musée école polytechnique

< 1800

Soleil  
Fusion



Lumière



Chaleur



vent



Energie Eolienne



Évaporation



Energie hydraulique



Photosynthèse

biomasse



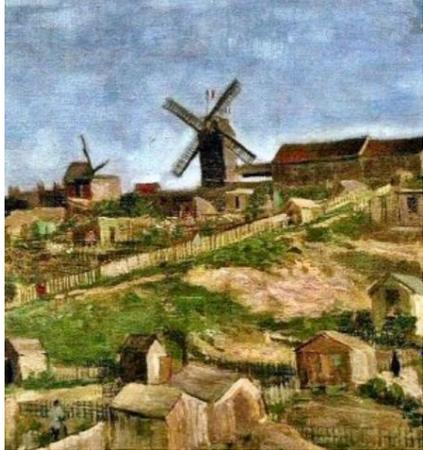
Force animale



Chaleur



travail



Moulins de Montmartre  
V. Van Gogh (1886)

1711

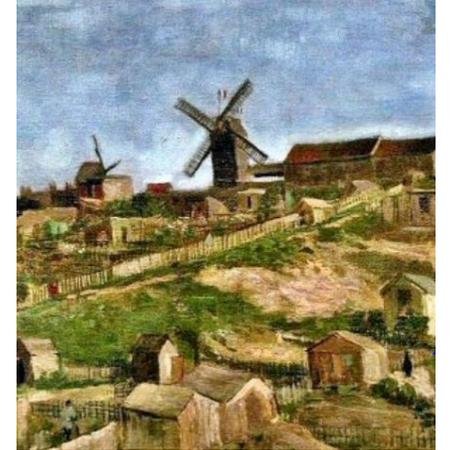
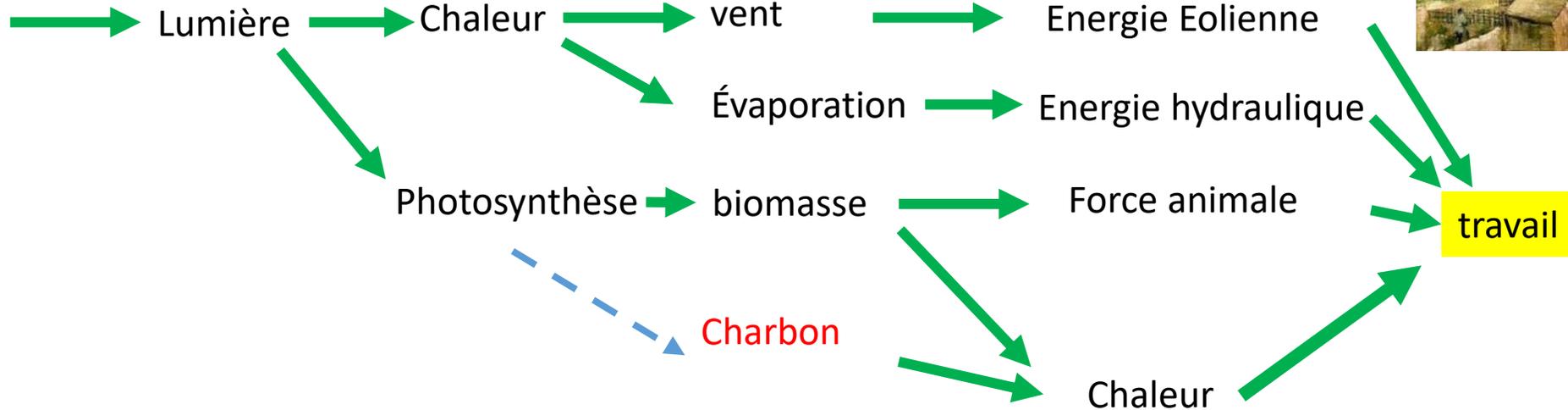
Thomas Newcomen

1775 James Watt



1850

Soleil  
Fusion

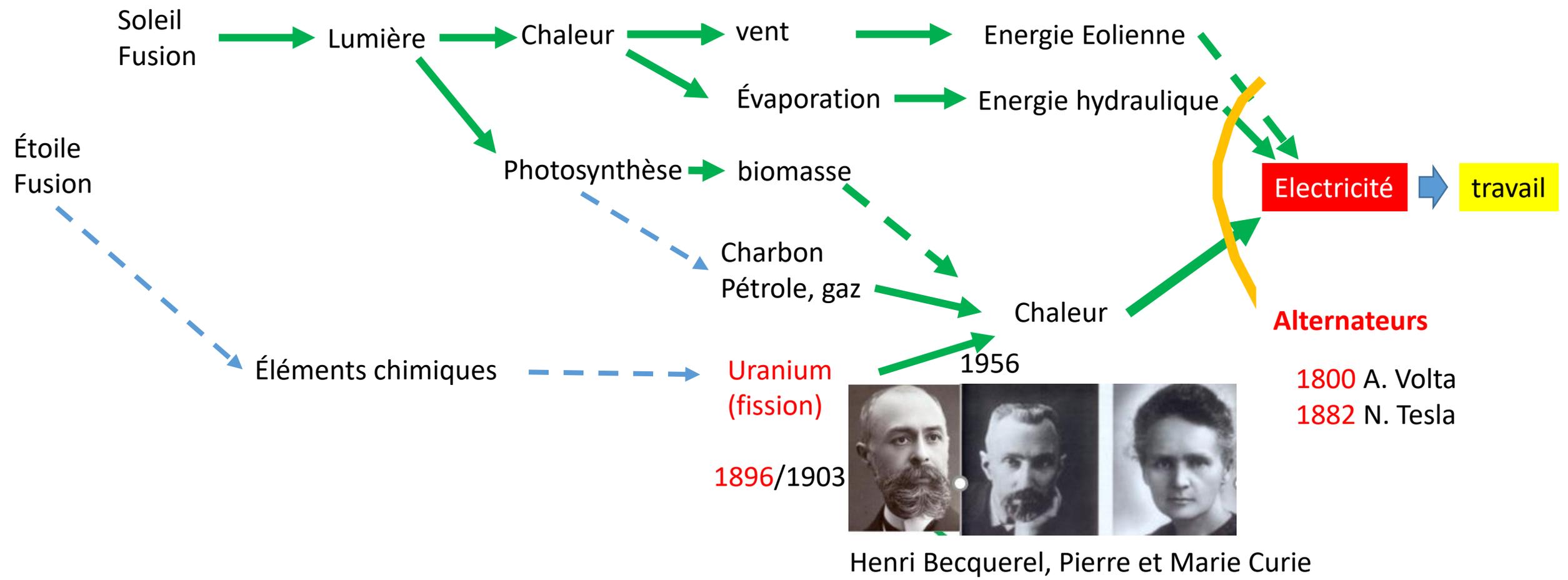


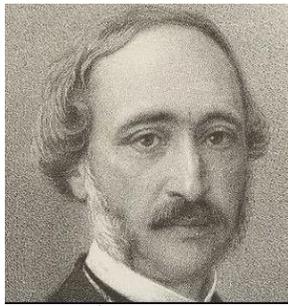
Moulins de Montmartre  
V. Van Gogh (1886)

1711  
Thomas Newcomen  
1775 James Watt



1960





Edmond Becquerel

1839

2020



Conversion photovoltaïque

Soleil Fusion

Lumière

Chaleur

vent

Energie Eolienne

Évaporation

Energie hydraulique

Photosynthèse

biomasse

Charbon

Pétrole, gaz

Chaleur

Alternateurs

Electricité

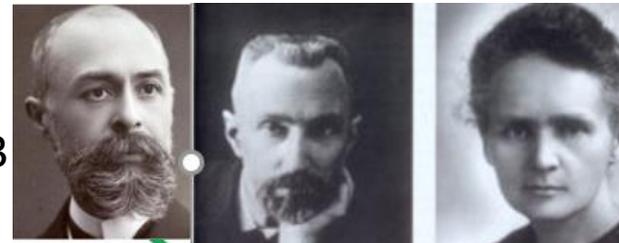
travail

1800 A. Volta



1896/1903

Uranium (fission)

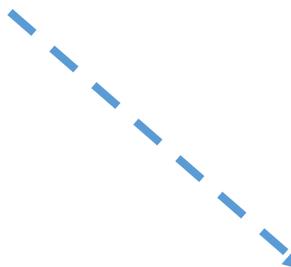


Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie

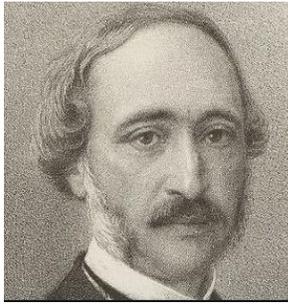
Étoile Fusion

Éléments chimiques

Uranium (fission)



2020



Edmond Becquerel  
1839

Conversion photovoltaïque



Soleil Fusion

Lumière

Chaleur

vent

Energie Eolienne

Évaporation

Energie hydraulique

Photosynthèse

biomasse

Charbon

Pétrole, gaz

Chaleur

Alternateurs

Electricité

travail

Photovoltaïque  
-3 Mds années

1771  
J. Priesley

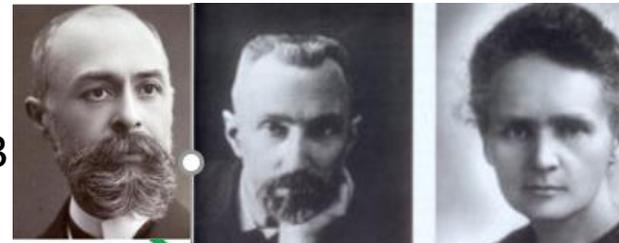


40 TW

Éléments chimiques

Uranium  
(fission)

1896/1903

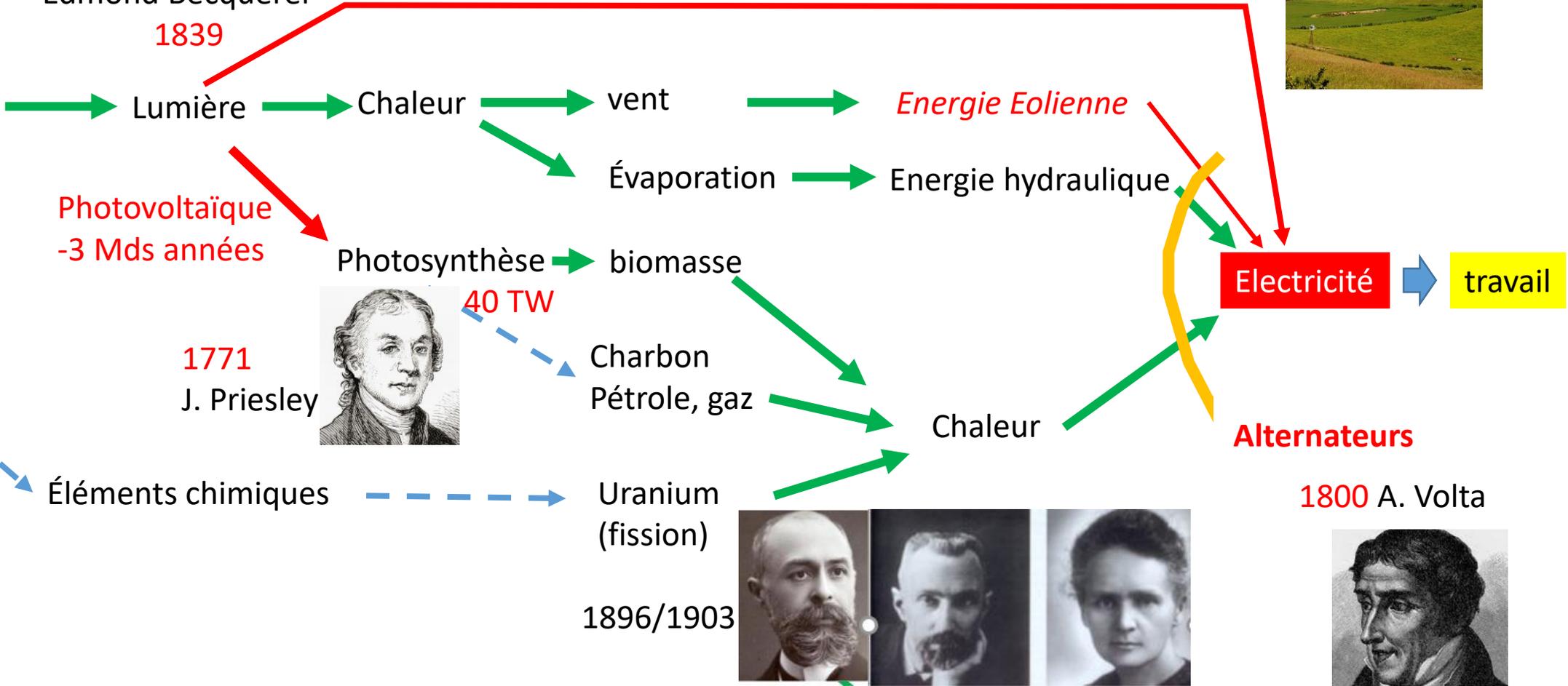
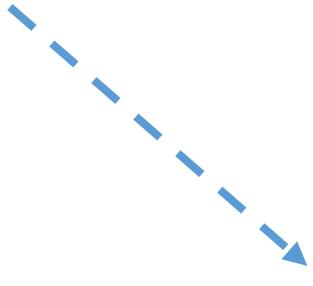


Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie

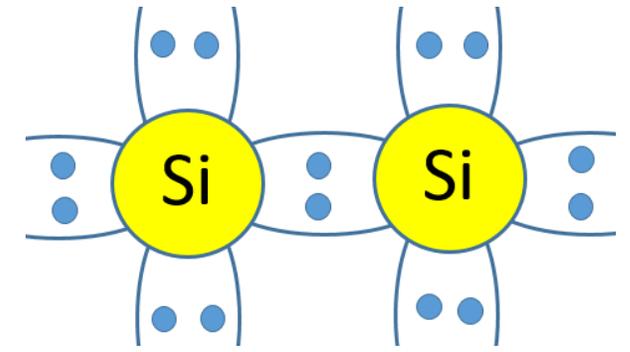
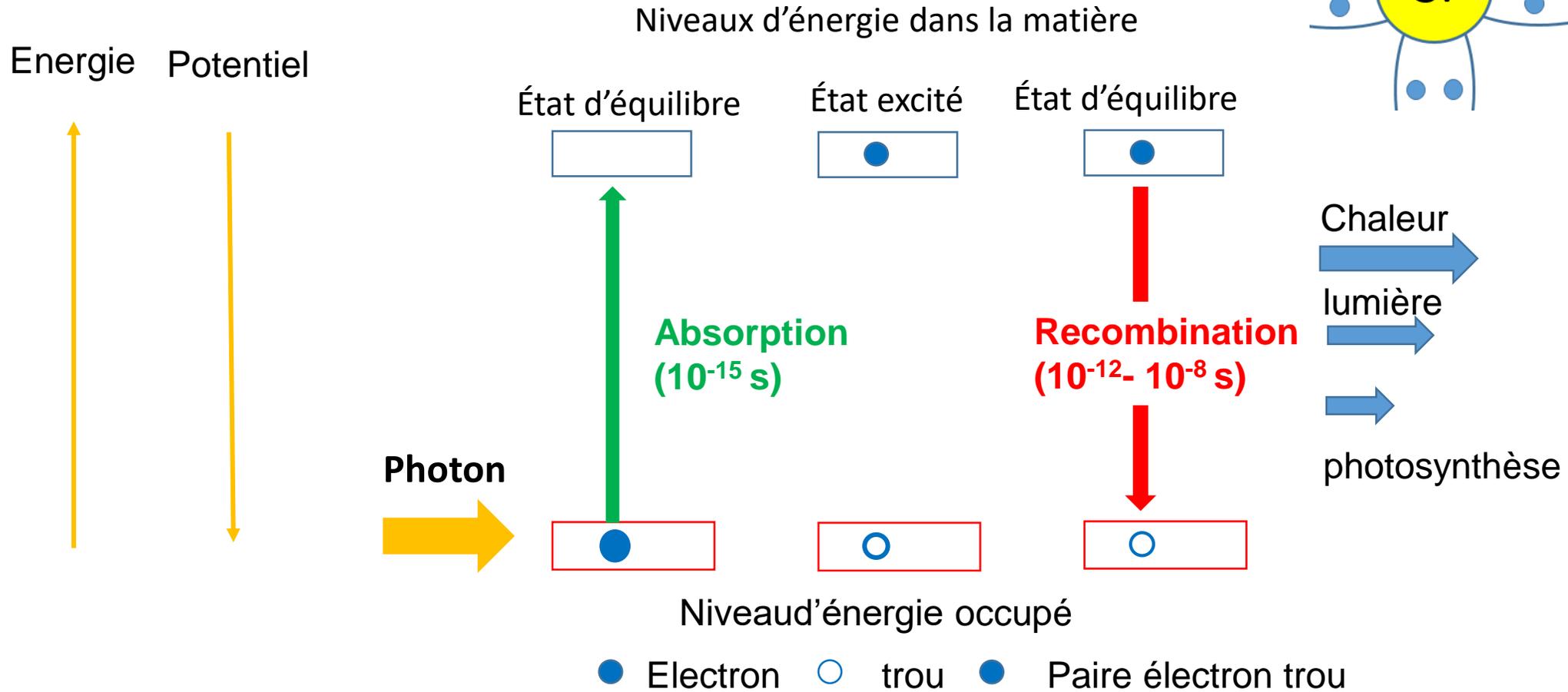
1800 A. Volta



Étoile Fusion



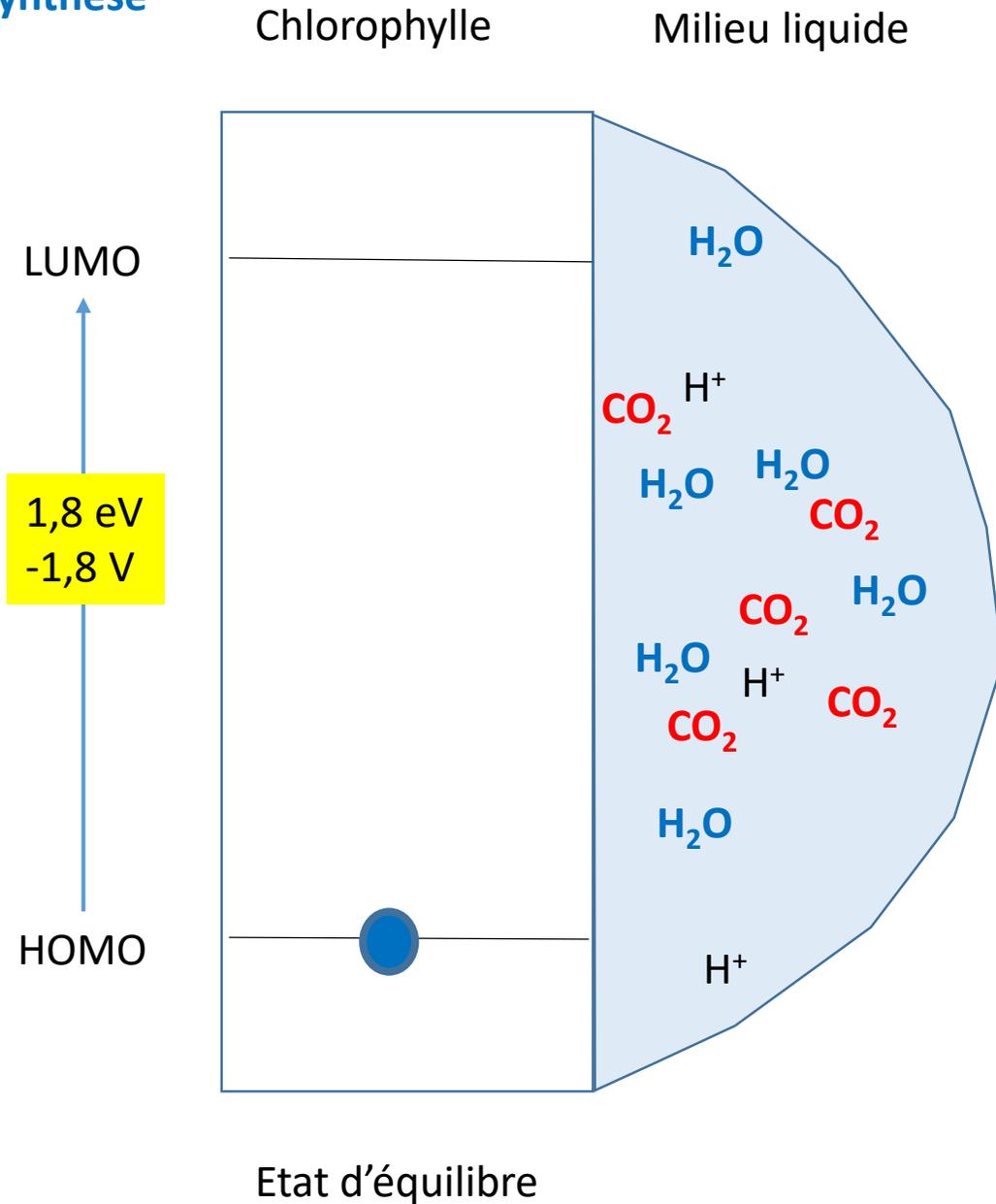
# Processus d'absorption de la lumière par les électrons de liaison de la matière



Énergie du photon ( $E = h\nu$ )  $\rightarrow$  énergie électrique « stockée » ( $-qV$ )  $\rightarrow$  Energie restituée

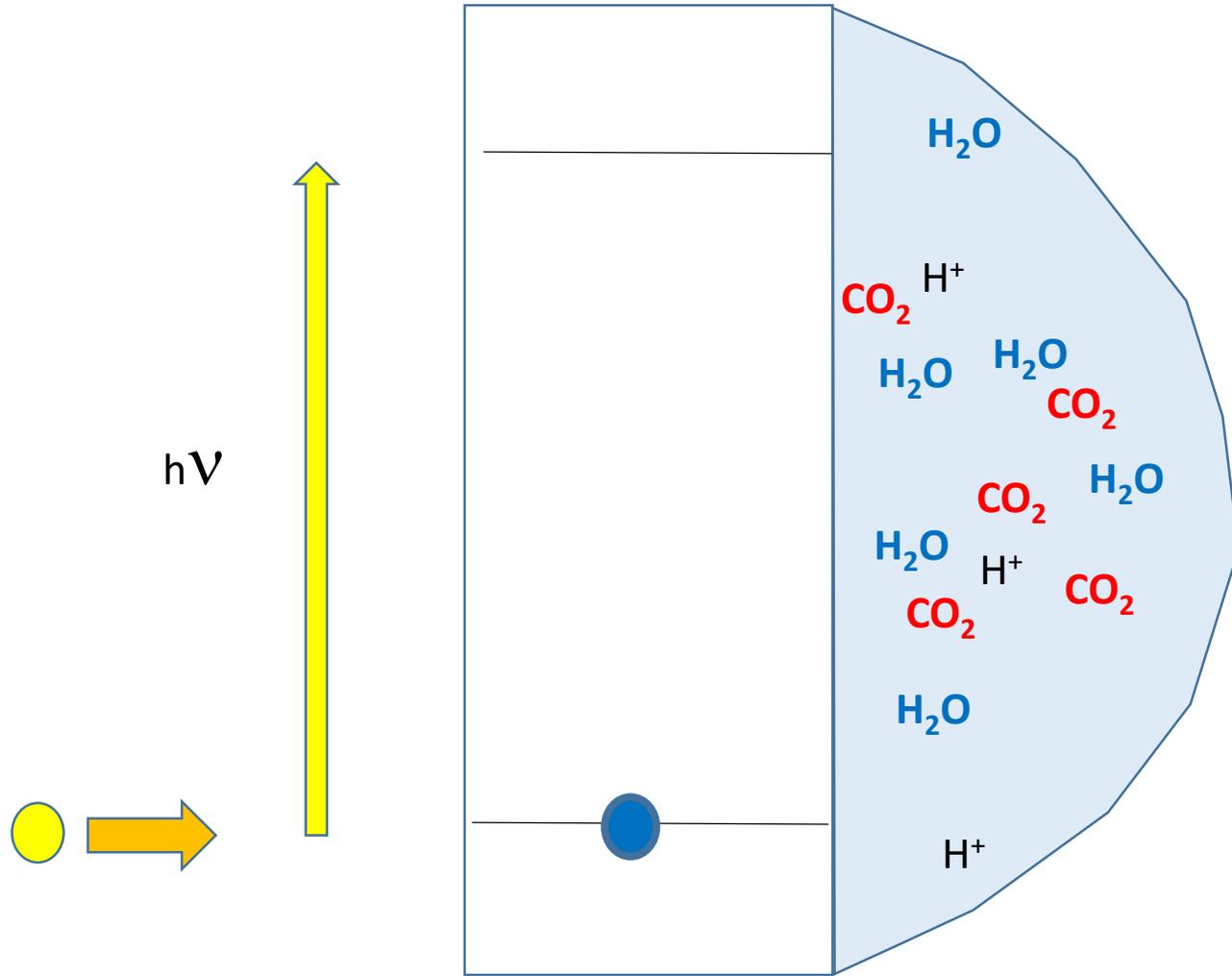


## Principe de la photosynthèse

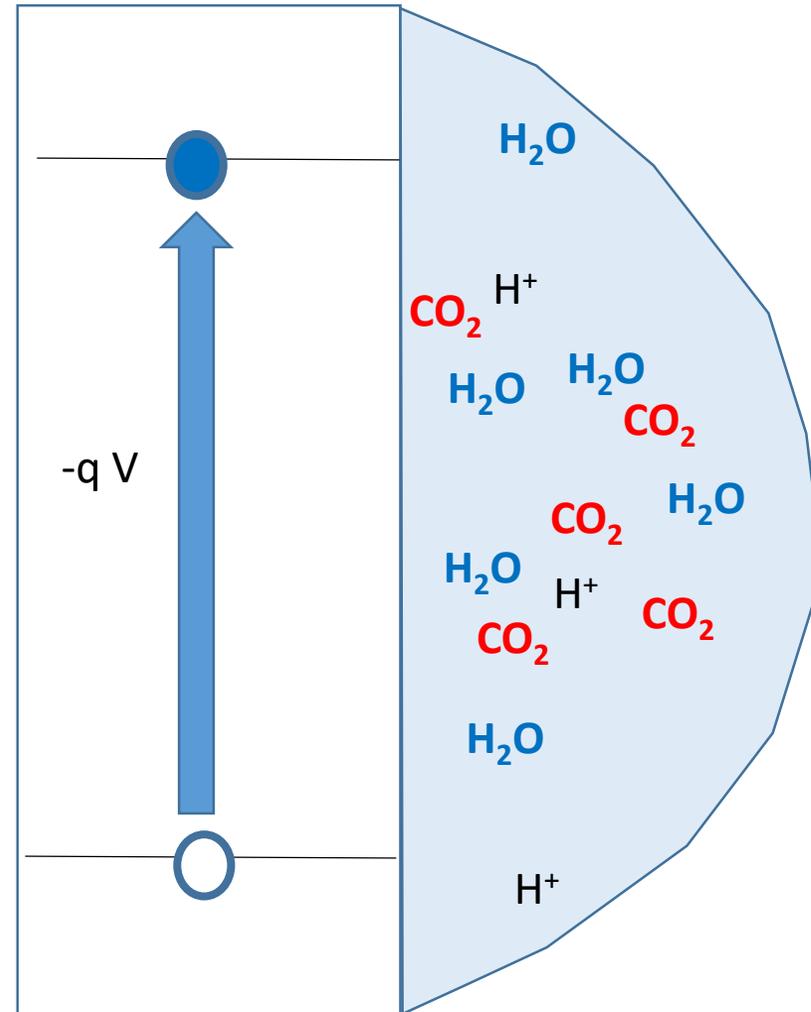


Ceci est un schéma illustratif pour présenter les mécanismes fondamentaux. La réalité est beaucoup plus complexe et fait intervenir deux photons Voir transparent 24.

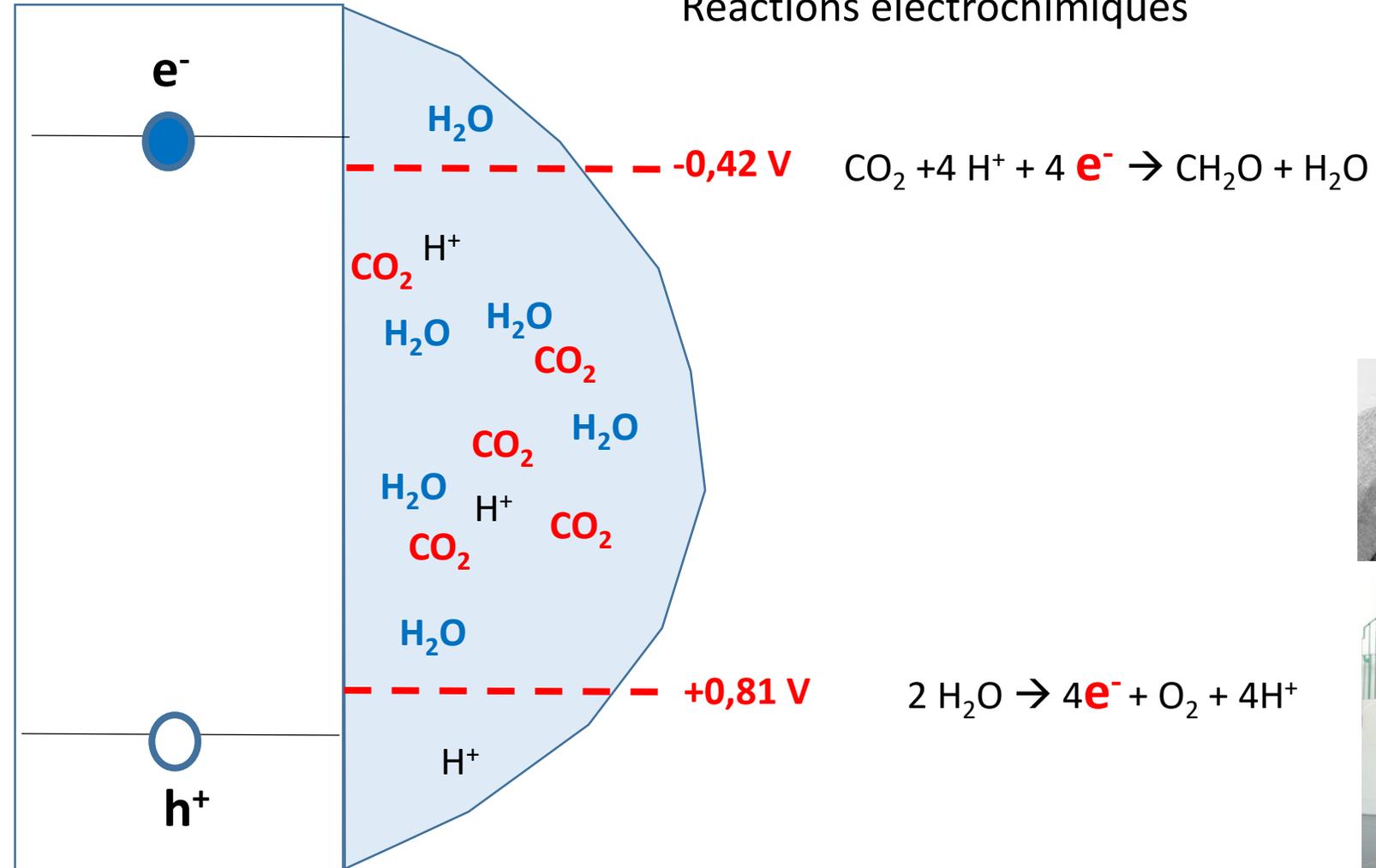
Référence : La photosynthèse, processus physiques, moléculaires et physiologiques J. Farineau, J. F. Morot-Gaudry, Editions Quae, 2017



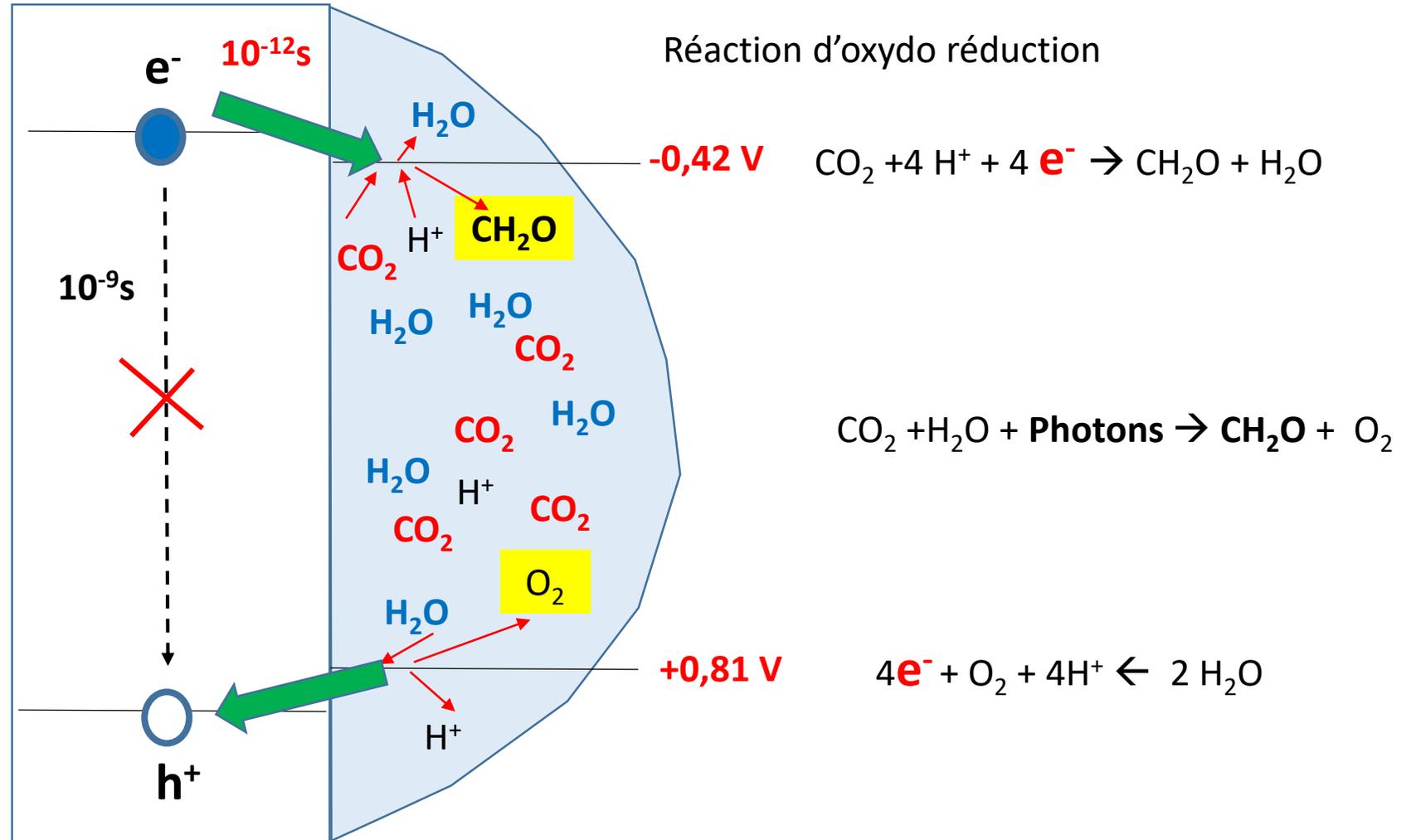
# Absorption d'un photons



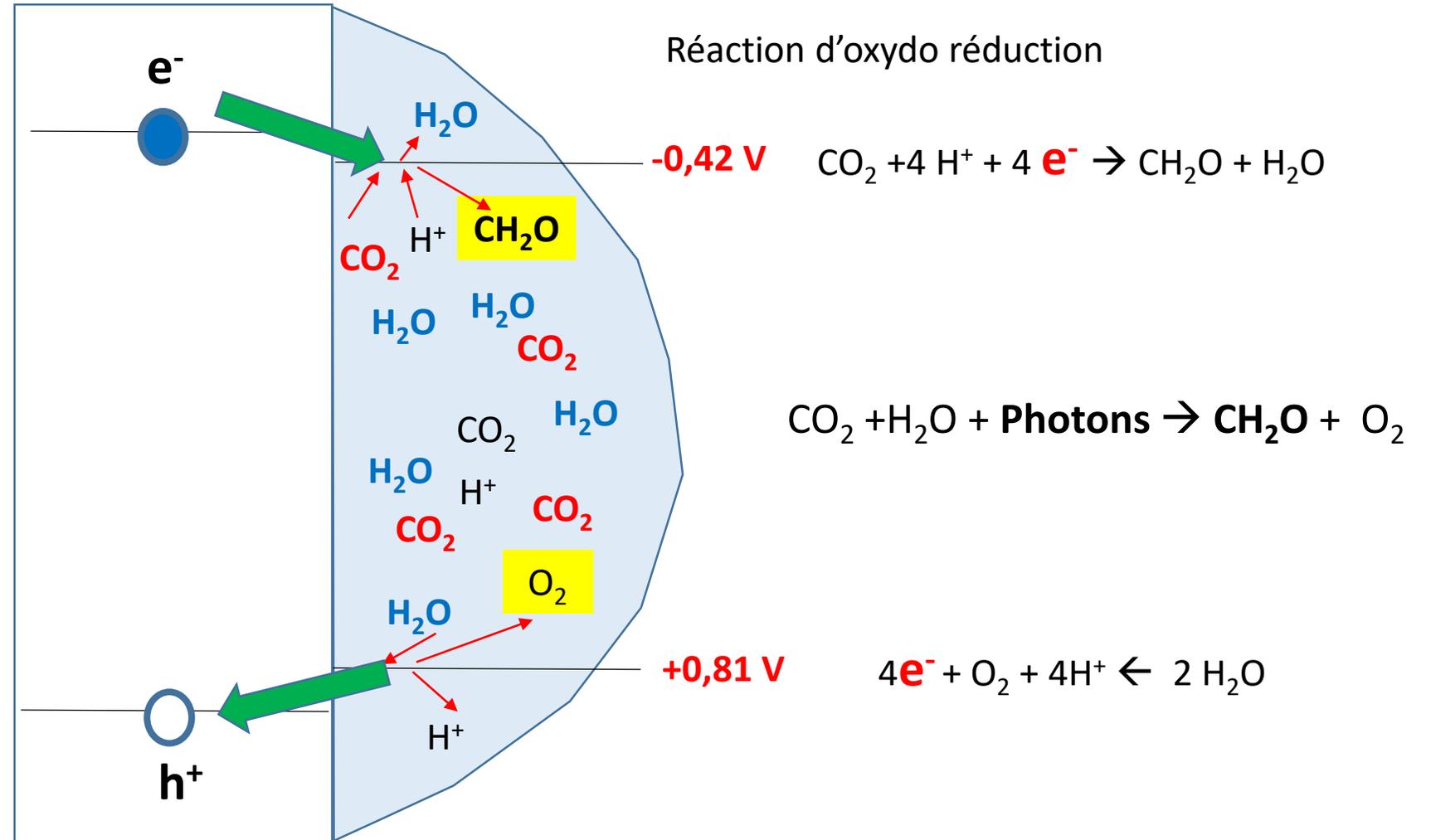
## Réactions électrochimiques

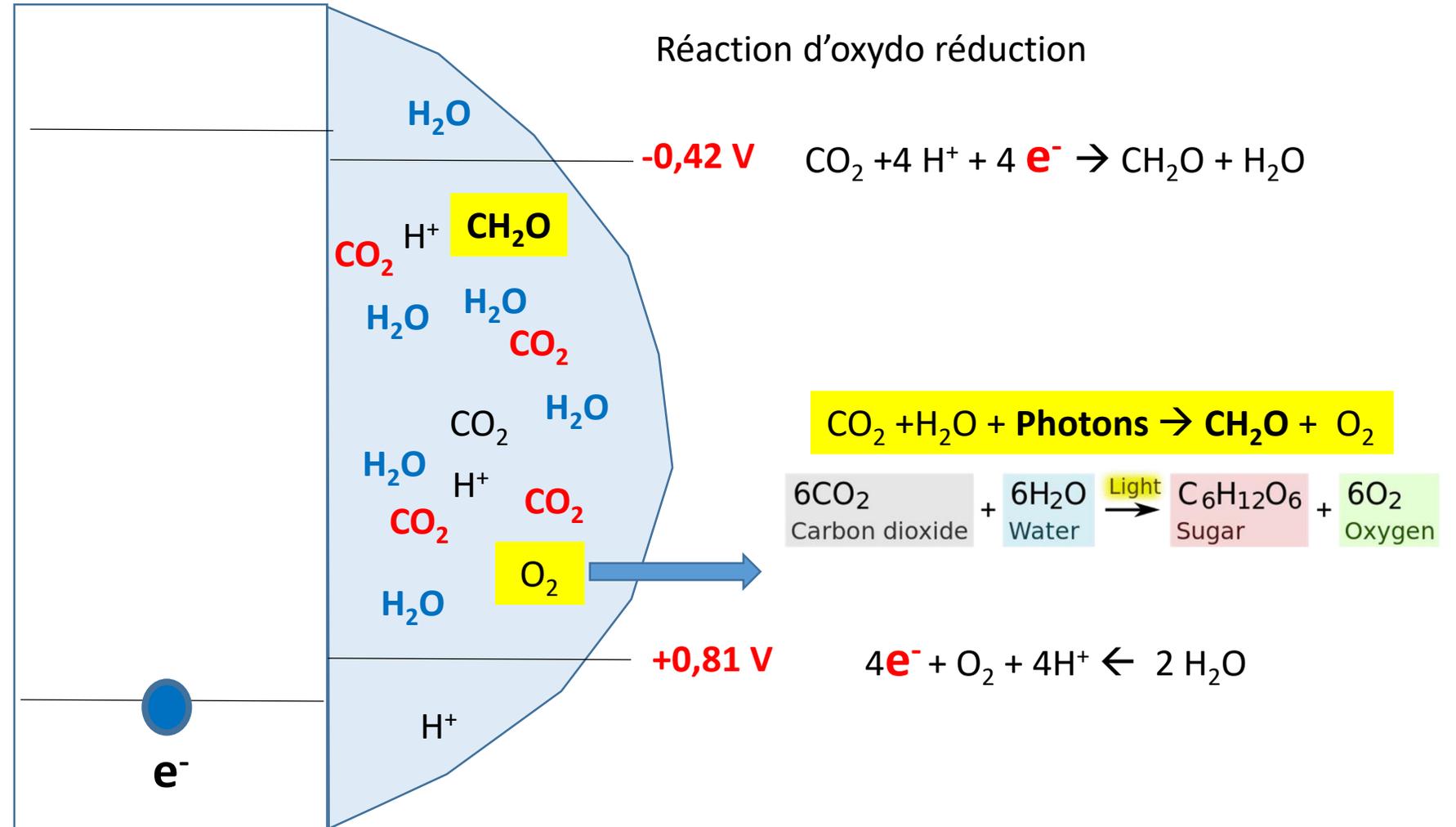


Etat excité hors équilibre

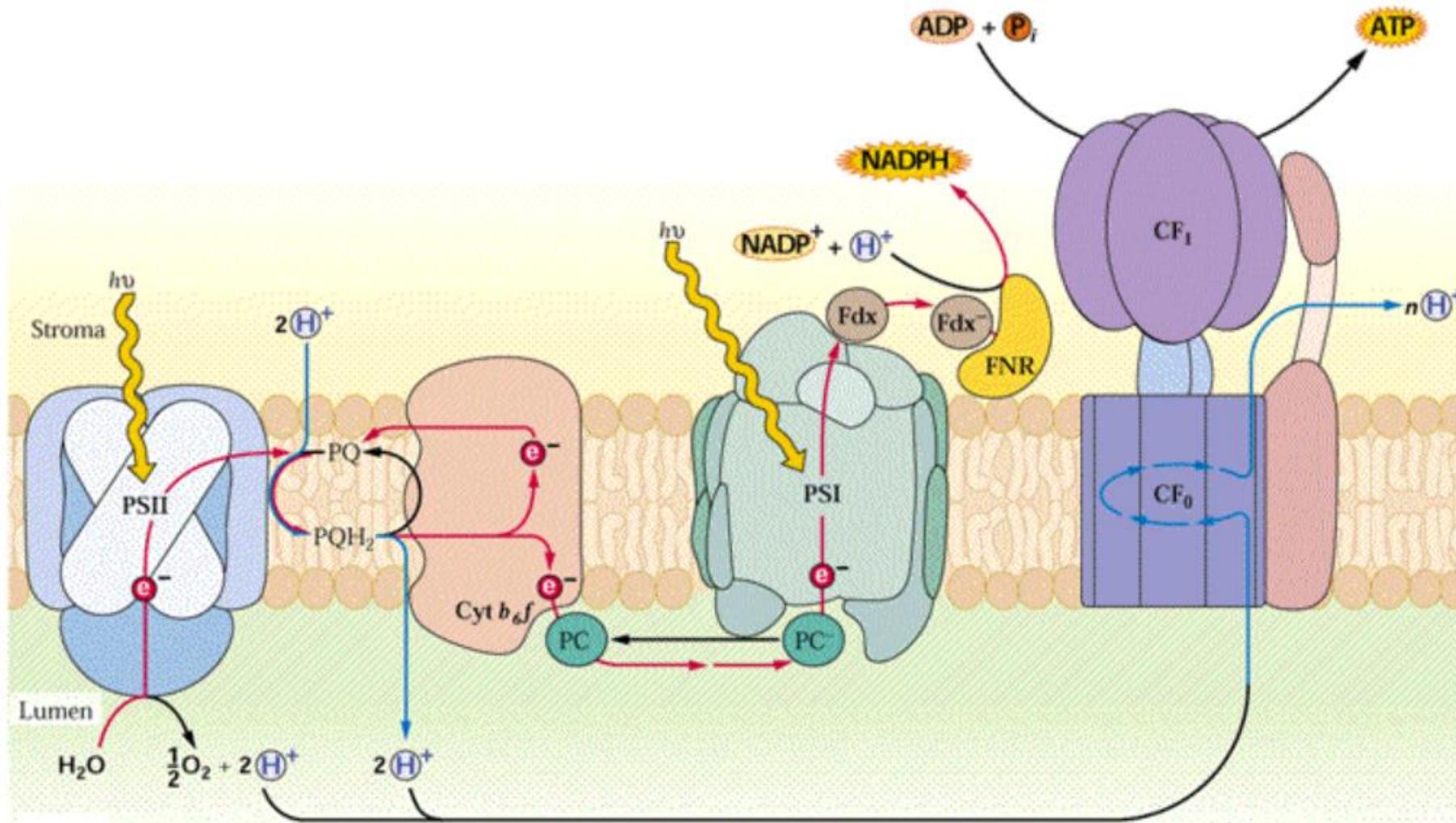


# Retour à l'équilibre

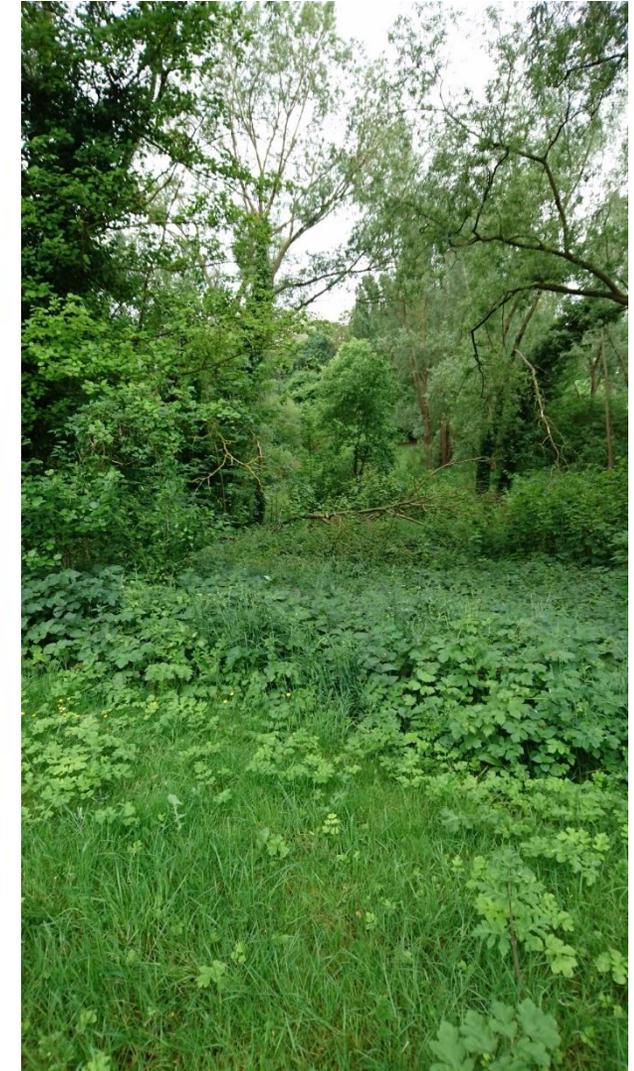




# Les nano-usines naturelles: Photovoltaïque + stockage + transport → Matière → Vie



Source : "Photosynthèse" - Université Lausanne

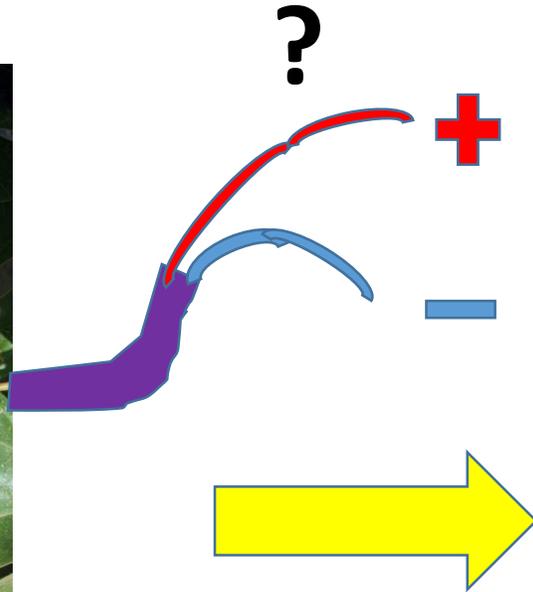


Coulée verte, Antony

# l'innovation photovoltaïque



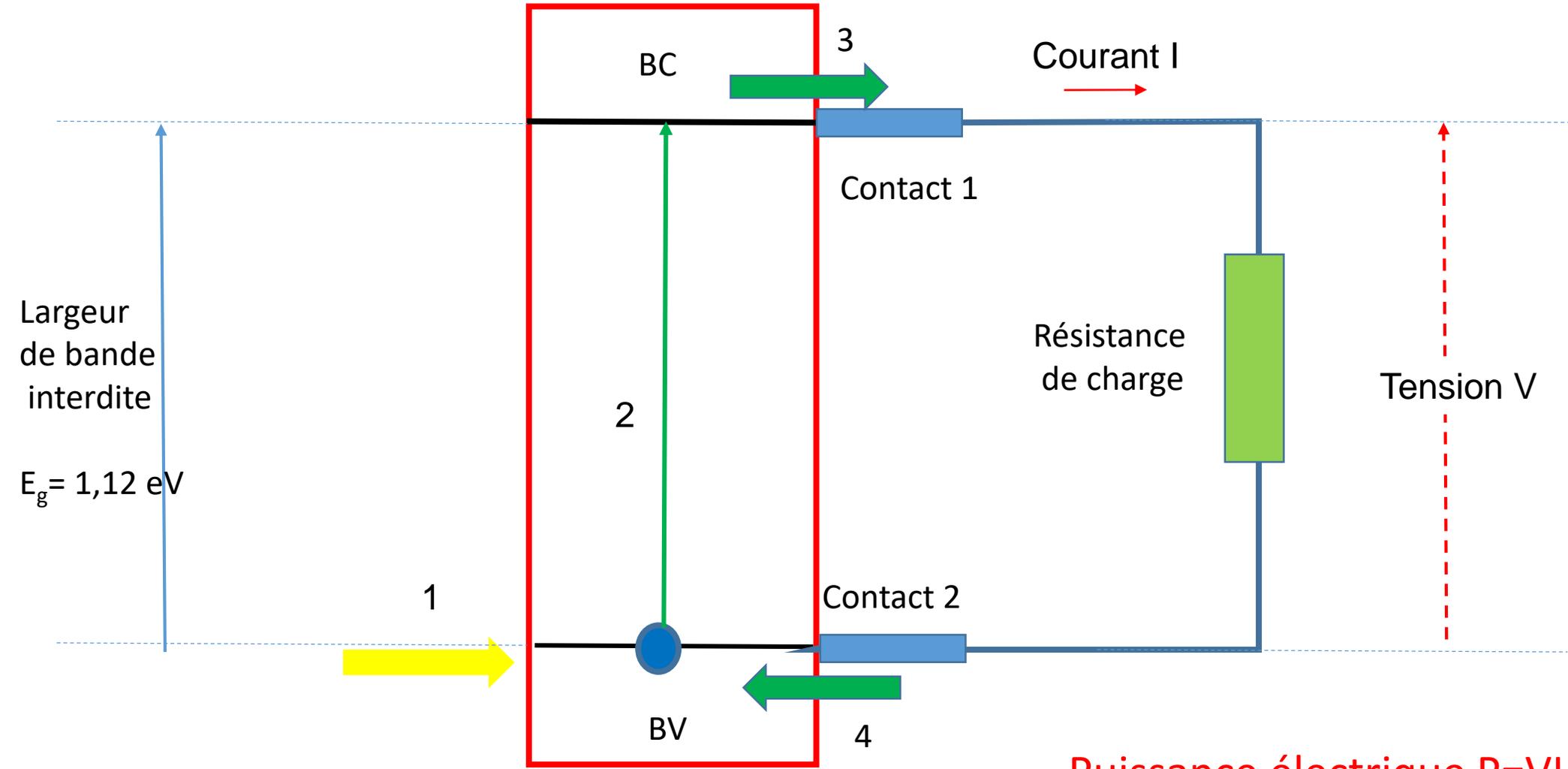
chlorophylle



Silicium

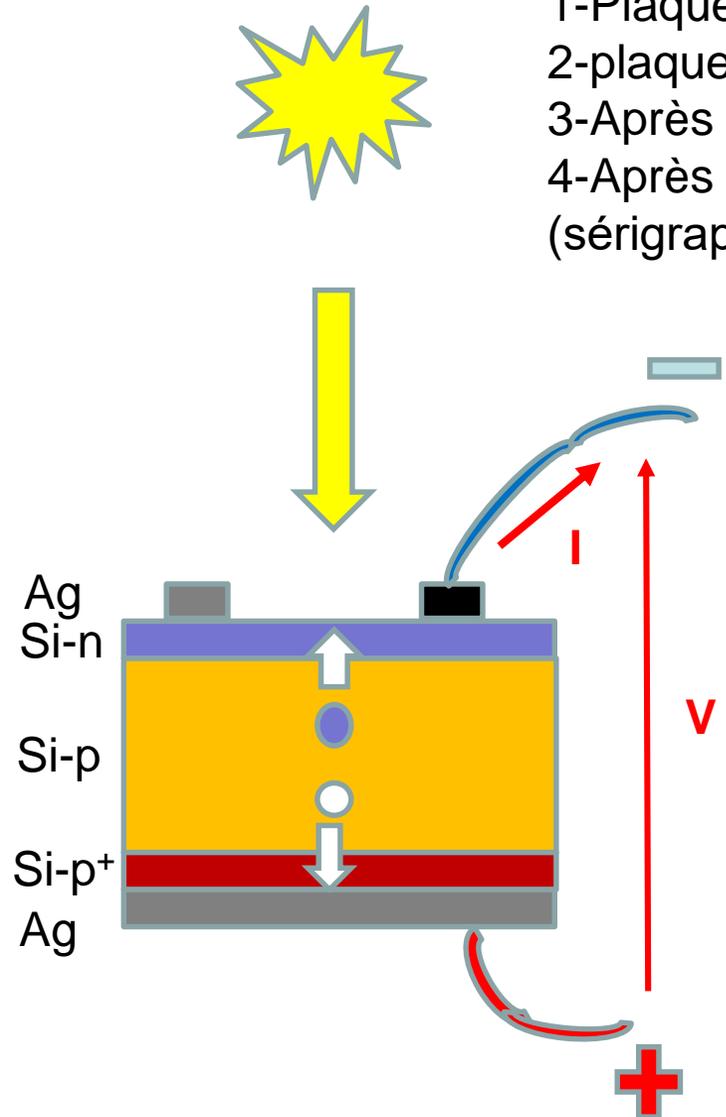
Semi-conducteurs  
Silicium

Circuit extérieur

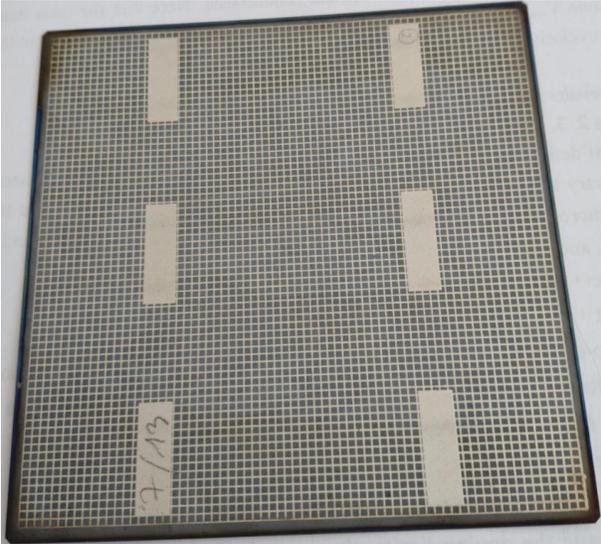
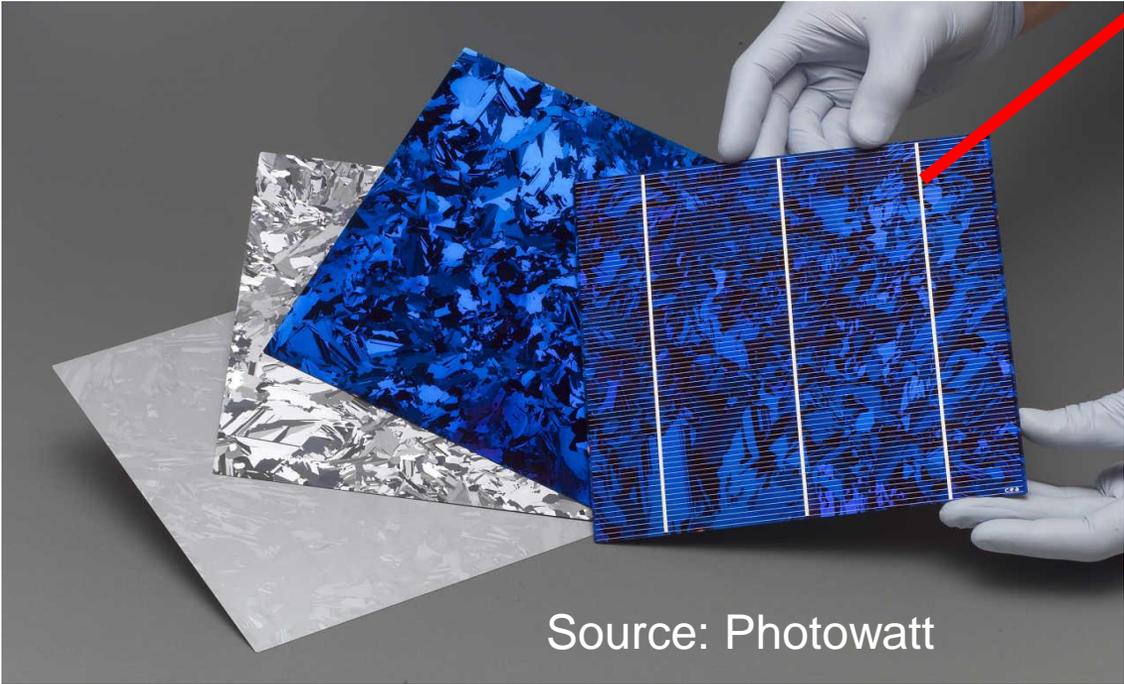


# Cellule Photovoltaïque au silicium (2010)

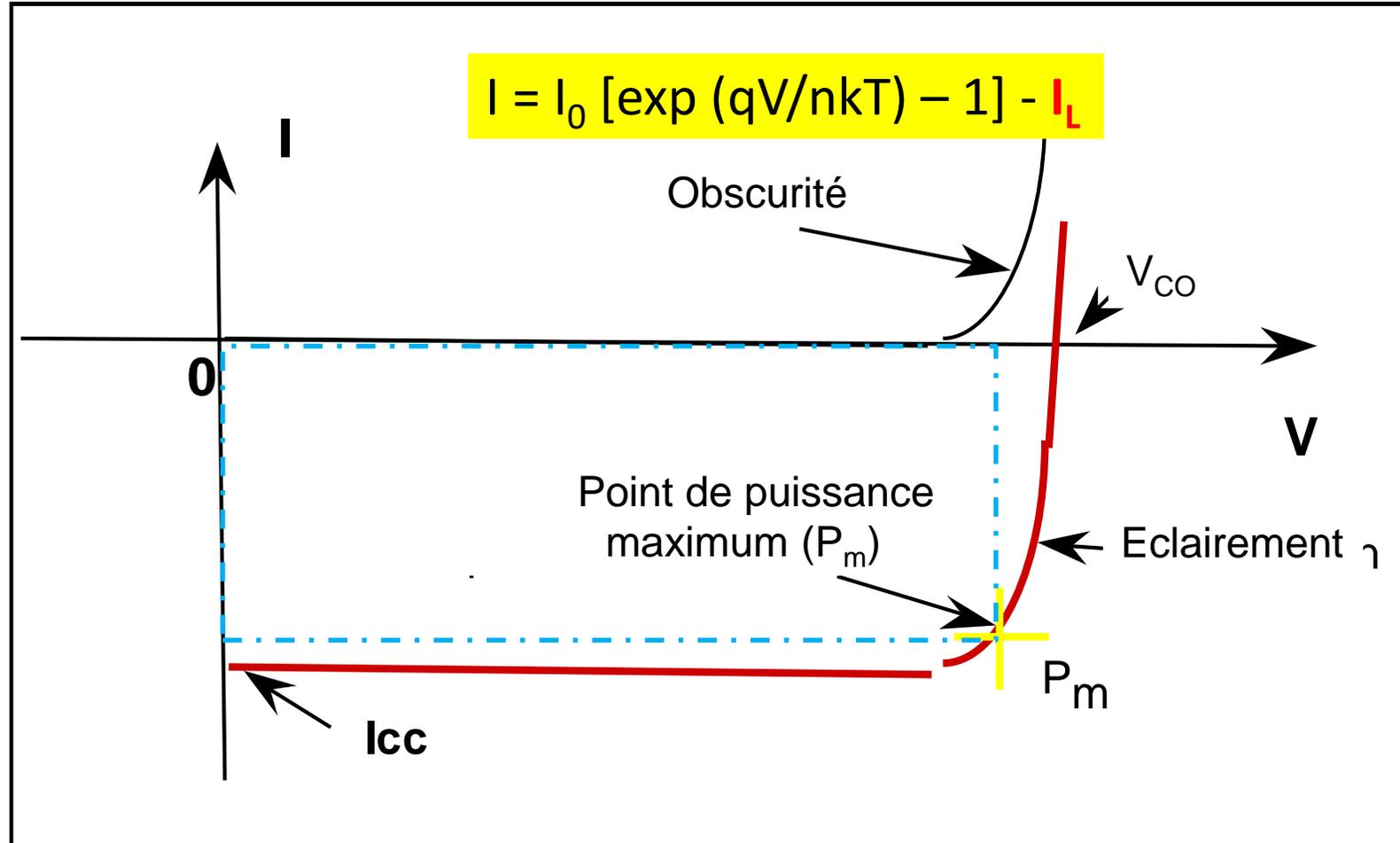
- 1-Plaquette de type p (dopage bore) brute de sciage,
- 2-plaquette découpée et avec un dopage superficiel n (phosphore)
- 3-Après couche anti-reflet (oxyde de titane)
- 4-Après dépôt de la grille de collecte des électrons photogénérés (sérigraphie à la pate à l'argent)



Face arrière



## Caractéristique courant –tension (I-V) d'une cellule solaire:



$$P_m = FF \times V_{co} \times I_{cc}$$

FF facteur de remplissage

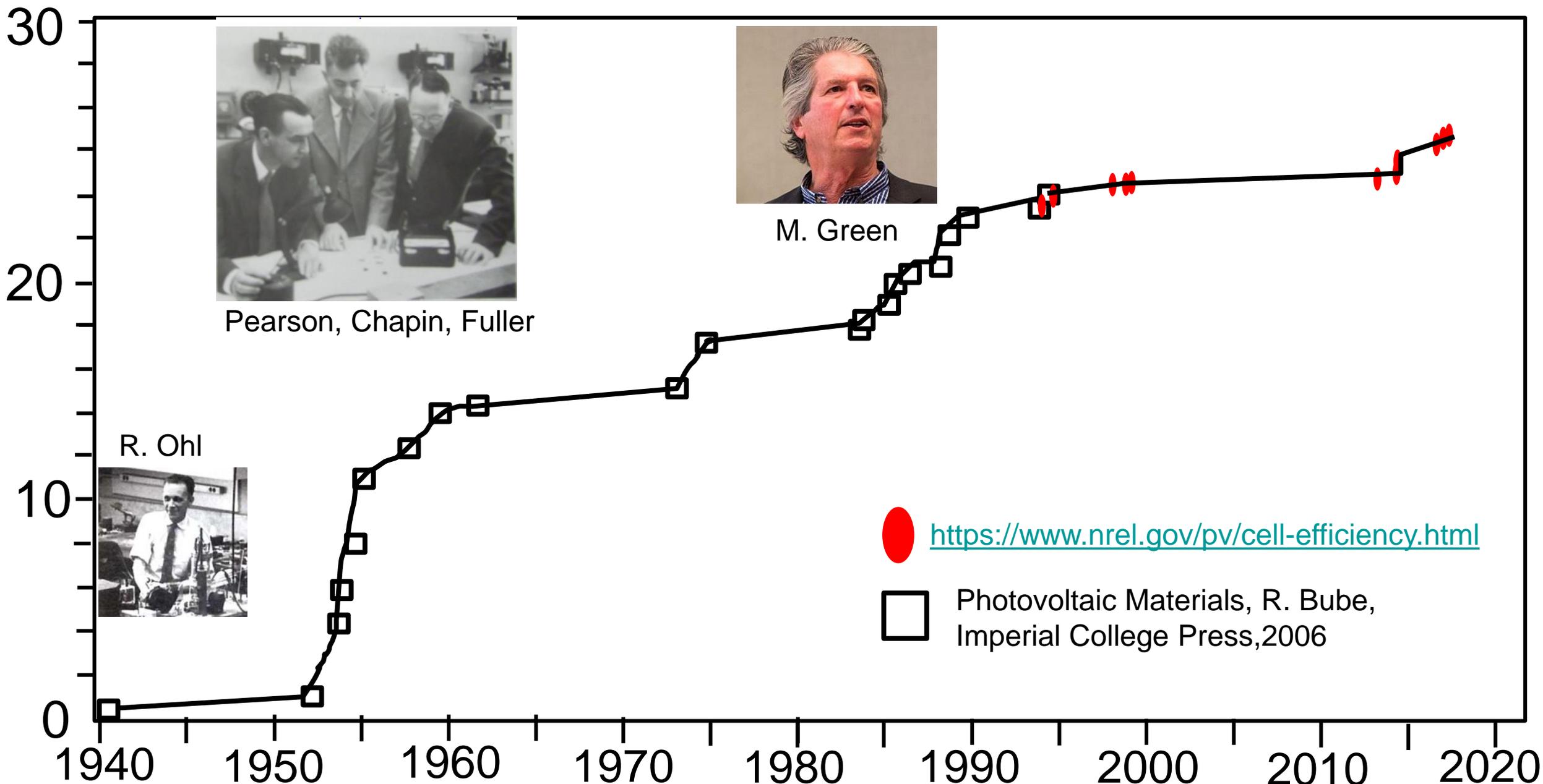
$$\text{Rendement de conversion} = P_m / P_{\text{lumière}}$$

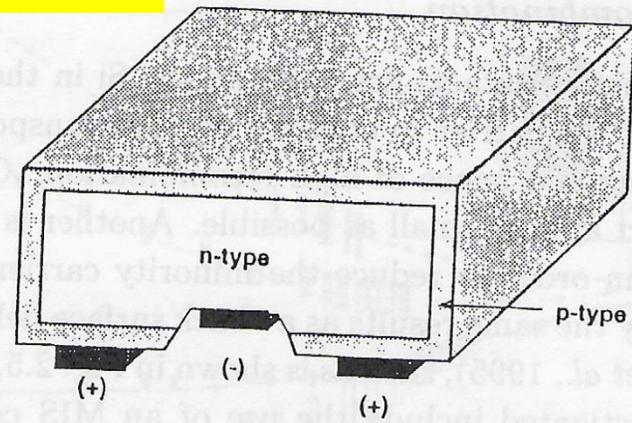
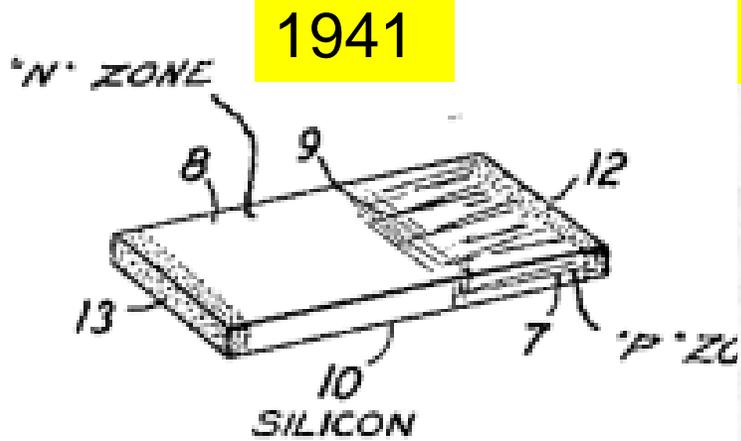
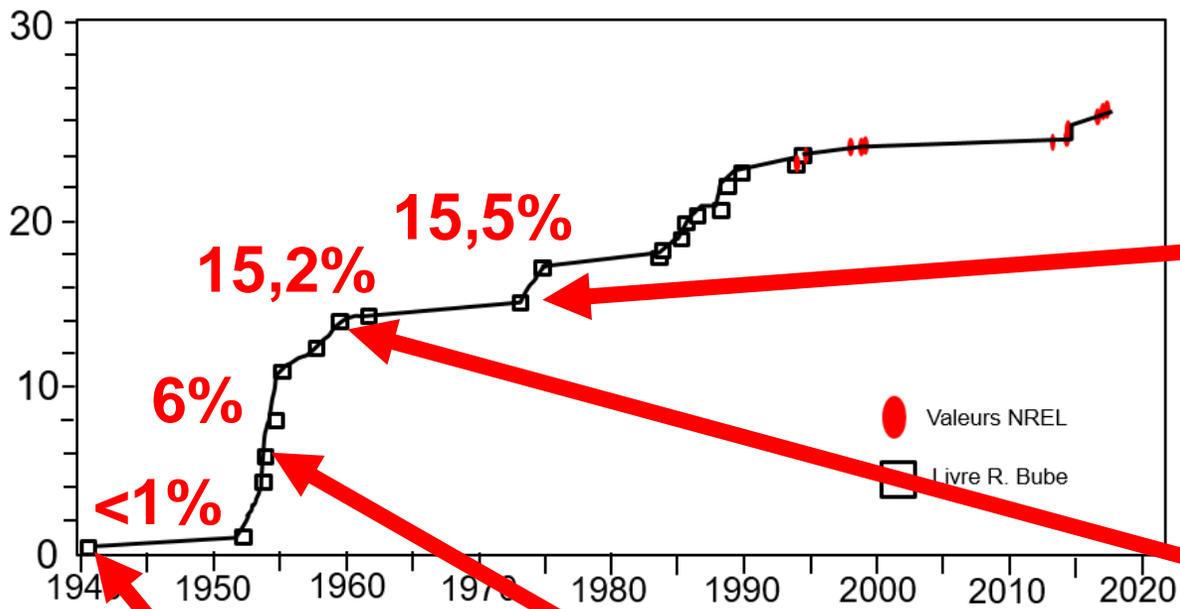
Conditions standard  $1000 \text{ W/m}^2$

Rendement de 10% veut dire  $P_m = 100 \text{ W/m}^2$

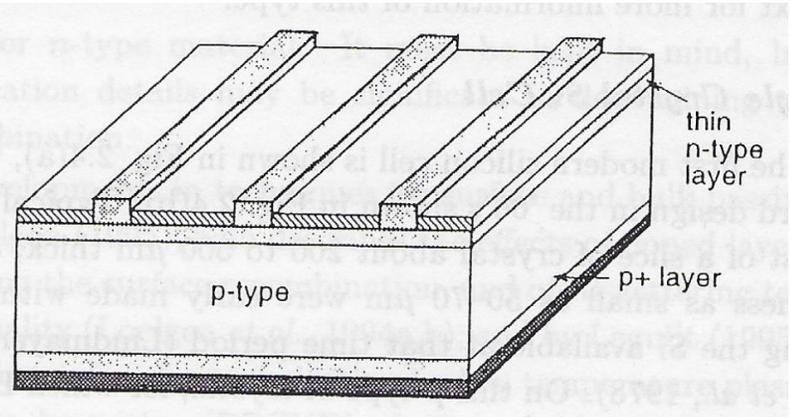
# La longue marche des cellules silicium

Rendement de conversion en %

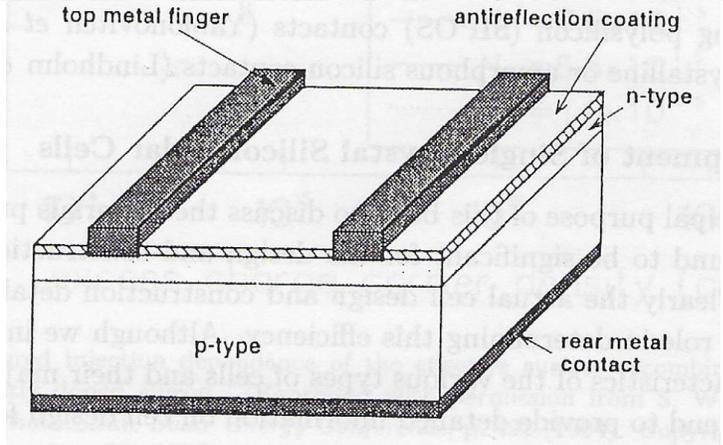




1973

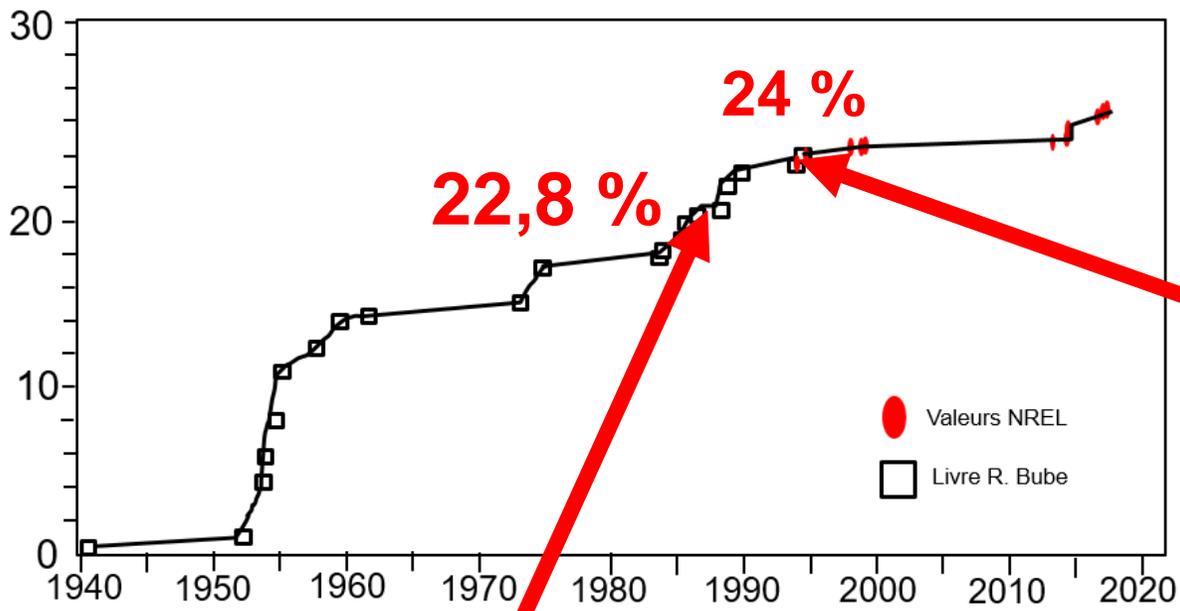


1962



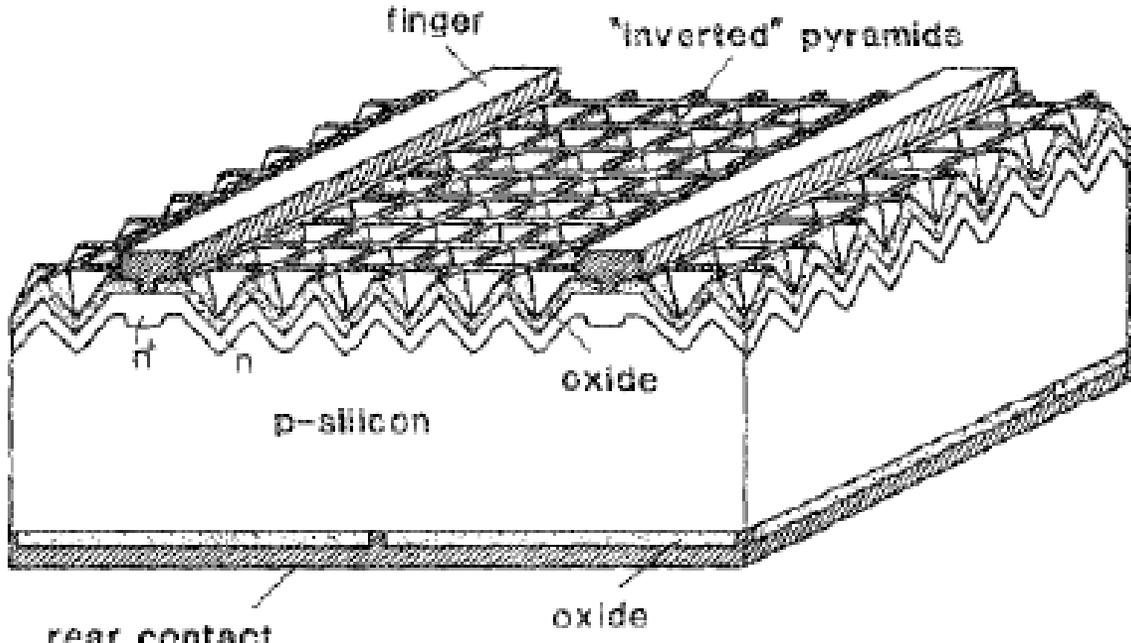
1958



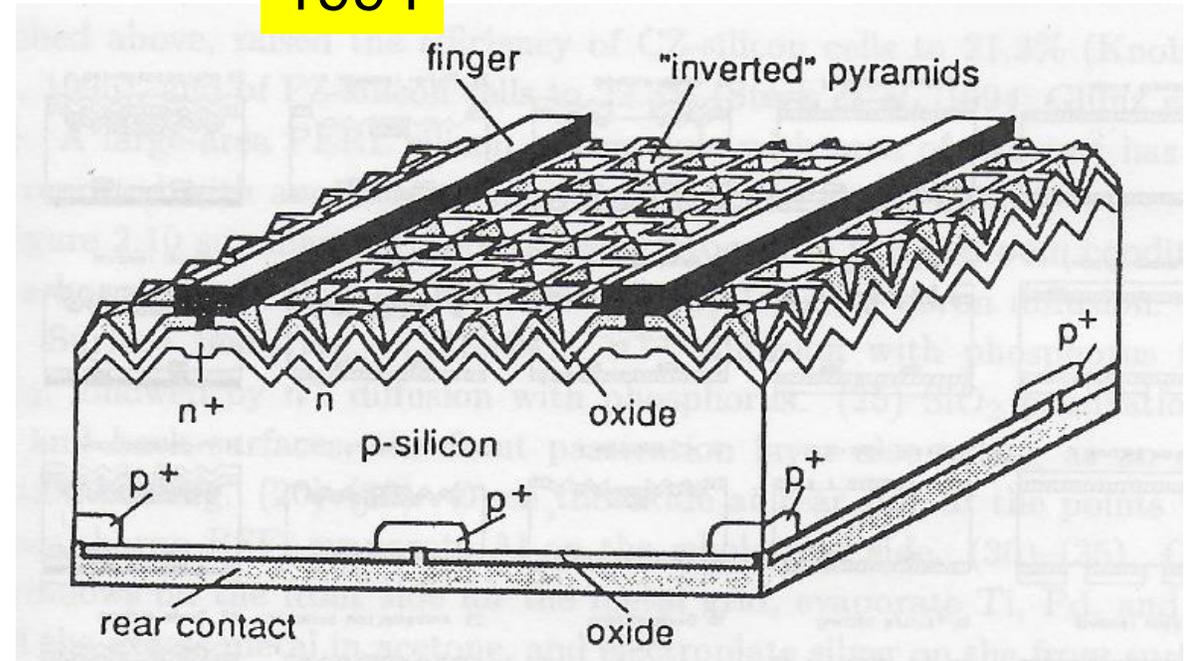


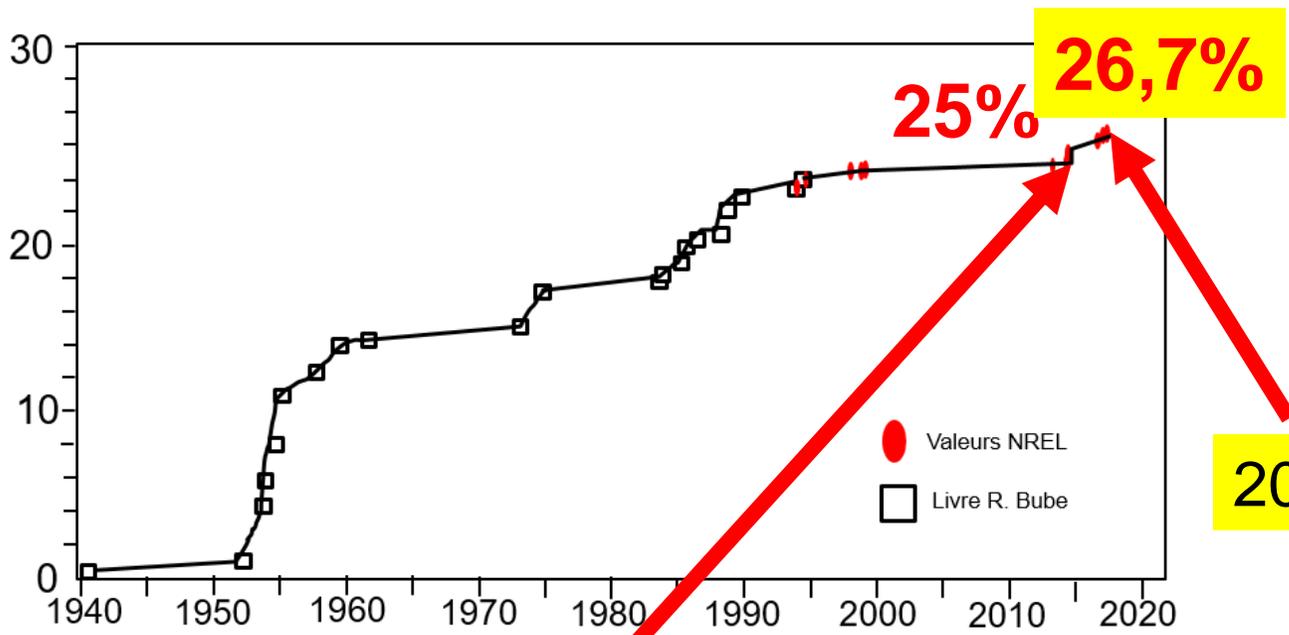
**Introduction de l'architecture à émetteur passivé et contact Arrière Localement diffusé (PERL)**

**1989**



**1994**



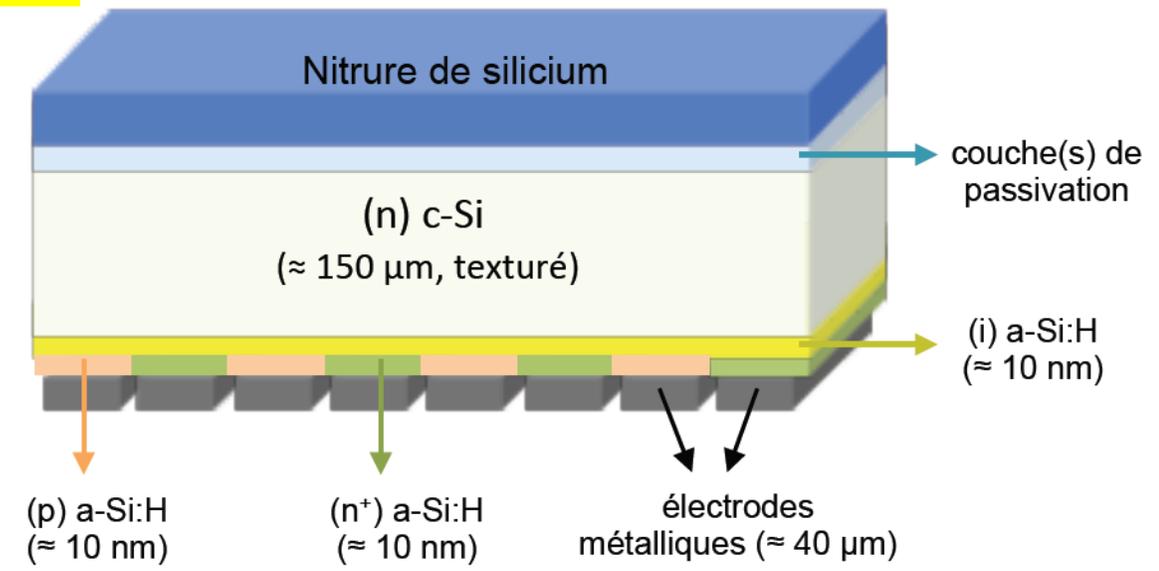
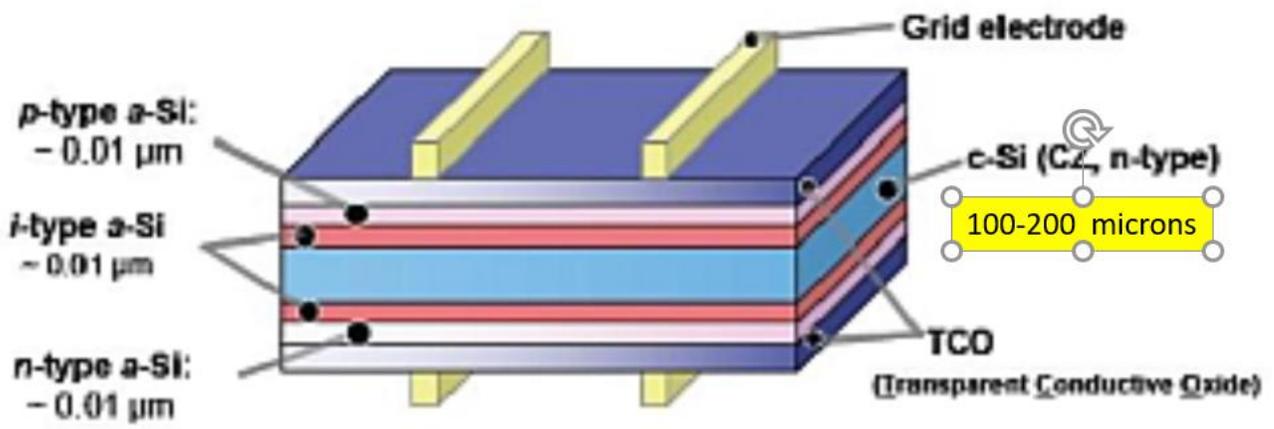


2014

2017

# 2014

## Rupture technologique majeure les cellules à hétérojonction (HIT)

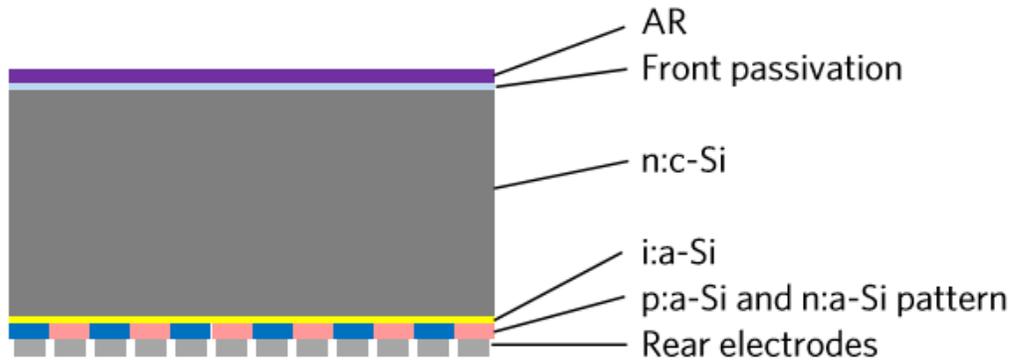


**Record mondial HIT avec contacts arrières interdigités (HIT-IBC)**

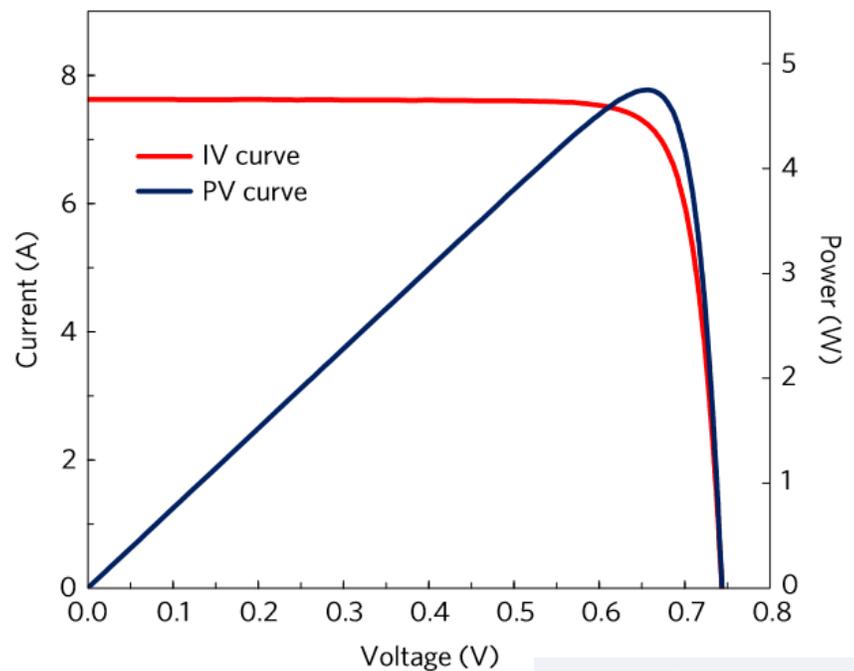
# 26.7% la cellule championne du monde

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

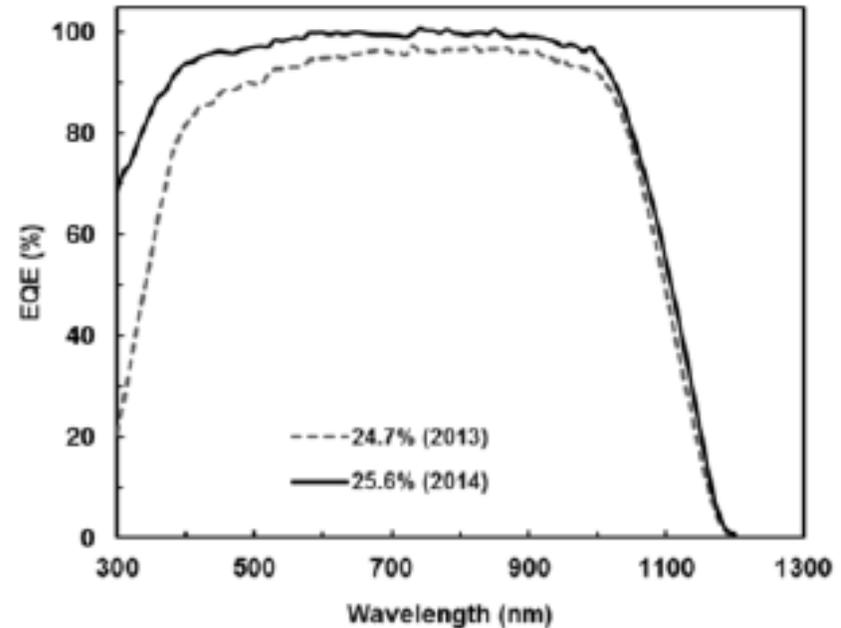
Kunta Yoshikawa\*, Hayato Kawasaki, Wataru Yoshida, Toru Irie, Katsunori Konishi, Kunihiro Nakano, Toshihiko Uto, Daisuke Adachi, Masanori Kanematsu, Hisashi Uzu and Kenji Yamamoto



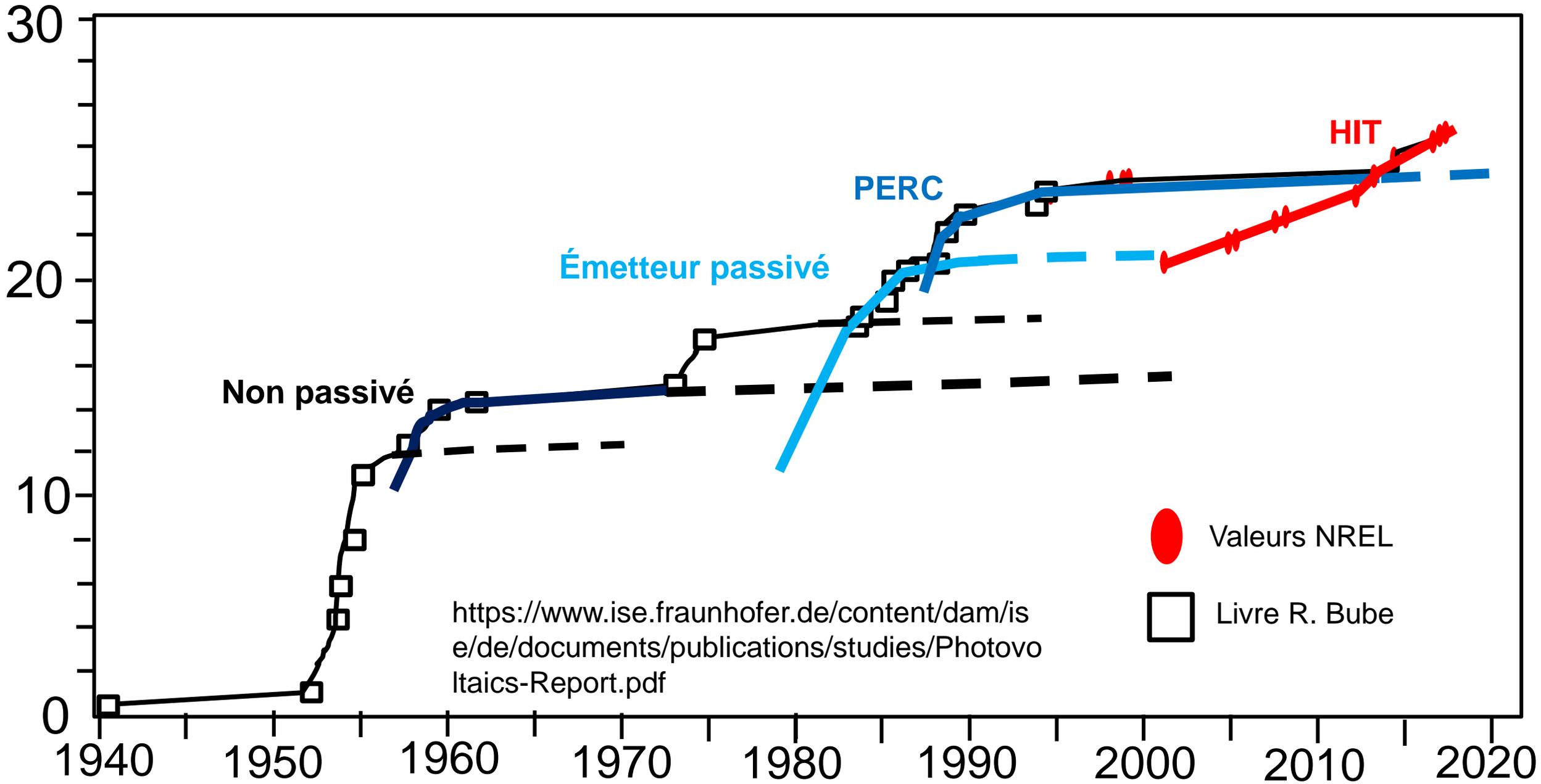
Caractéristique courant tension



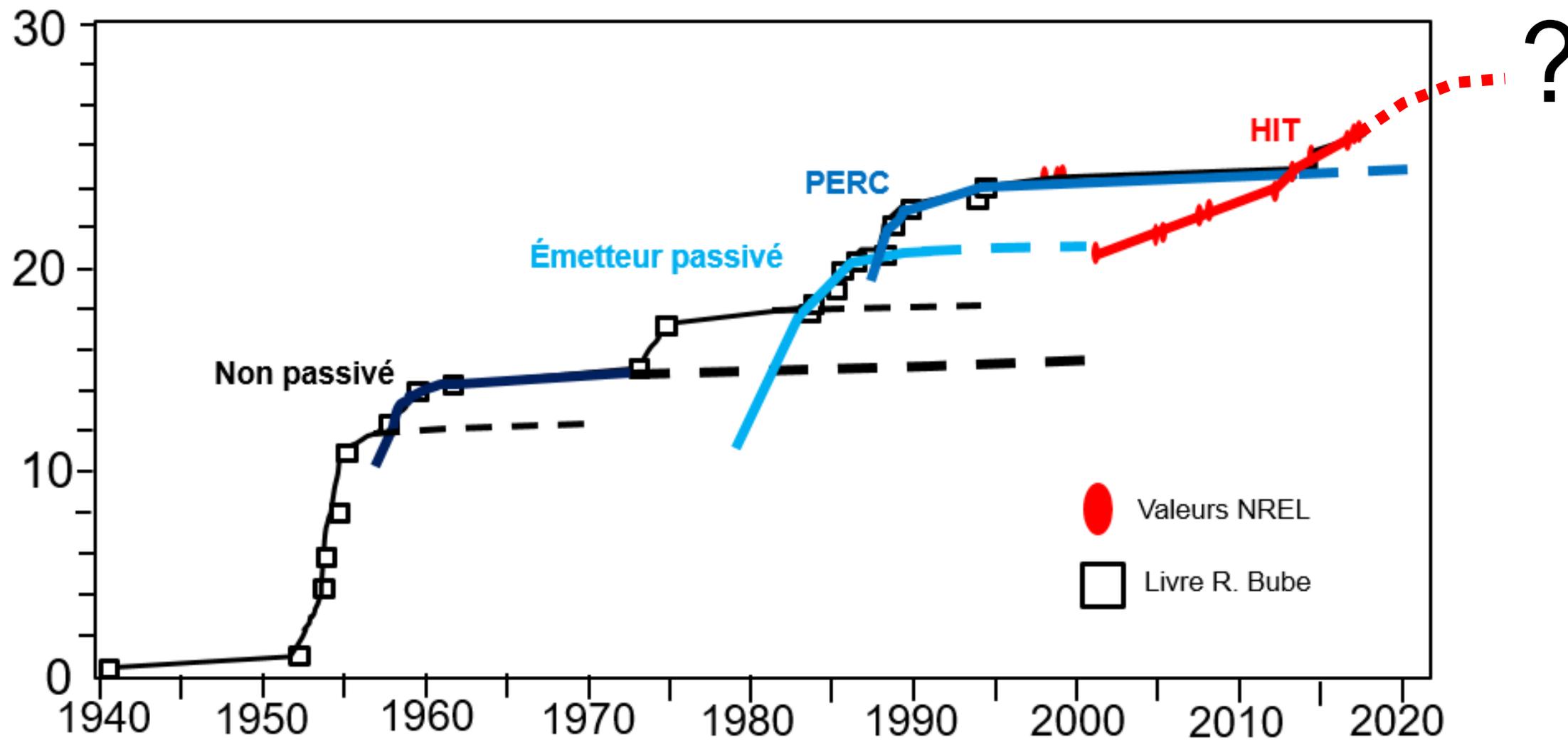
Réponse spectrale



$V_{OC}$ (V)	$J_{SC}$ ( $mA\ cm^{-2}$ )	FF%	Eff%	Area ( $cm^2$ )	$W$ ( $\mu m$ )
0.744	42.3	83.8	$26.3 \pm 0.5$	180.4 (da)	165

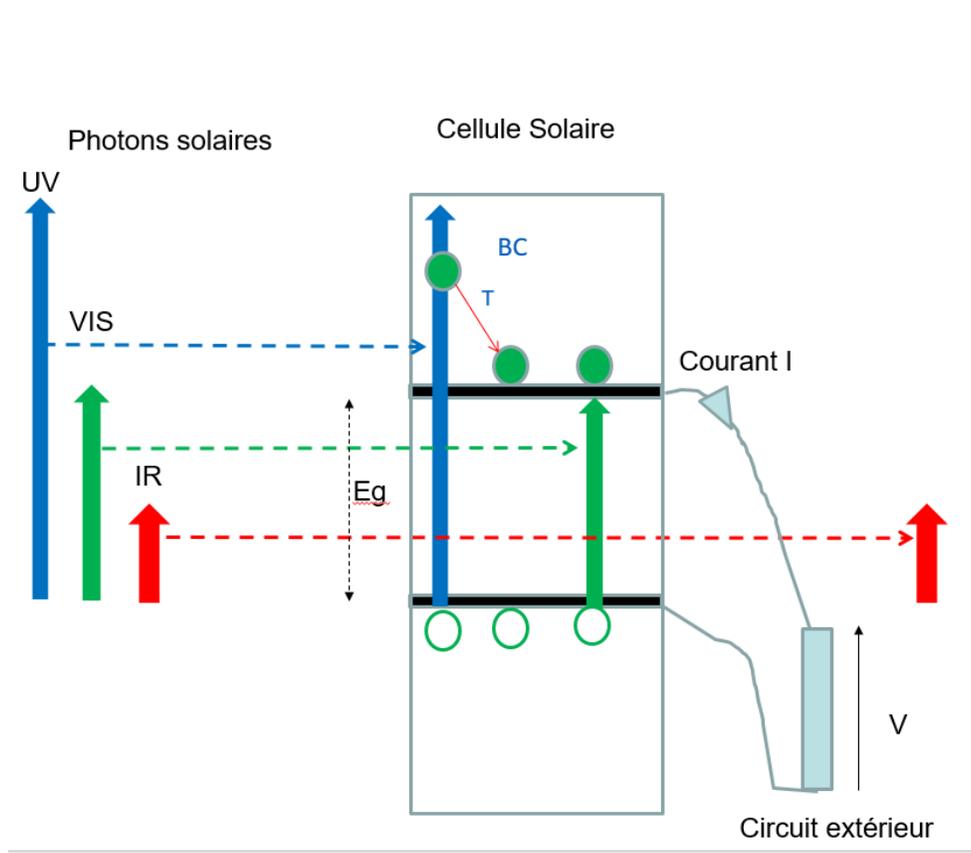


# Quand atteindra t'on le rendement limite absolu ?

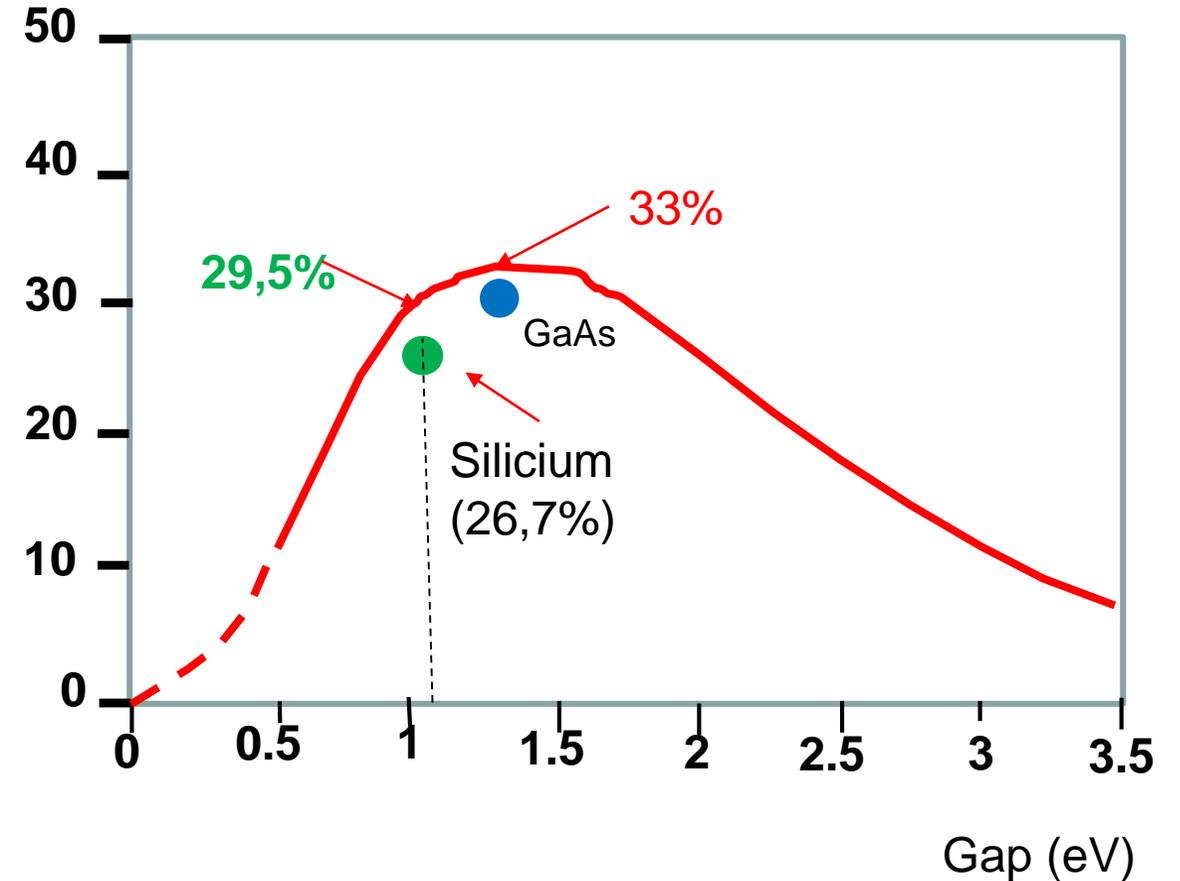


1961, W. Shockley et Queisser → Rendement théorique d'une cellule solaire simple (monojonction)

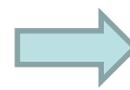
2011 L.C. Hirst et al. – Progress in Photovoltaics – 2011; 19:286-293 → JF Guillemoles et al. Nature Photonics | VOL 13 | AUGUST 2019 | 501–508 |



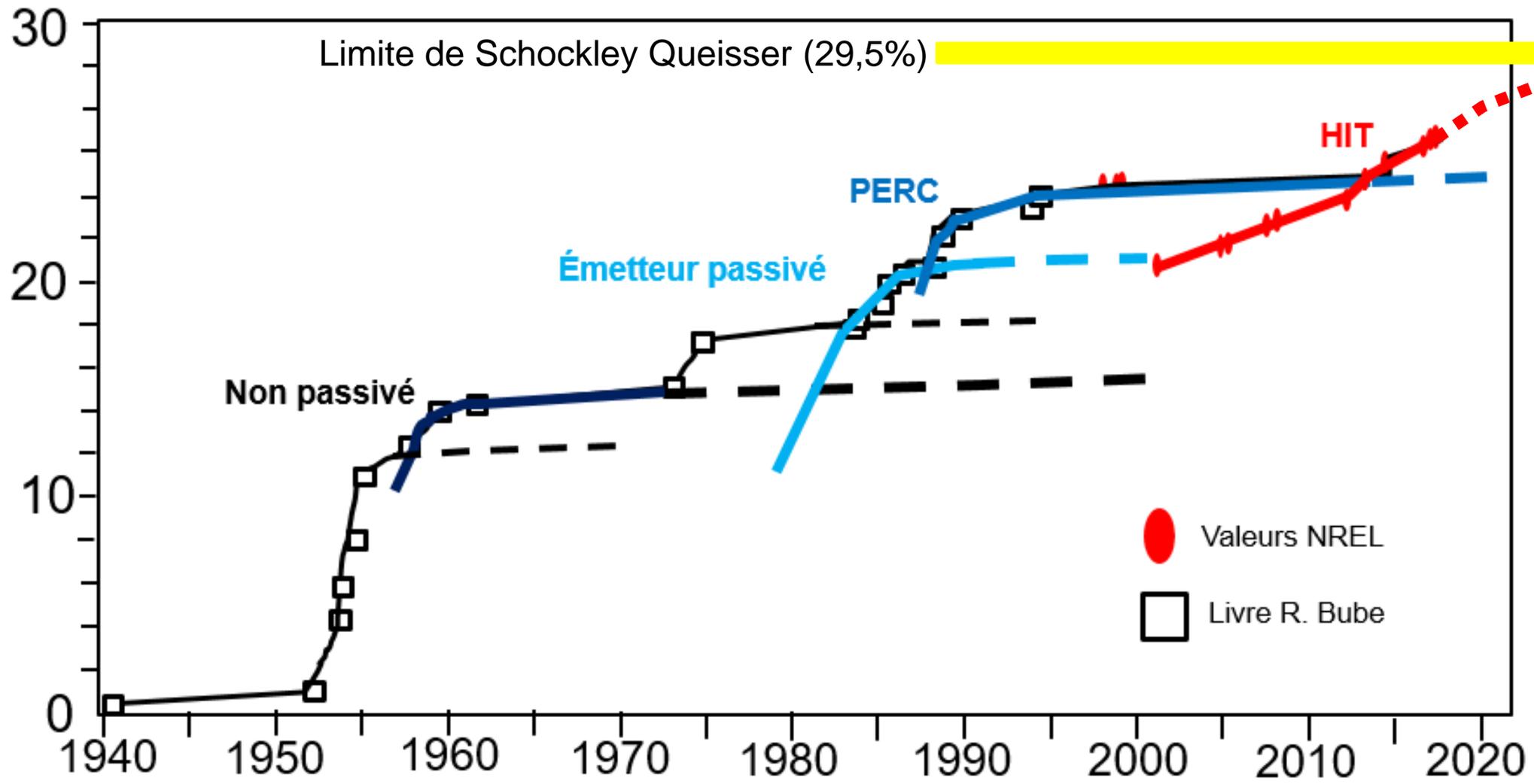
Rendement (%)



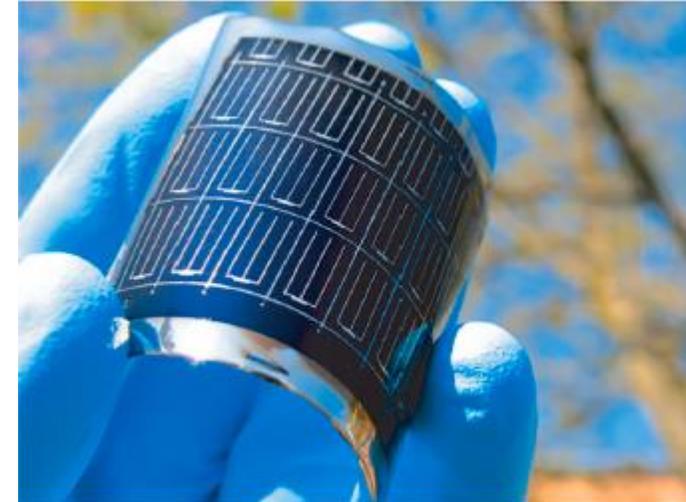
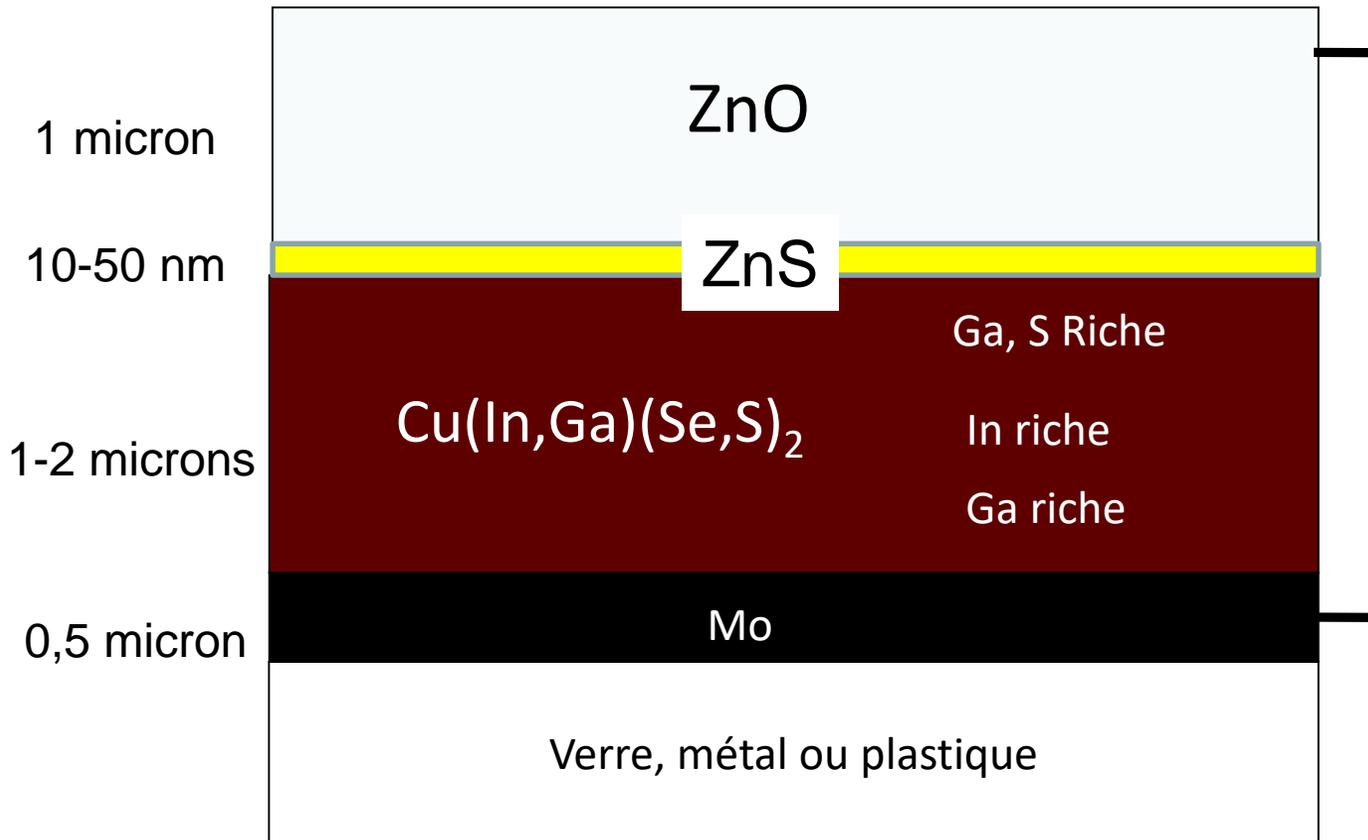
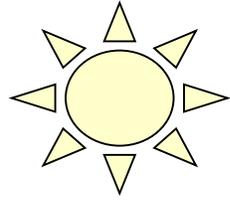
Le photocourant diminue avec le Gap  
La phototension augmente avec le gap



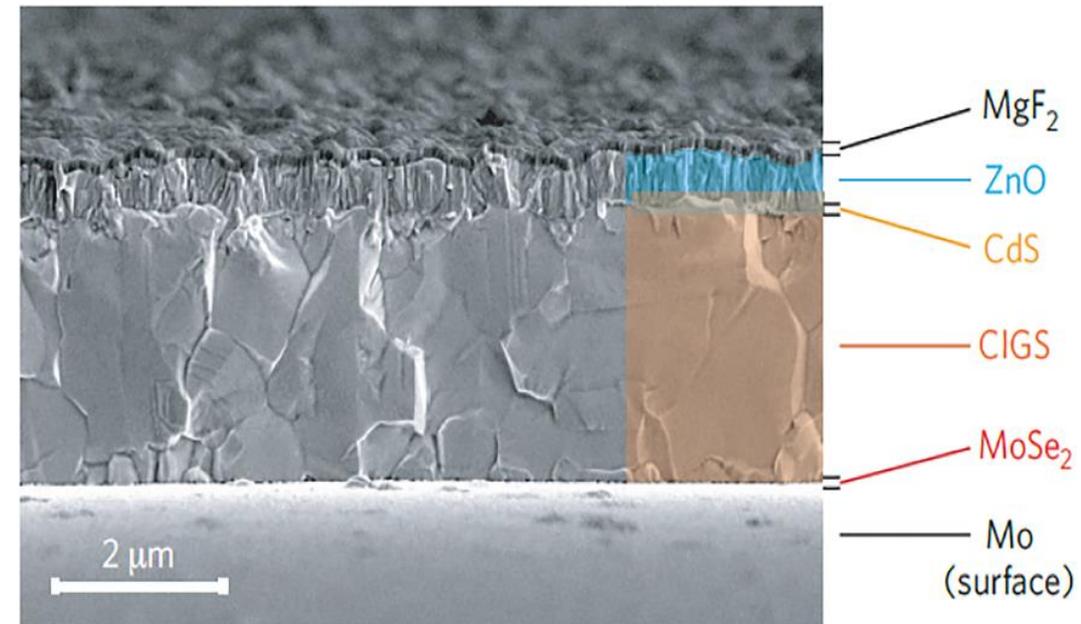
Puissance présente un maximum



Filière couches minces : GaAs (1951),  $\text{Cu}_2\text{S}$  (1954) CdTe(1963), aSi (1976), **CIGS (1976)**



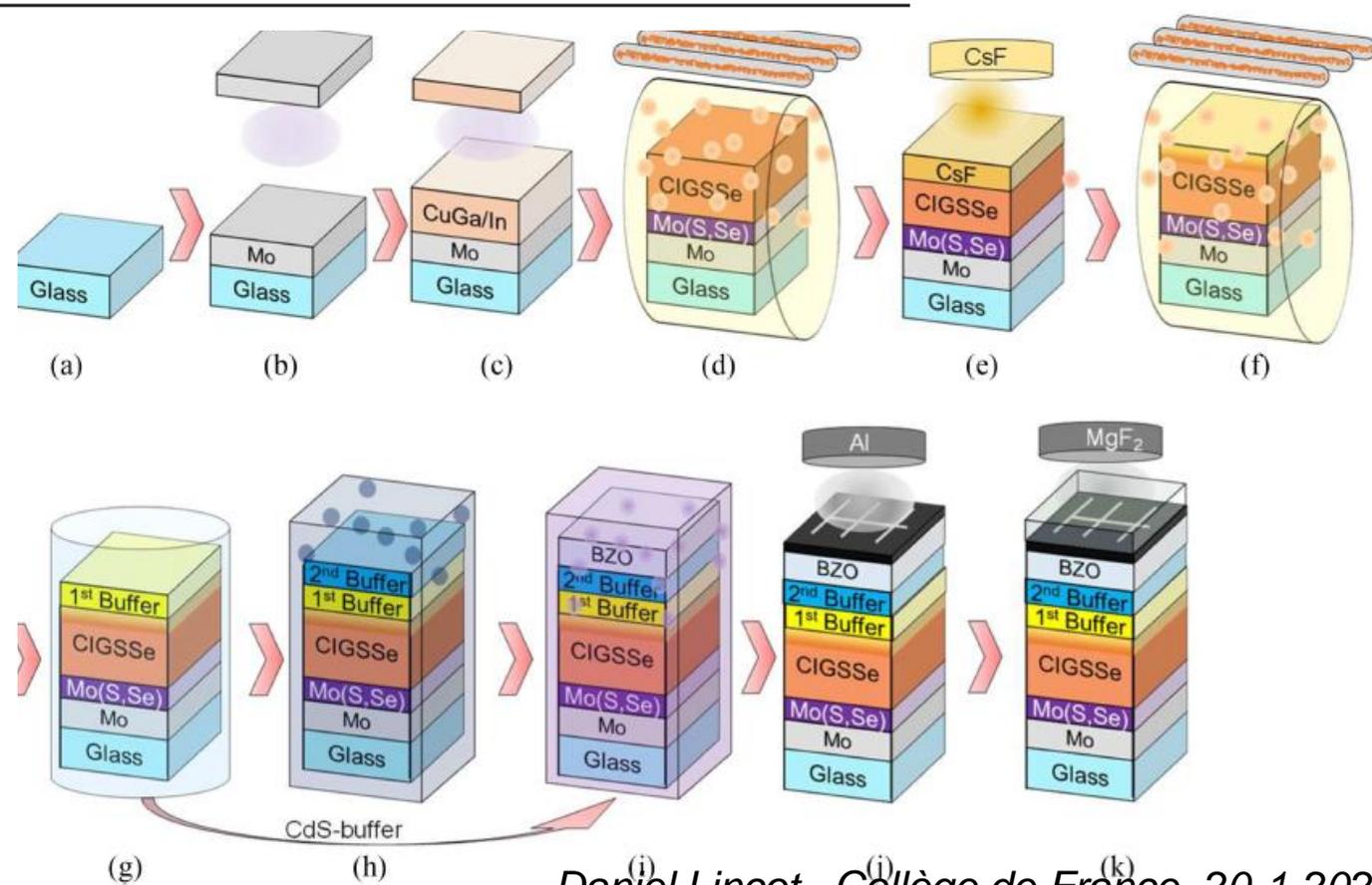
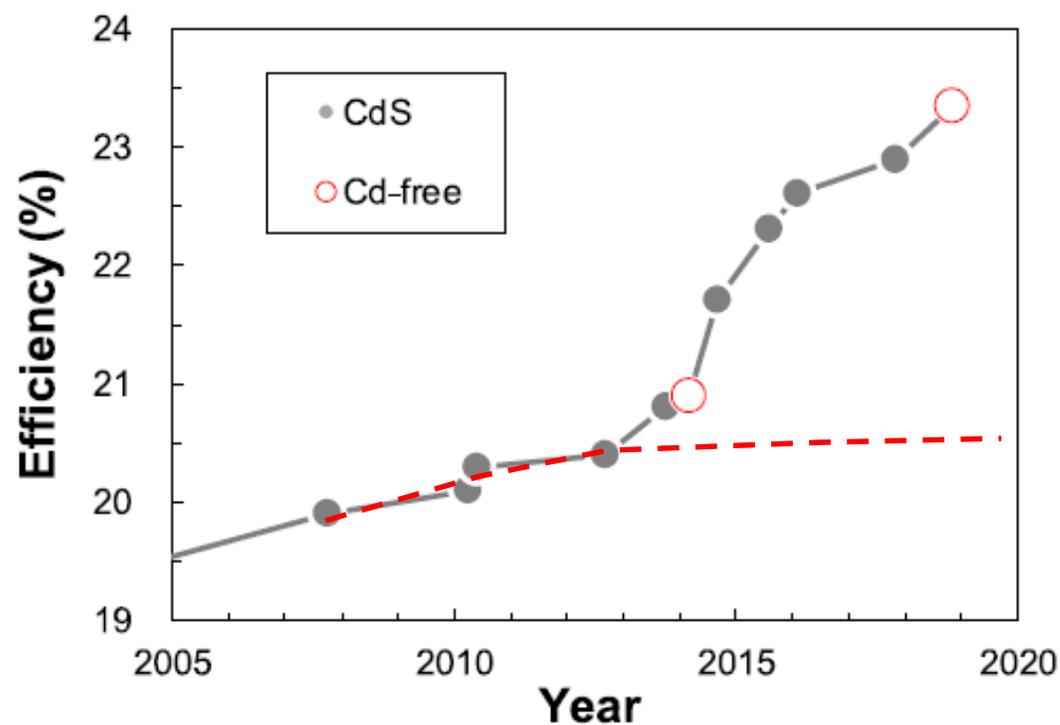
Source : EMPA



# Cd-Free $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%

Motoshi Nakamura <sup>1</sup>, Koji Yamaguchi, Yoshinori Kimoto, Yusuke Yasaki, Takuya Kato <sup>2</sup>, and Hiroki Sugimoto <sup>3</sup>

Year	Buffer	Efficiency (%)	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$E_g$ (eV)	$V_{oc,def}$ (mV)	Test Center
2017	CdS	22.92	746	38.5	79.7	1.13	384	AIST
2019	$\text{Zn}(\text{O,S,OH})_x/\text{Zn}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}$	23.35	734	39.6	80.4	1.08	350	AIST

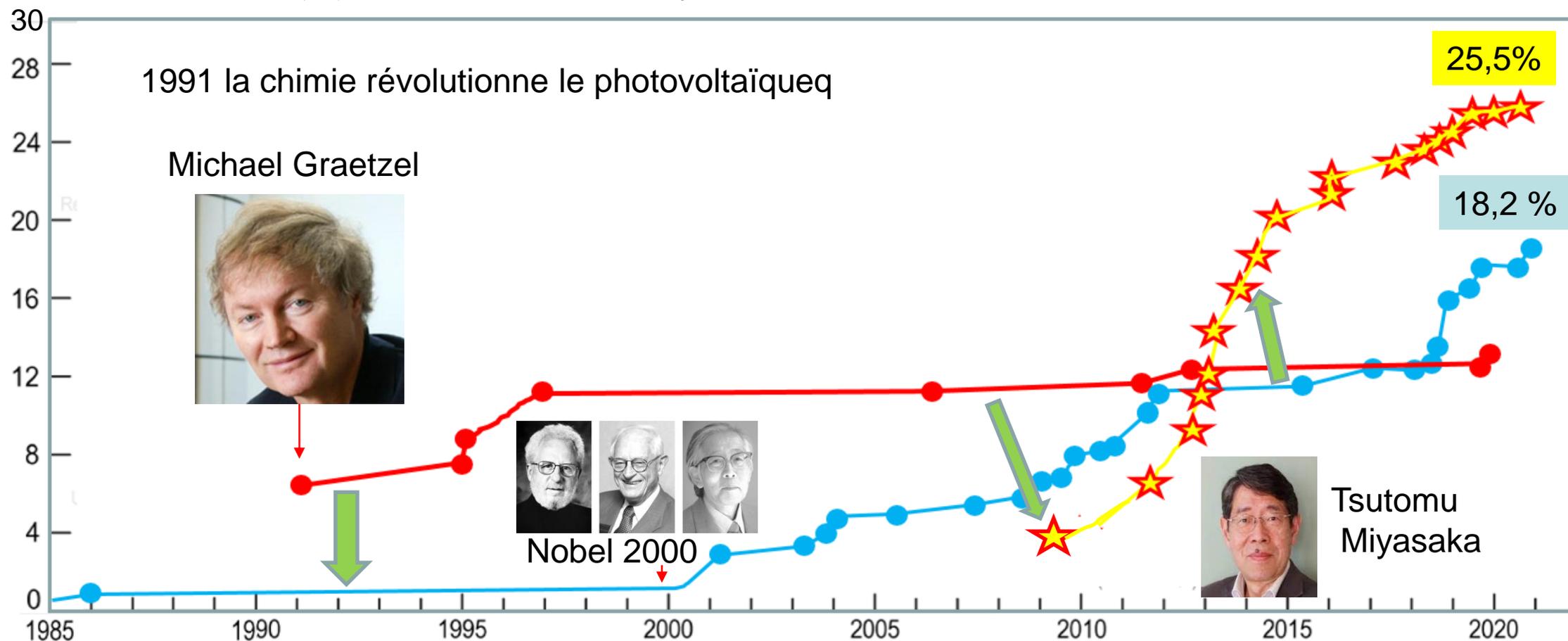


Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022

# 1991 – La chimie révolutionne le photovoltaïque

Filières photovoltaïques émergentes couches minces organiques :

- Cellules hybrides à colorants (M. Graetzel) : 1991
- Cellules organiques : 2001 (OPV)
- ★ Cellules Perovskites hybrides : 2009

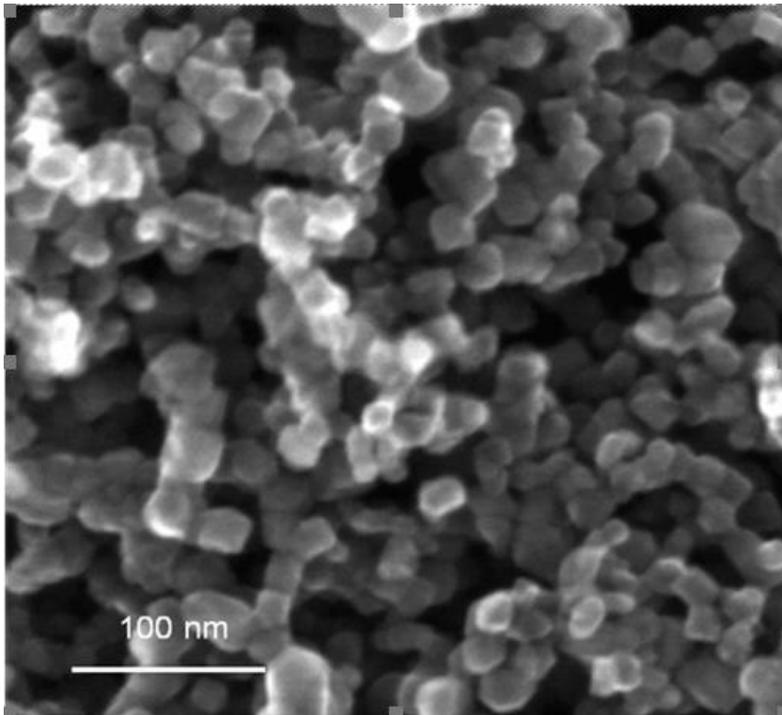


➔ Phénomènes de fertilisation croisée (concepts, matériaux, procédés)

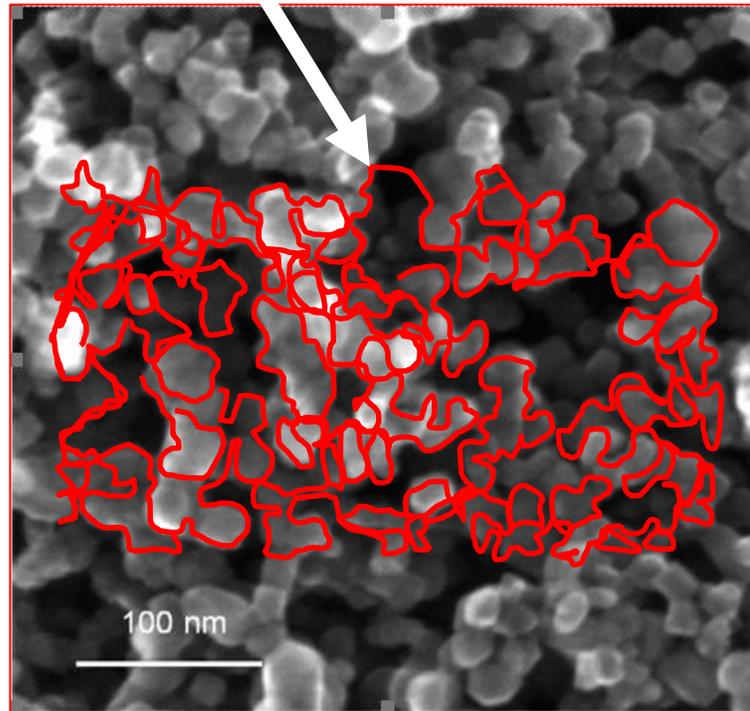
# Les cellules à colorants : l'irruption des concepts de la photosynthèse dans le photovoltaïque

- Photovoltaïque moléculaire
- Découverte du concept de réseaux interpénétrés

Matrice poreuse de  $\text{TiO}_2$

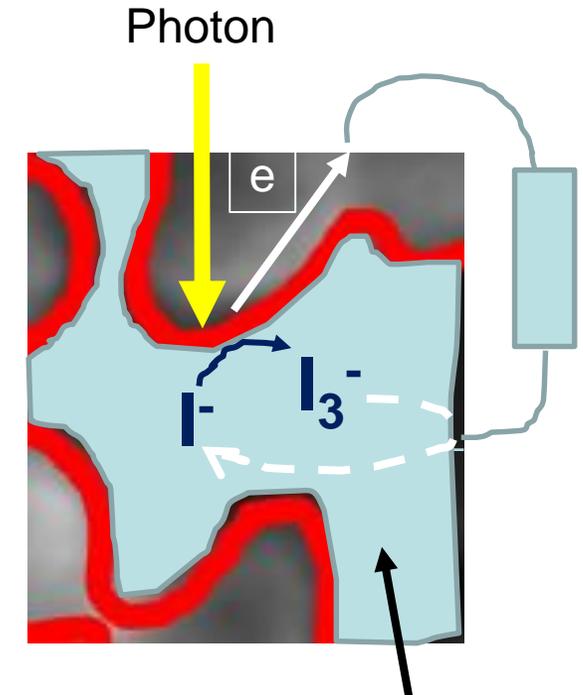


Adsorption d'un colorant

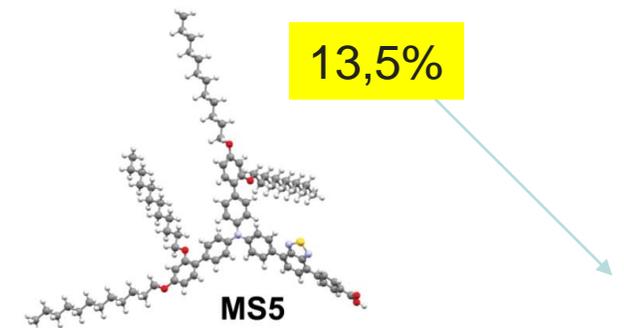


Multiplication de la surface développée

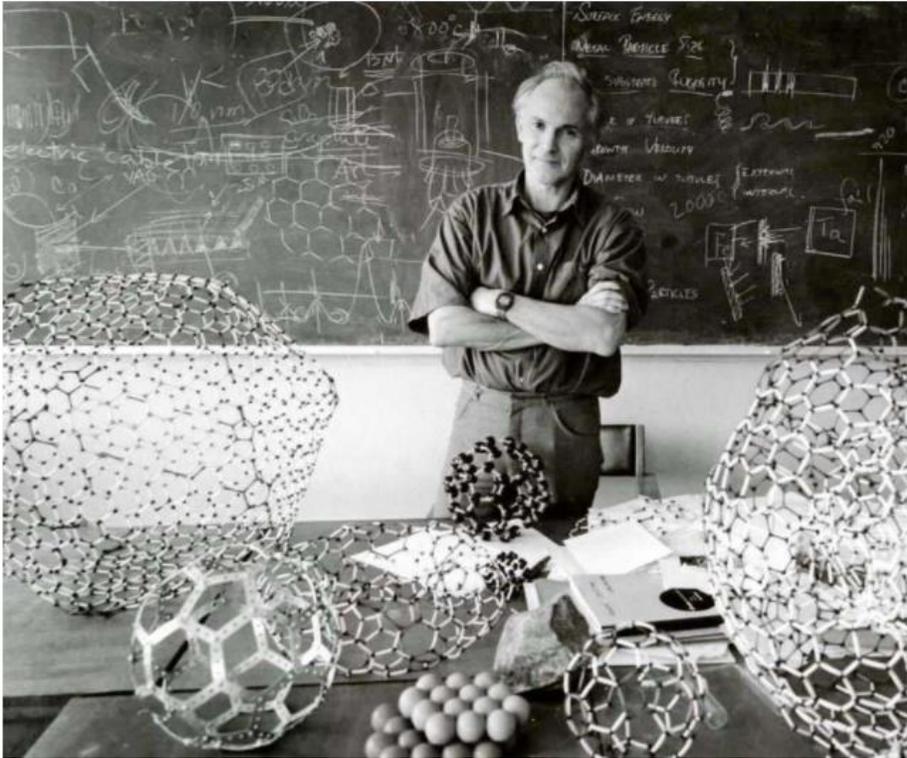
$1 \text{ cm}^2 \rightarrow 1000 \text{ cm}^2$



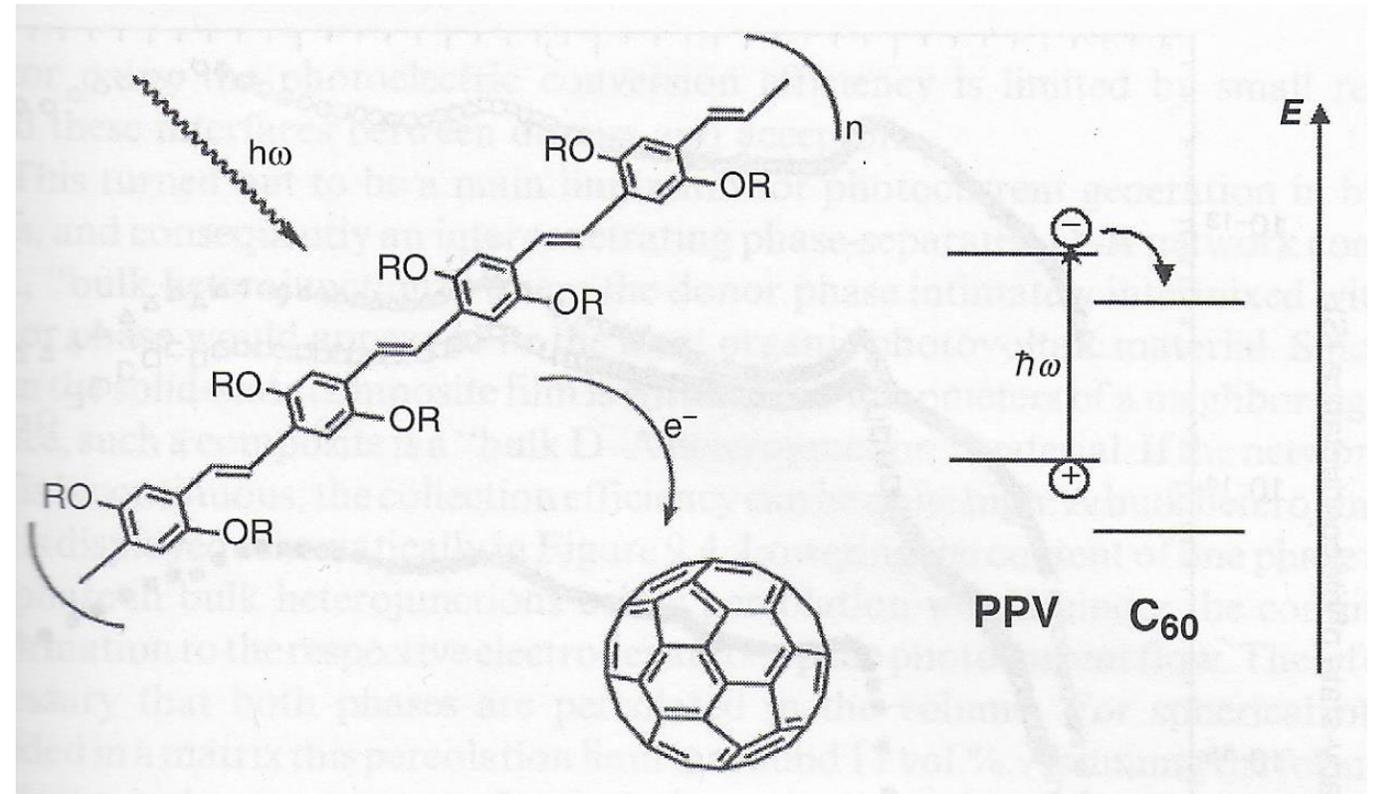
Injection d'un électrolyte iodure



## Il ouvre la voie au photovoltaïque organique « interpénétré » (OPV) ... et à la chimie organique dans le photovoltaïque (polymères, molécules...)



H. Kroto, R. Curl, R. Smalley, prix Nobel 1996  
Découverte 1985  
Source: futura sciences 2016



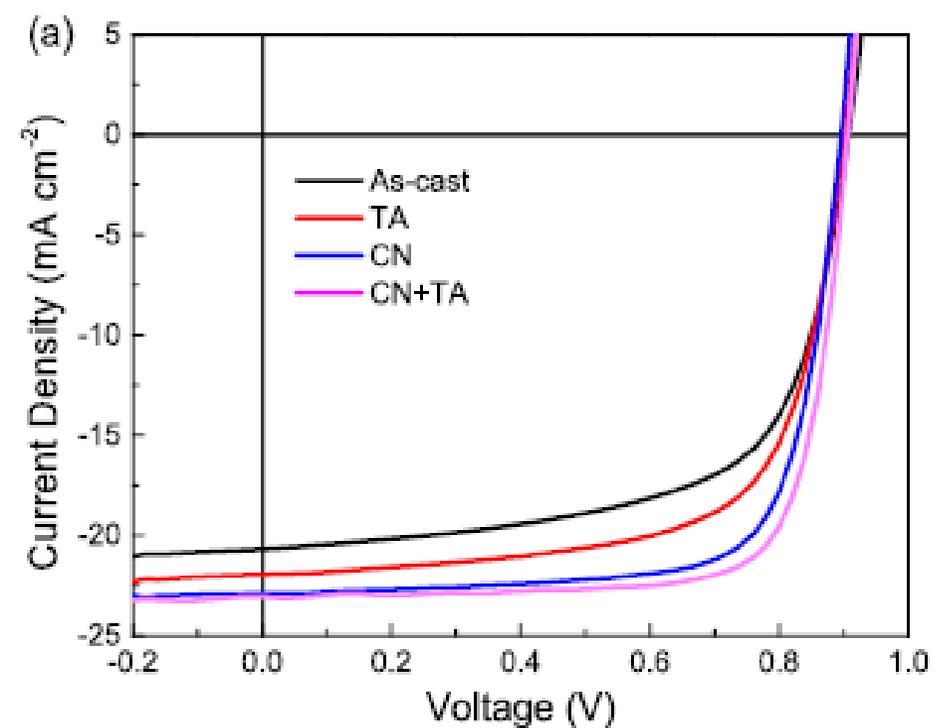
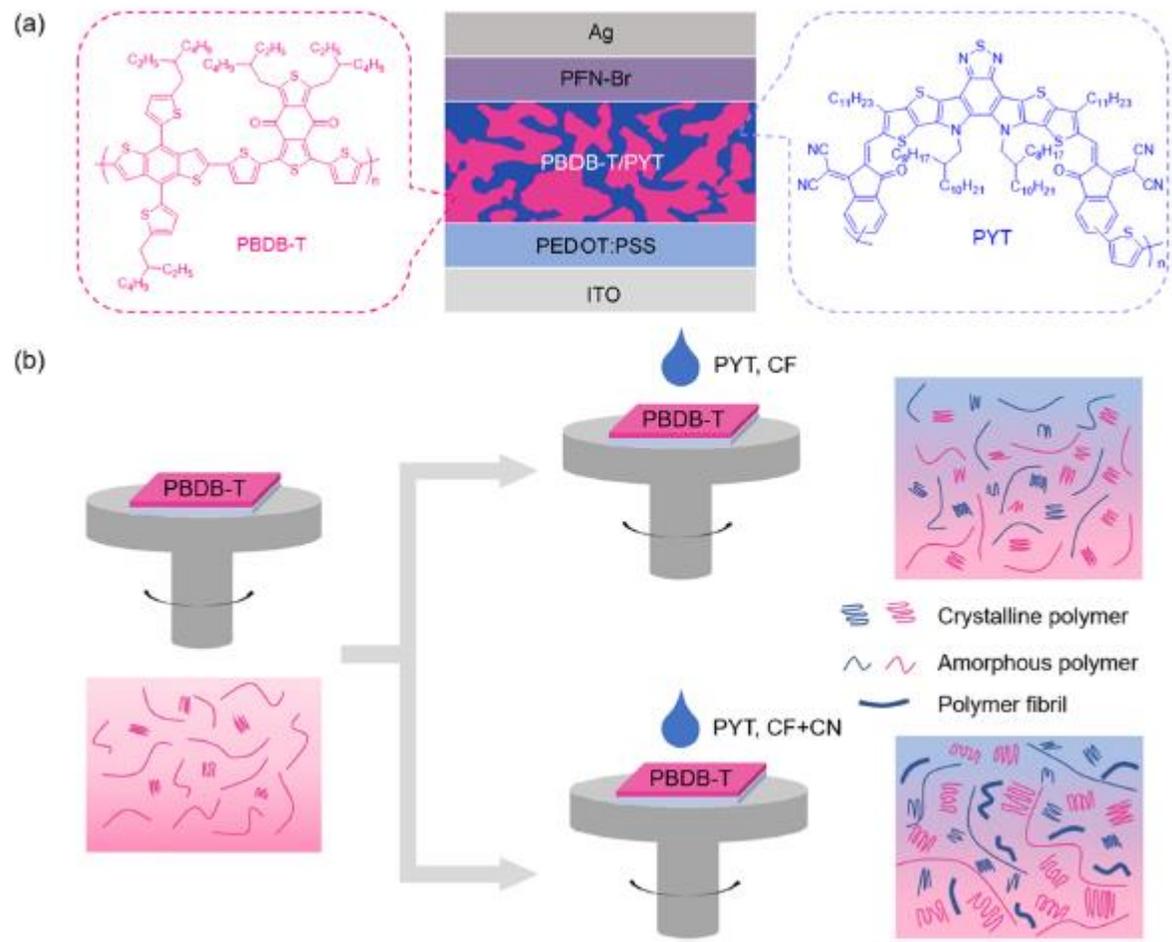
H. Hoppe, N. S. Saricifti, Bulk heterojunction solar cells,  
Organic photovoltaics, S.S. Sun and N.S. Saricifti,  
CRC Press, 2005

Rendement record 18,2%

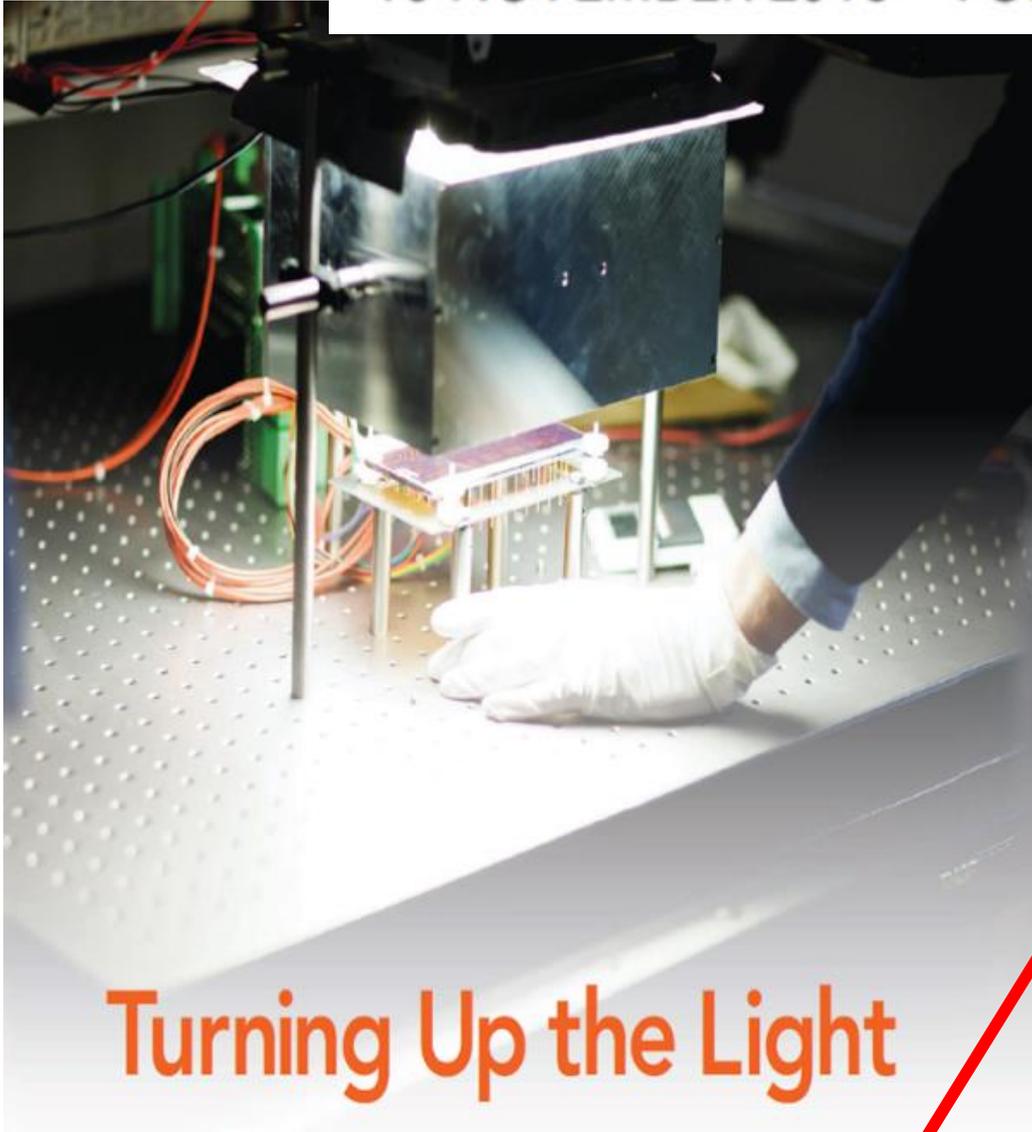
# Layer-by-layer processed binary all-polymer solar cells with efficiency over 16% enabled by finely optimized morphology

Yue Zhang<sup>a,1</sup>, Baoqi Wu<sup>a,1</sup>, Yakun He<sup>b</sup>, Wanyuan Deng<sup>a</sup>, Jingwen Li<sup>a</sup>, Junyu Li<sup>c</sup>, Nan Qiao<sup>d</sup>, Yifan Xing<sup>d</sup>, Xiyue Yuan<sup>a</sup>, Ning Li<sup>b</sup>, Christoph J. Brabec<sup>b</sup>, Hongbin Wu<sup>a</sup>, Guanghao Lu<sup>d</sup>, Chunhui Duan<sup>a,e,f,\*</sup>, Fei Huang<sup>a</sup>, Yong Cao<sup>a</sup>

Il n'y a plus de phase liquide !



15 NOVEMBER 2013 VOL 342 SCIENCE www.sciencemag.org



## Turning Up the Light

Photovoltaic materials called perovskites work wonders in the lab, but will they shine as commercial technology?

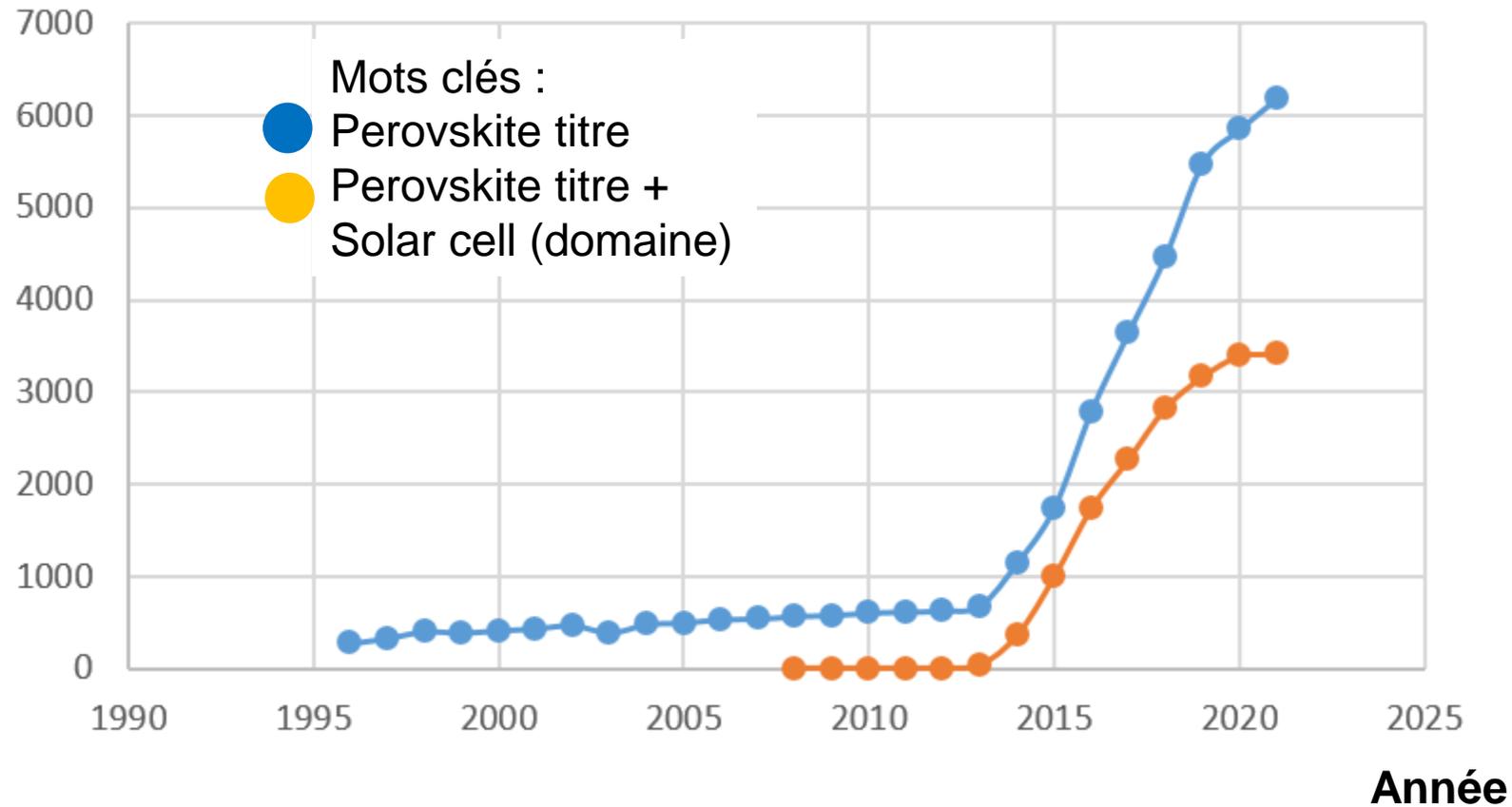
Photovoltaic materials called perovskites work wonders in the lab, but will they shine as commercial technology?

Hype or Hope ?  
Espoir ou illusion ?

# Etude Bibliométrique

Source : Web of Science /CNRS  
15 janvier 2022

## Nombre d'articles publiés par an





Tsutomu Miyasaka

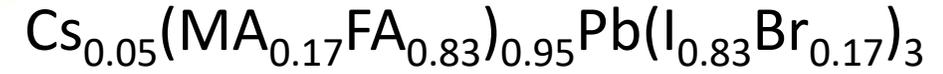
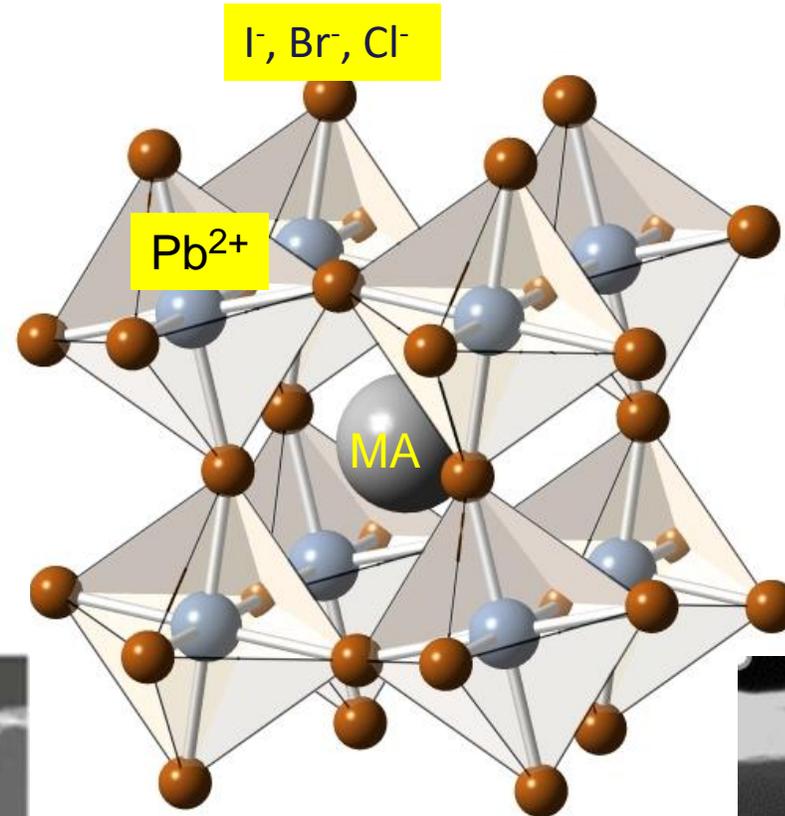
2021 : 25,2 %

2009 : 3,8 %



MA :  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$

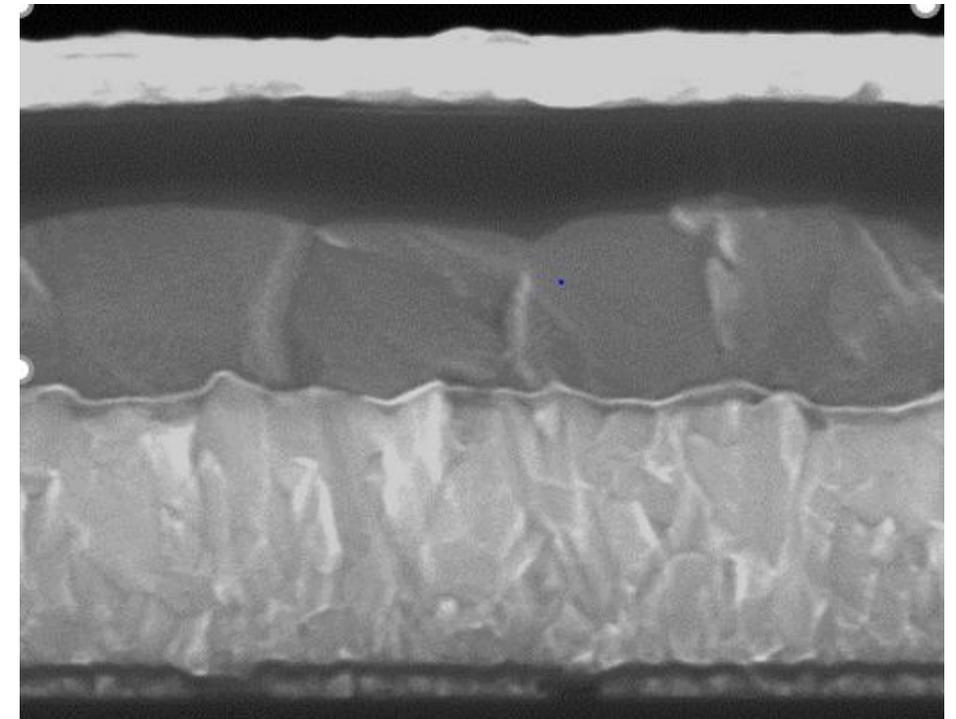
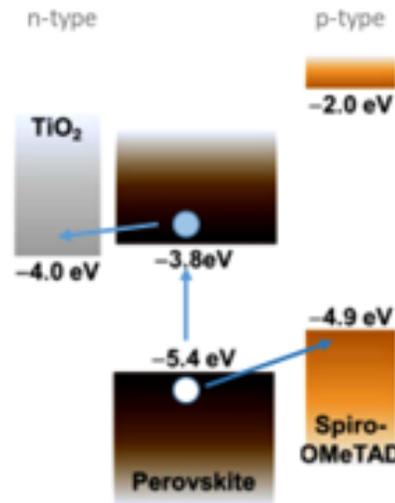
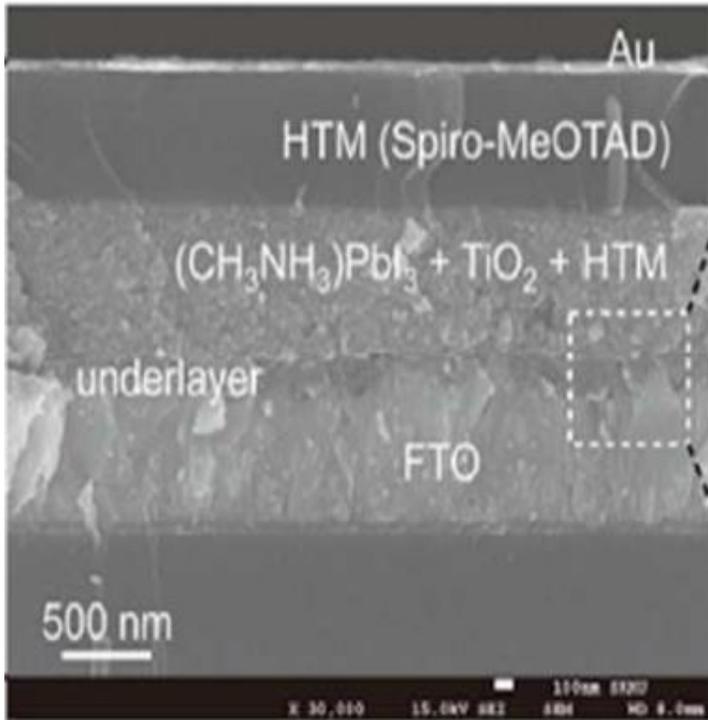
« MAPbI » :  $\text{MAPbI}_3$



MA → FA :  $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+ \rightarrow \text{Cs}^+, \text{Rb}^+$ ,

I → Br

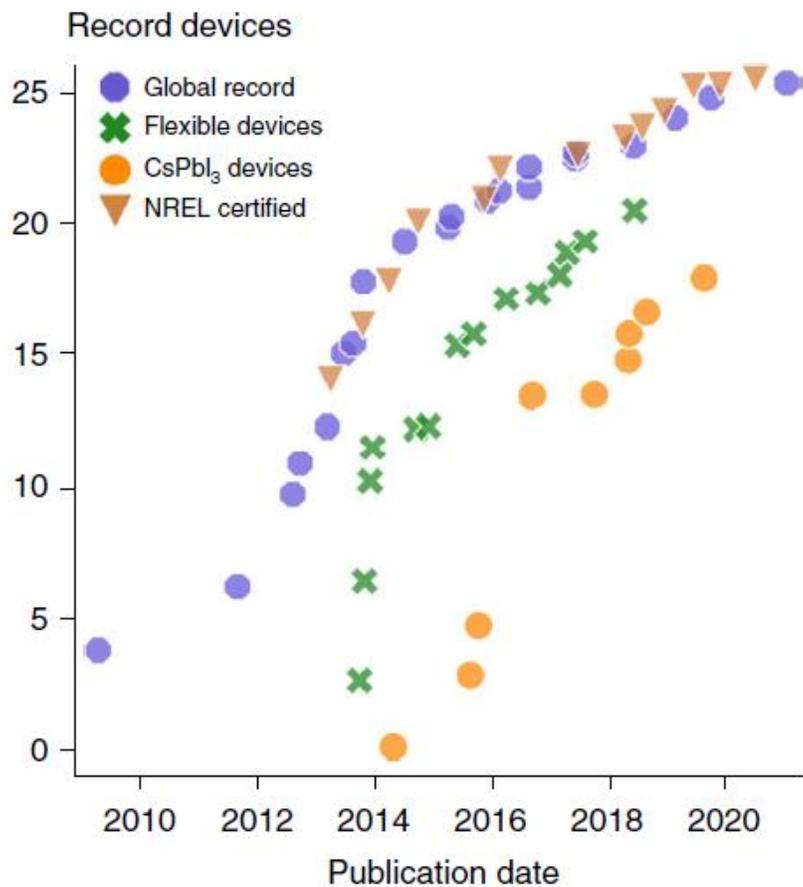
Pb → Sn





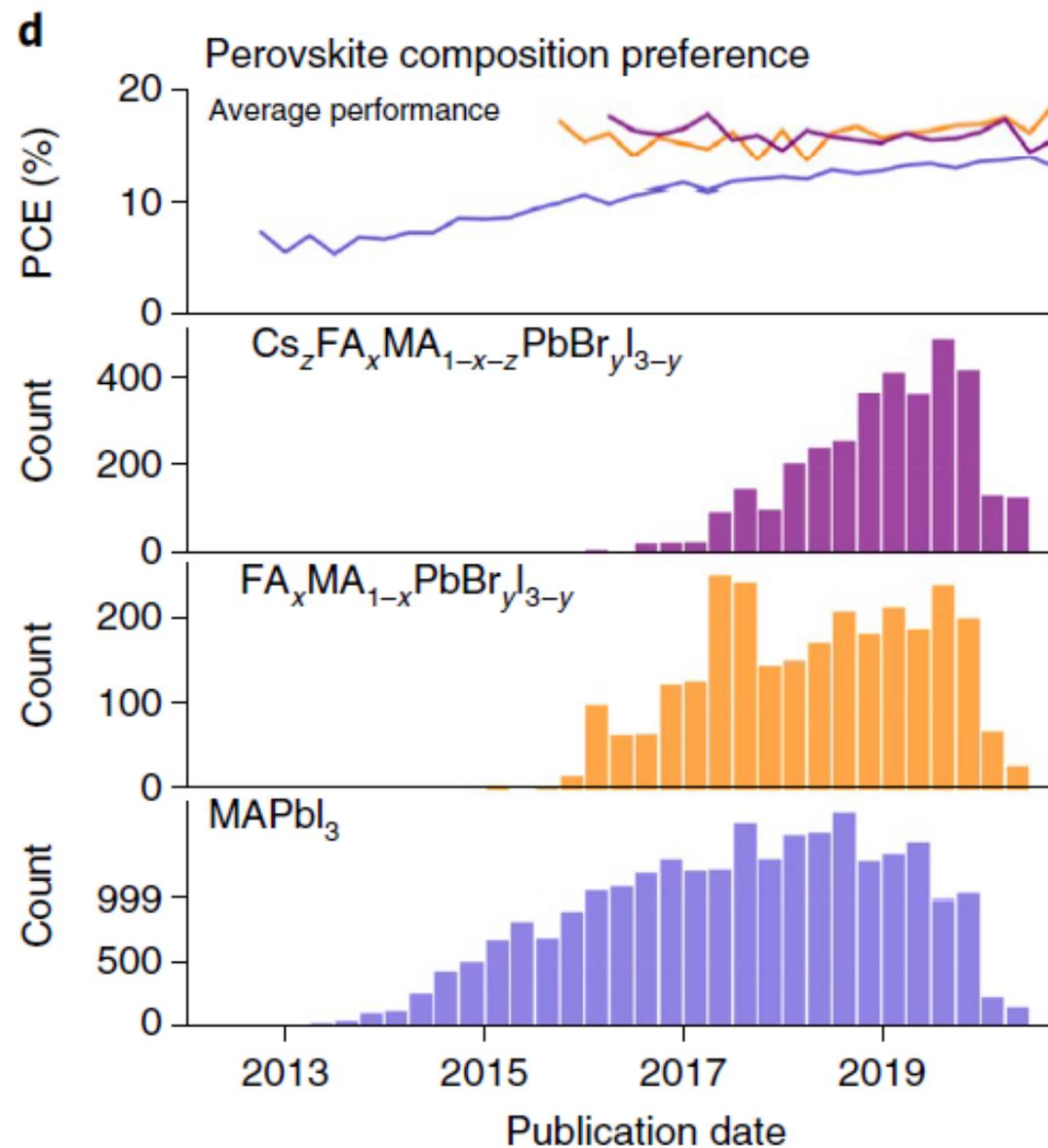
OPEN

An open-access database and analysis tool for perovskite solar cells based on the FAIR data principles



96 co-auteurs

Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022



Peut-on encore augmenter le rendement  
au-delà de la limite des 30%?

# Que nous dit la thermodynamique ?

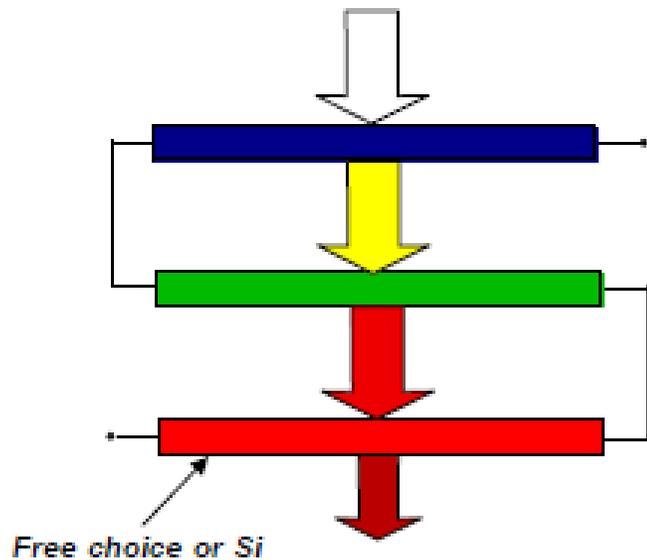
$$\begin{array}{l} \text{Rendement} \\ \text{de Carnot} \end{array} = 1 - \frac{\text{Température} \\ \text{source froide}}{\text{Température} \\ \text{source chaude}} \quad \begin{array}{l} \text{Cellule PV} \\ \\ \\ \text{Soleil} \end{array} = 1 - \frac{300}{6000} = 0,95 \rightarrow 95\%$$

Avec des modèles plus élaborés →

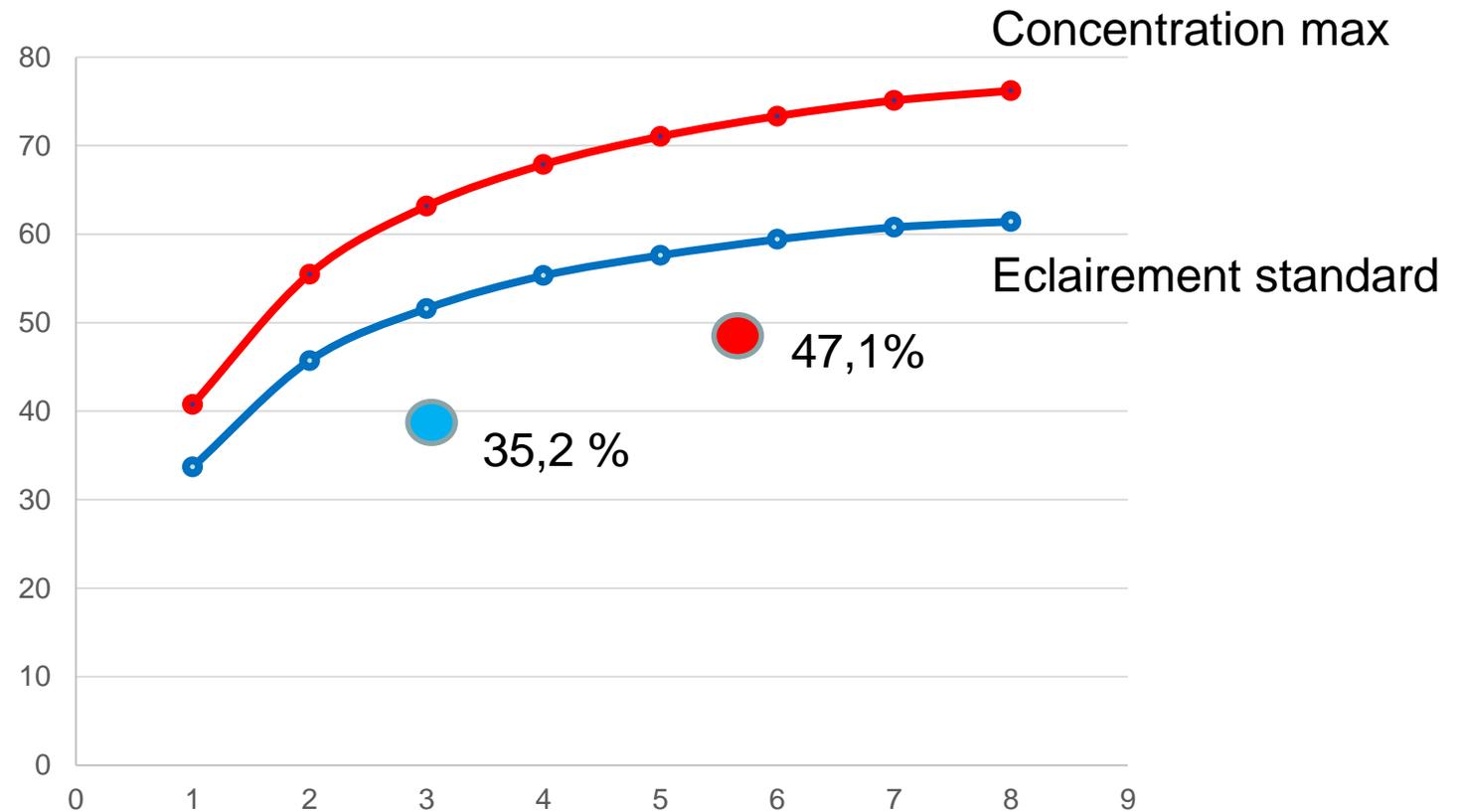
**85% sous concentration**

**67 % sous éclairement standard**

# Un concept est disponible : les multijonctions



nombre	rendement
1	33,7
2	45,7
3	51,6

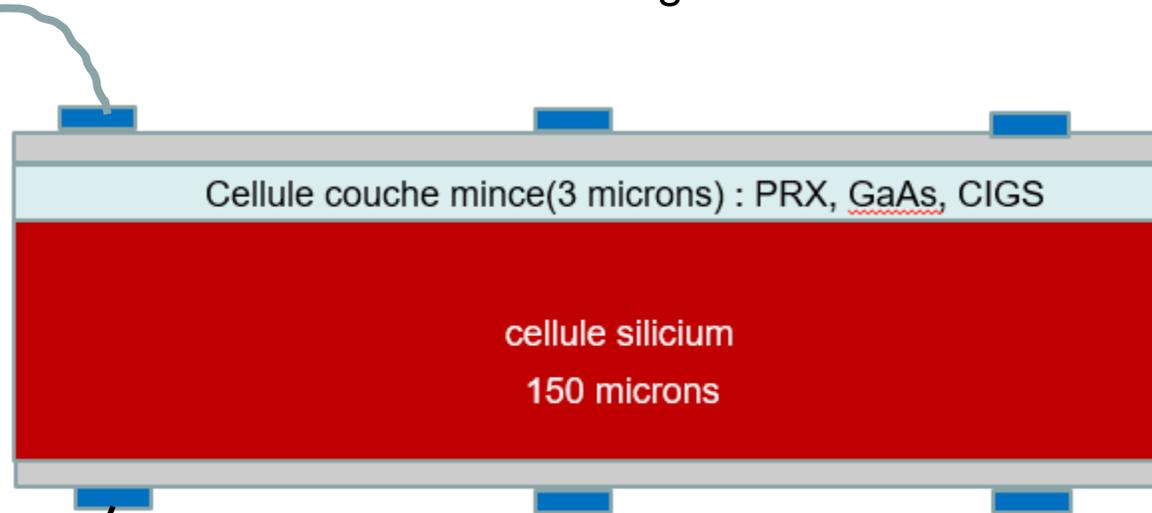


Rendements record actuels :  
47,1% 6 jonctions sous concentration  
35,2 % 3 jonctions en éclairage standard

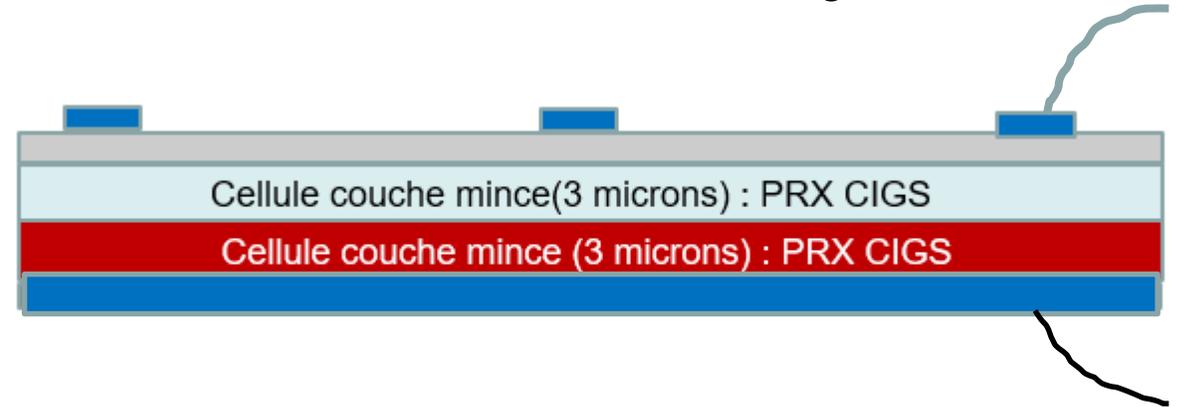
# Objectif 30x30x30 : 30% modules, 30 centimes le Watt en ...2030

## Le moyen : les cellules tandem

Cellules silicium « augmentée »



Cellules couches minces « augmentée »



Tandem CIGS-PRX : 24,2% (23,3 %)

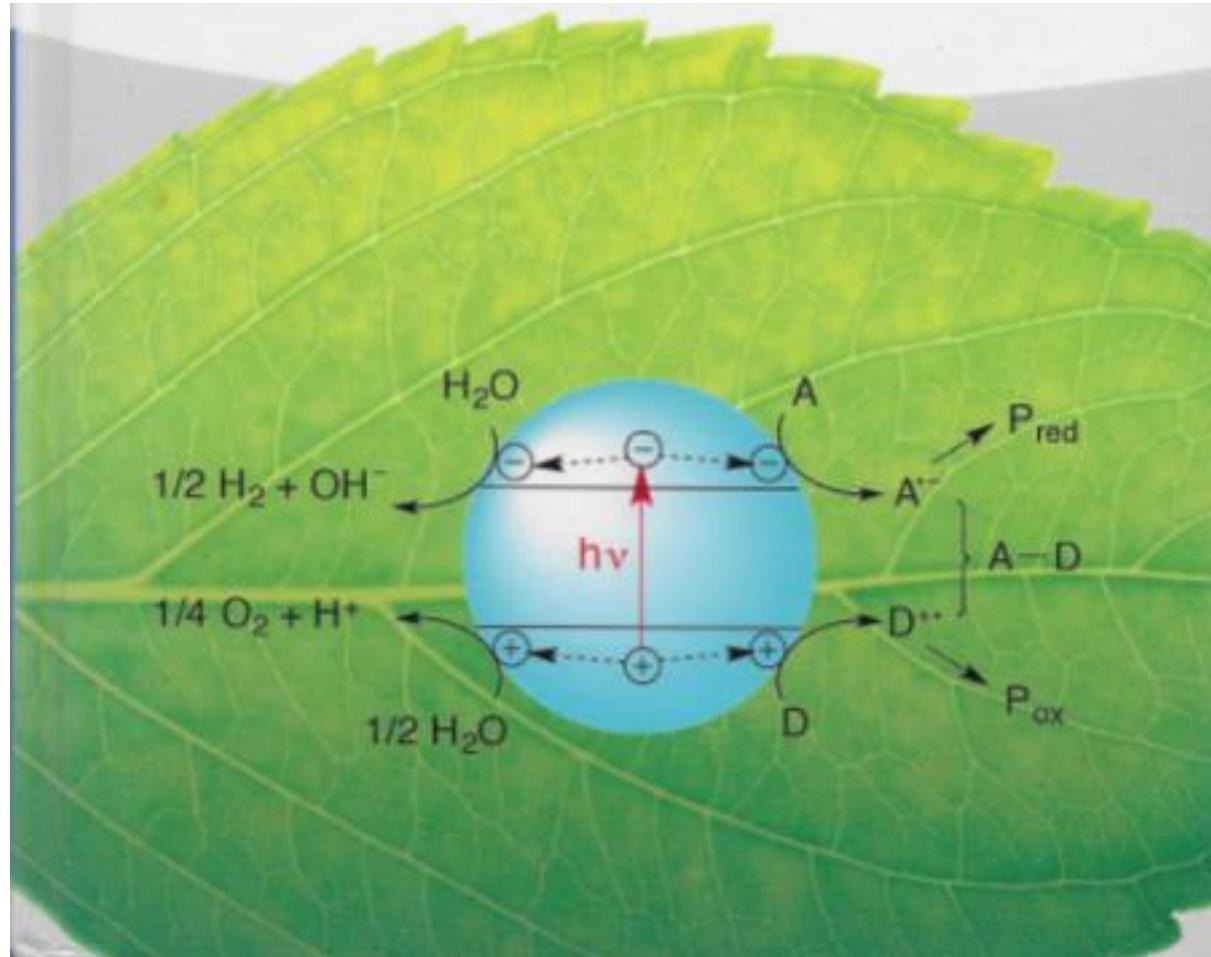
Tandem OPV annoncé : 20,2 % (18,2%)

Tandem Si-PRX 29,5% (26,7%)

Multijonction GaAs (32,9% 2J- 39,5% 3J)

## Un nouvel Horizon

# la photoélectrochimie pour la conversion directe en composés chimiques : Interface Photovoltaïque -Biologie



# Conclusions Recherche

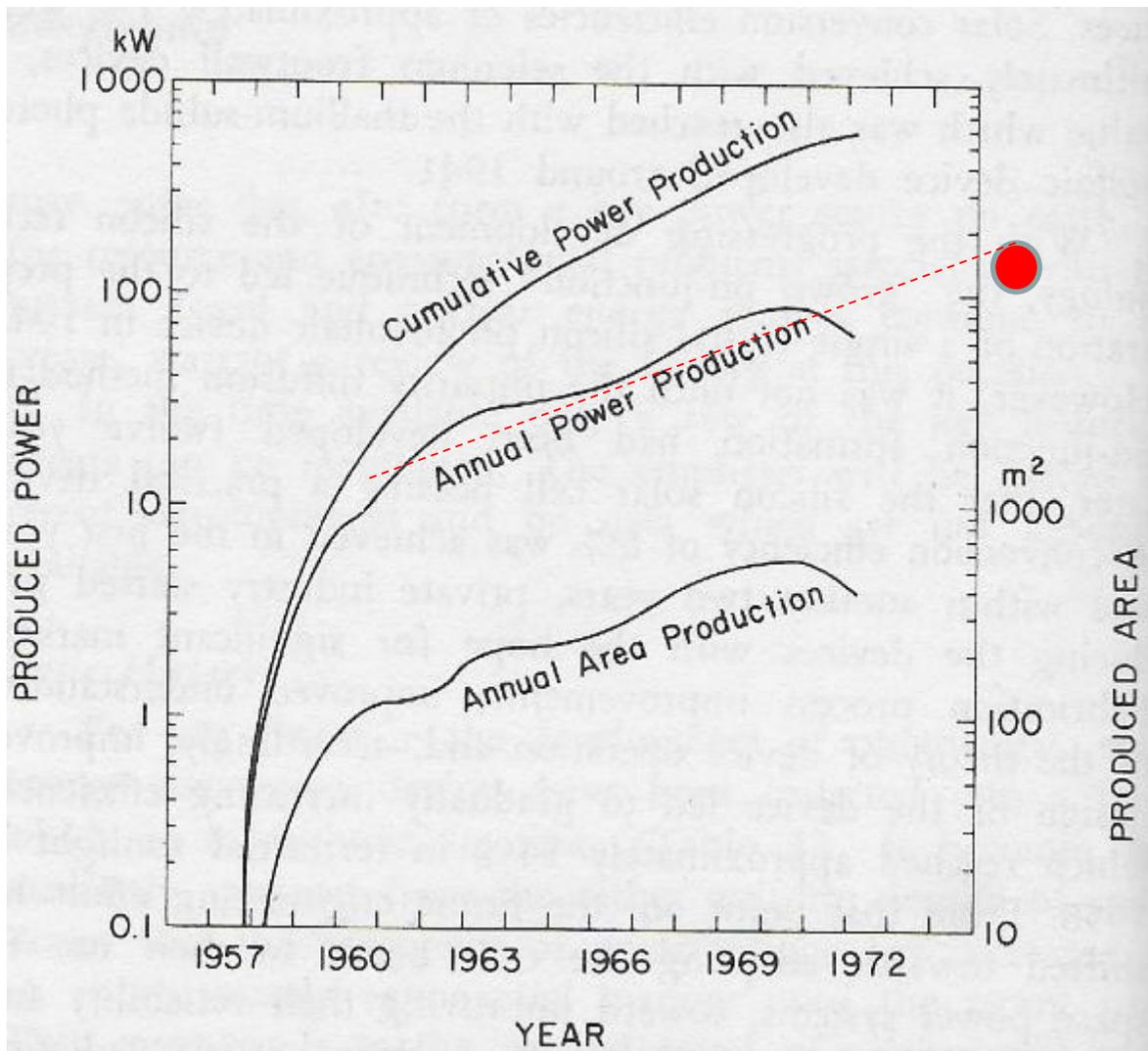
- Progrès soutenus des performances de la conversion photovoltaïque
- Emergence permanente de nouvelles technologies avec des cycles de plus en plus courts, hybridation, convergences
- Recherche très créative, «motivation», fortement pluridisciplinaire, internationale, allant du fondamental aux applications
- Marge de progression très importante

# Au-delà de la course au rendement : les nouvelles responsabilités sociales de la recherche

- Intervenir sur l'ensemble du cycle de vie des cellules photovoltaïques et des systèmes : de la mine au recyclage
  - Matériaux, procédés, systèmes aval
  - Critères environnementaux, économie de matière, recyclabilité
- L'économie du photovoltaïque
  - Liens avec les institutions et le secteur industriel (PV, stockage, batteries...), innovation, réduction des coûts. Création d'entreprises et d'emplois.
- Liens avec la société
  - Sciences humaines et sociales. Dialogue, partage des savoirs, Intégration du photovoltaïque dans les usages, dans la culture. Nouveaux modes d'organisation.
- Prospective, scénarios

# Photovoltaïque & transition énergétique

## Les premières innovations (1957-1976) : Spatial et sites isolés terrestres



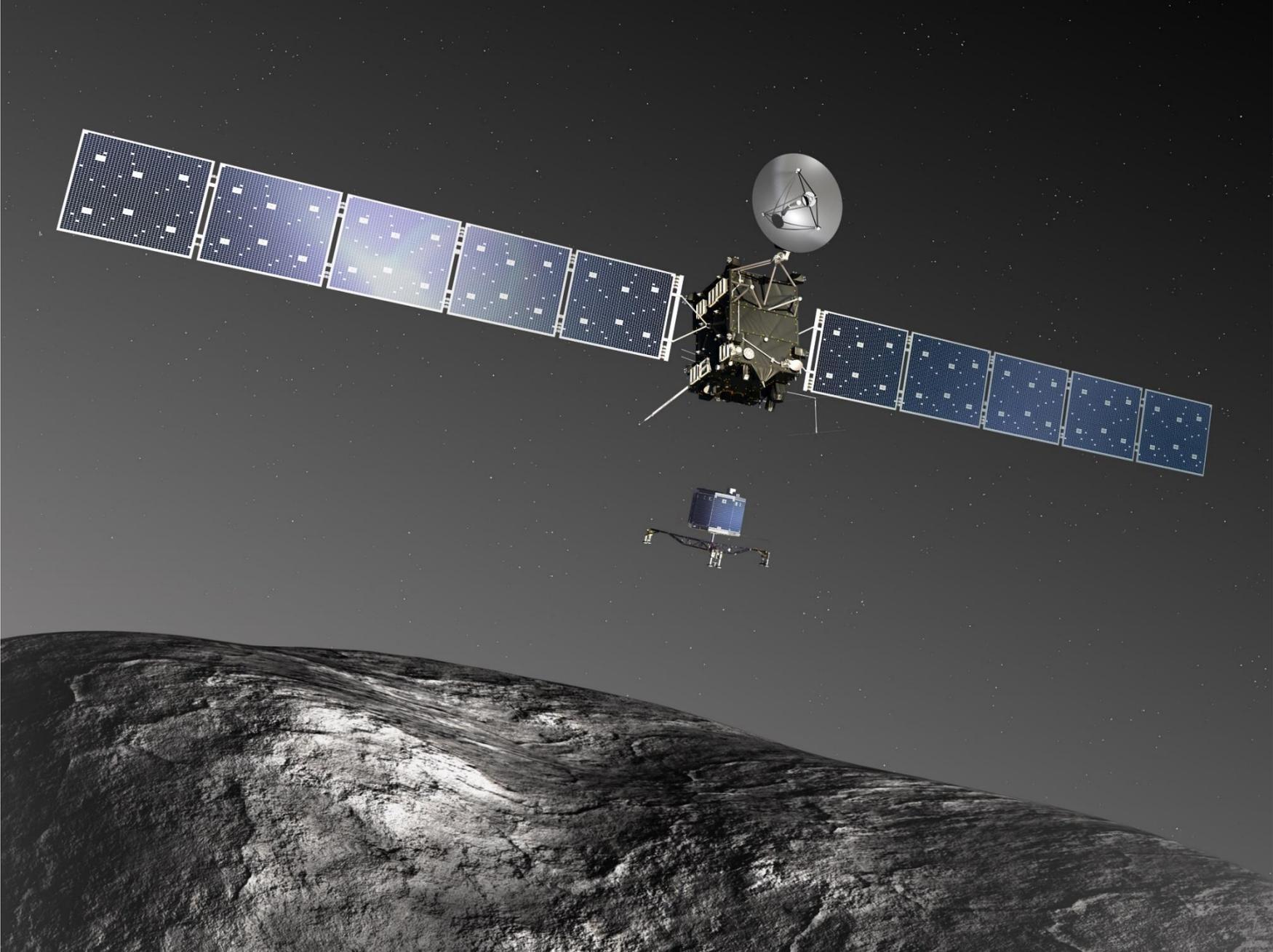
Source : M. Wolf, 1972

Estimation de la capacité de production mondiale  
en fin 1975 - début 1976

	<u>kW-crête / an</u>
<u>Etats-Unis</u> 5 à 6 industriels : environ	100
<u>France</u> 1 industriel : environ	30
<u>Japon</u> 1 ou 2 industriels :	5 à 10 (?)
<u>Allemagne</u> 1 industriel :	< 5 (?)
<u>Autres</u> ?	?
	<hr style="width: 10%; margin: auto;"/>
	environ 150
Par comparaison, capacité de production à usage spatial :	
environ	80 - 100

Tableau I

H. Durand, colloque CNES-CNRS 1976



*Daniel Lincot , Collège de France, 20-1-2022*

**1976 - 2000** : Le développement du photovoltaïque terrestre en sites isolés

**2000-2020** : L'envol du photovoltaïque terrestre de puissance

Lutte contre le changement climatique

Forte aspirations citoyennes

Politiques publiques de soutien au développement industriel

- Incitation financière (tarifs d'achat)

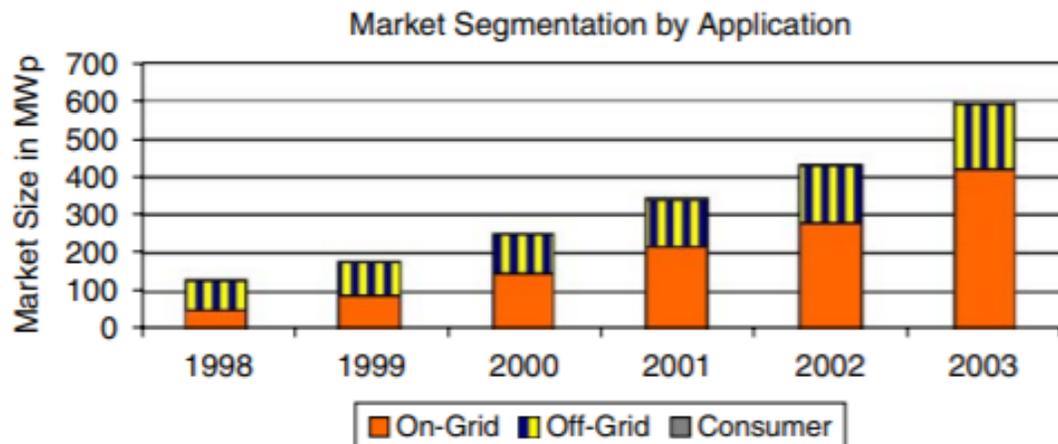
-Visibilité pour les industriels

Point de basculement

Sites isolés  
1976-1999



Raccordé réseau  
2000-2020



Due to strong market support programs in Germany, Japan, and USA, the world pv market has grown with over 50% per year

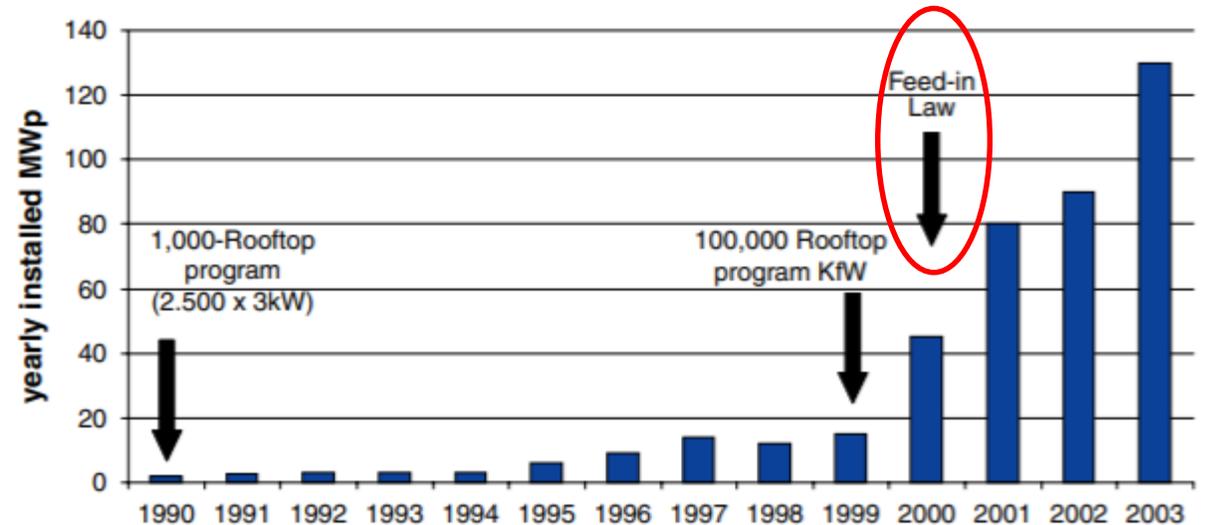
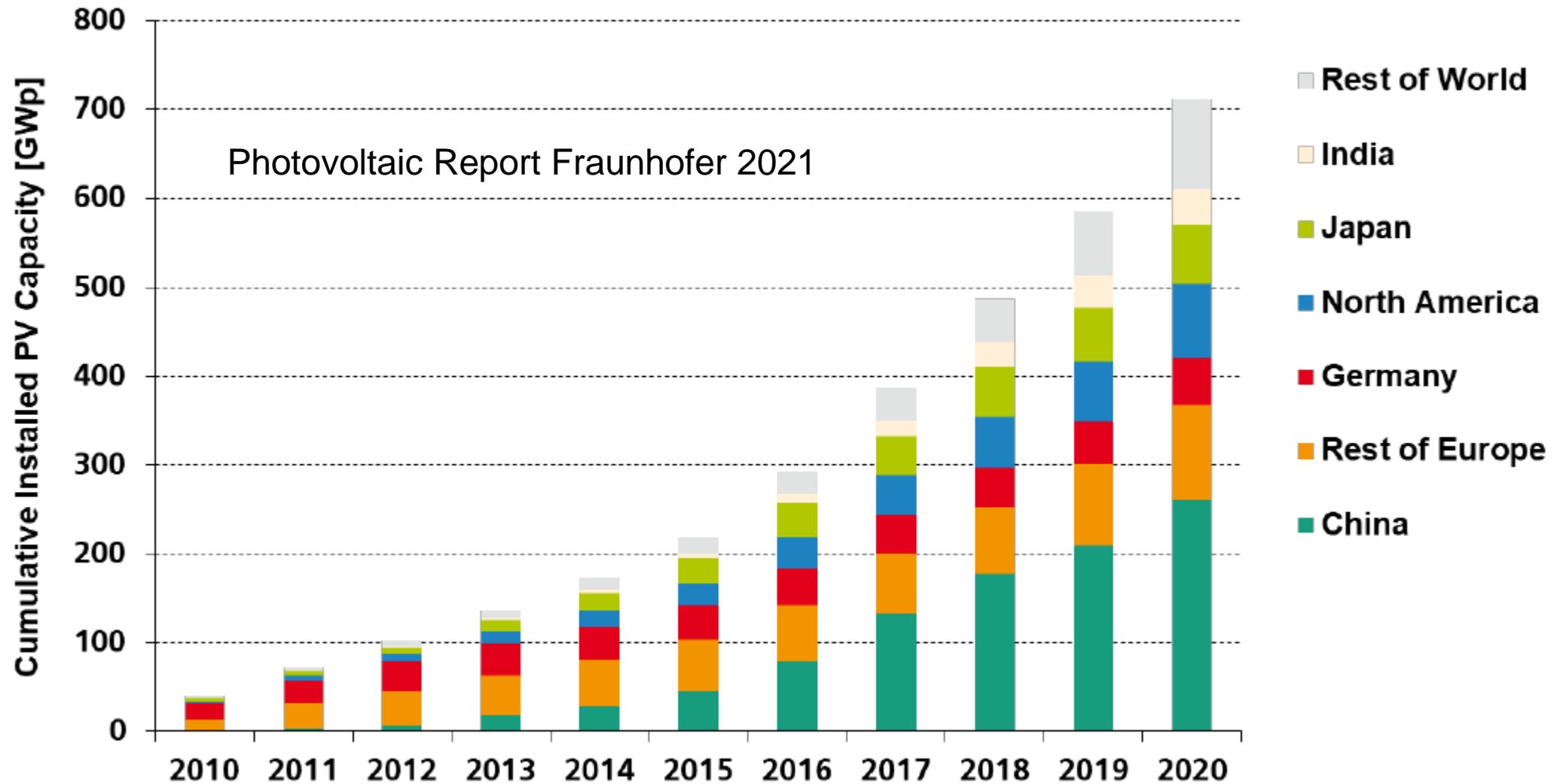


Fig. 16. Market pull by EEG and 100,000 rooftop program in Germany.

## L'entrée dans la cour des grands (2010-2020)

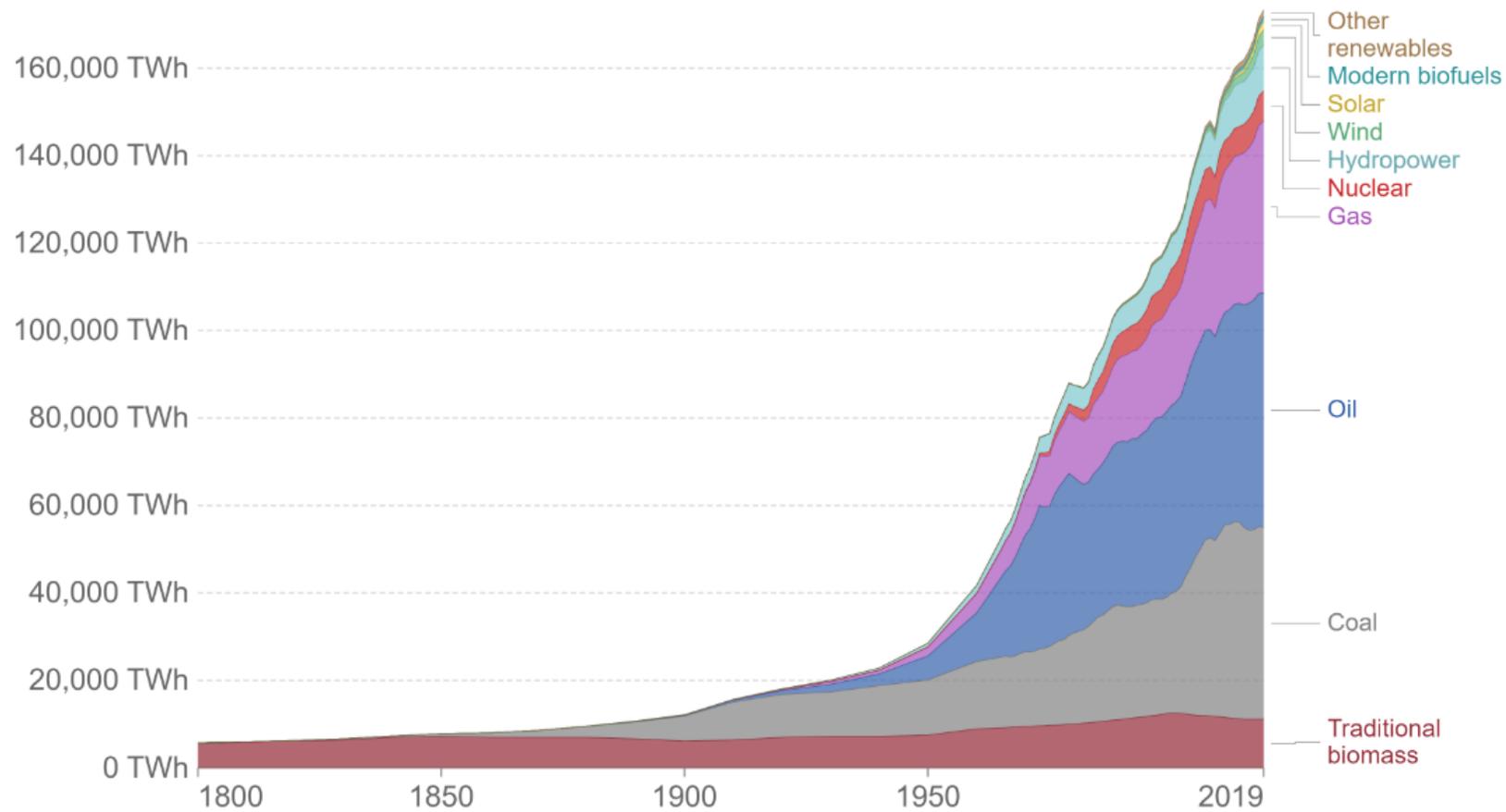


# Les grands !

## Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

Our World  
in Data



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

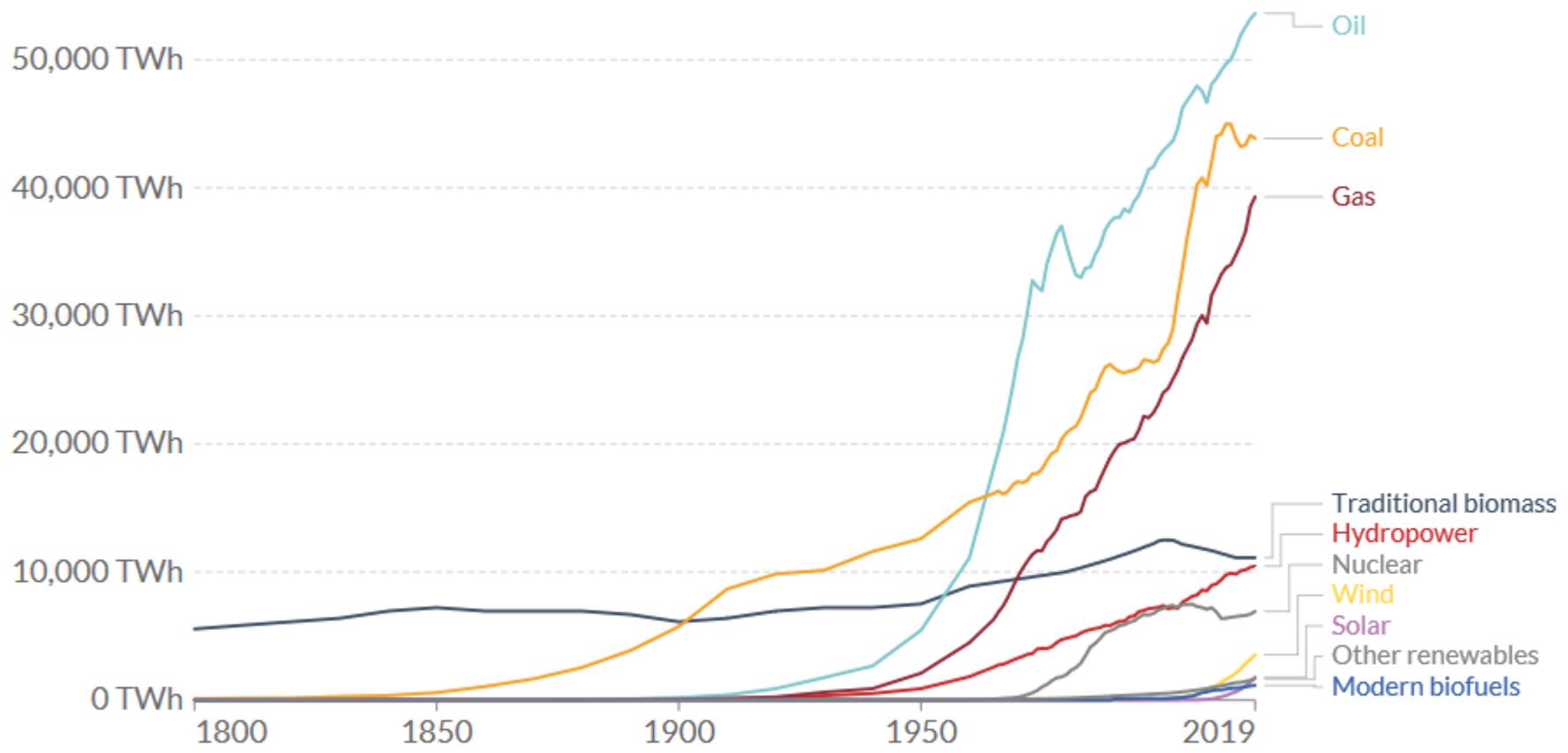
<https://ourworldindata.org/global-energy-200-years?country=>

Daniel Lincot , Collège de France, 20-1-2022

# Global primary energy consumption by source



Global primary energy consumption here is measured by the 'substitution' method which takes account of the inefficiencies of fossil fuel production.

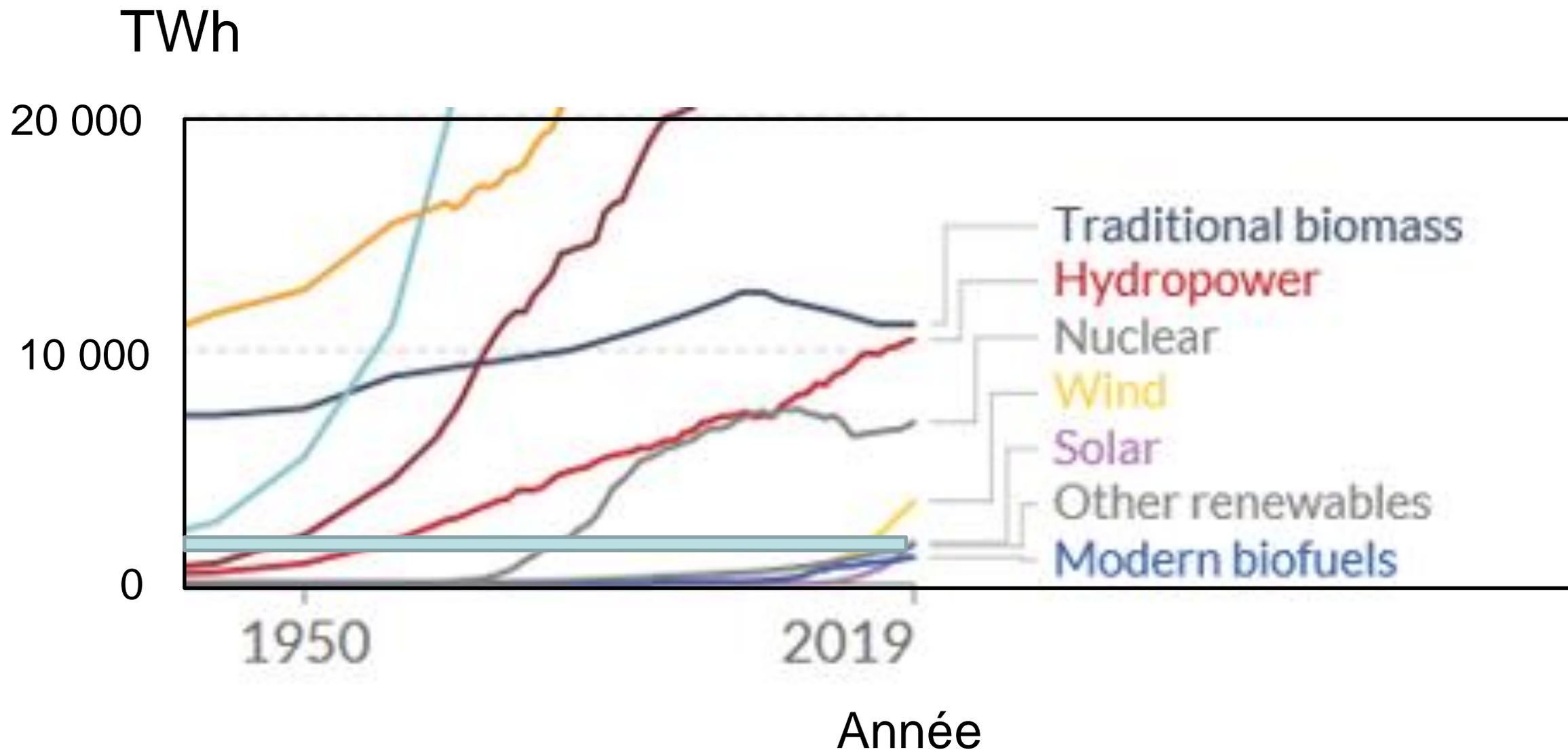


Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

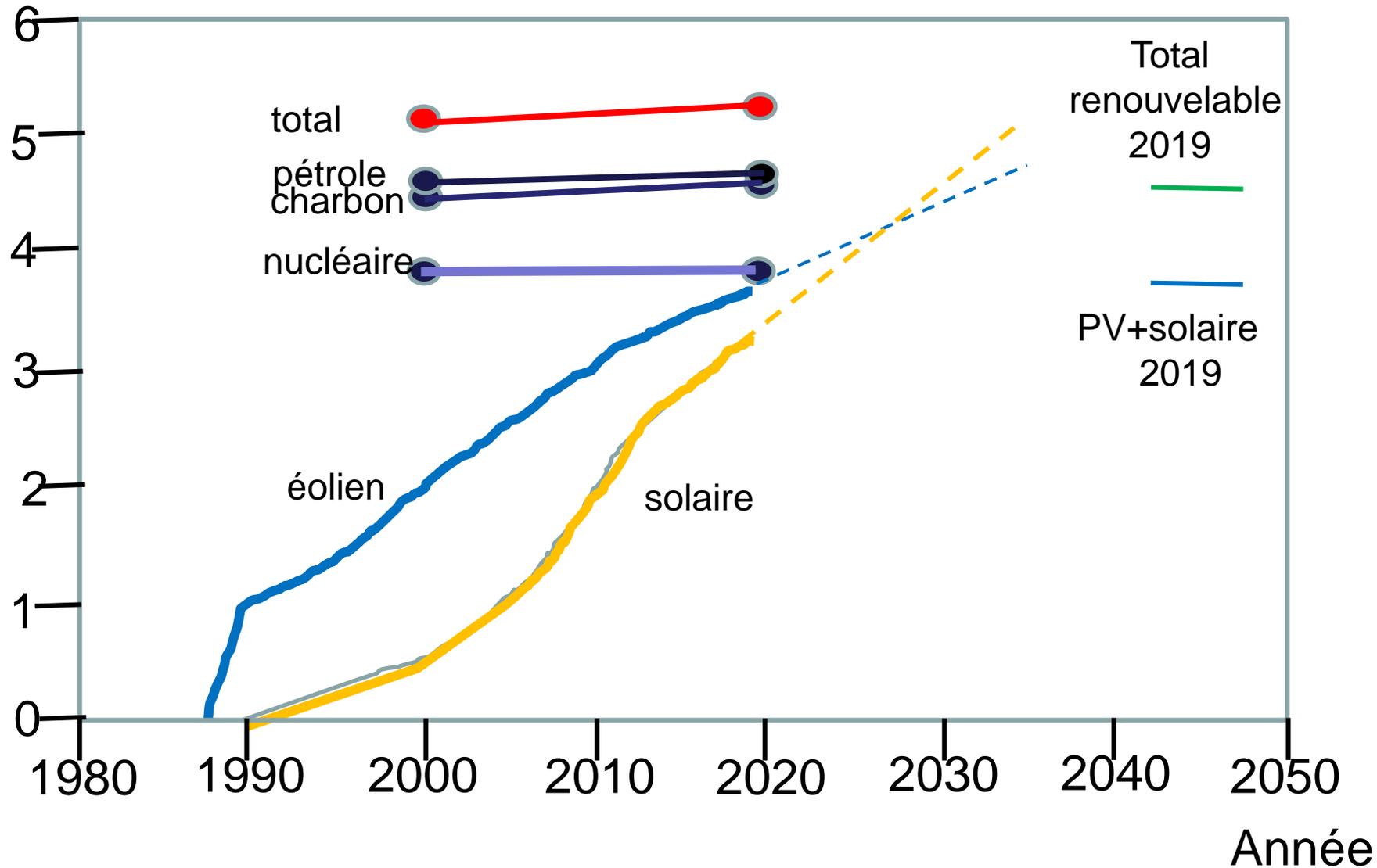
OurWorldInData.org/energy • CC BY

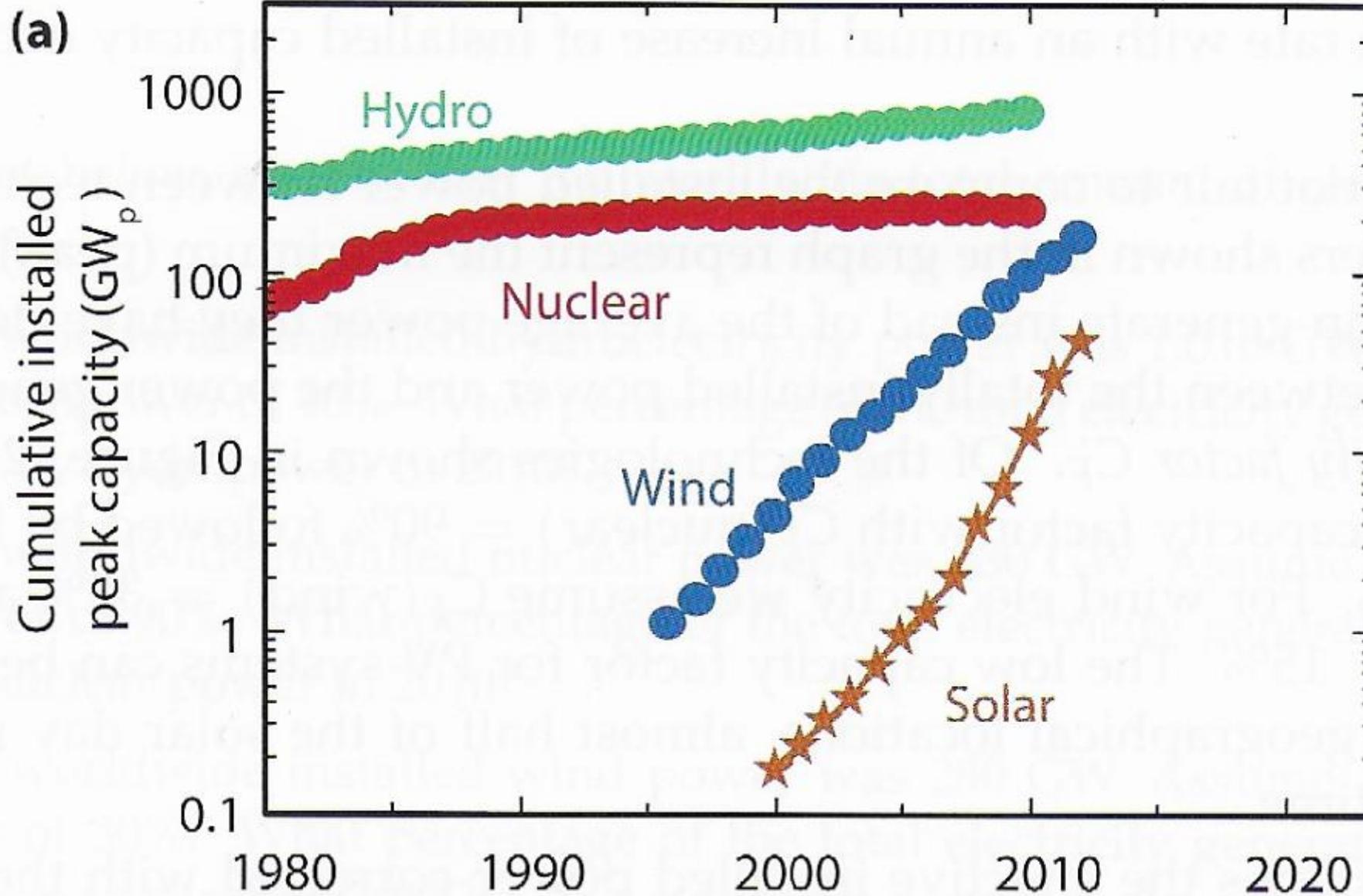


CHART TABLE SOURCES DOWNLOAD



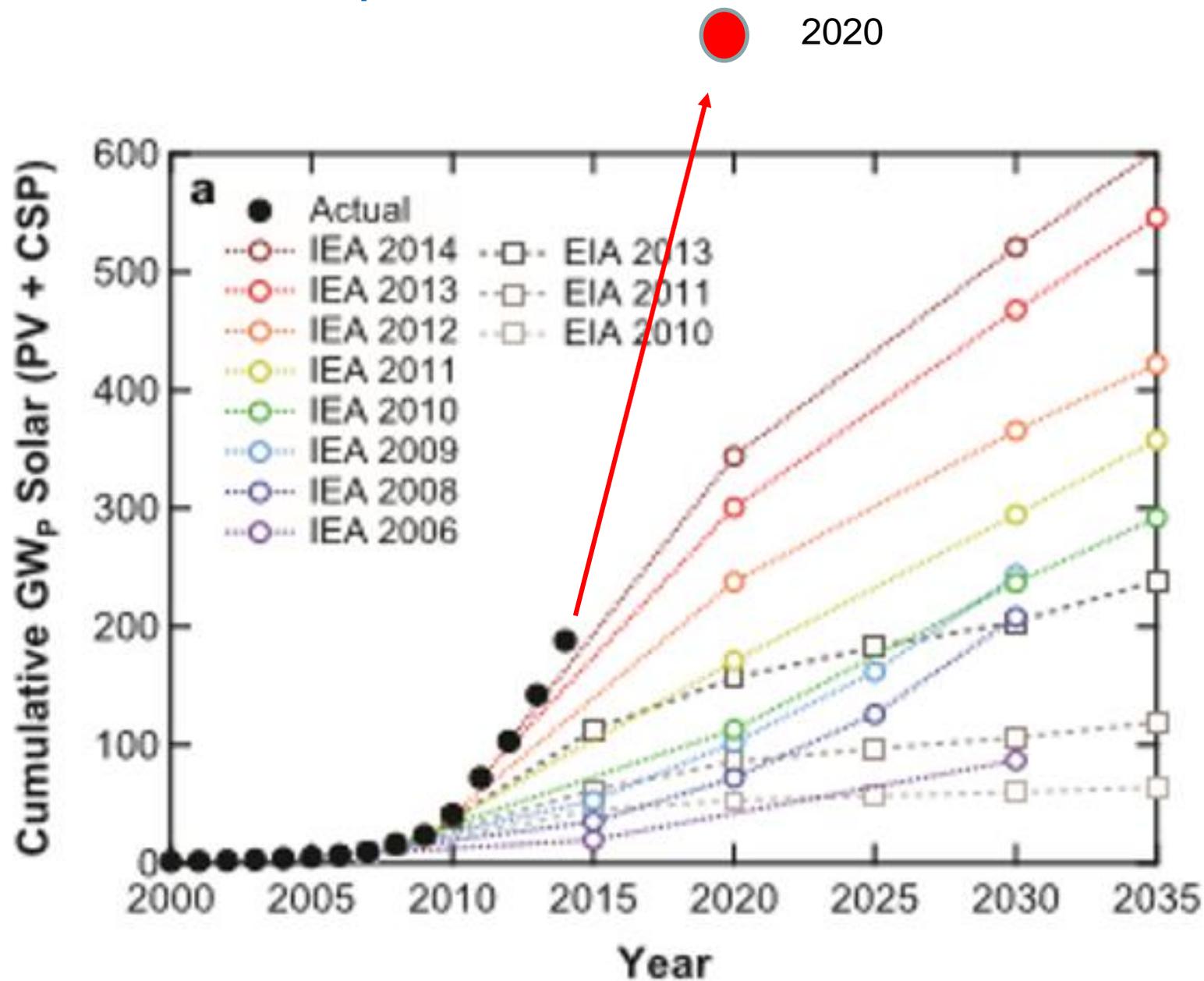
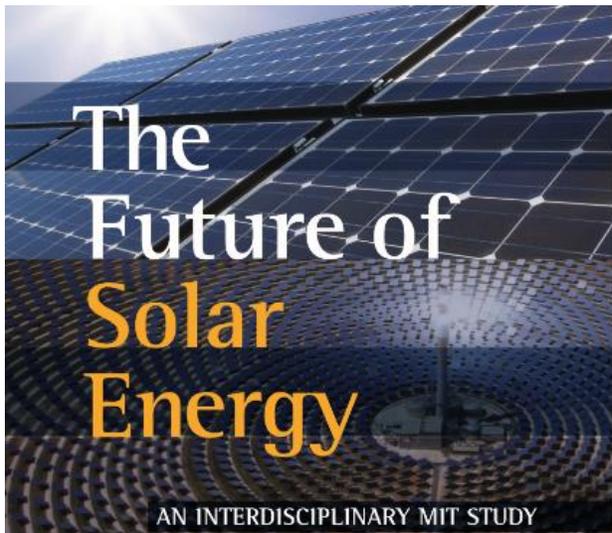
log (TWh)





2015

# Les limites des prévisions



# Un voyage à travers le monde pour suivre la dynamique de développement du de la production photovoltaïque (en TWh)

Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - "Energy". *Published online at OurWorldInData.org*. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/energy>' [Online Resource]

1987



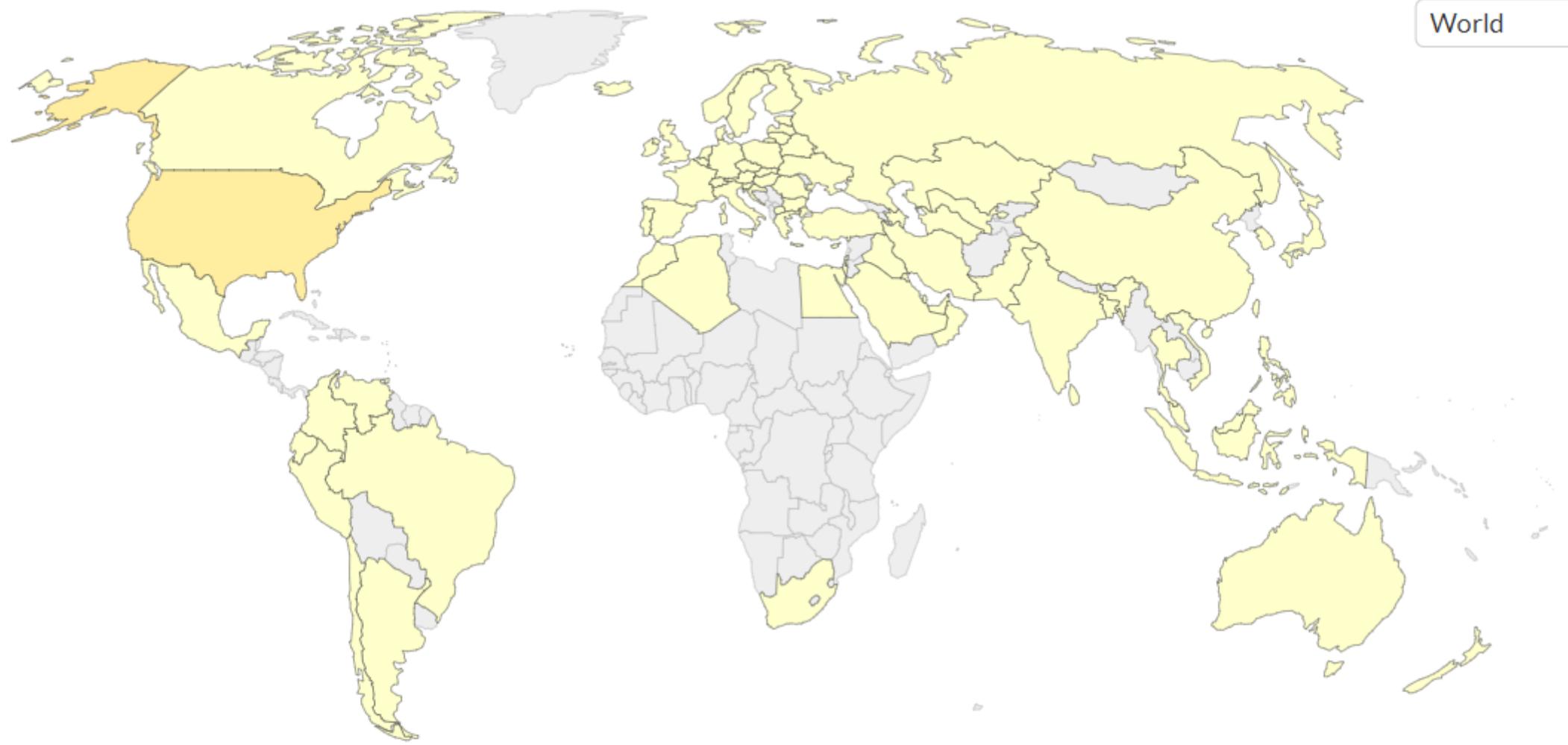
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY



1985

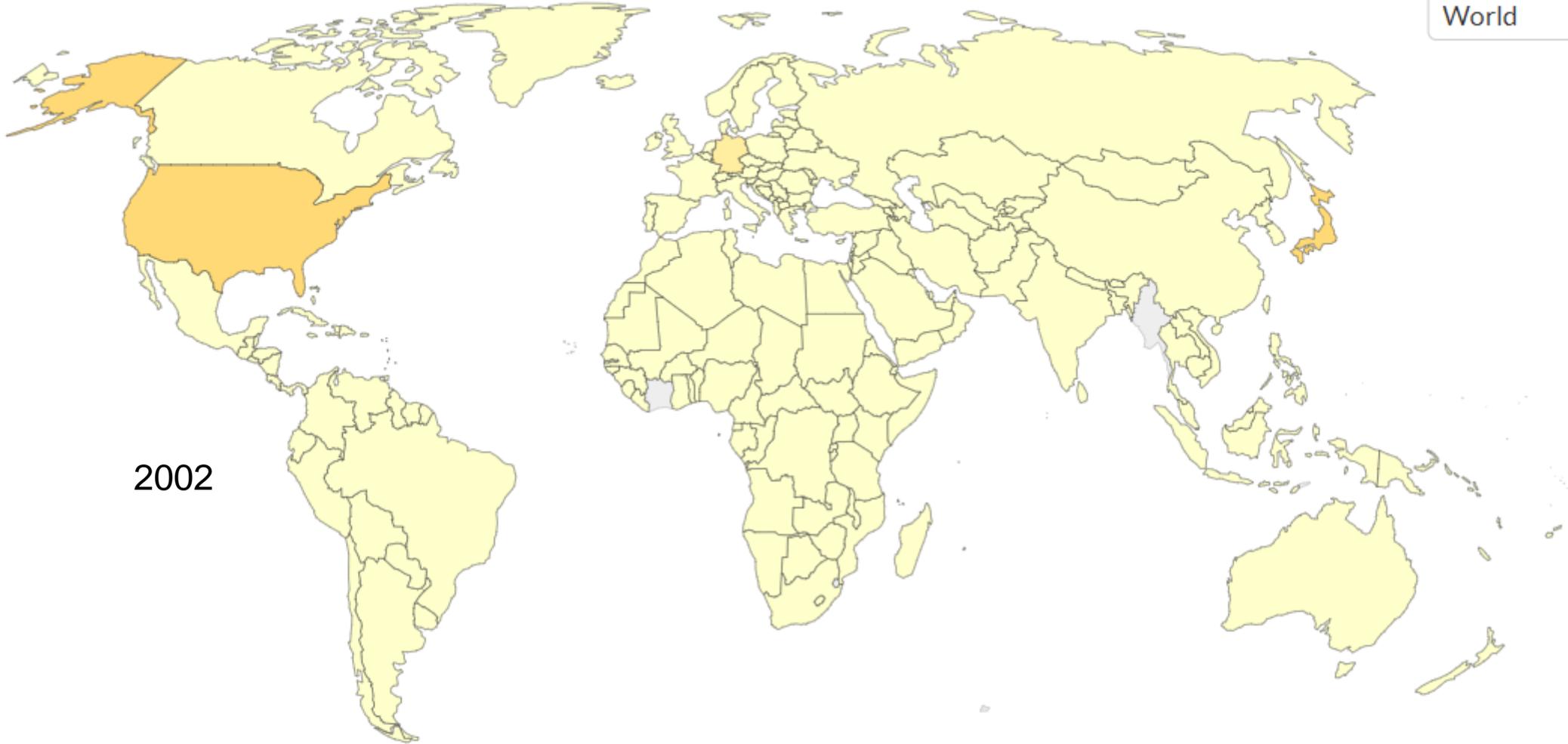
1993



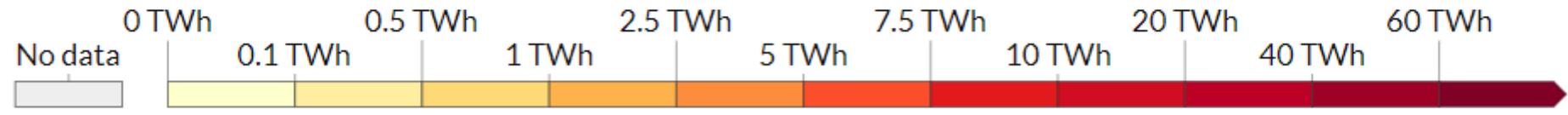
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY





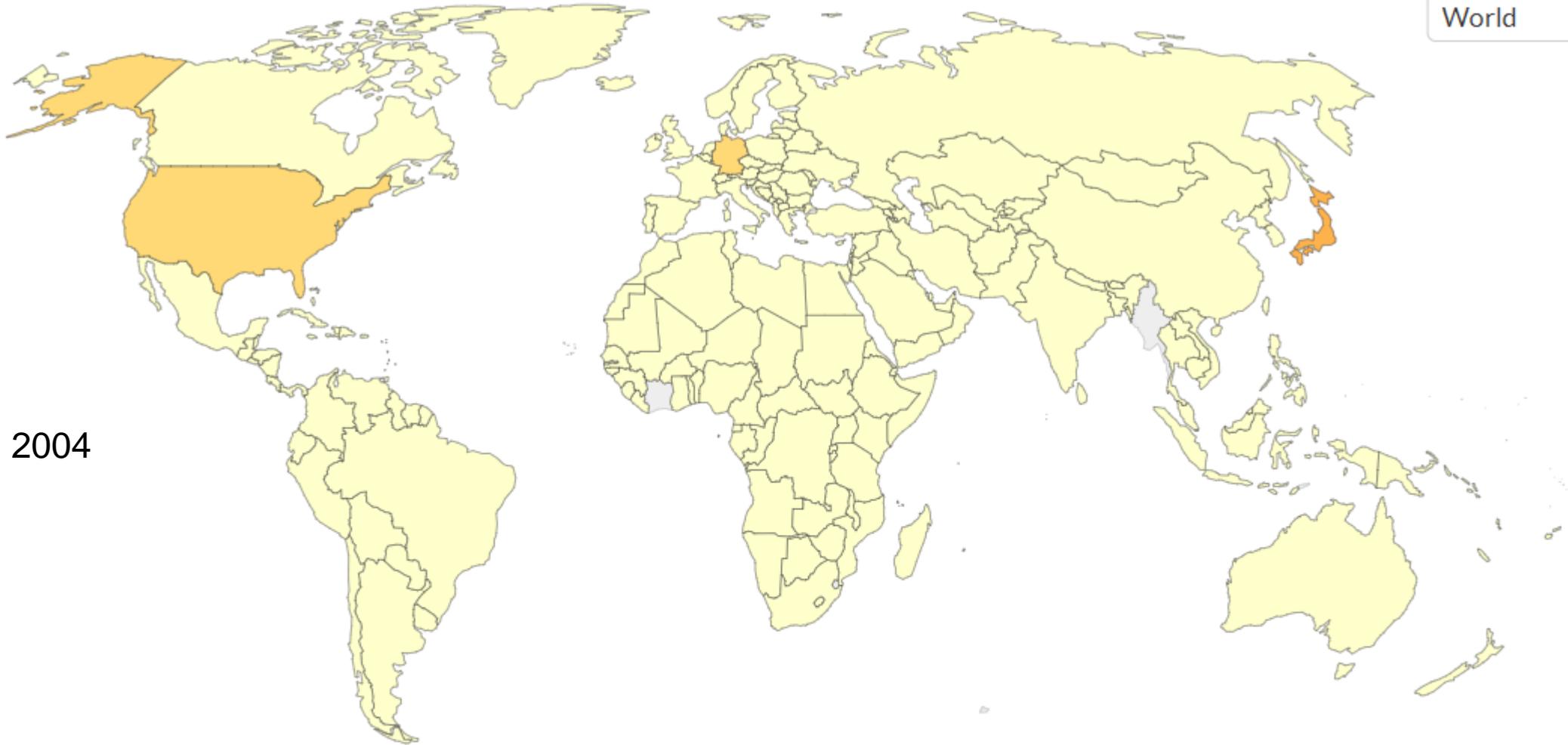
2002



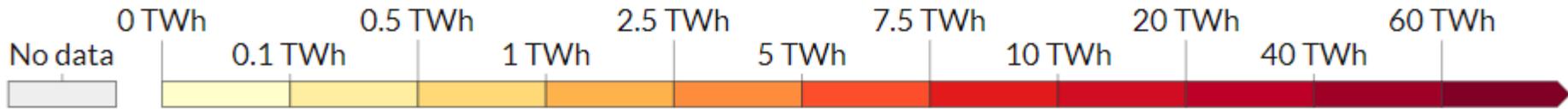
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY





2004

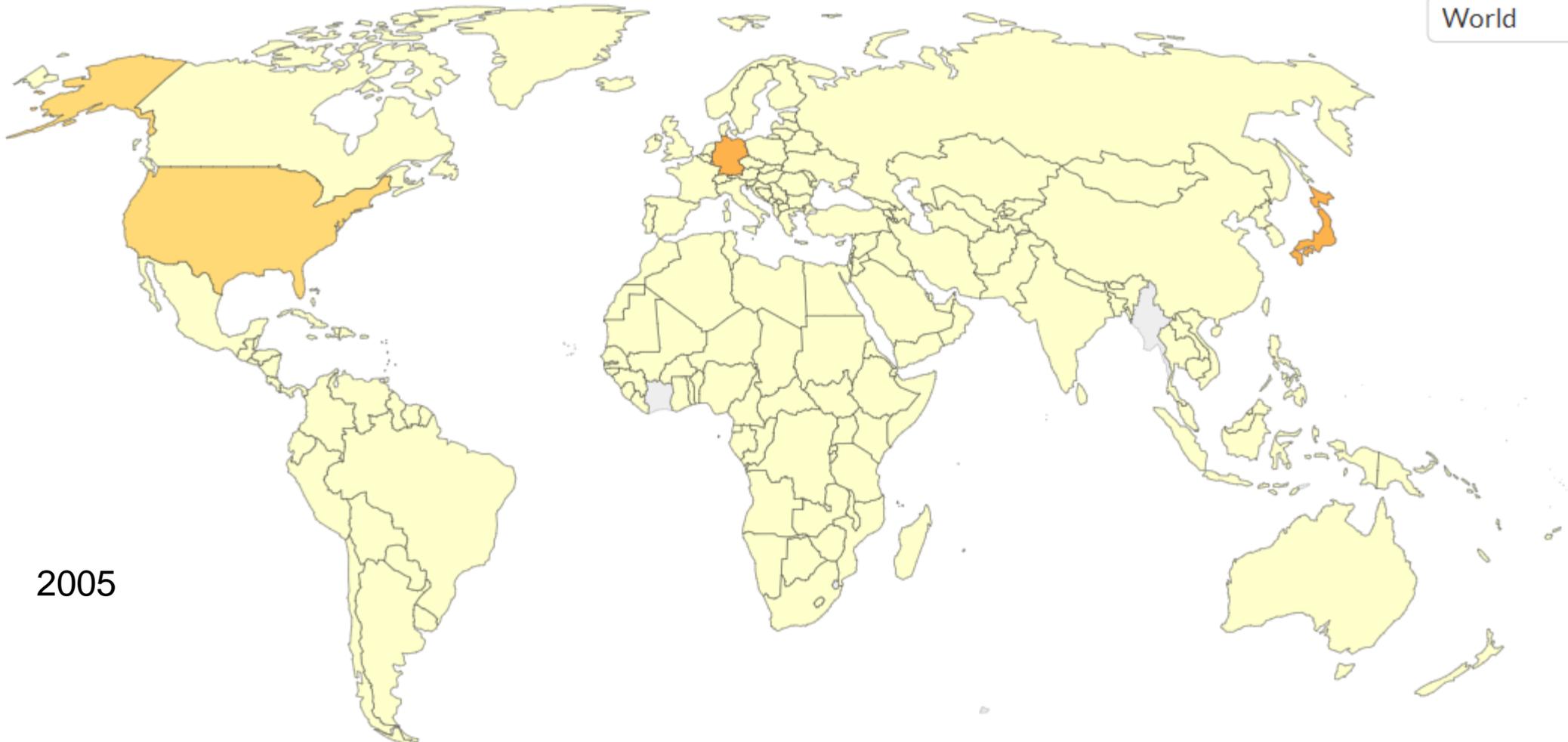


Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

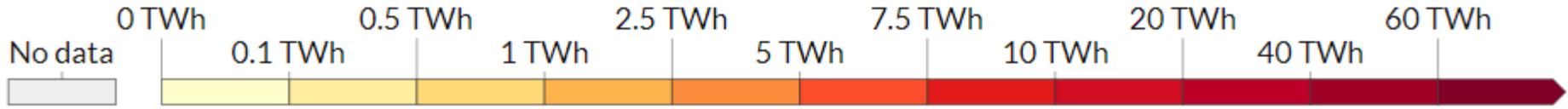
OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

▶ 1985





2005

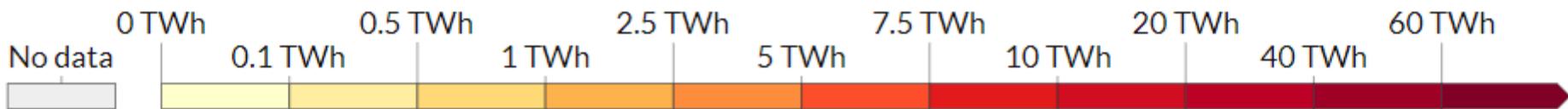
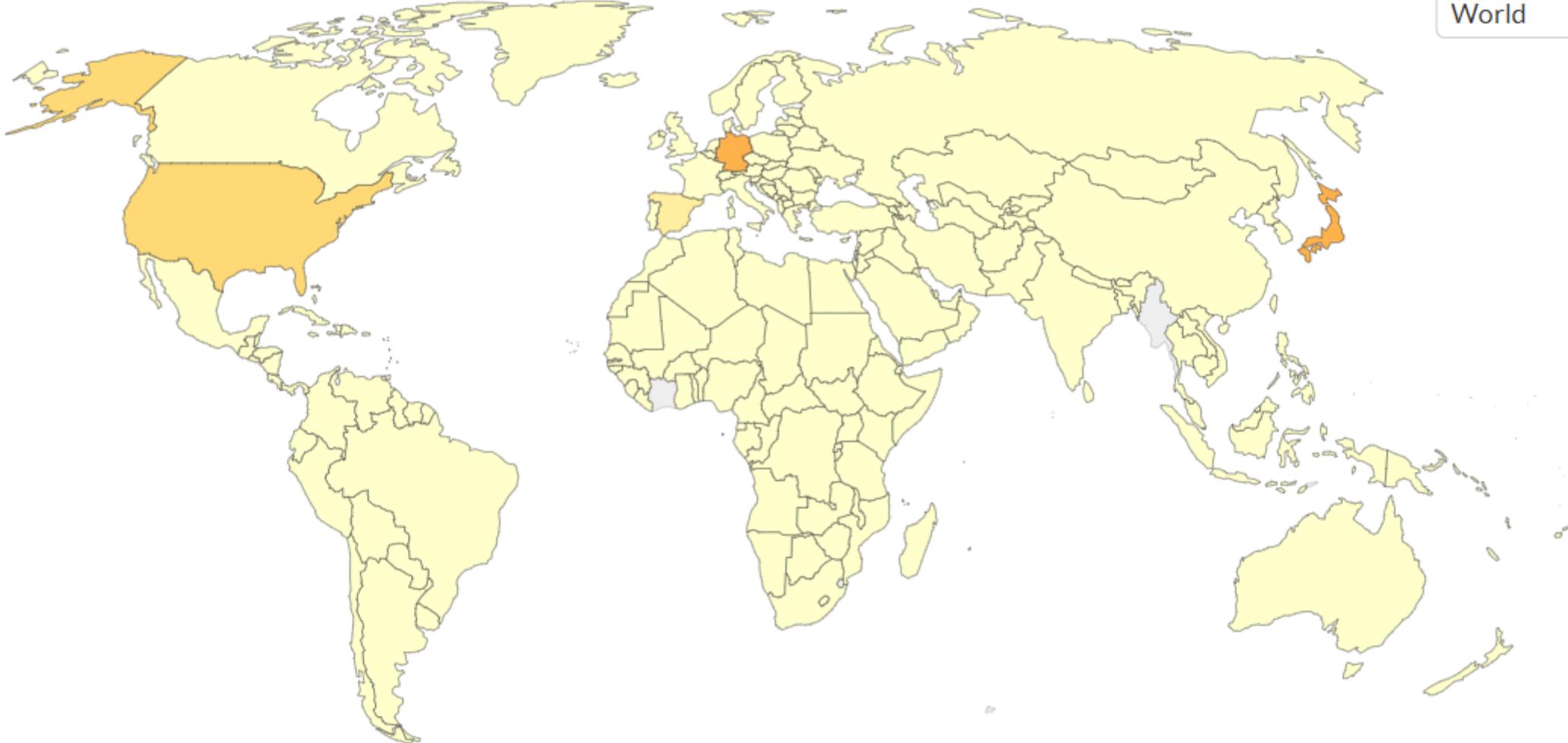


Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY



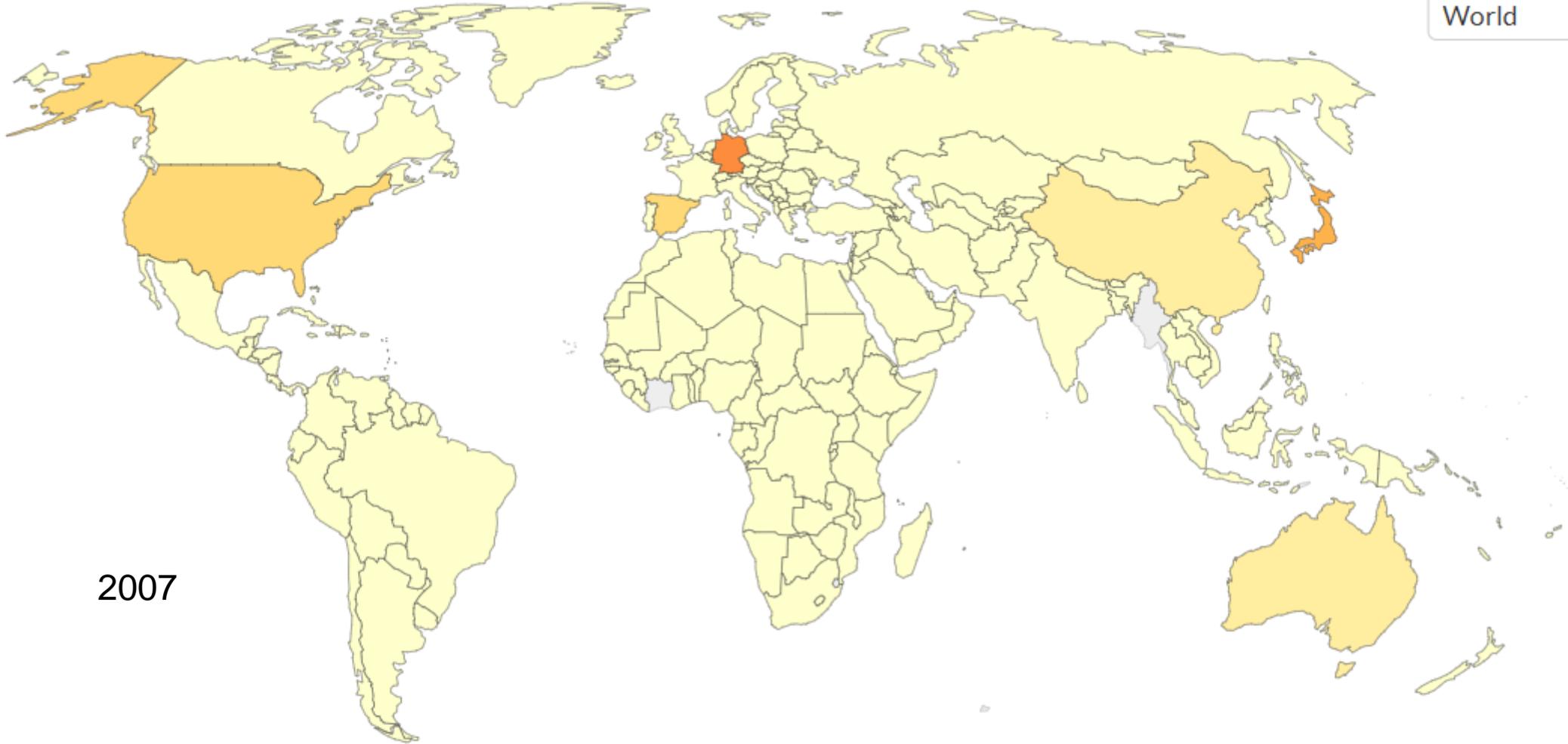
2006



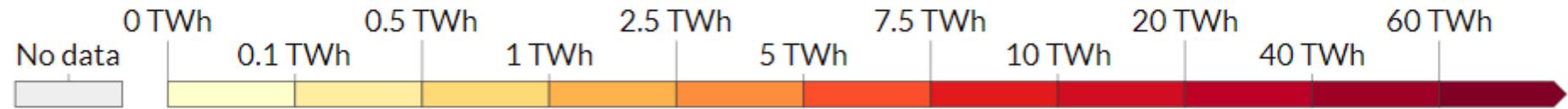
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY





2007



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

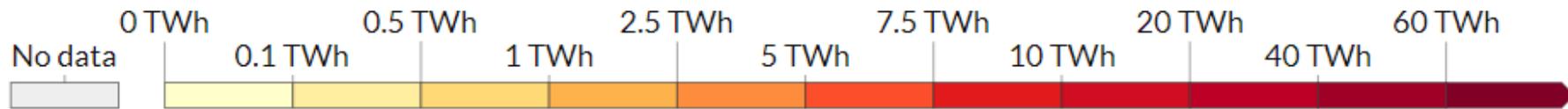
OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

▶ 1985



World

2008



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY

▶ 1985

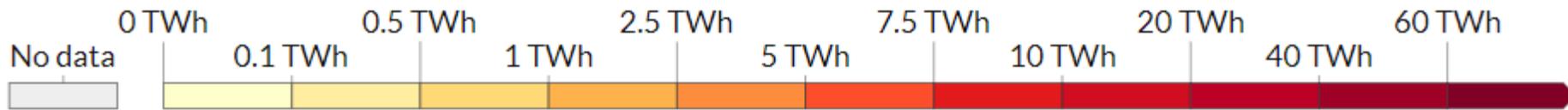


2020

Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022

World

2009



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

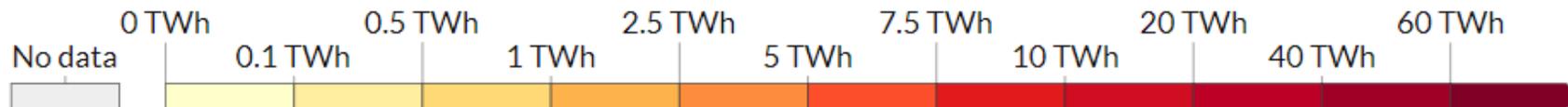
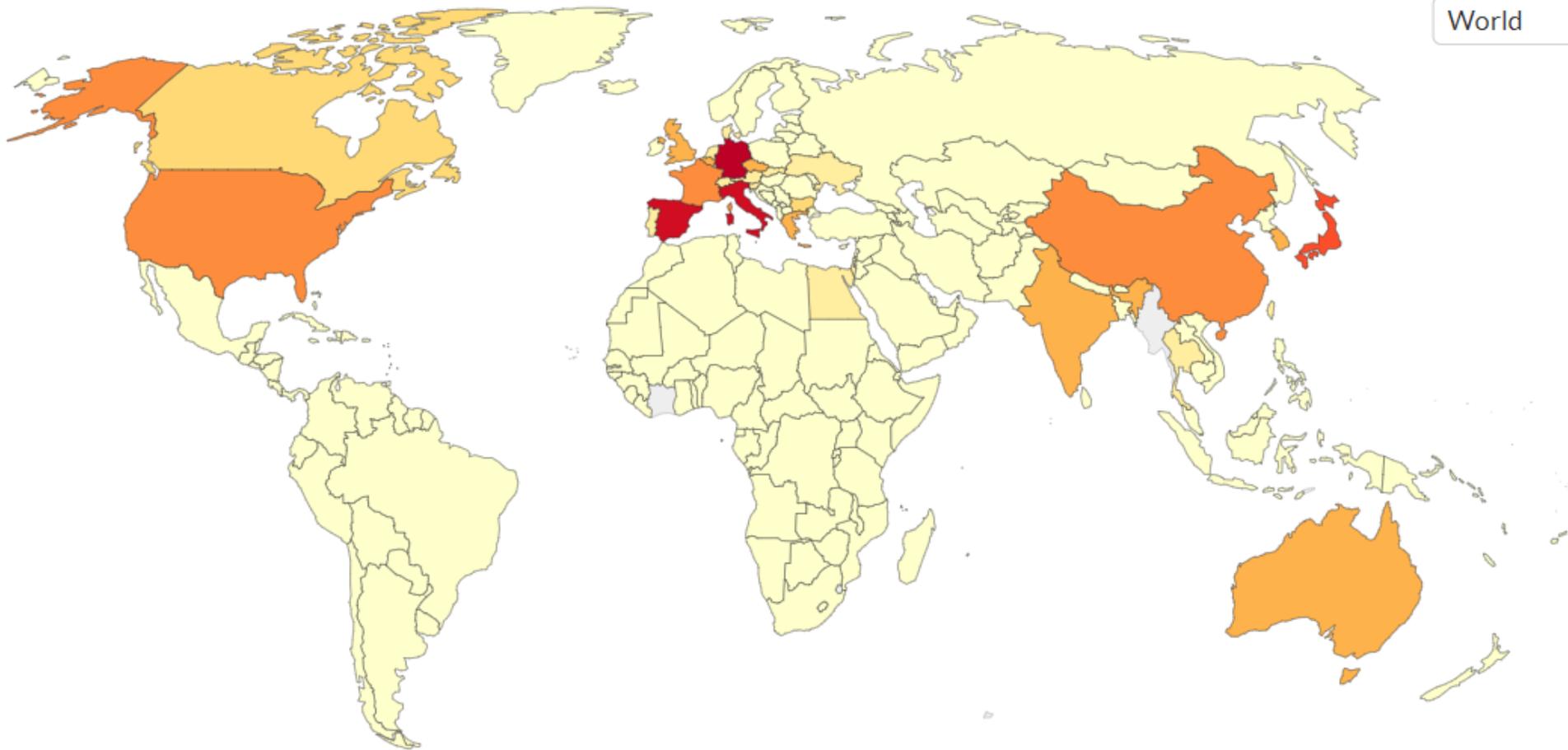
Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022

1985

2020

2012

World 

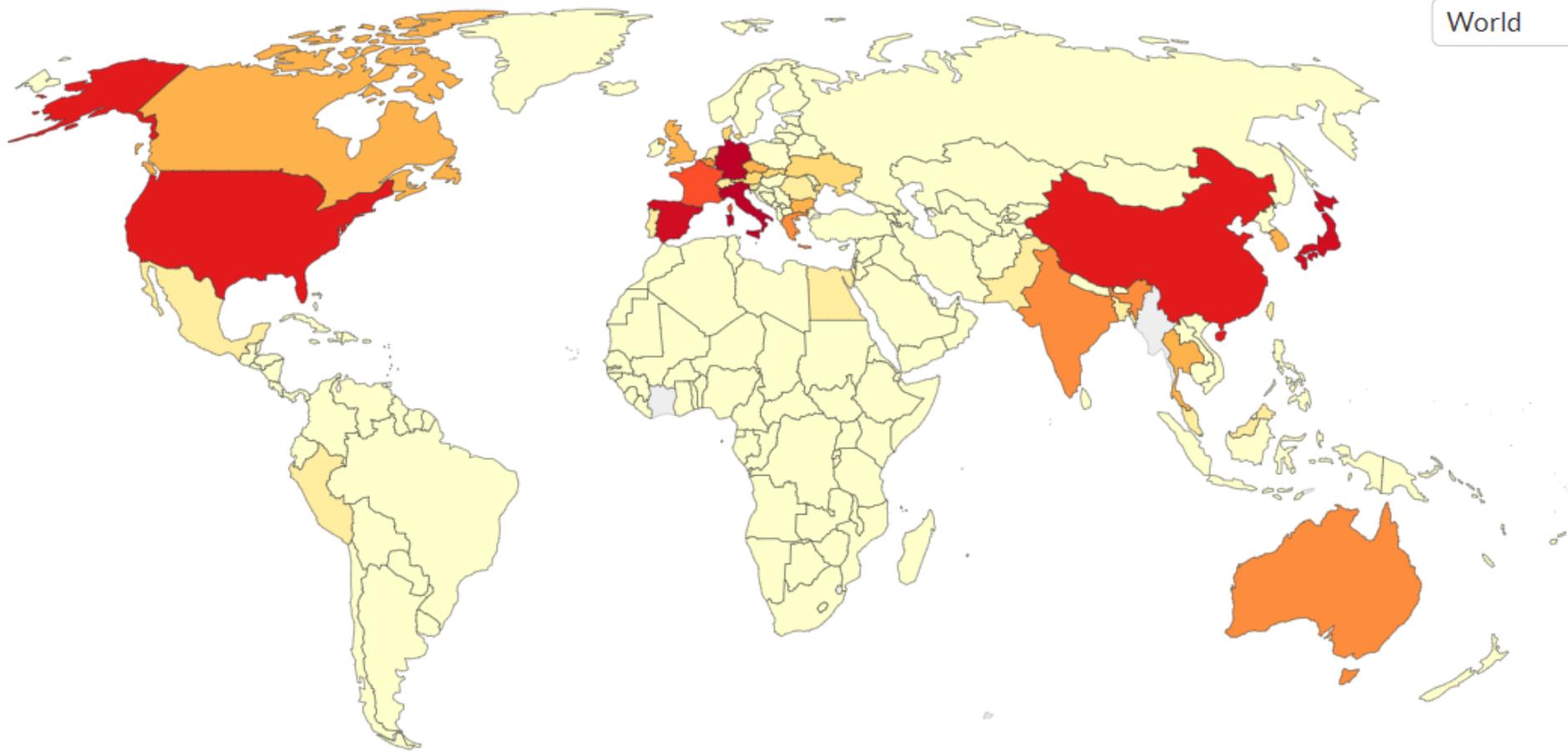


Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

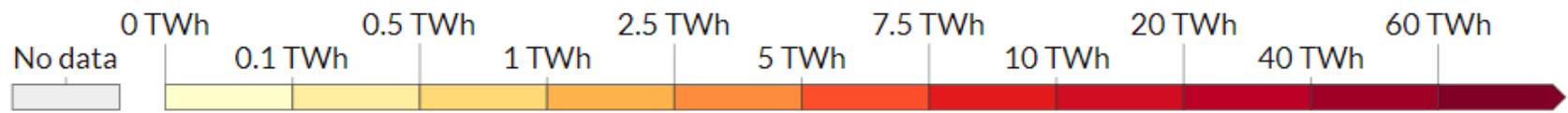
[OurWorldInData.org/renewable-energy](http://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY



World



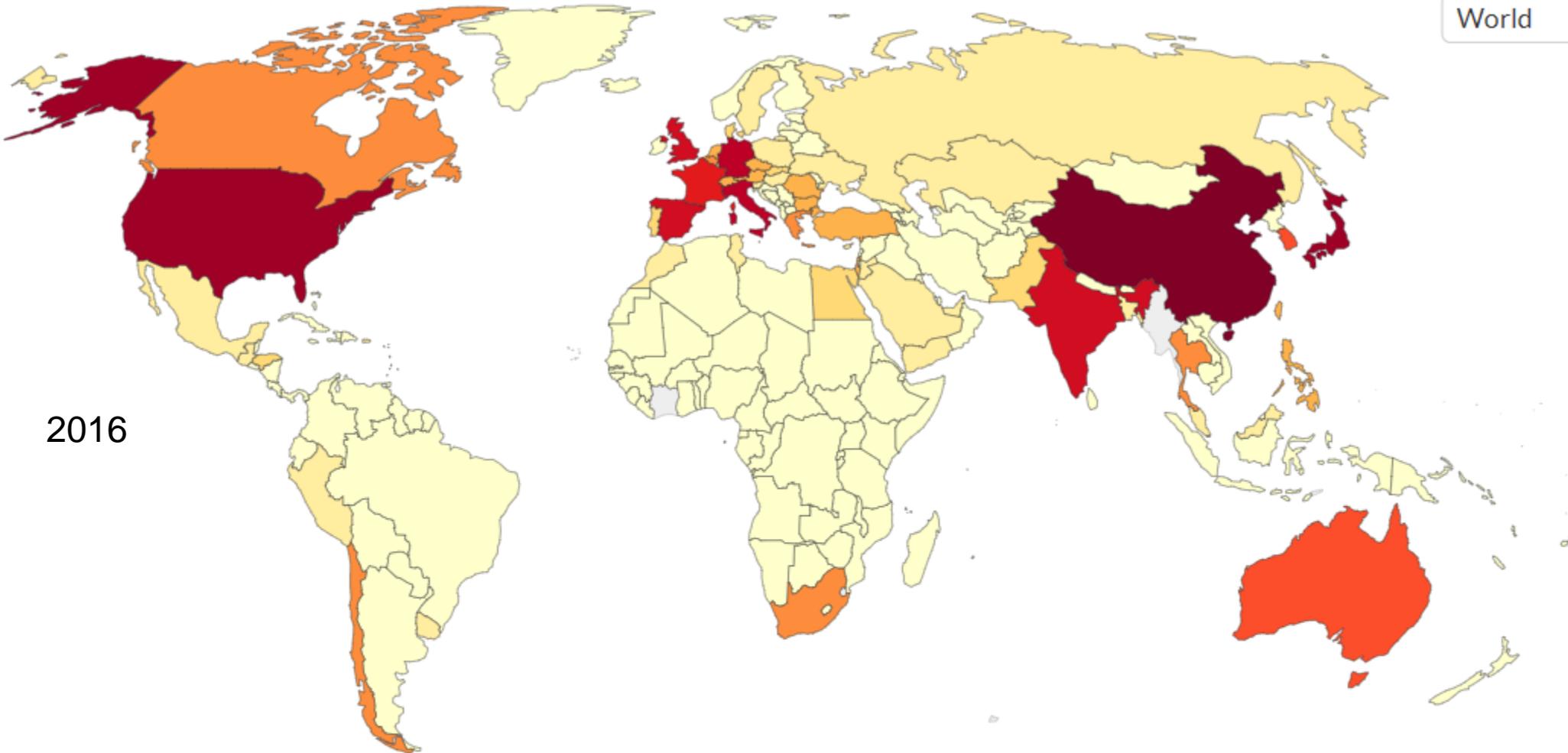
2013



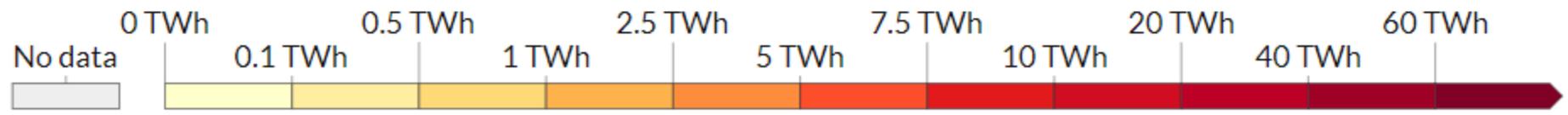
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY





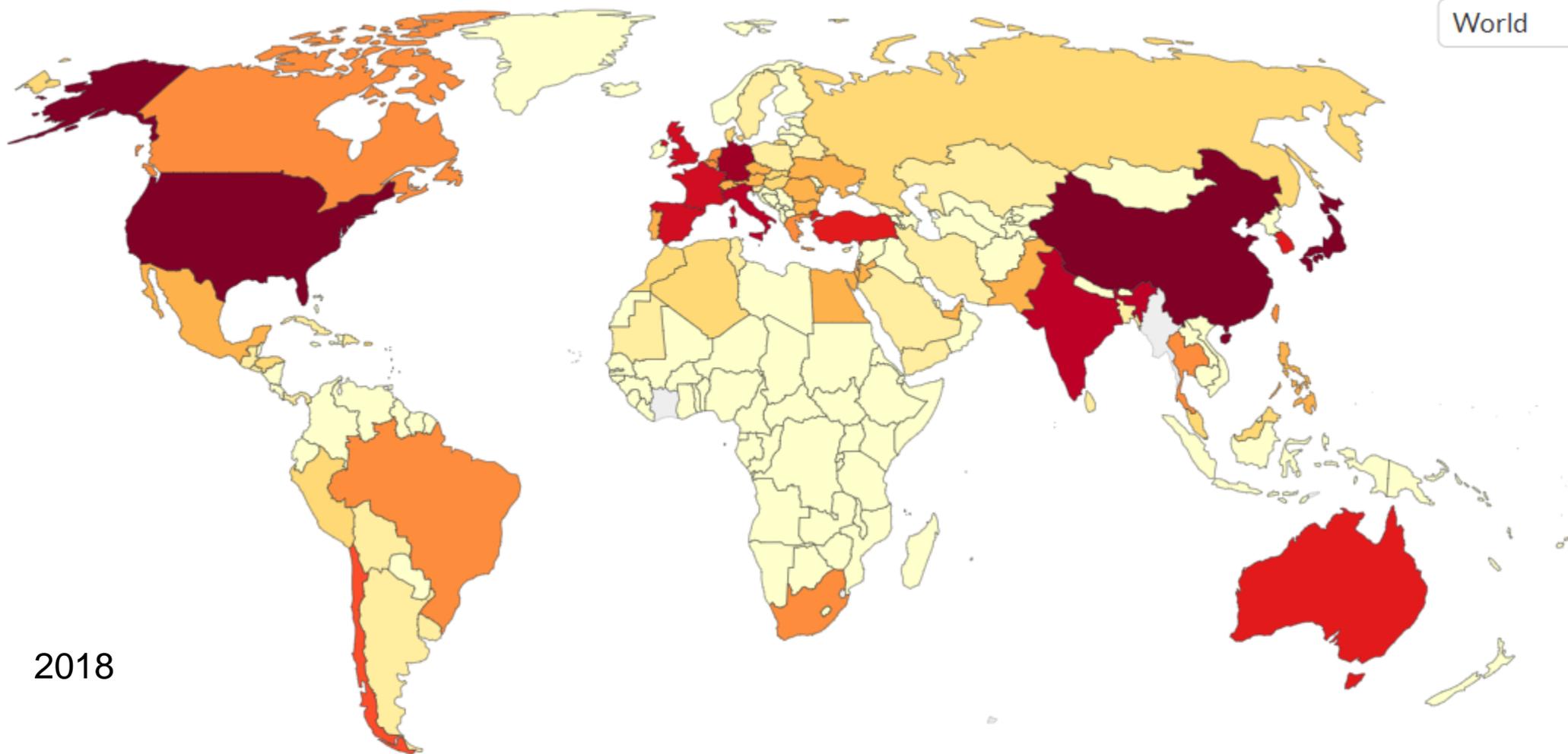
2016



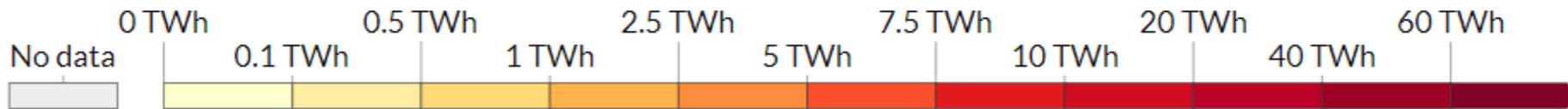
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY





2018



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

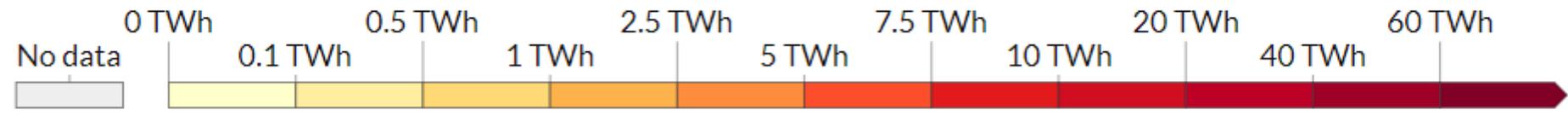
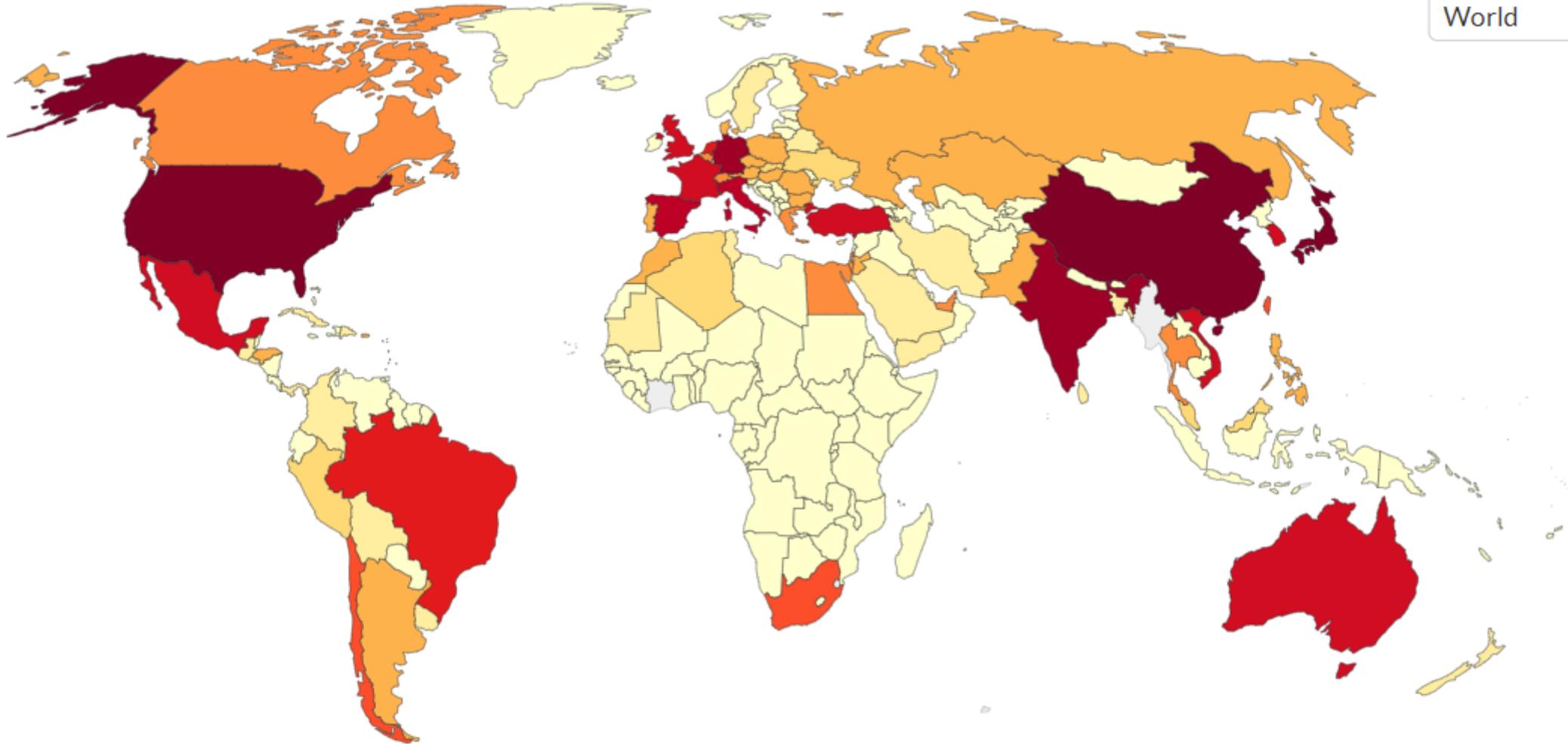
[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) • CC BY

▶ 1985



Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022

2020



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

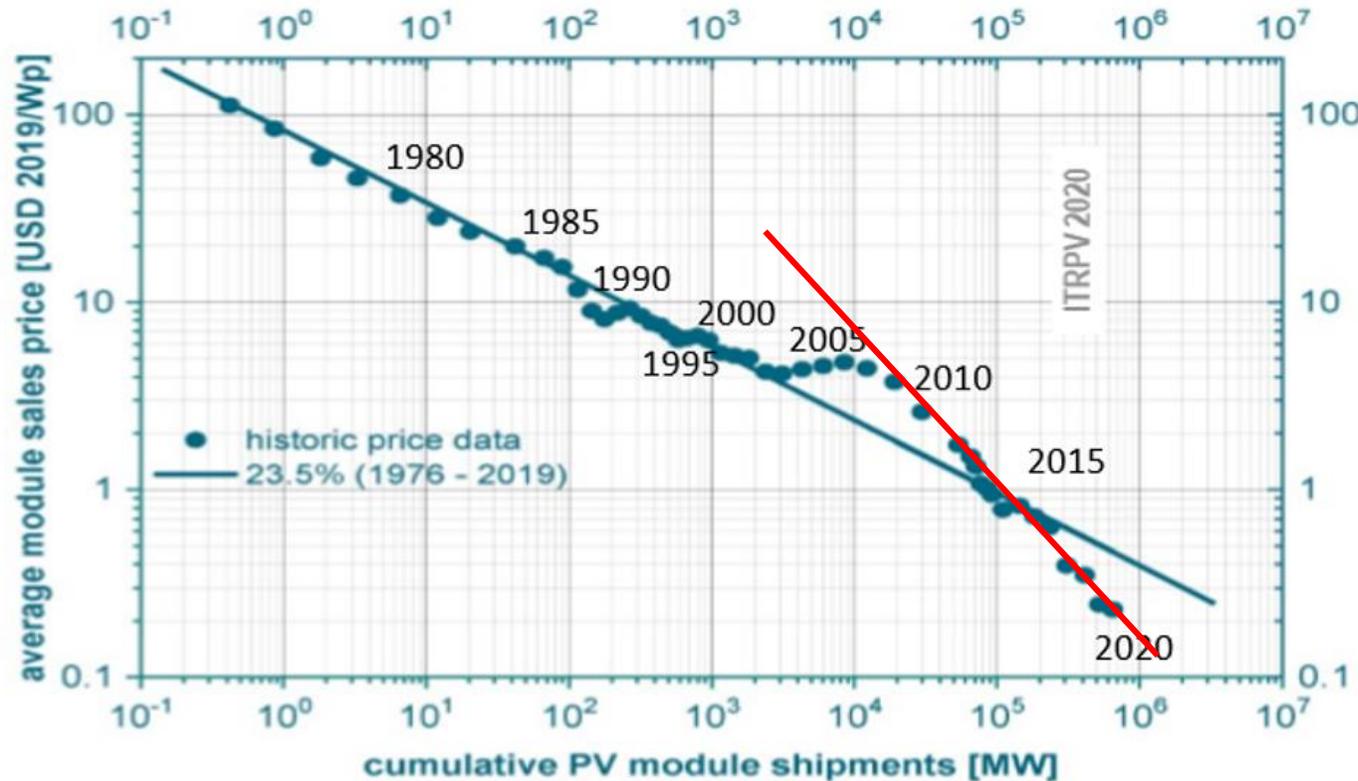
▶ 1985



Daniel Lincot, Collège de France, 20-1-2022

# La compétitivité économique du photovoltaïque : la réduction des coûts

Learning curve for module price as a function of cumulative shipments



Adapté de : <https://pv-manufacturing.org/wp-content/uploads/2019/03/ITRPV-2019.pdf>

Prix de production de l'électricité:

→ 50-60 Euros/MWh en France et en Allemagne

→ 20 Euros/MWh dans plusieurs régions du monde

TABLE 6.1: LOWEST WINNING BIDS IN PV TENDERS FOR UTILITY SCALE PV SYSTEM PER REGION

REGION	COUNTRY/STATE	USD/MWh	YEAR
ASIA	UZBEKISTAN	17,9	2021
AFRICA	TUNISIA	24,4	2019
EUROPE	PORTUGAL	13,2	2020
LATIN AMERICA	BRAZIL	17,5	2019
MIDDLE EAST	SAUDI ARABIA	10,4	2021
NORTH AMERICA	MEXICO	20,6	2017

EURO exchange rate adapted in september 2021.  
1 EURO = 1.16 USD

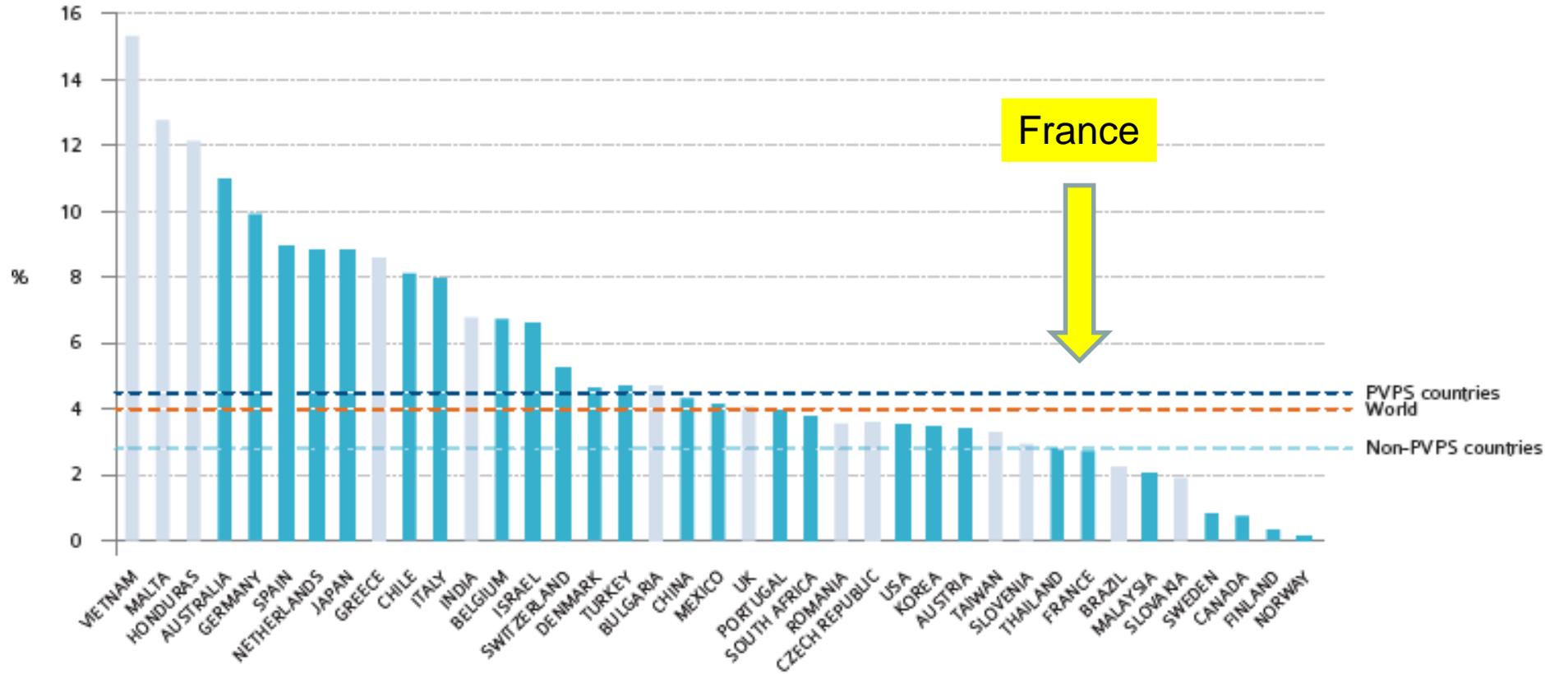
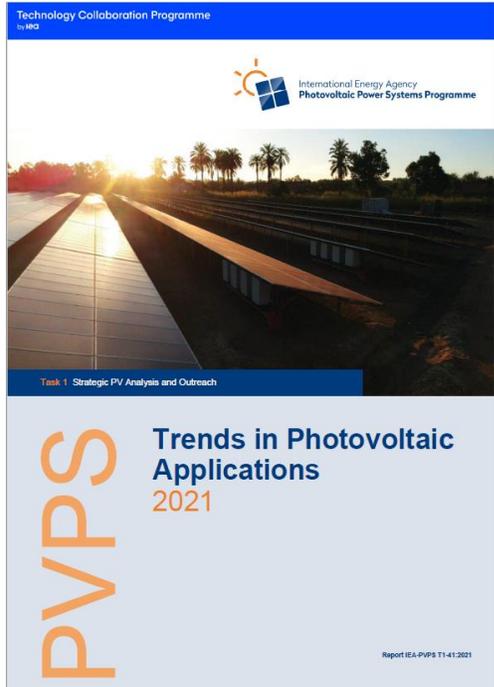
SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

Annual PV installations (GW)  
+31% YoY growth

Turnover PV  
160 Billion USD

CO<sub>2</sub> avoided  
860 MT CO<sub>2,eq</sub>

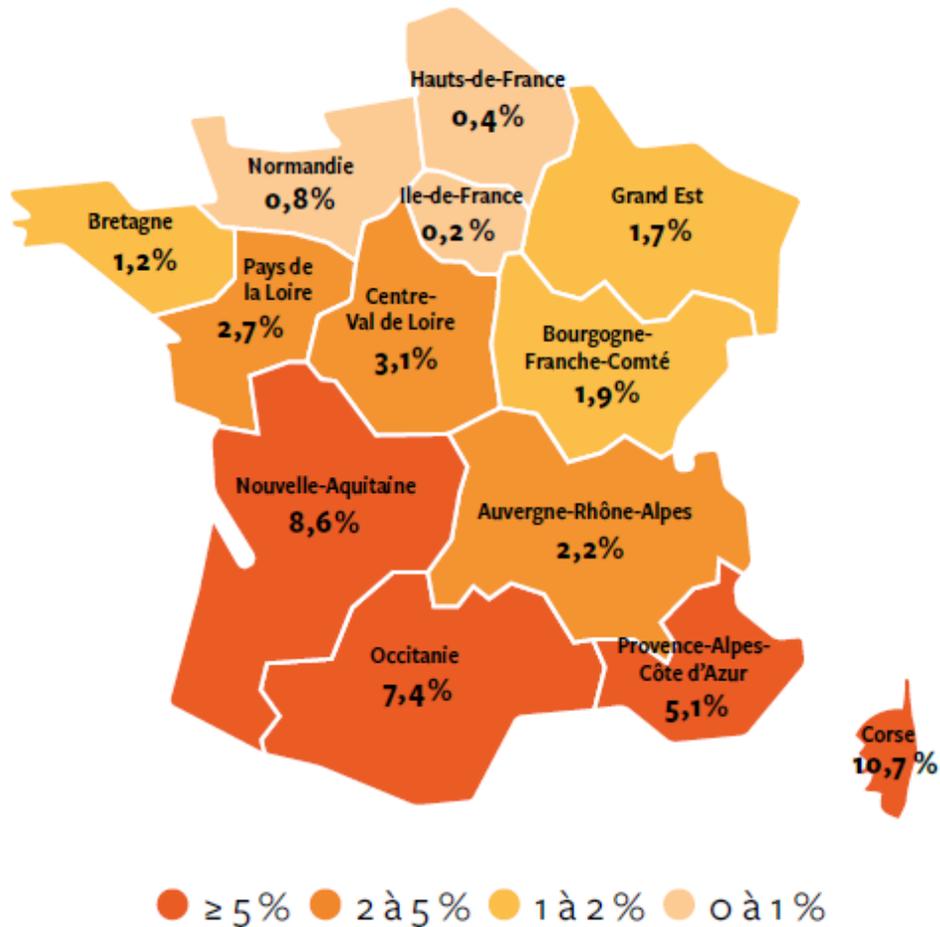
## Contribution de photovoltaïque à la demande électrique dans le monde



<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-1.pdf>

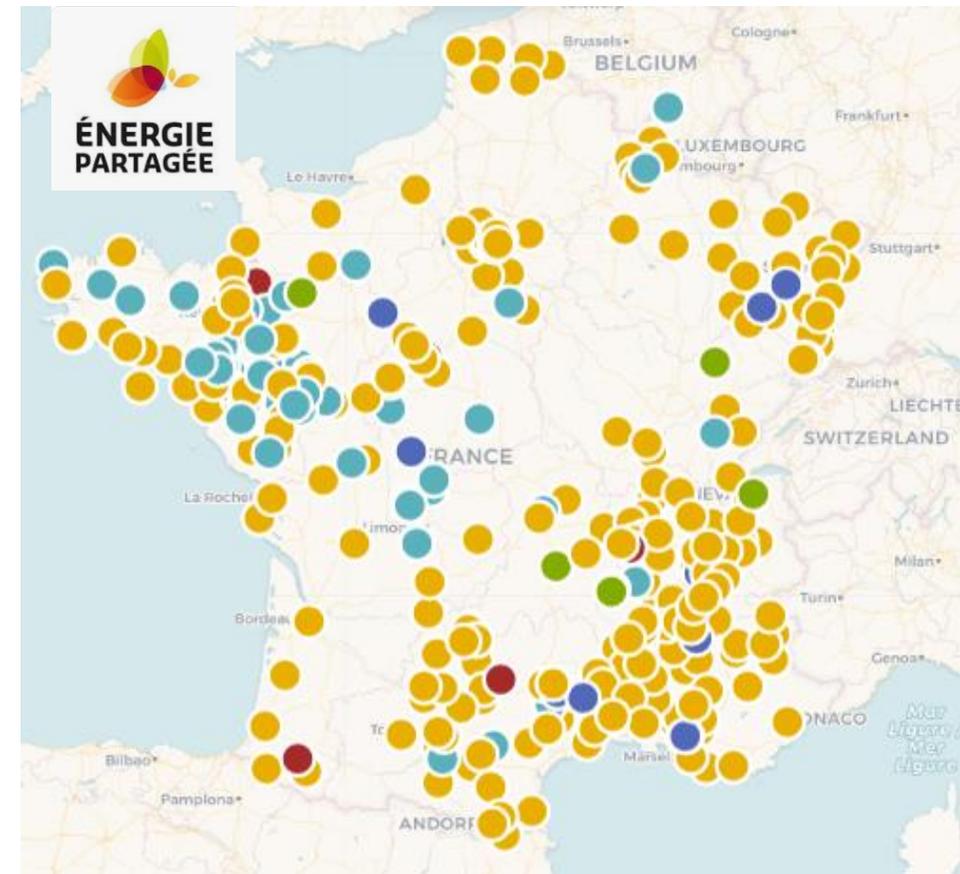
# Le Solaire en France aujourd'hui

La situation au 30 juin 2021



Les initiatives citoyennes

<https://energie-partagee.org/>



### Chinese PV Industry Brief: Jinko switches on 8 GW TOPCon factory, Tongwei announces skyrocketing profits

By Vincent Shaw on Jan 7 2022, 2:01pm



Solar manufacturer JinkoSolar announced on Wednesday that its 8 GW TOPCon cell factory in the Anhui Province has started manufacturing activities. Polysilicon supplier and solar cell maker Tongwei announced on Thursday it expects to achieve a net profit of up to RMB 8.5 billion (\$1.33 billion) with a YoY increase of around 136%

# Aspect fondamentaux à prendre en compte

Analyse du cycle de vie

Temps de retours énergétique

Recyclage

Matériaux critiques

Impact environnemental

Santé

Acceptabilité sociale

Modèles économiques innovants

(ex: économie citoyenne, économie circulaire...)

Convergences : PV stockage, mobilité, réseau, internet...

# Des innovations à toutes échelles et pour toutes sortes d'applications

## Milieu Urbain



## Agriphotovoltaïque



## Avion solaire



## Solaire au sol



## Photovoltaïque flottant



## Grandes installations



## PV flexible Design



## PV Flexible Voiles solaires Applications mobiles



## MERCI

Je n'aurais pas été là si : CNRS, Chimie Paristech PSL, EDF, IPVF...  
et toutes les rencontres...

Fédération de recherche Photovoltaïque: FedPV



Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)

Fédération de recherche sur l'énergie solaire : Fedesol

Archives → <https://jnpv.geeps.centralesupelec.fr/>

Groupe de recherche carburants solaires : GDR Solar fuels

*Article de presse avec photo de groupe 2012*



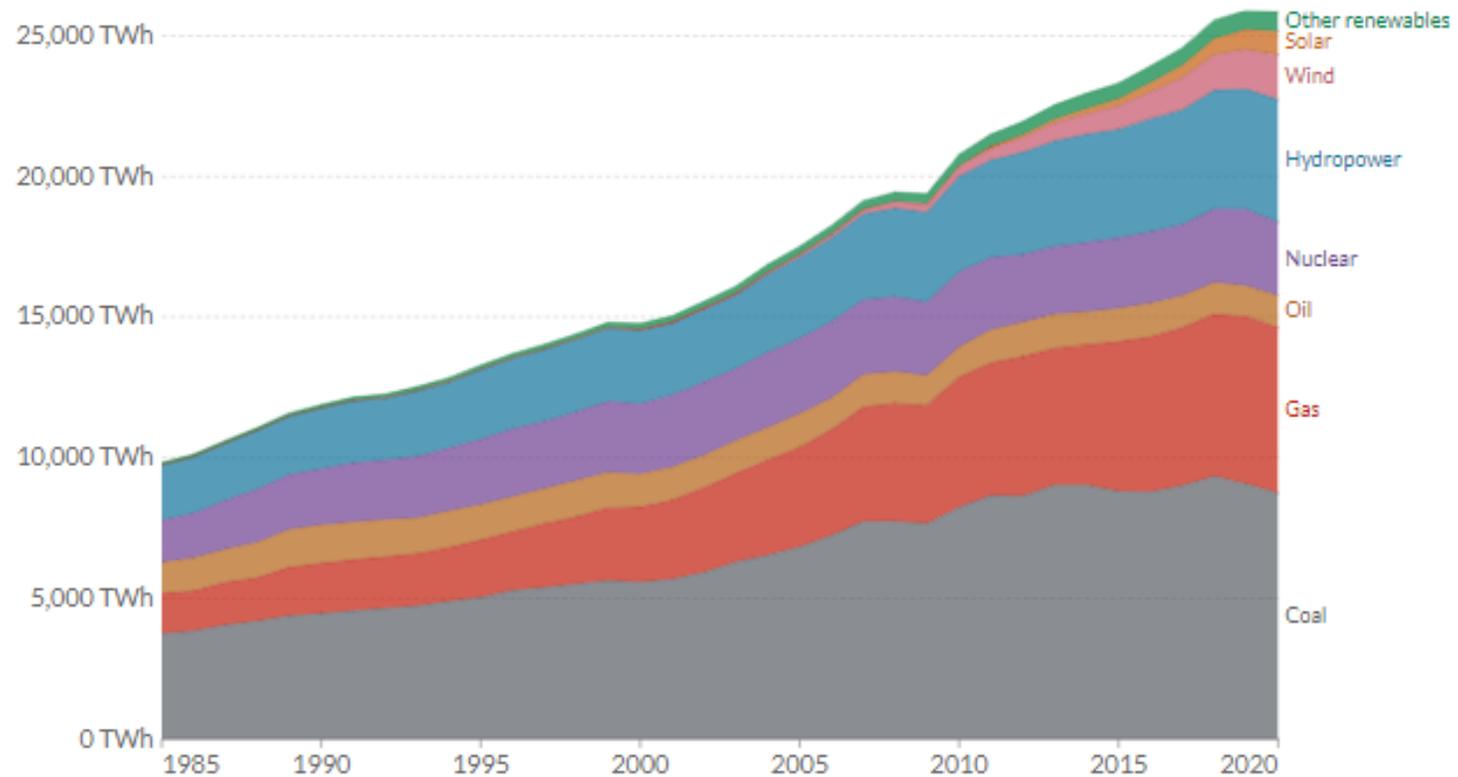
Transparents de réserve

<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>

### Electricity production by source, World

Our World  
in Data

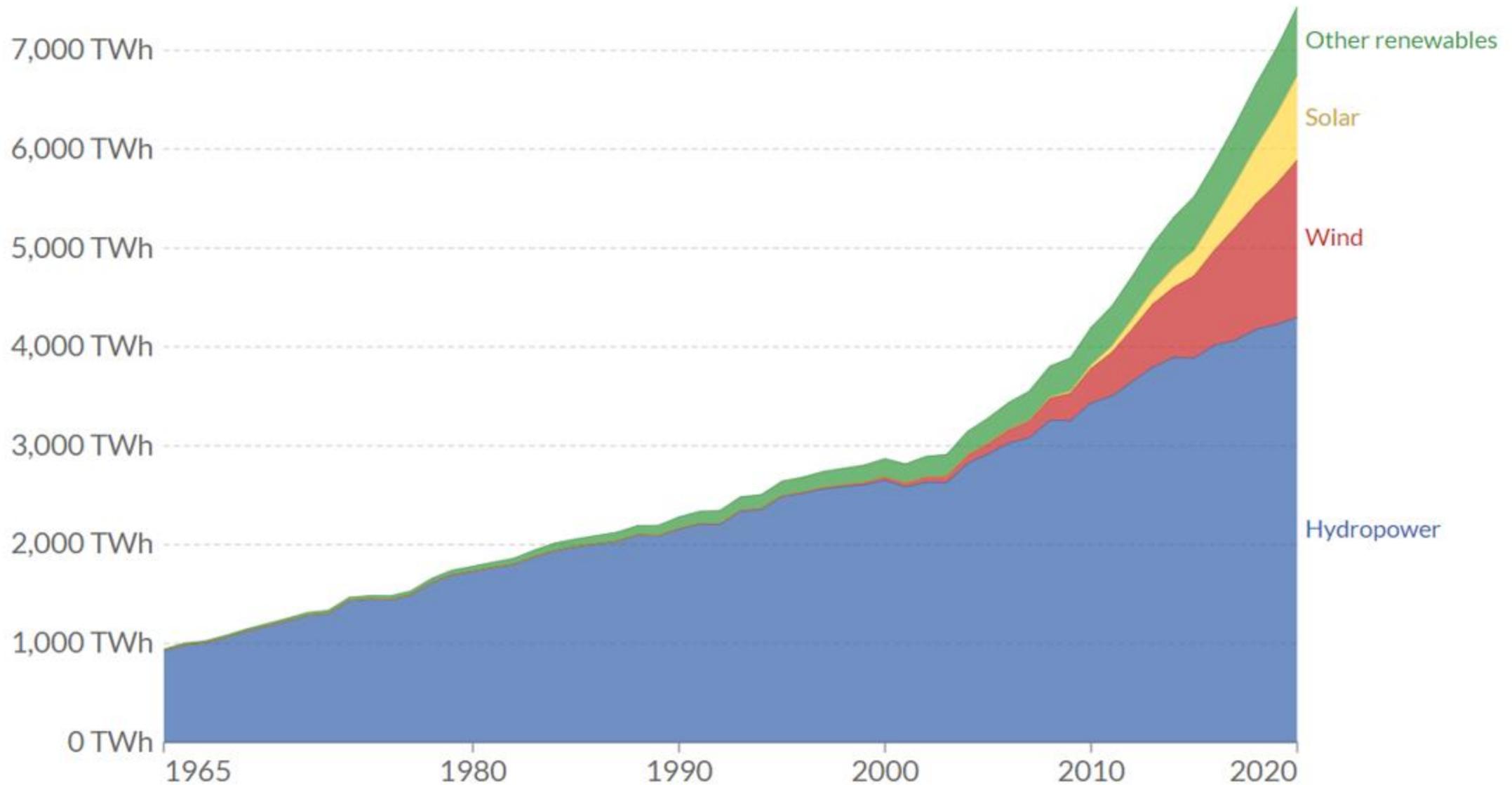
Change country Relative



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2021)  
Note: 'Other renewables' includes biomass and waste, geothermal, wave and tidal.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

## Evolution de la production électrique mondiale annuelle par source (en TWh)



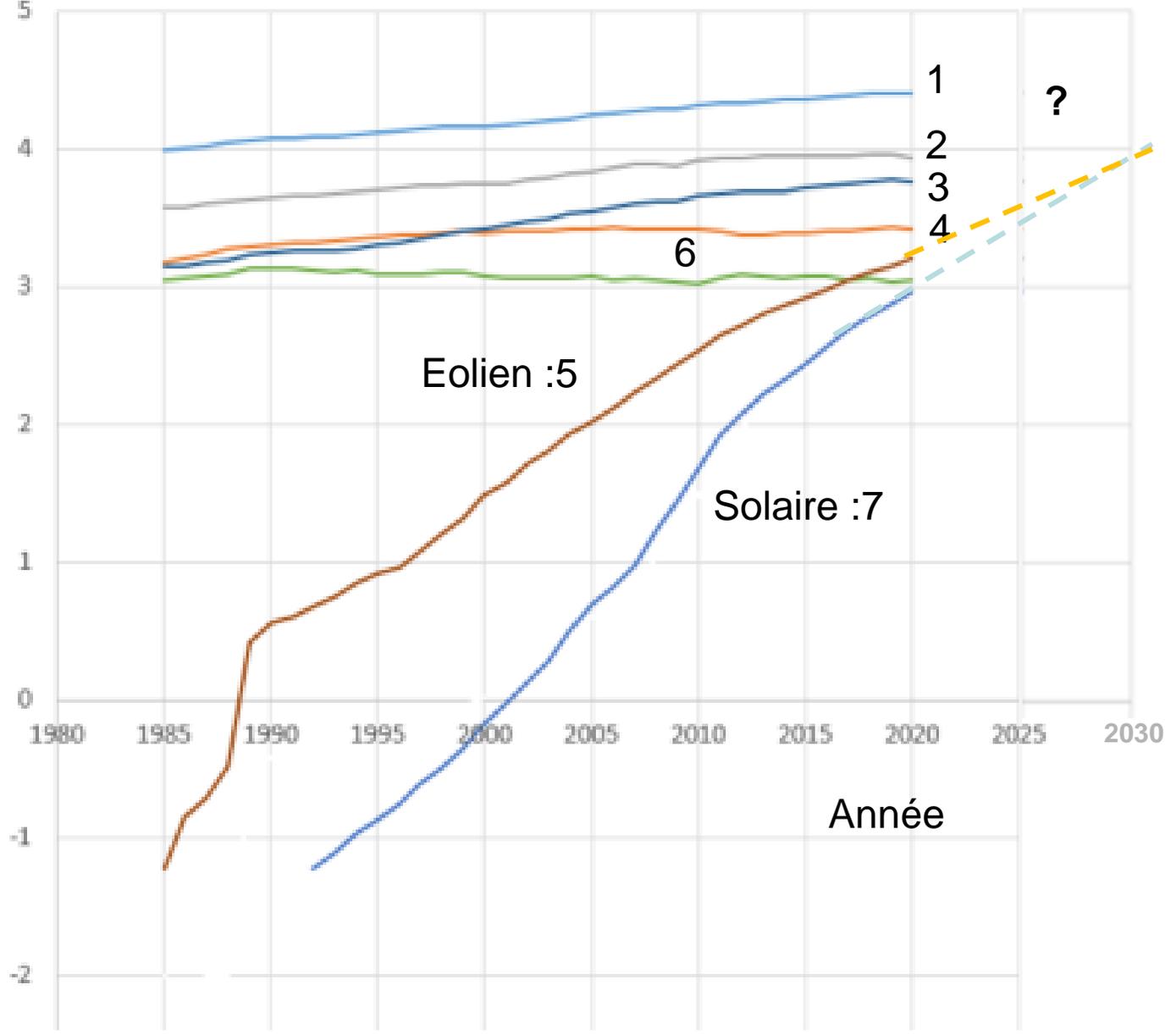
Source: BP Statistical Review of Global Energy

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Note: 'Other renewables' refers to renewable sources including geothermal, biomass, waste, wave and tidal. Traditional biomass is not included.

# Evolution de la production électrique mondiale annuelle par source (en TWh)

Log (TWh)



- 1-Production totale
- 2-Charbon
- 3- Gaz
- 4-Nucléaire
- 5-Eolien
- 6-Pétrole
- 7-Solaire photovoltaïque

1-6 adapté de:  
<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>  
7: adapté de AIE PVPS avec 1 kW→1,2 MWh  
<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-1.pdf>