



ÉCOLE NATIONALE DES
PONTS
ET CHAUSSÉES



SciencesPo

Cycle annuel 2026

Nouvelles géographies. Maîtriser nos dépendances dans un
monde qui change

L'essor mondial du photovoltaïque: Focus scientifique et technologique

Jeudi 16 janvier 2026

DANIEL LINCOT

Directeur de recherche émérite au CNRS
Institut Photovoltaïque d'Île de France (IPVF)
Académie des technologies
Professeur invité au Collège de France 2021-2022
Daniel.lincot@chimieparistech.psl.eu

Daniel Lincot, Conférence Ihdete 16 janvier 2026

13 janvier 2026

Neoen et RTE signent un contrat pour expérimenter le grid forming de batterie

By Tecsol 13 Janvier 2026

546 0

Facebook

Twitter

Pinterest

WhatsApp



Nathalie Lemaître, DG du pôle Clients Systèmes Innovation chez RTE et Guillaume Decaen, CEO de Neoen France

92 MW / 183 MWh
Pleyber-Christ
Printemps 2026

« Nous sommes très fiers de pouvoir lancer cette expérimentation unique en France. Avec cette innovation, nous apportons aussi la preuve que nos actifs renouvelables peuvent contribuer au système électrique non seulement en produisant et en stockant l'électricité mais aussi en fournissant les services essentiels au fonctionnement des réseaux électriques » confie Guillaume Decaen, CEO France de Neoen.

Daniel Lincot, Conférence Ihedate 16 janvier 2026

Leçons inaugurales
du Collège de France

—
Daniel Lincot

Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



COLLÈGE
DE FRANCE
— EDITIONS —

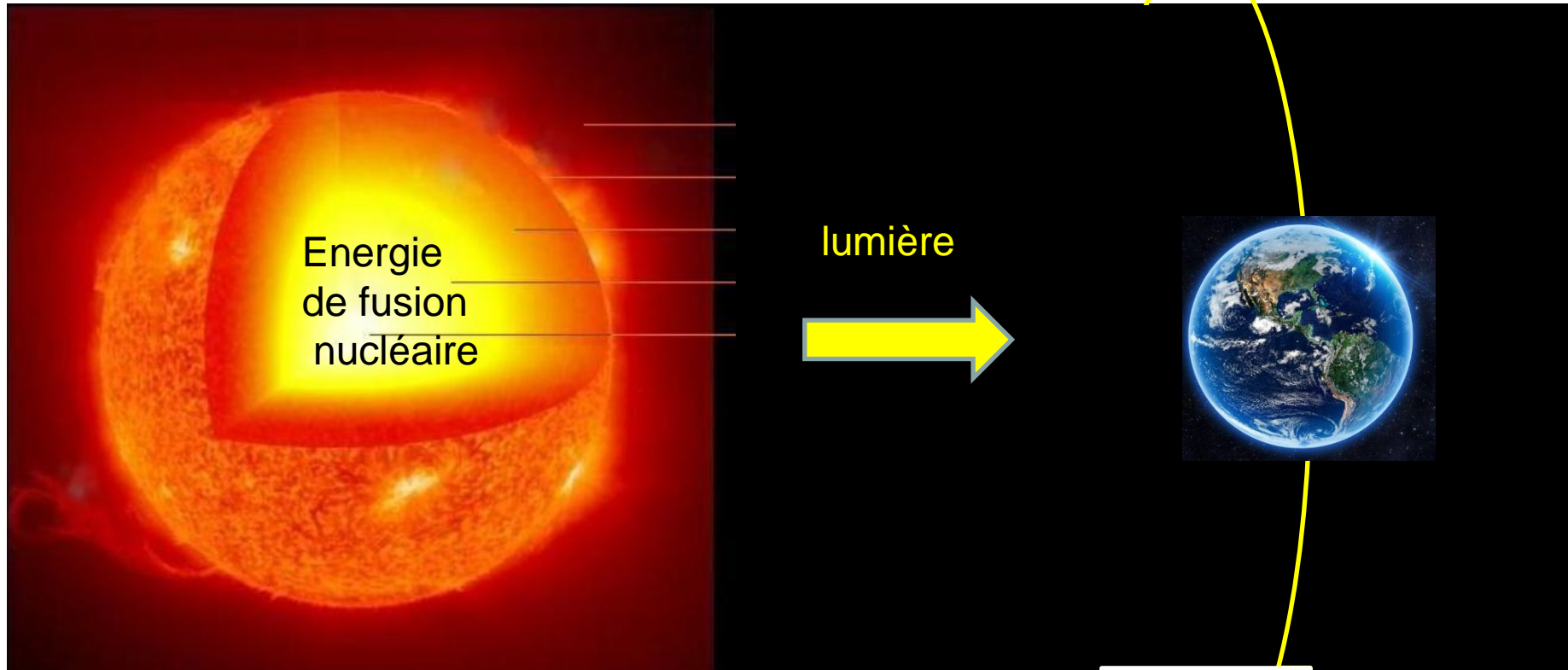
La Terre baigne dans un océan d'énergie, celle de la lumière du Soleil. De nature extraterrestre, illimitée à notre échelle, celle-ci échappe de fait à la finitude des ressources terrestres. Elle alimente depuis la nuit des temps les rêves de l'humanité d'une utilisation universelle et pacifique. La conversion photovoltaïque, grâce aux cellules solaires, permet pour la première fois dans l'histoire la transformation directe de l'énergie des photons en électricité. De sa découverte en 1839 à son formidable essor actuel, cette leçon inaugurale retrace l'histoire de sa longue progression scientifique, technologique et sociale. Pressentie comme le futur pilier de la transition énergétique, l'énergie solaire permet d'envisager le passage d'un Anthropocène destructeur à un Hélicocène réparateur.

<https://www.youtube.com/watch?v=UhjWEmeCpXo>

Daniel Lincot, Conférence lhedate 16 janvier 2026

<https://www.college-de-france.fr/fr/chaire/daniel-lincot-innovation-technologique-liliane-bettencourt-chaire-annuelle>

Soleil ← 150 millions de km → **Terre**
Diamètre 1,5 million de km Diamètre 12600 km



627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent en une seconde

Puissance libérée : $3,8 \cdot 10^{26}$ W

Puissance interceptée par la terre :

$1,7 \cdot 10^{17}$ W = 170 000 TW → 120 000 au niveau du sol

Puissance consommée par l'humanité : 17 TW soit 148000 TWh

Rapport : 10 000 → 7000 au niveau du sol

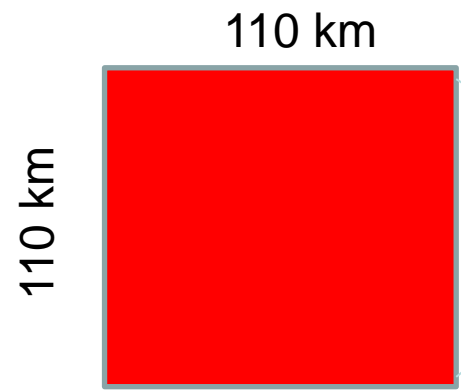
Puissance reçue par m² : 1360 W

Comparaison ressource solaire / consommation Humanité (17 TW)

Puissance solaire espace

1360 W/m²

12500 km²



Puissance solaire au sol

1000 W/m²



Moyenne : 200 W/m²

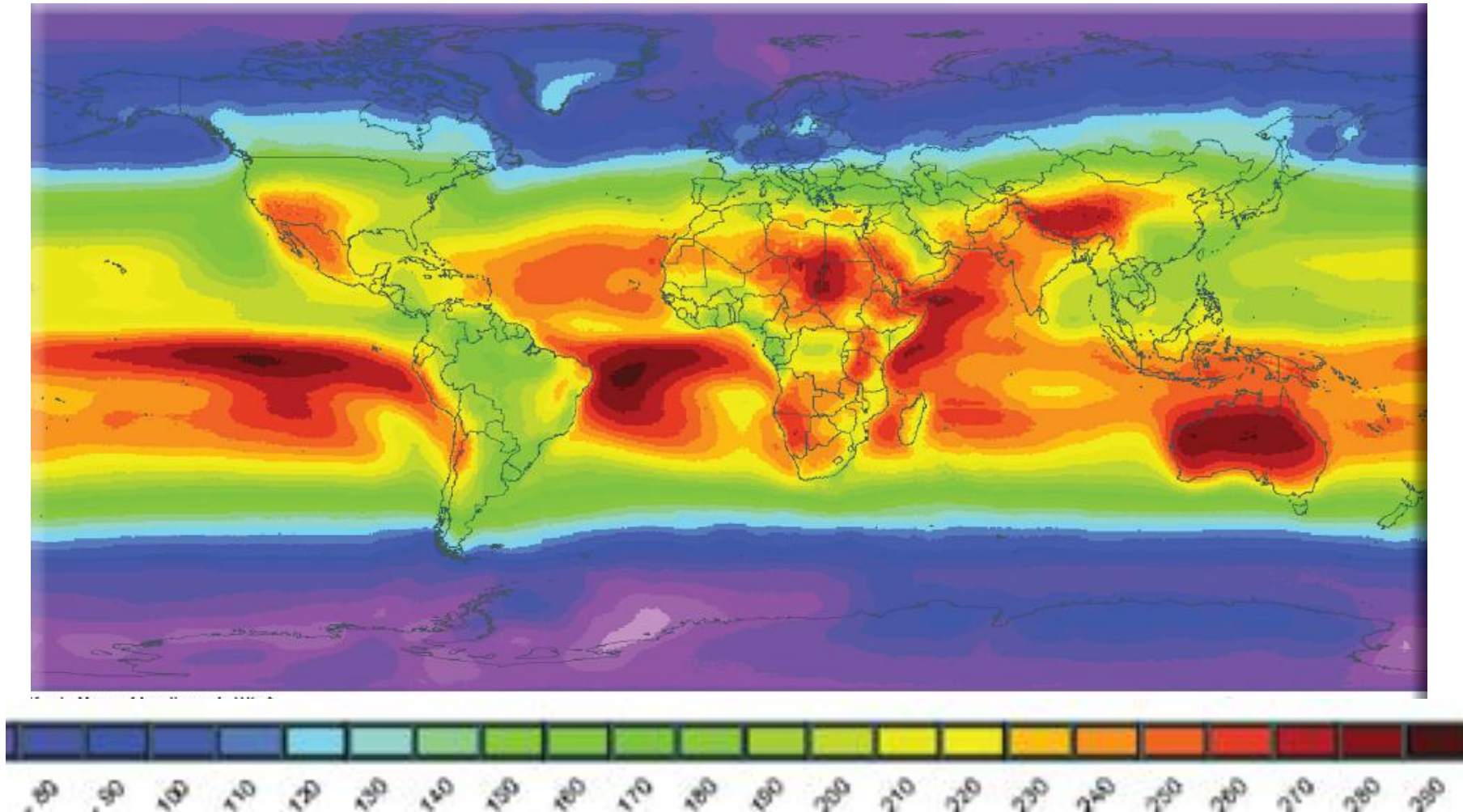
17 TW → 85 000 km²
Surface : 290 km x 290 km

Convertisseur R=20%
425 000 km²
650 km x 650 km

Consommation
primaire finale France
1562 TWh / 0,18 TW
(elec. 500 TWh / 570 GW
→ 4000 km²)

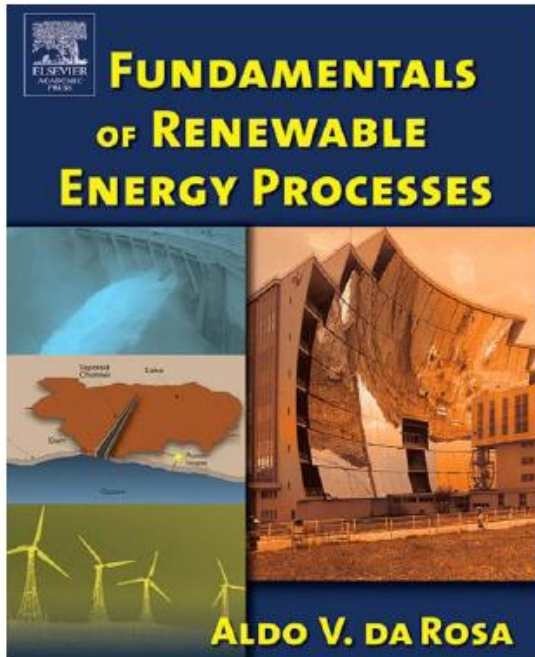
Source Larousse

Irradiation moyenne au niveau du sol en Watt/m²



Energie associée sur une année : $E=P \cdot \text{temps}$

1,26 MWh/m² en France, 2,5 MWh/m² en Australie, 0,87 MWh nord de l'Europe



7000 fois
La puissance
consommée
par l'humanité

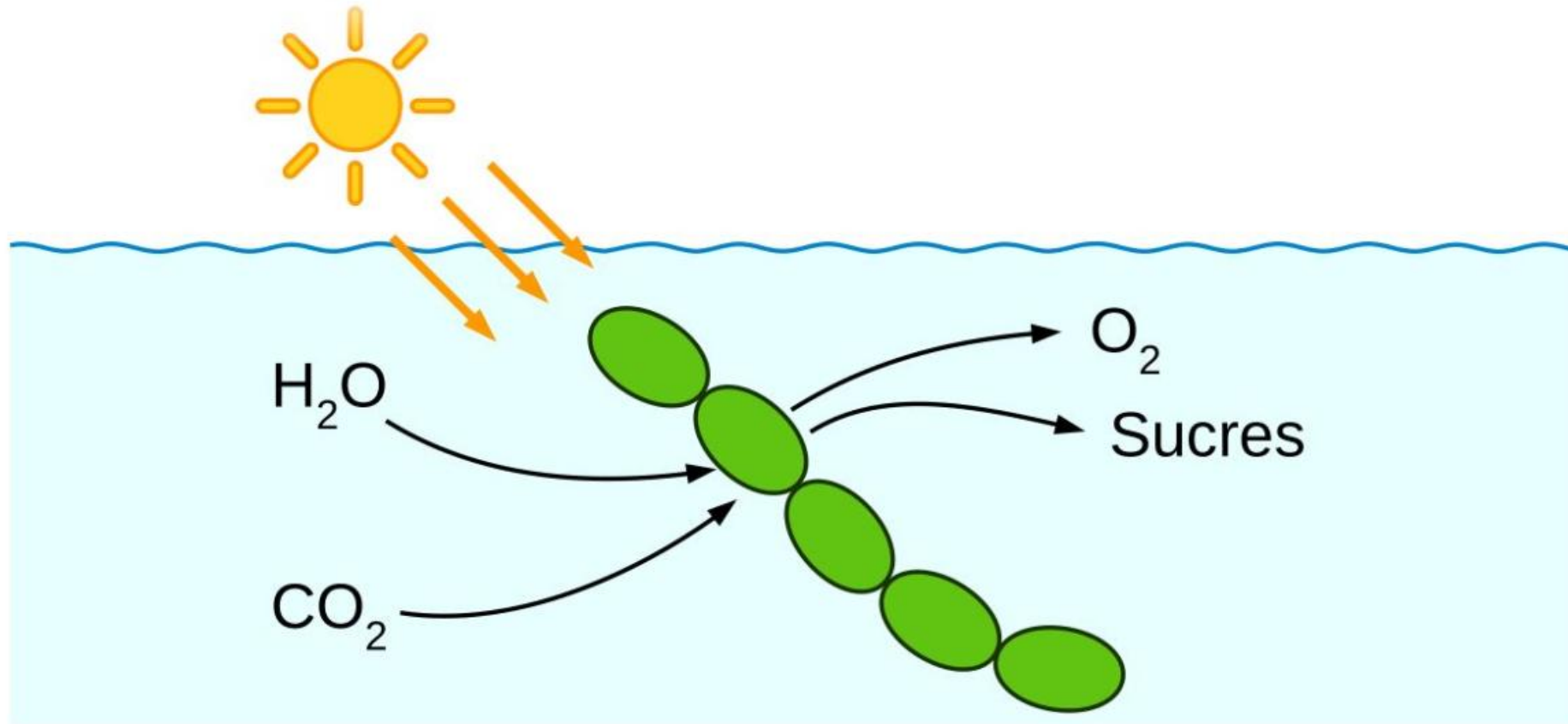
Tableau - Bilan énergétique à la surface de la Terre
(1 TW = 10^{12} watts) (d'après [1]).

Puissance solaire incidente (hors atmosphère)
173 000 TW

Réflexion directe	52 000 TW (30 %)
Conversion directe en chaleur	78 000 TW (45 %)
Évaporation de l'eau	39 000 TW (22 %)
Vent et vagues	3 600 TW (2 %)
Photosynthèse	40 TW (0,02 %)

Marées : 3 TW

Géothermie : 32,3 TW



Photosynthèse par une cyanobactérie.

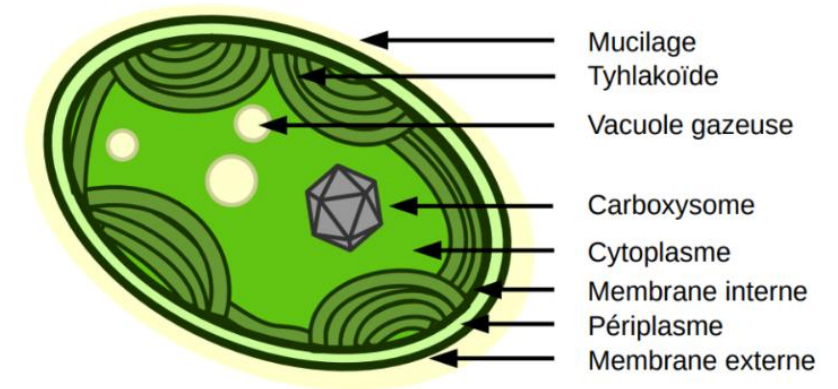
L'importance des ancêtres des cyanobactéries dans l'histoire de la Terre

La **photosynthèse** oxygénique, avec la production de dioxygène (O₂) est apparue chez l'ancêtre des cyanobactéries modernes. Cette invention a conduit il y a 2,4 milliards d'années à une production importante de dioxygène dans l'atmosphère terrestre. Cet événement appelé la grande oxygénation est visible via des **minéraux** ayant été oxydés à l'époque.



La prolifération rapide des cyanobactéries est à l'origine du "bloom" qui change la couleur de l'eau. © Maxppp -

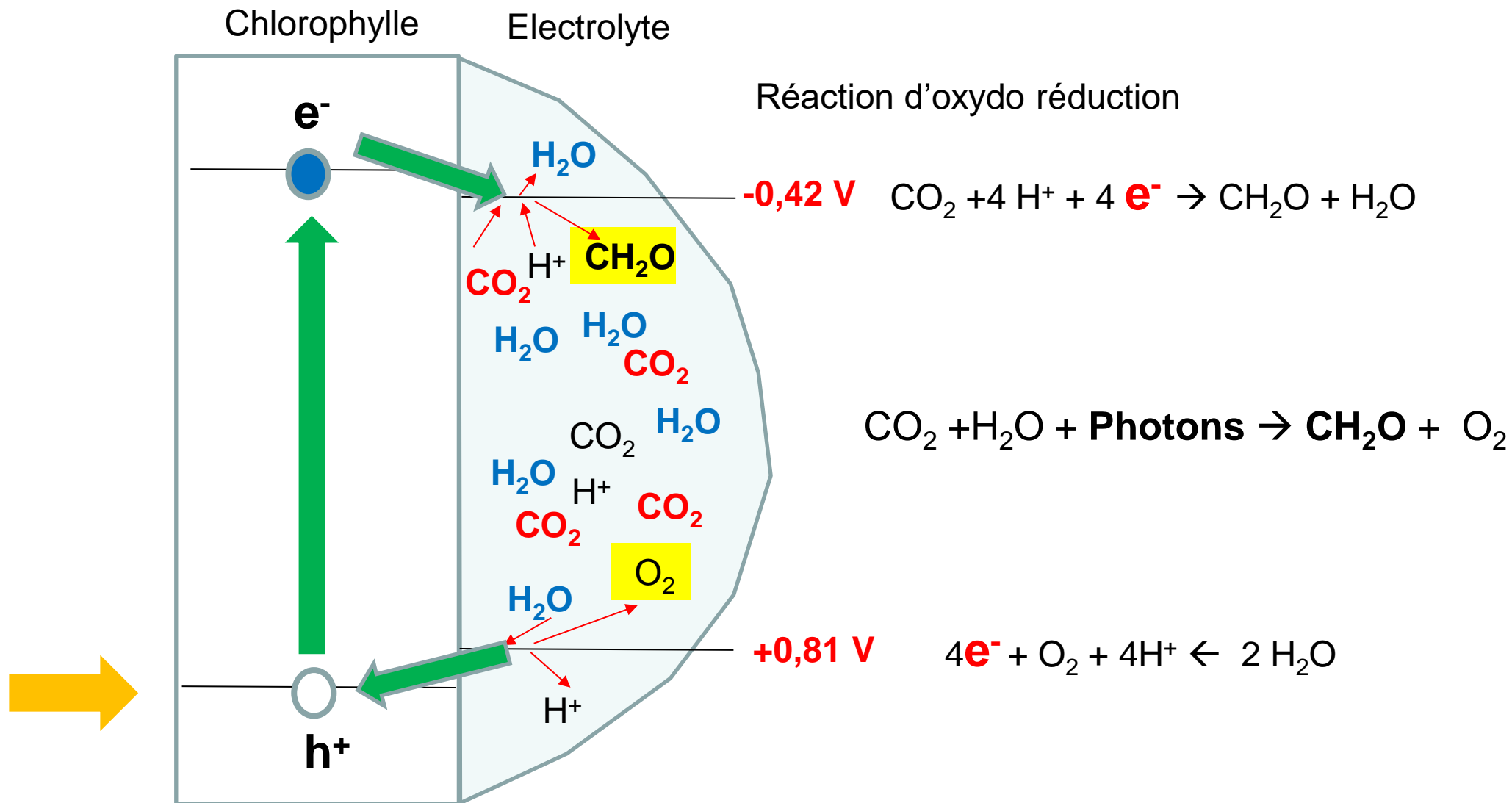
Les cyanobactéries possèdent des **pigments** comme la chlorophylle A (vert) ou la phycocyanine (bleu-vert).



Ultra-structure d'une cyanobactérie. Le cytoplasme contient des **vacuoles gazeuses** qui permettent aux cyanobactéries de flotter ainsi que des **carboxysomes** permettant la fixation du CO₂.

Les caractéristiques des cyanobactéries actuelles laissent penser que leur ancêtre est à l'origine des **chloroplastes** lors d'un événement d'endosymbiose.

La nature trouve la solution il y a 2,5 milliards d'années : La photosynthèse





Couple redox	E'0 (V)
O ₂ / H ₂ O	+ 0,82
P680 / P680 ⁺	+ 0,9
P680*/P680	- 0,8
Pheo (red/ox)	- 0,6
QA-QB(red/ox)	- 0,2
PQ (red/ox)	0
b6f (red/ox)	- 0,2 et + 0,2
P700 / P700 ⁺	+ 0,4
P700*/ P700	-1,3
Ao (red/ox)	-1,0
Fd (red/ox)	- 0,42
NADP ⁺ / NADPH	-0,32

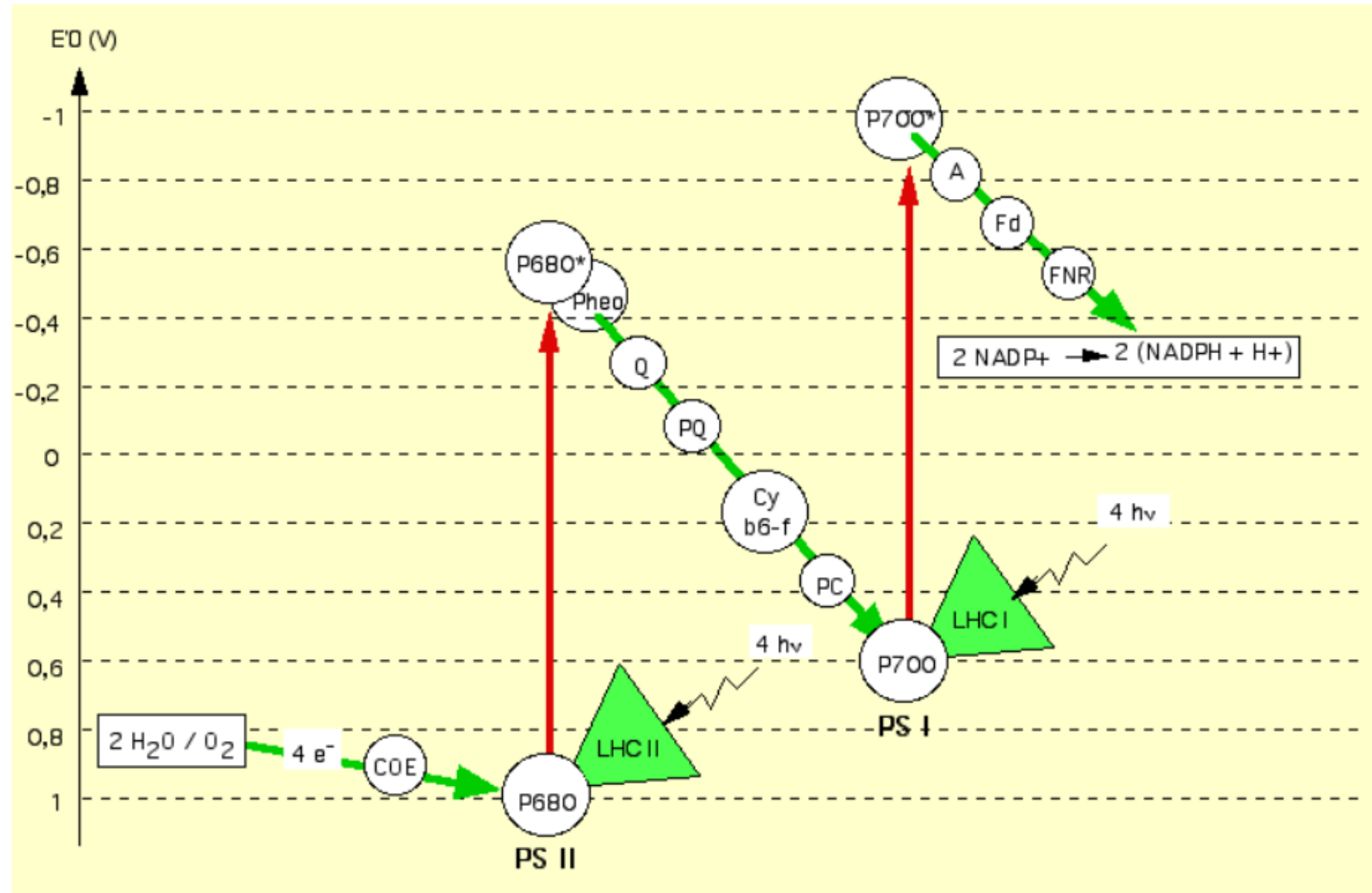
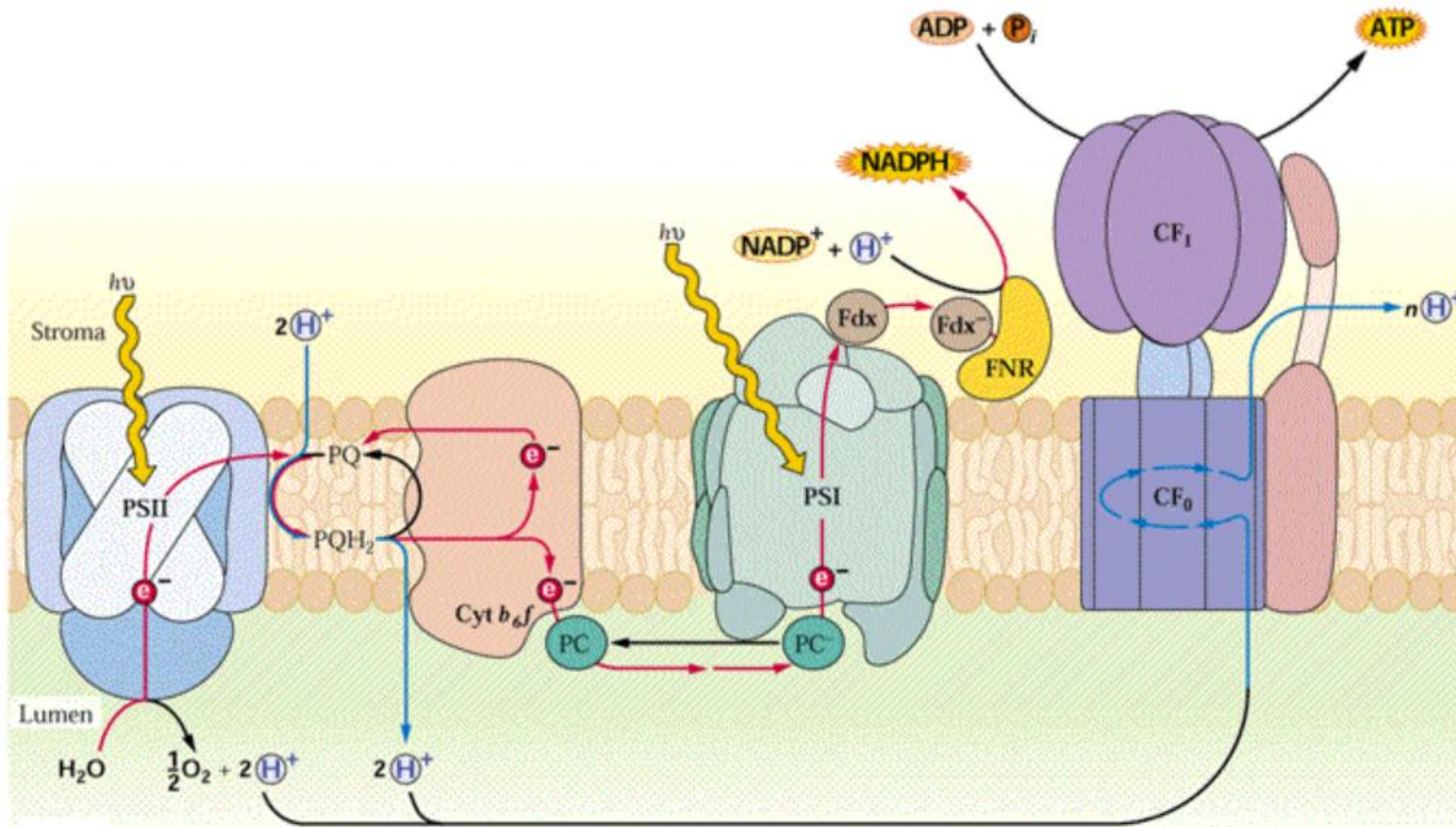
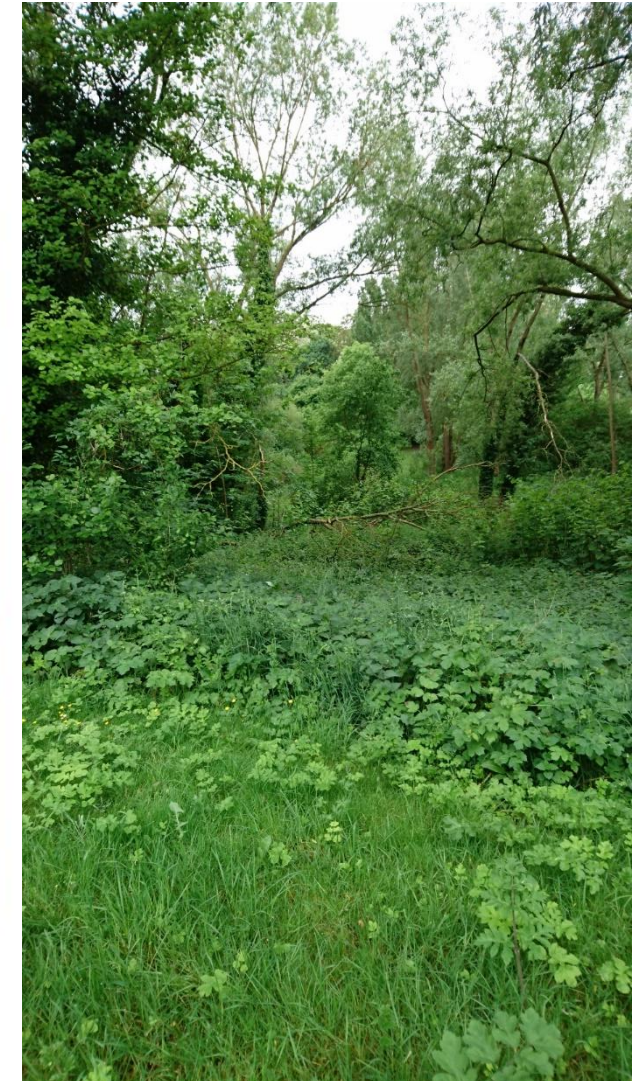


Schéma "en Z", transfert acyclique des électrons.

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



Source : "Photosynthèse" - Université Lausanne

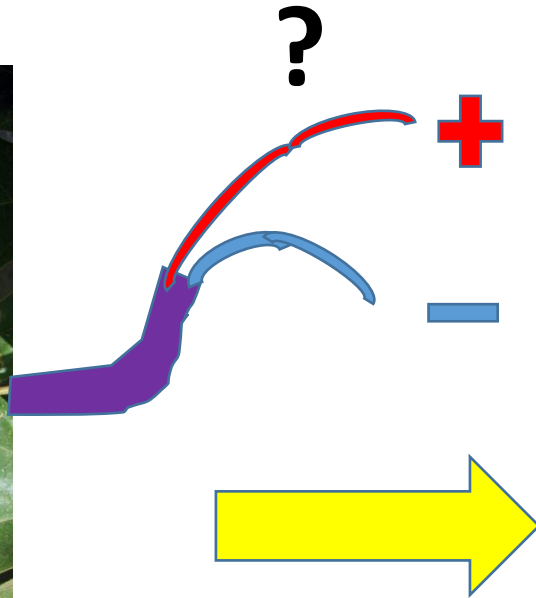


Coulée verte, Antony

l'innovation photovoltaïque

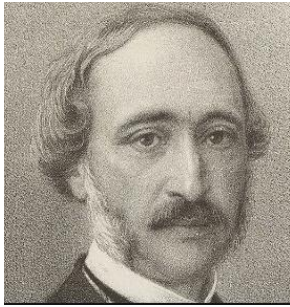


chlorophylle



Silicium

2020



Edmond Becquerel

1839

Conversion photovoltaïque



Soleil Fusion

Lumière

Chaleur

vent

Energie Eolienne

Évaporation

Energie hydraulique

Photovoltaïque
-3 Mds années

Photosynthèse

biomasse

Electricité

travail

1771

J. Priesley



40 TW

Charbon

Pétrole, gaz

Chaleur

Alternateurs

Éléments chimiques

Uranium
(fission)

1800 A. Volta

1896/1903

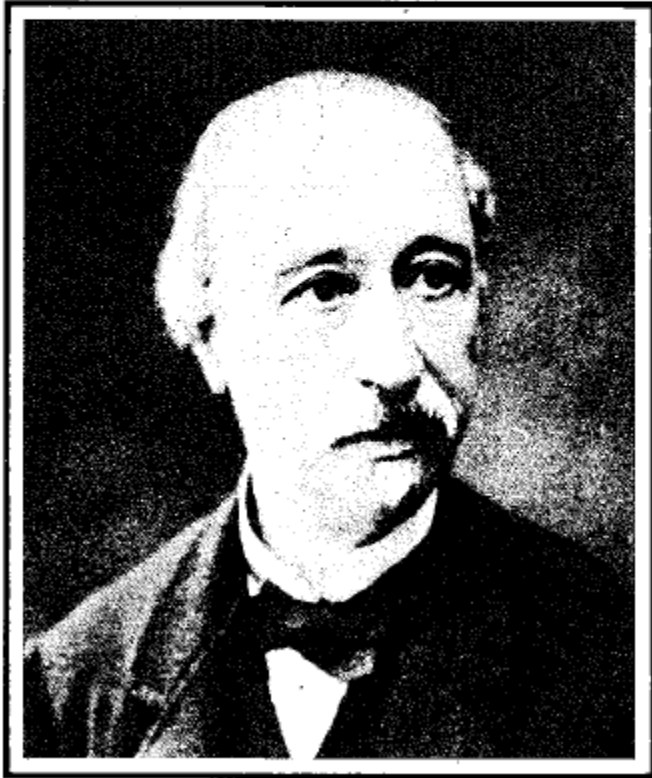


Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie



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.

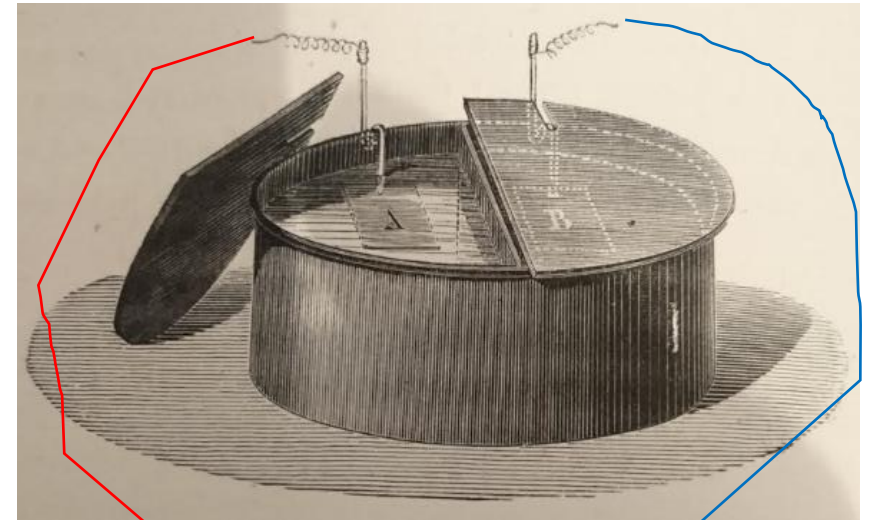
MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS
DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

MÉMOIRES LUS.

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

§ 1°. *Action de la radiation sur les lames métalliques.*

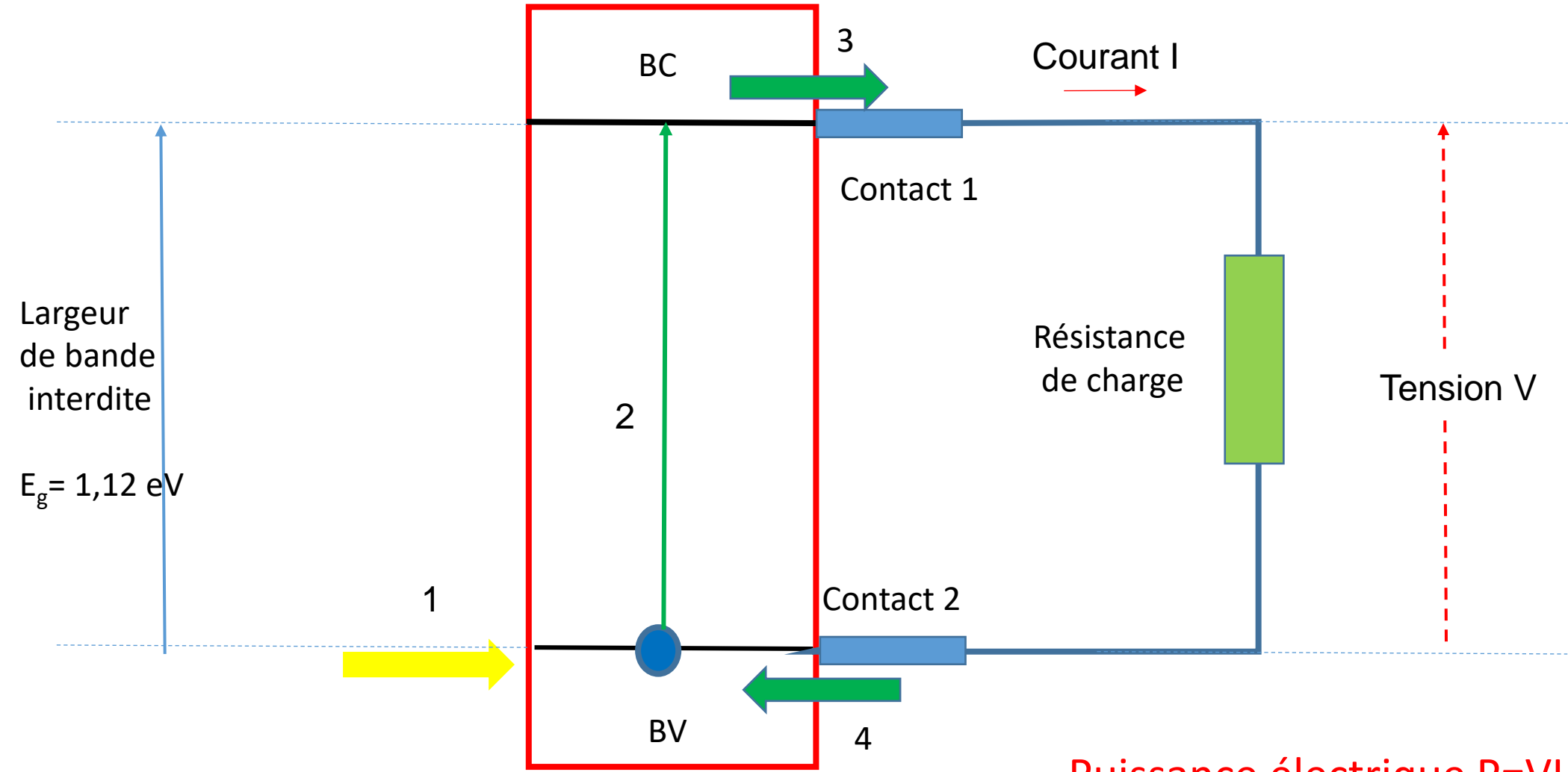
« Dans le dernier Mémoire que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie, dans sa séance du lundi 29 juillet 1839, je me suis attaché à mettre en évidence, à l'aide des courants électriques, les réactions chimiques qui ont lieu au contact de deux liquides, sous l'influence de la lumière solaire. Le 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

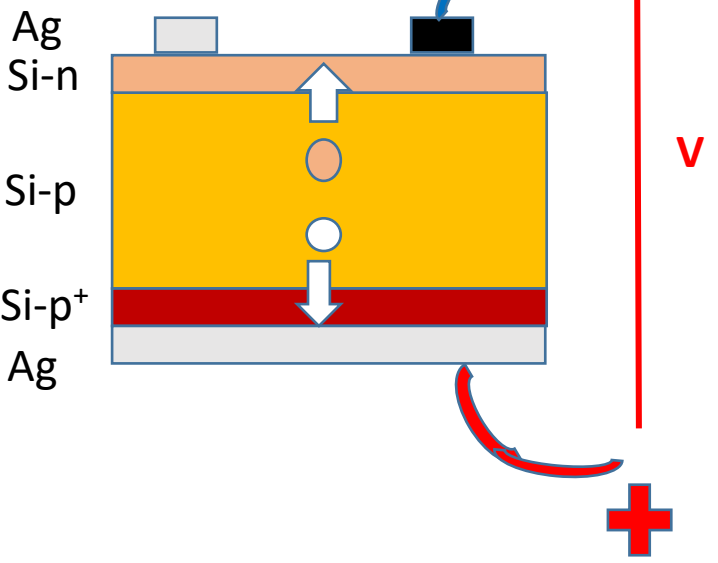
Semi-conducteurs
Silicium

Circuit extérieur

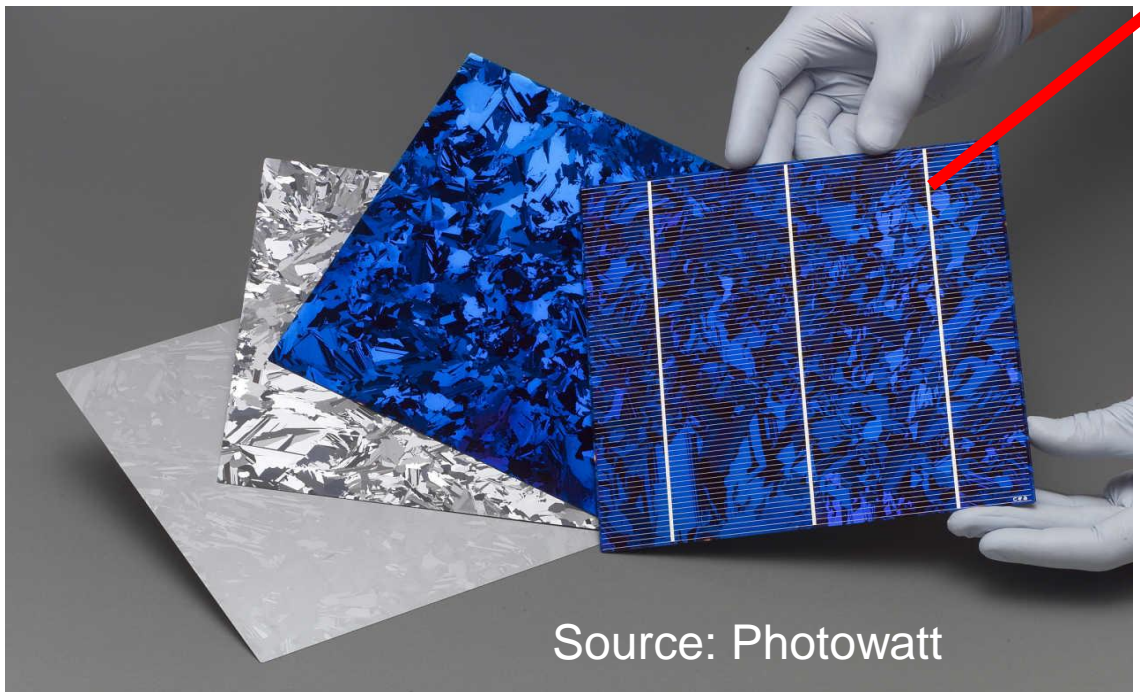


Cellule Photovoltaïque au silicium (2010)

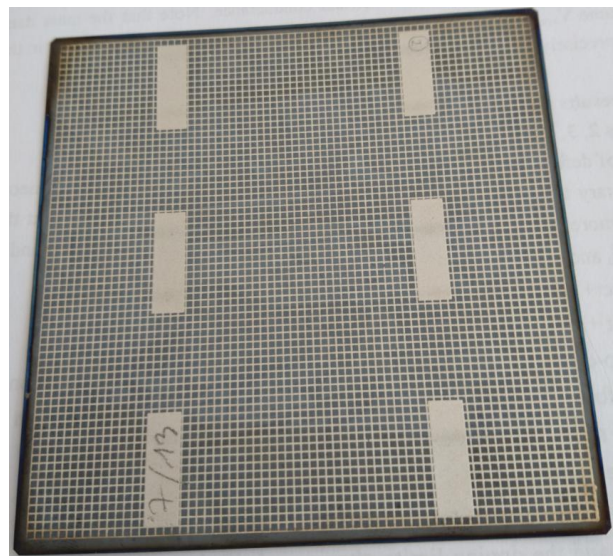
- 1-Plaquette de type p (dopage bore) brute de sciage,
- 2-plaquette découpée et avec un dopage superficiel n (phosphore)
- 3-Après couche anti-reflet (oxyde de titane)
- 4-Après dépôt de la grille de collecte des électrons photogénérés (sérigraphie à la pate à l'argent)



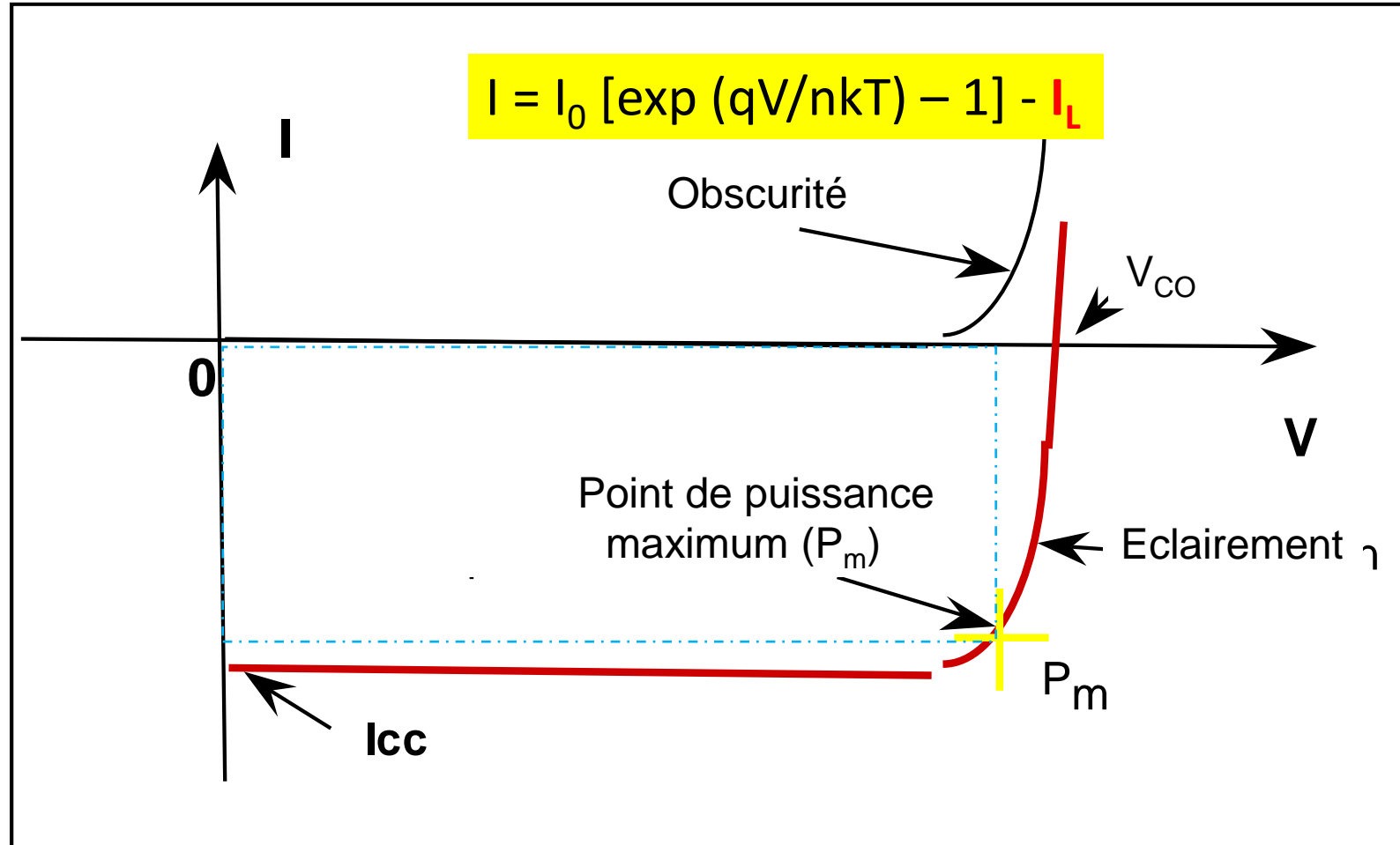
Face arrière



Source: Photowatt



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



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

FF facteur de remplissage

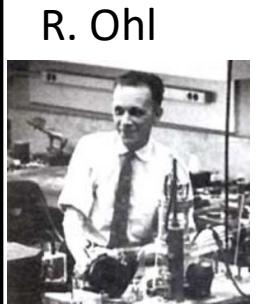
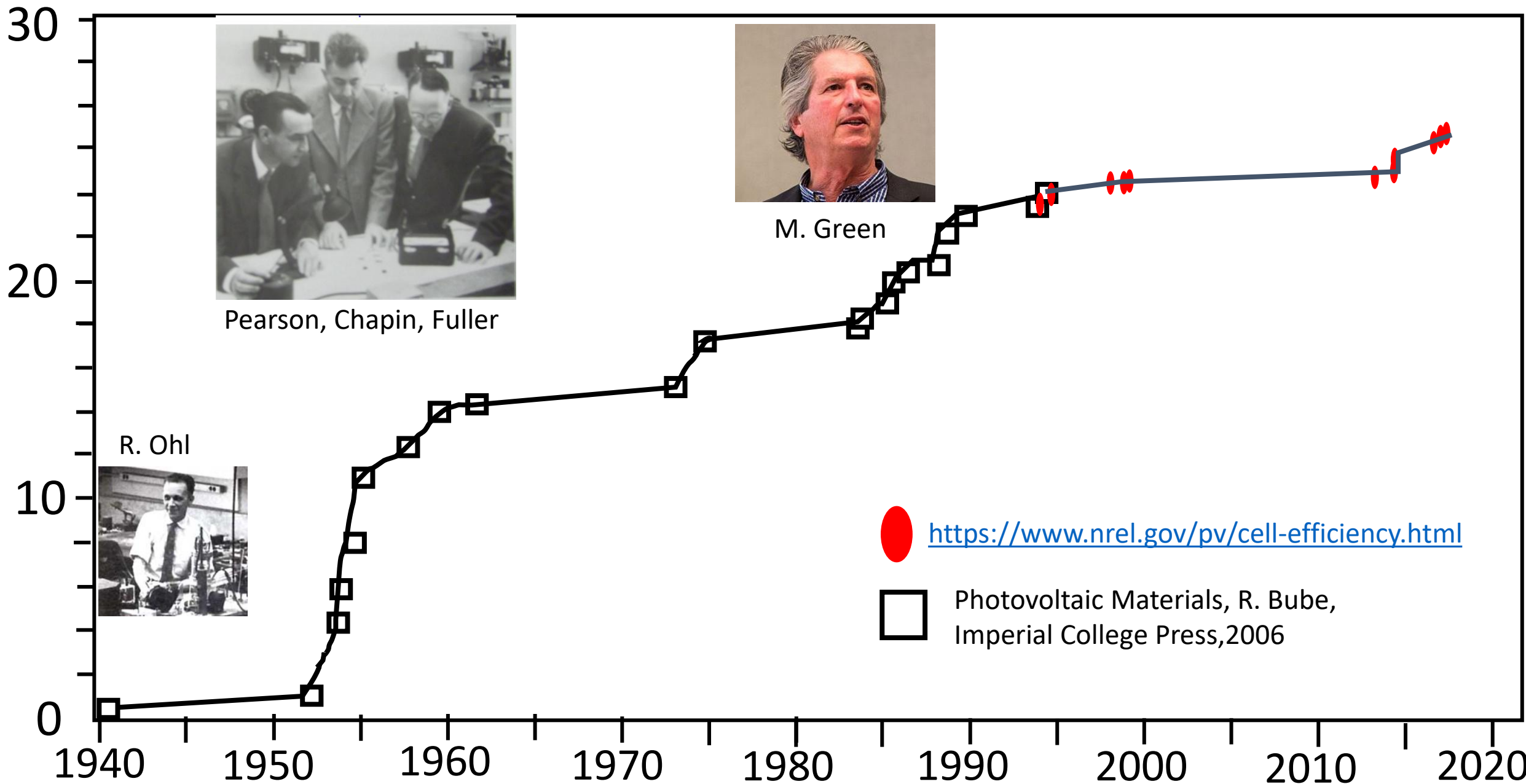
$$\text{Rendement de conversion} = P_m / P_{\text{lumière}}$$

Conditions standard 1000 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 %



R. Ohl




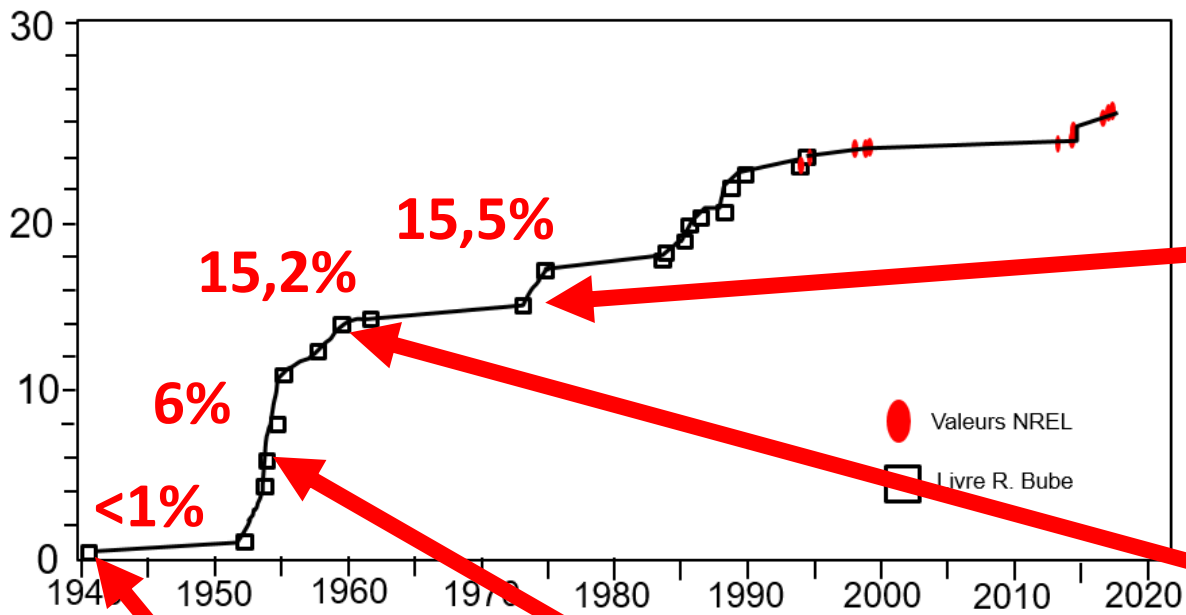
Pearson, Chapin, Fuller



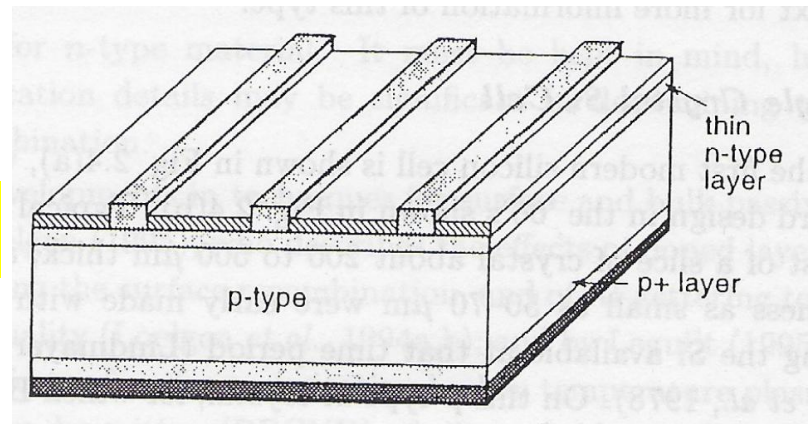
M. Green

 <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

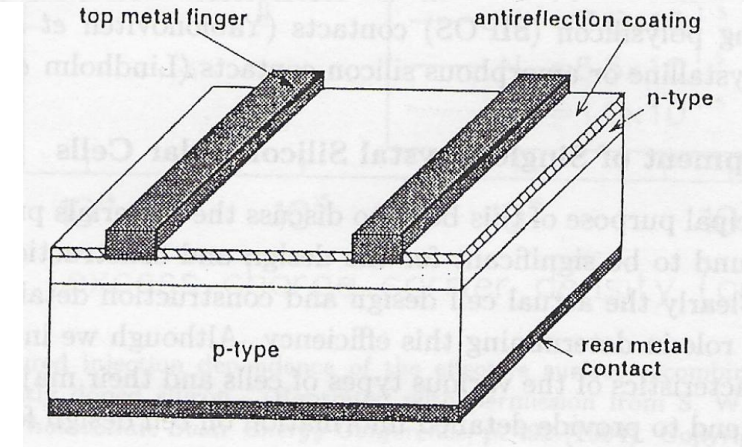
 Photovoltaic Materials, R. Bube, Imperial College Press, 2006



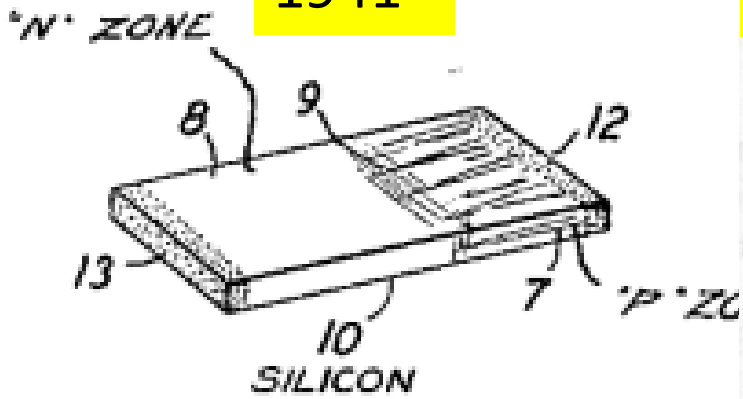
1973



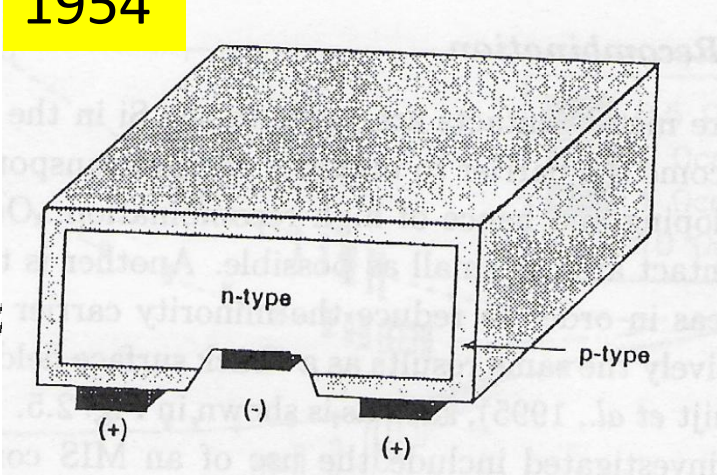
1962



1941

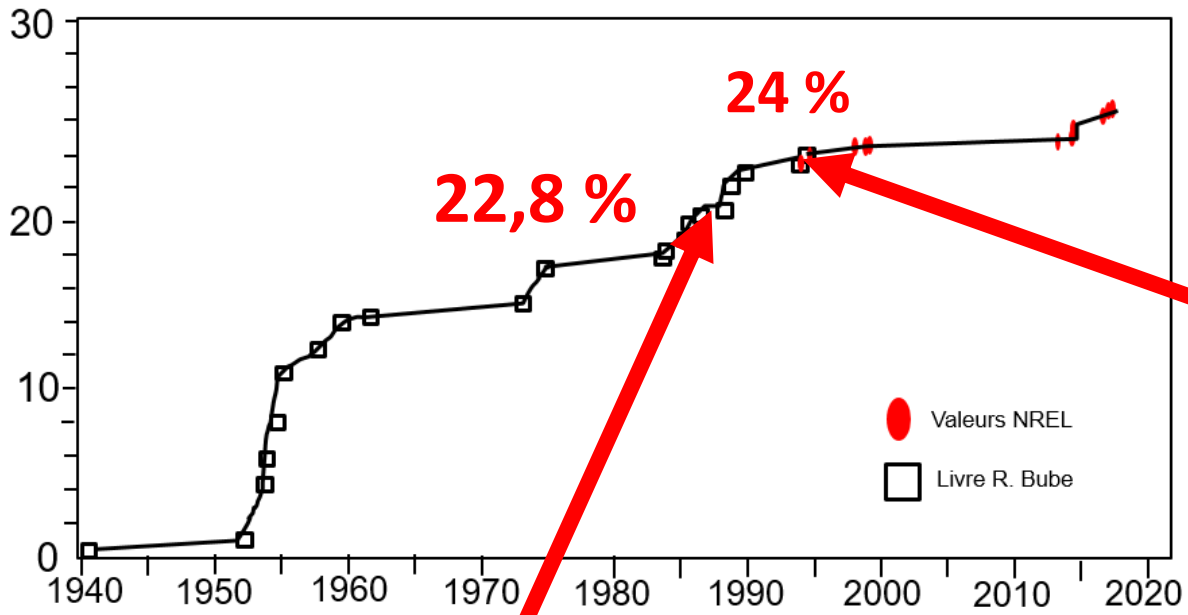


1954



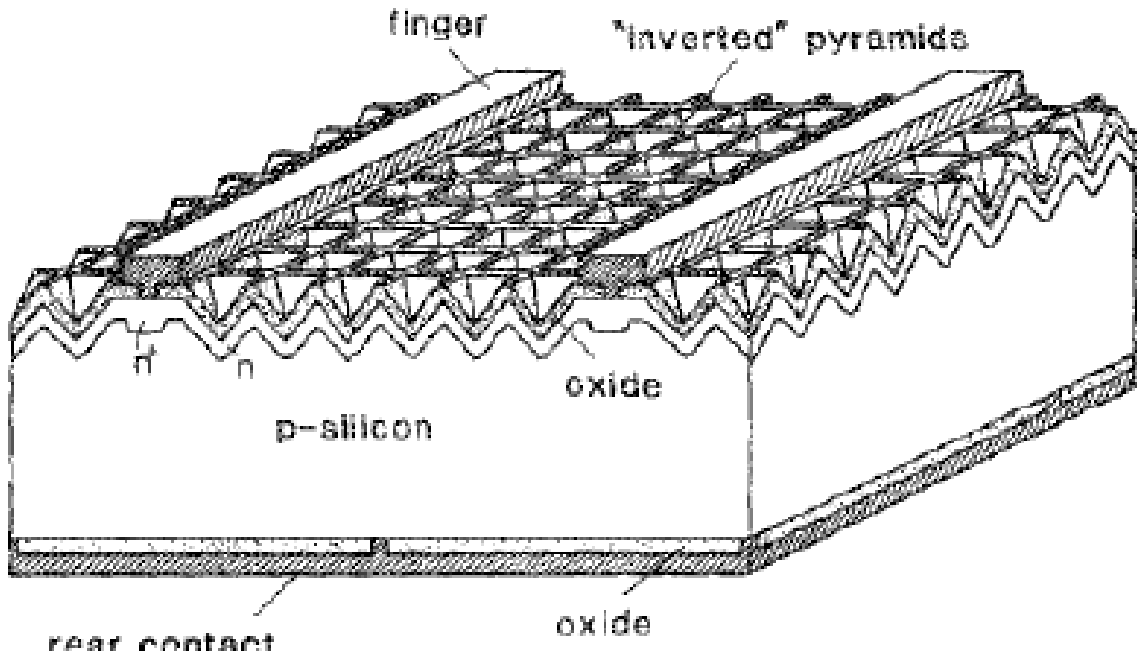
1958



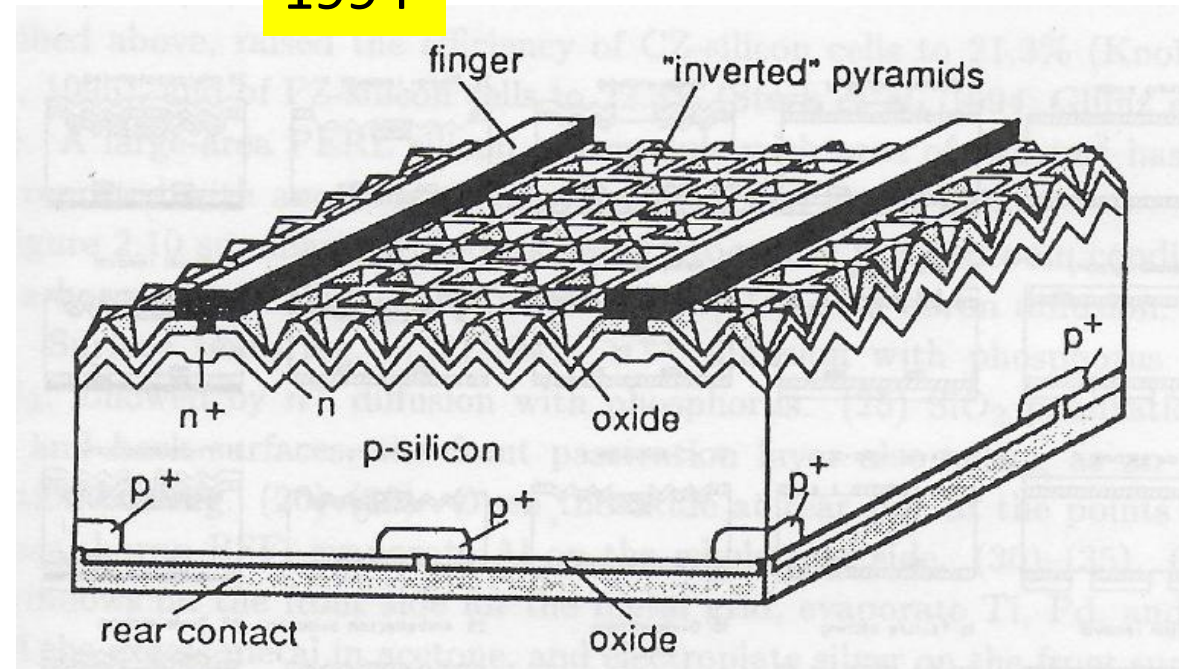


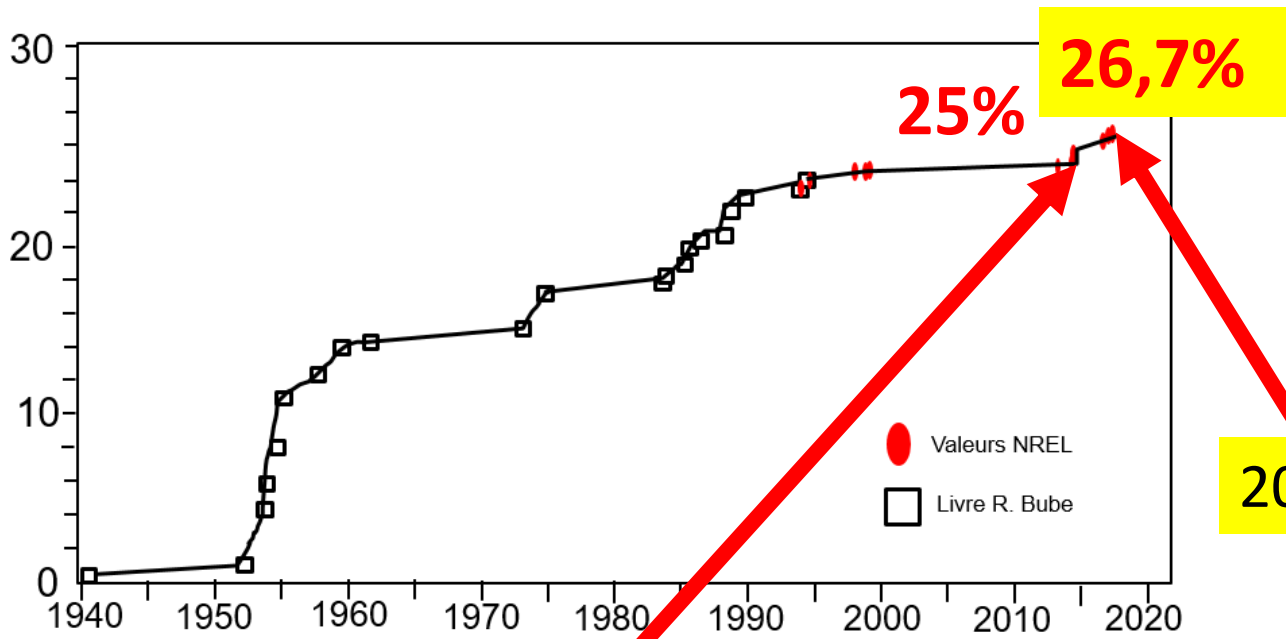
Introduction de l'architecture à émetteur passivé et contact Arrière Localement diffusé (PERL)

1989



1994



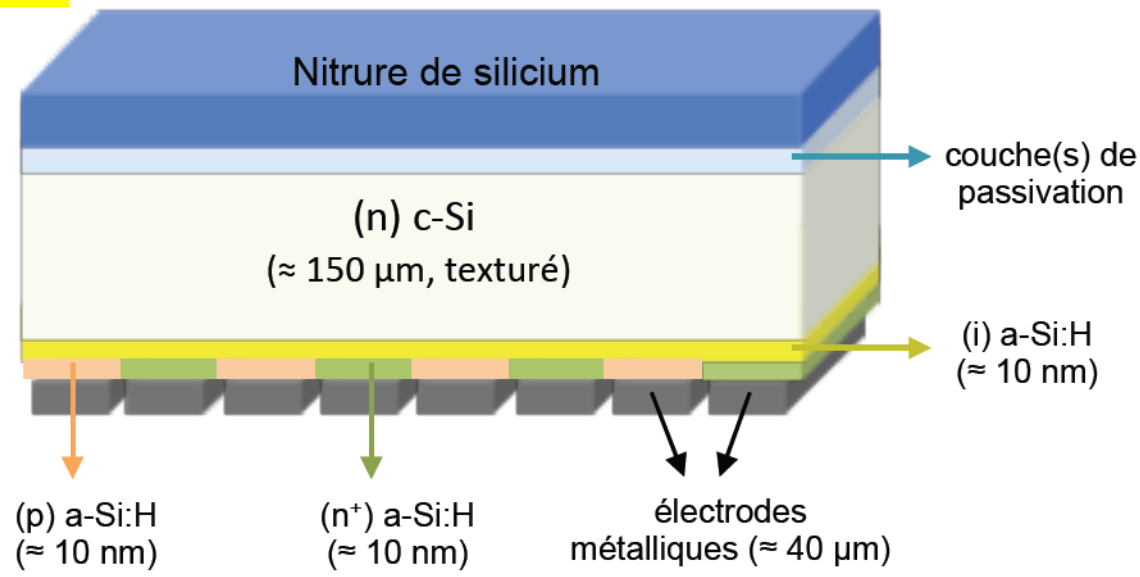
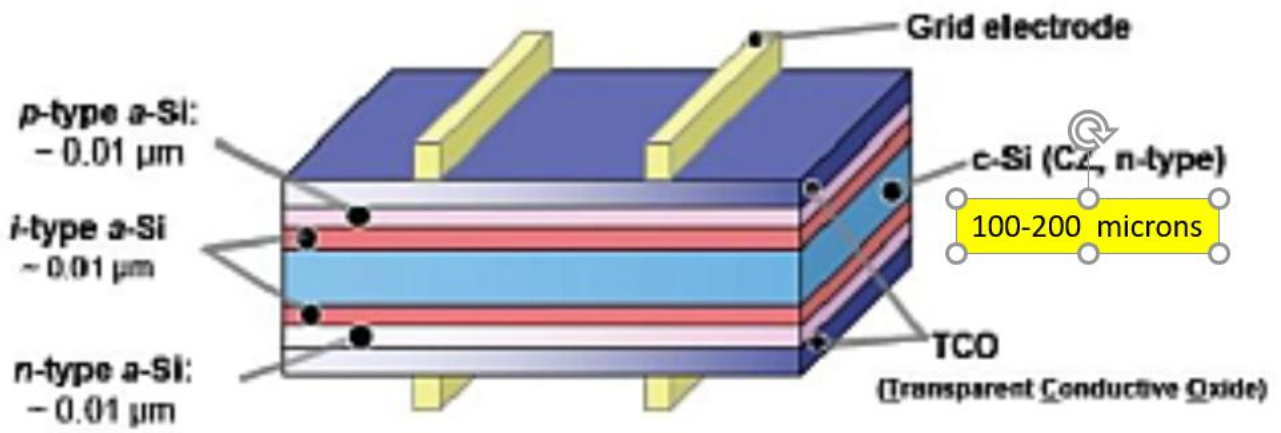


2014

2017

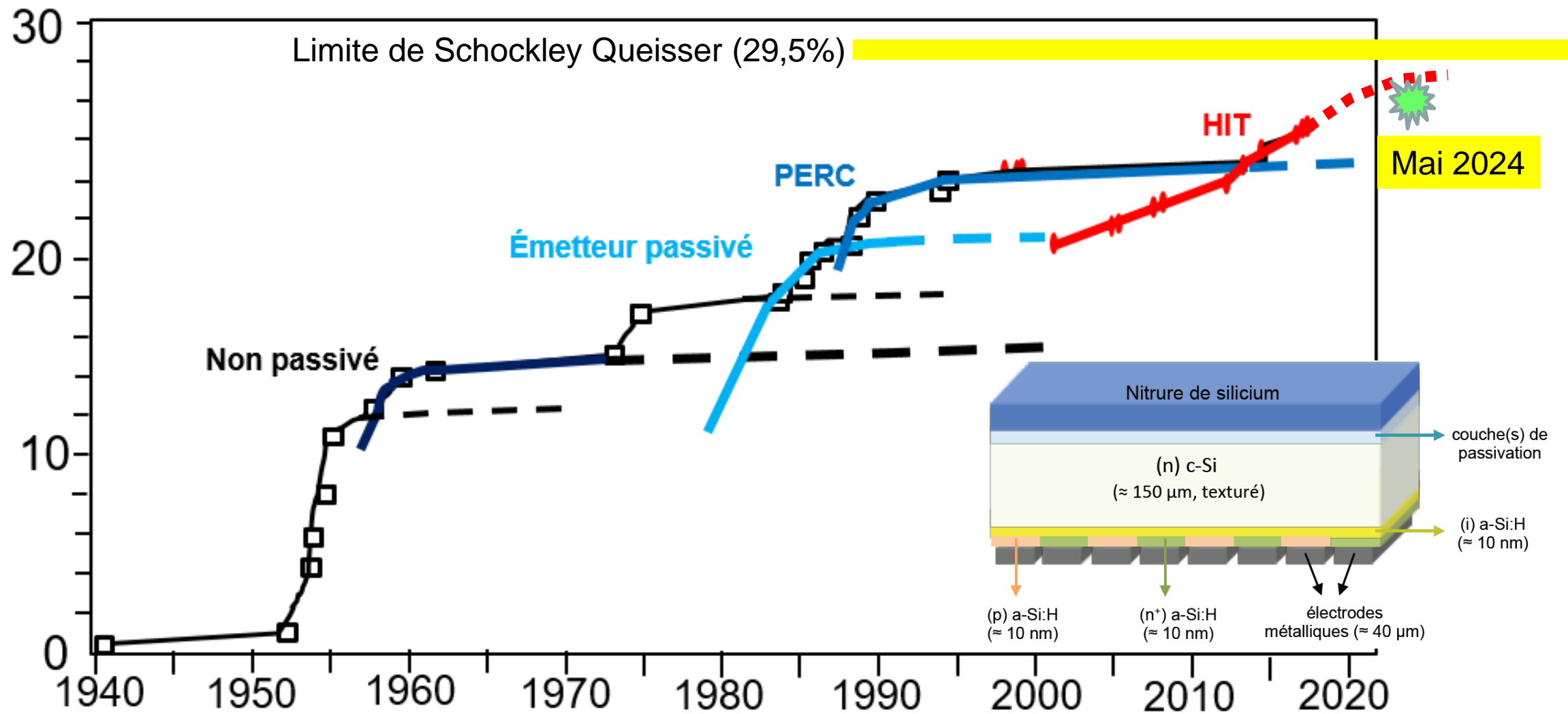
2014

Rupture technologique majeure les cellules à hétérojonction (HIT)



Record mondial HIT avec contacts arrieres interdigités (HIT-IBC)

Progression des rendements records sur silicium



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

Que nous dit la thermodynamique ?

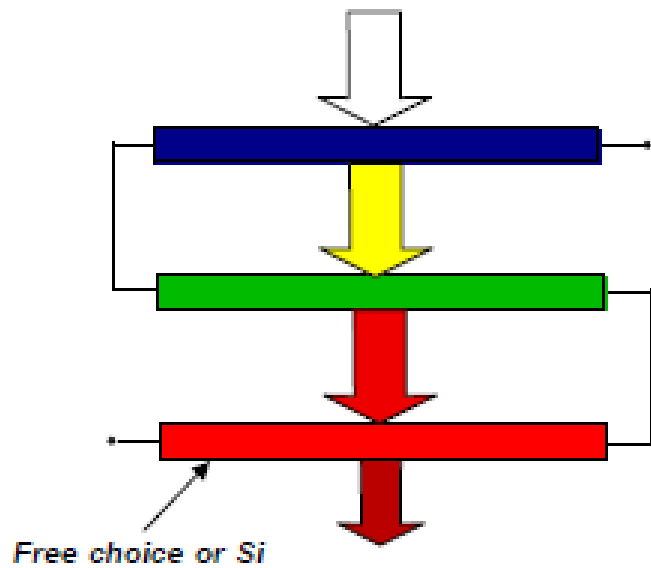
$$\begin{array}{l} \text{Rendement} \\ \text{de Carnot} \end{array} = 1 - \frac{\text{Température} \\ \text{source froide}}{\text{Température} \\ \text{source chaude}} \quad \begin{array}{l} \text{Cellule PV} \\ \\ \\ \text{Soleil} \end{array} = 1 - \frac{300}{6000} = 0,95 \rightarrow 95\%$$

Avec des modèles plus élaborés →

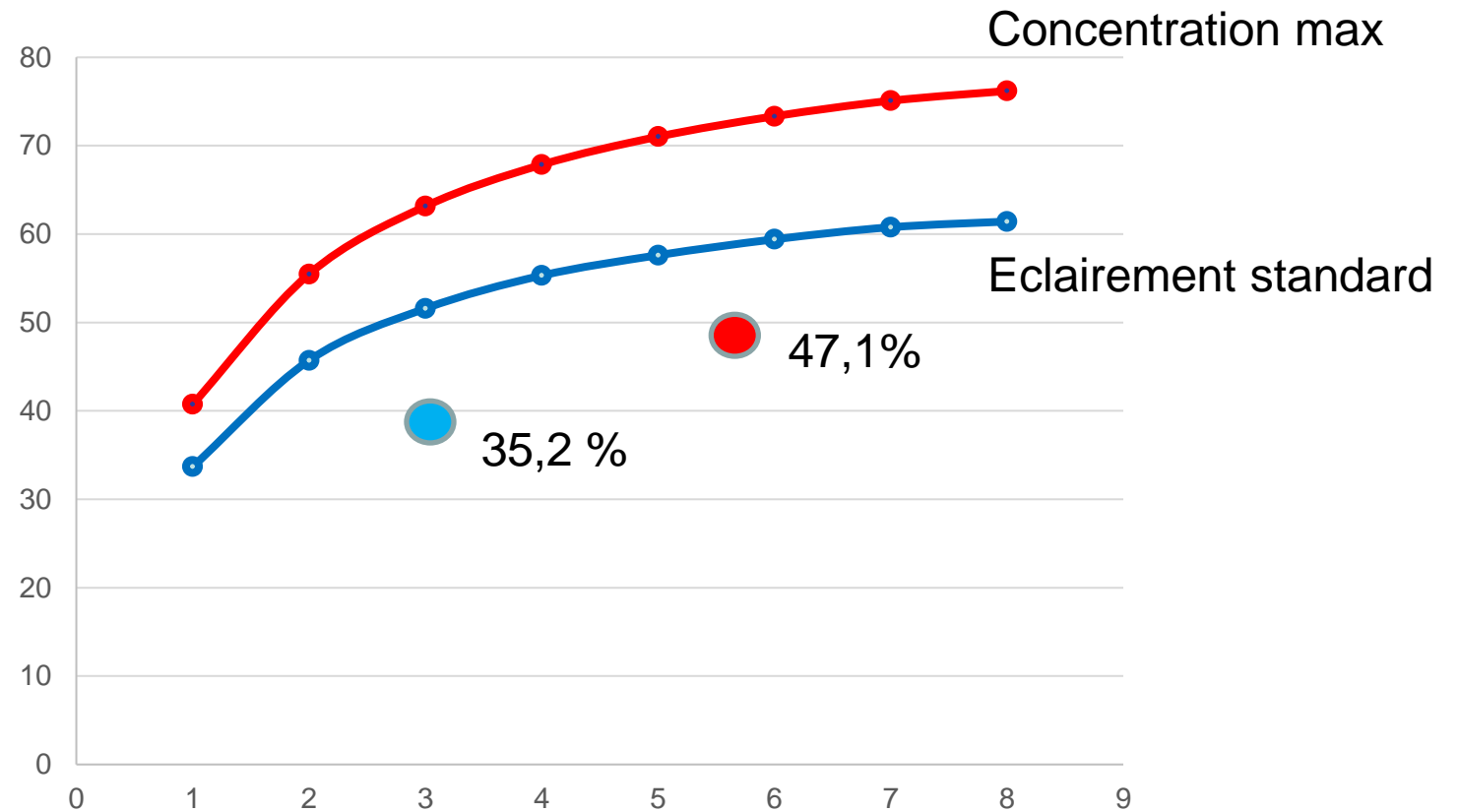
85% sous concentration

67 % sous éclairage standard

Un concept est disponible : les multijonctions



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

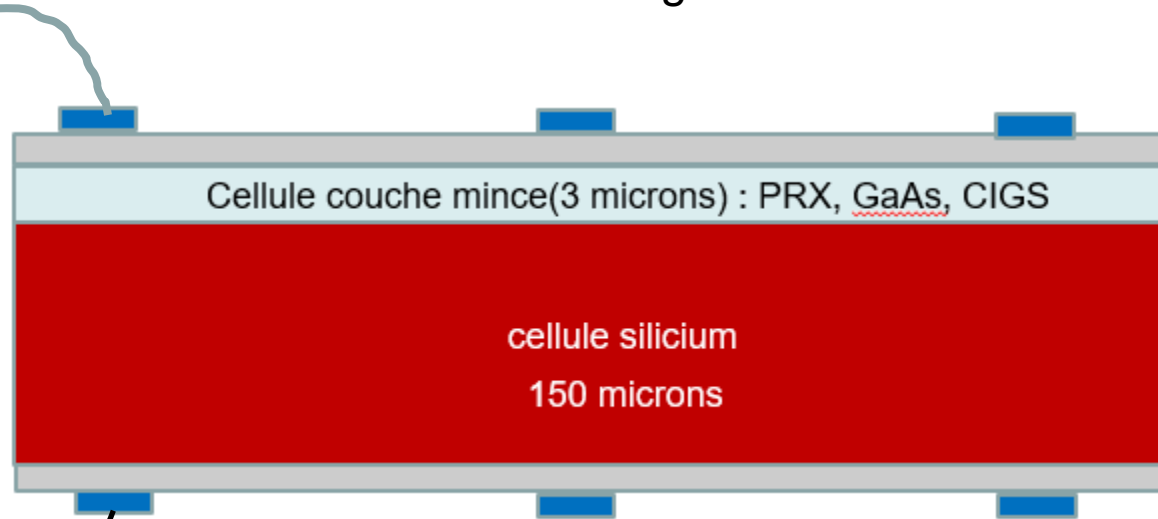


Rendements record actuels :
47,1% 6 jonctions sous concentration
35,2 % 3 jonctions en éclairage standard

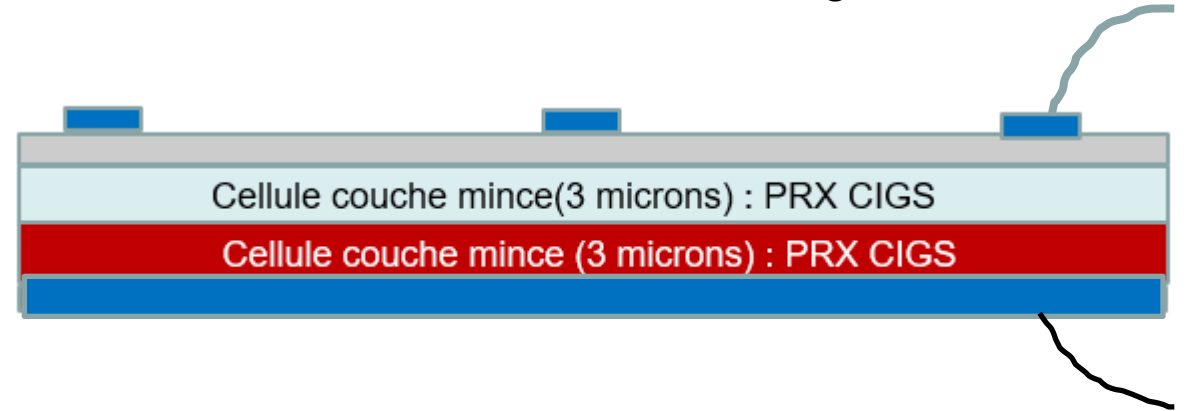
Objectif 30x30x30 : 30% modules, 30 centimes le Watt en ...2030

Le moyen : les cellules tandem

Cellules silicium « augmentée »



Cellules couches minces « augmentée »



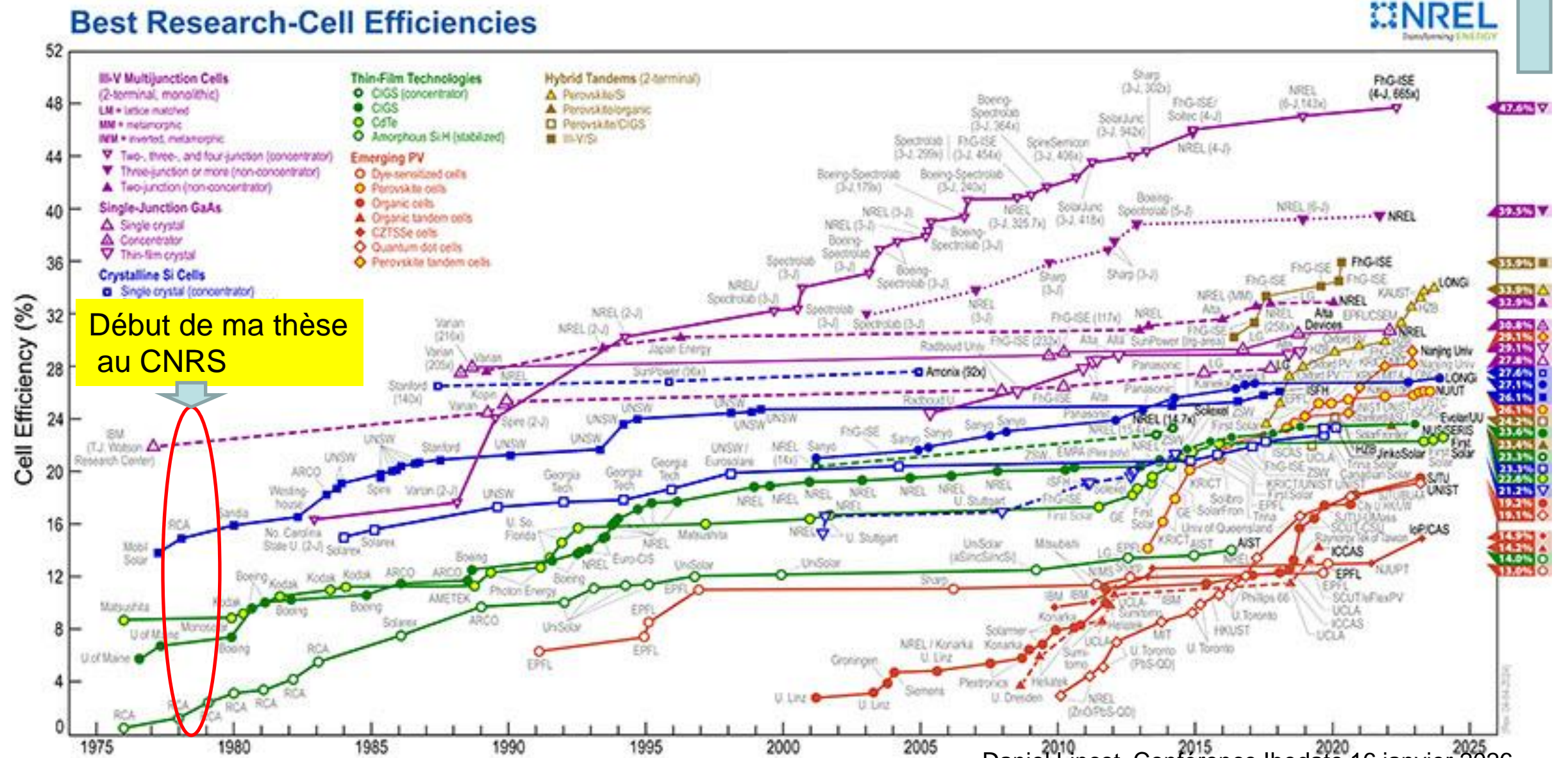
Tandem CIGS-PRX : 24,2% (23,3 %)

Tandem OPV annoncé : 20,2 % (18,2%)

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

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

Les jeux olympiques du photovoltaïque

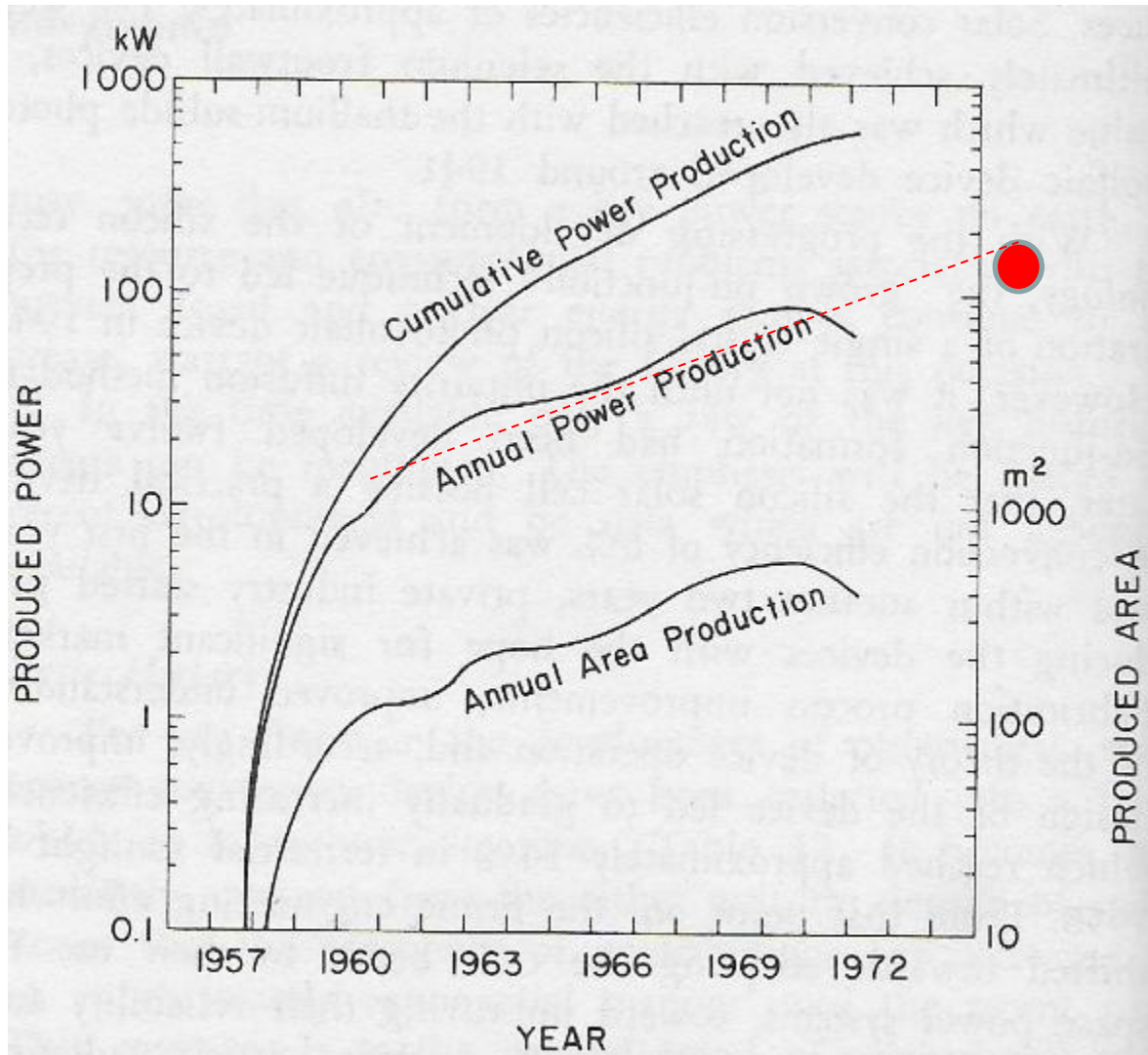


Début de ma thèse au CNRS



Photovoltaïque & transition énergétique

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



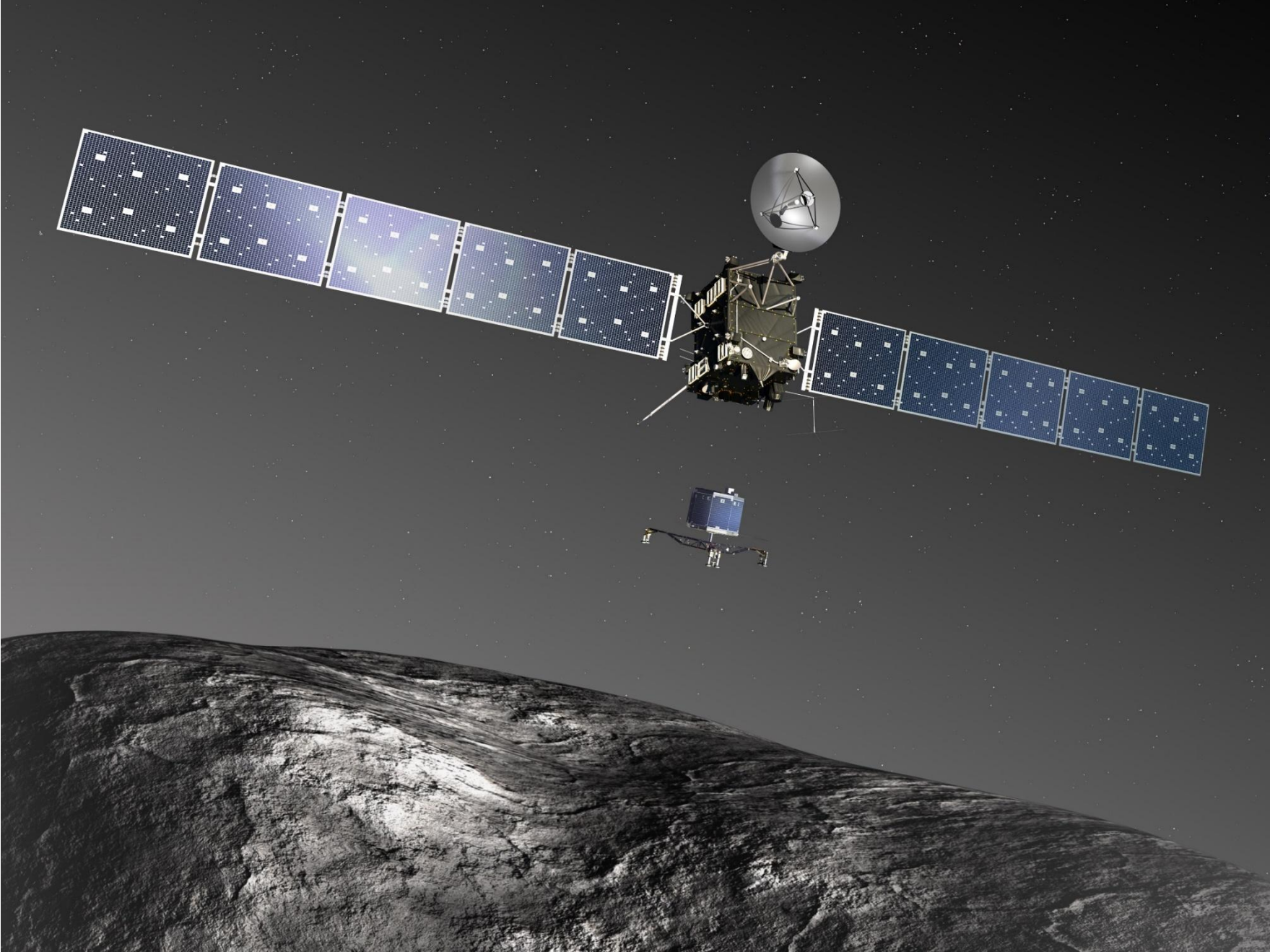
Source : M. Wolf, 1972

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

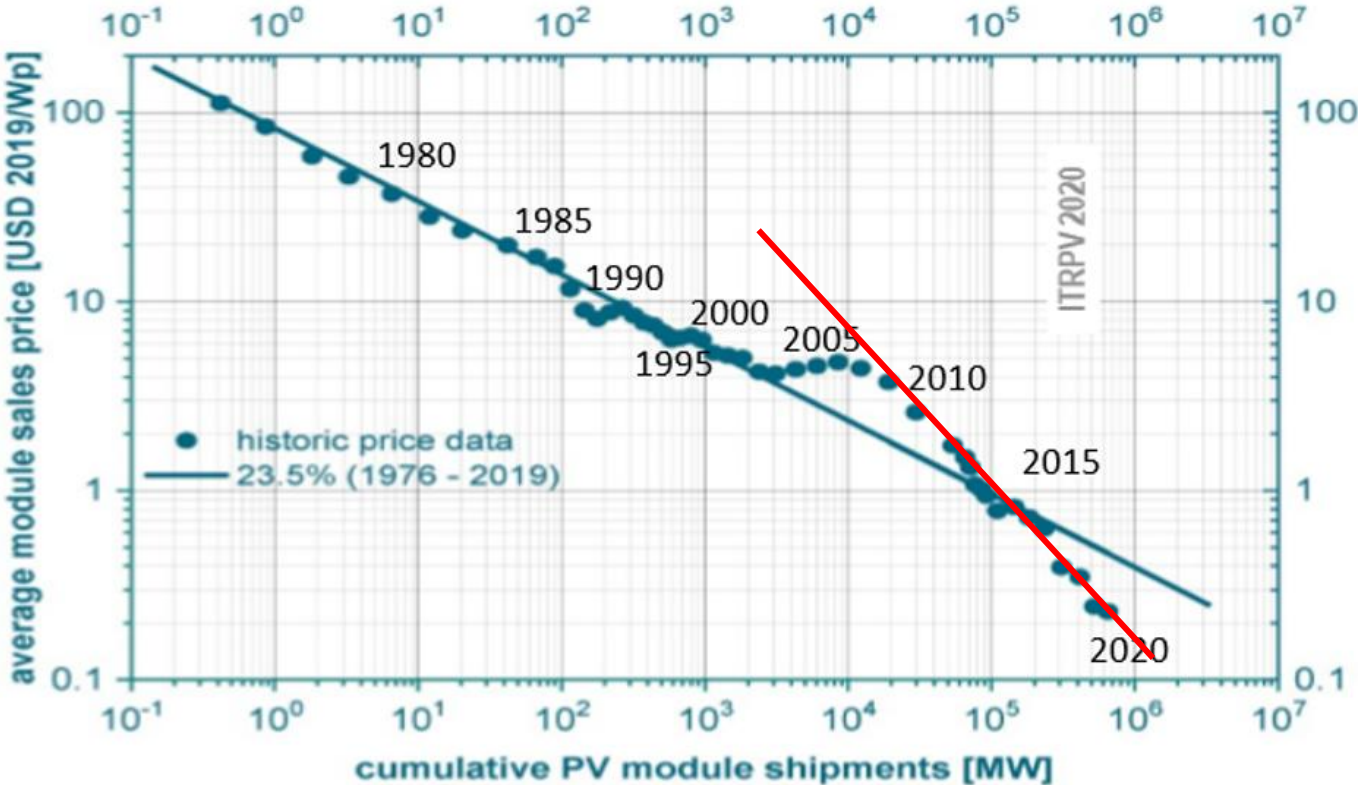
H. Durand, colloque CNES-CNRS 1976



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

La réduction des coûts

Learning curve for module price as a function of cumulative shipments



Source AIE programme PVPS, 2021

Prix de production de l'électricité:

→ 80 Euros/MWh en France

→ 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.

Evolution de la capacité photovoltaïque installée au niveau mondial

2006

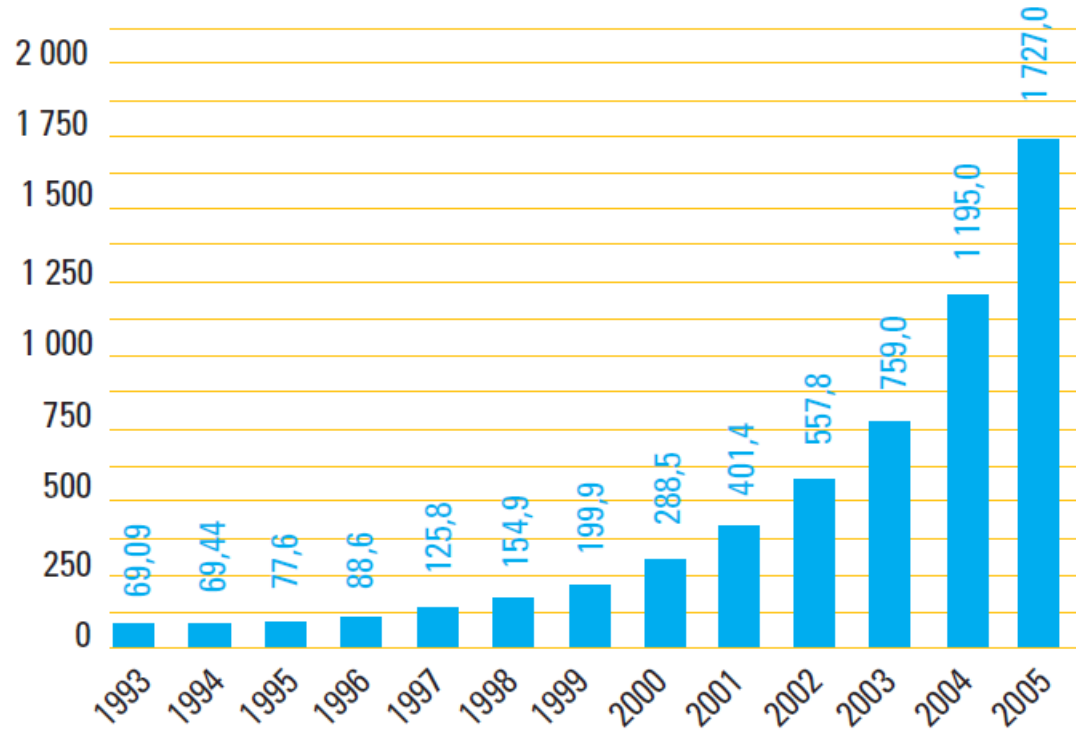


FIGURE 3
Évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques (en MWc).

Source : EurObserv'ER, PV News, mars 2006.

2024

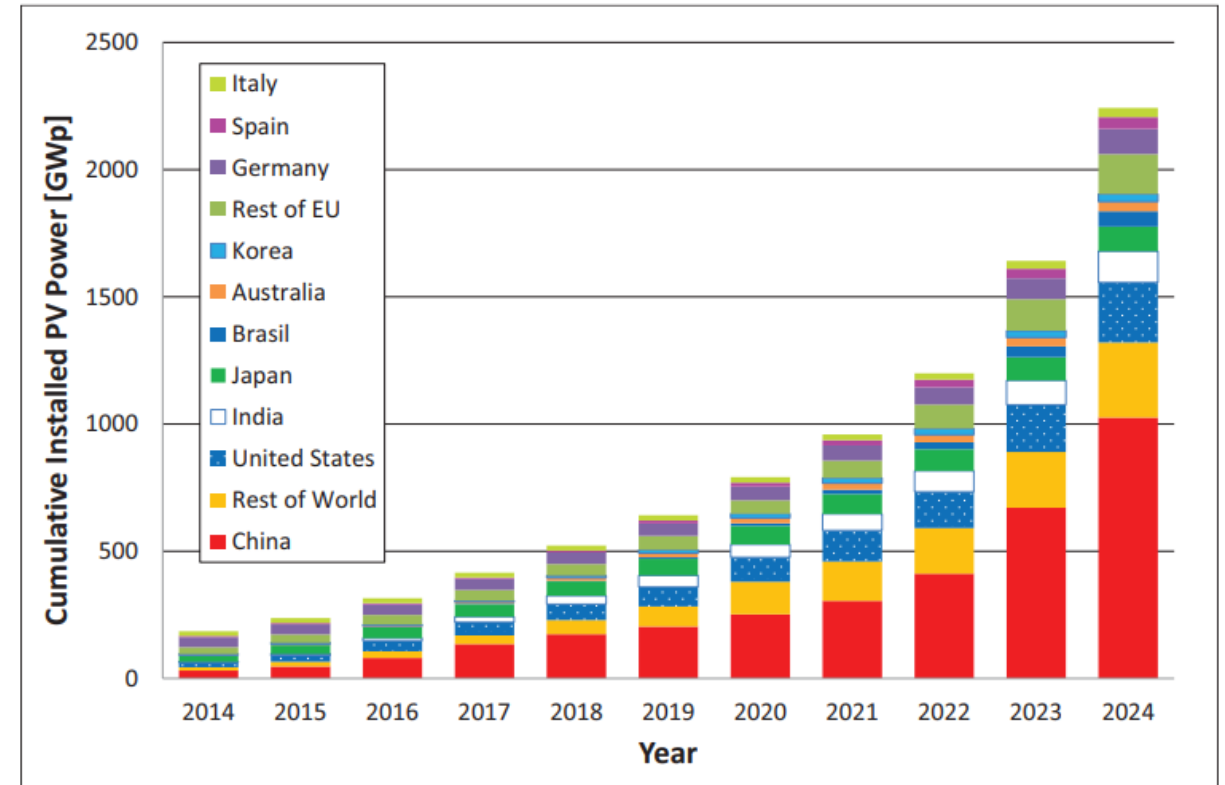
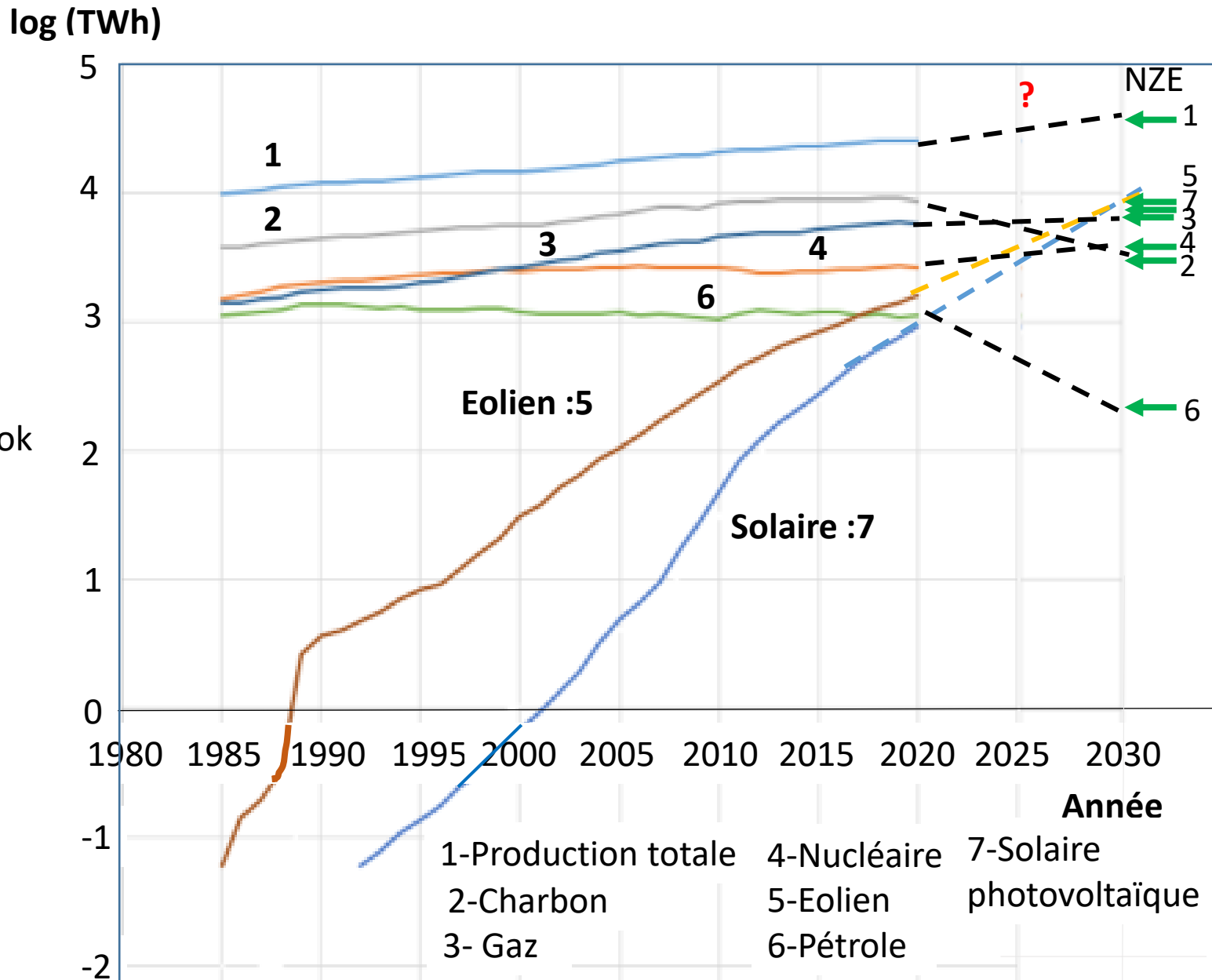


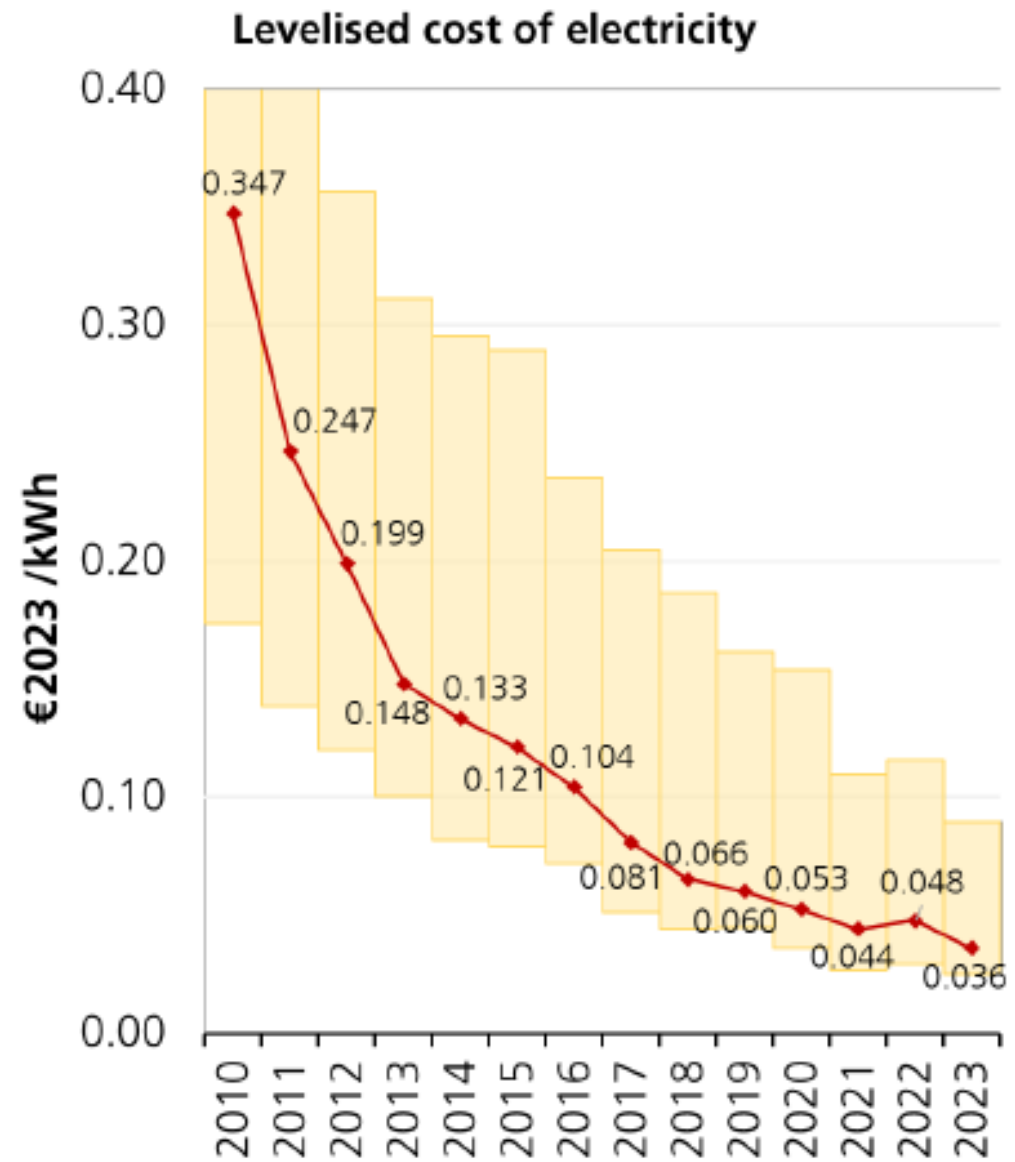
Fig. 1. Cumulative photovoltaic installations from 2014 to 2024 (data source: [7,8] and own analysis).

<https://www.epj-pv.org/articles/epjpv/pdf/2025/01/pv20250008.pdf>

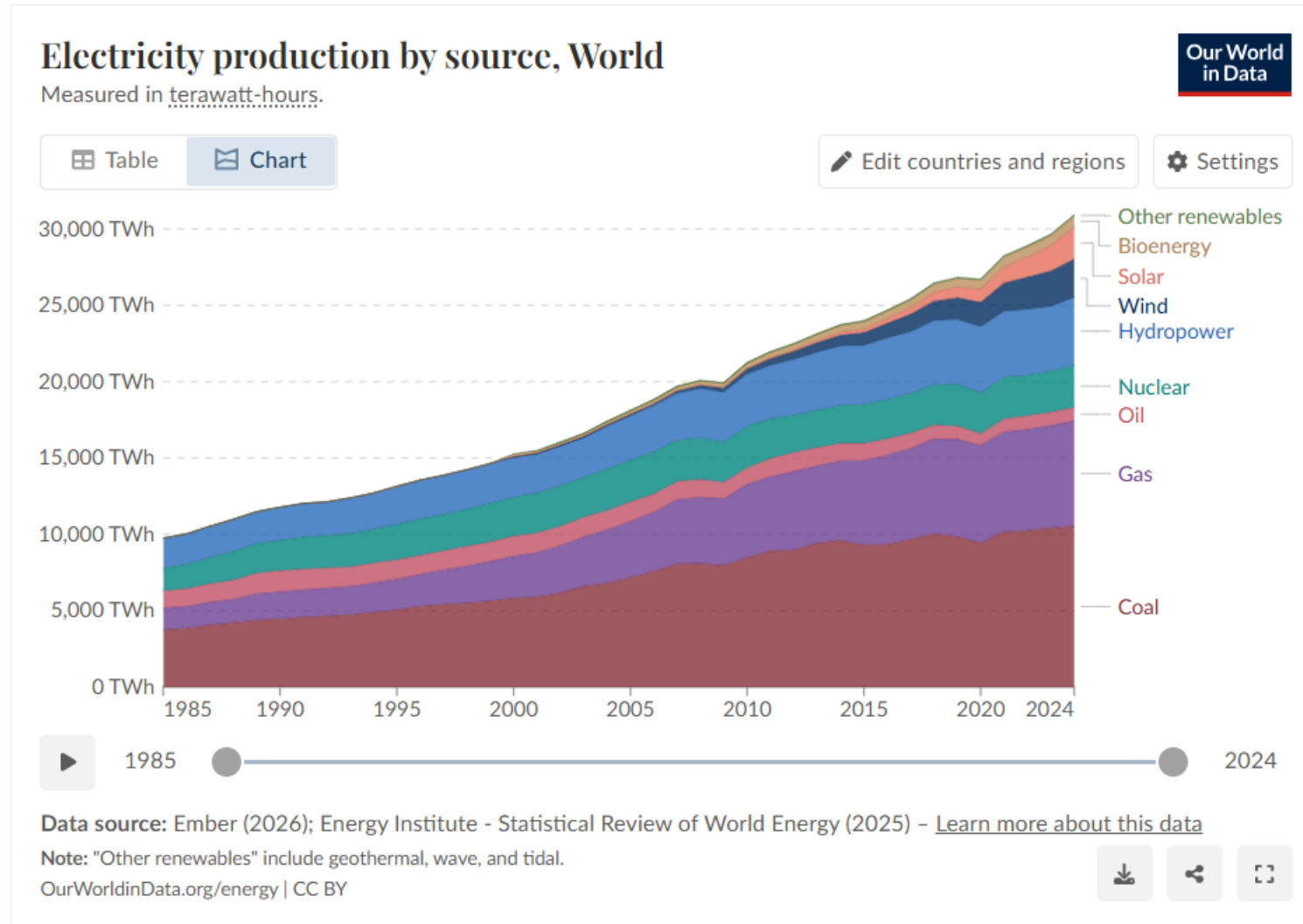
Evolution du Mix électrique mondial : l'énergie solaire en pointe



Source : adapté
World Energy Outlook
de l'AIE



Electricity production by source, World



Electricity production by source, World

Measured in terawatt-hours.

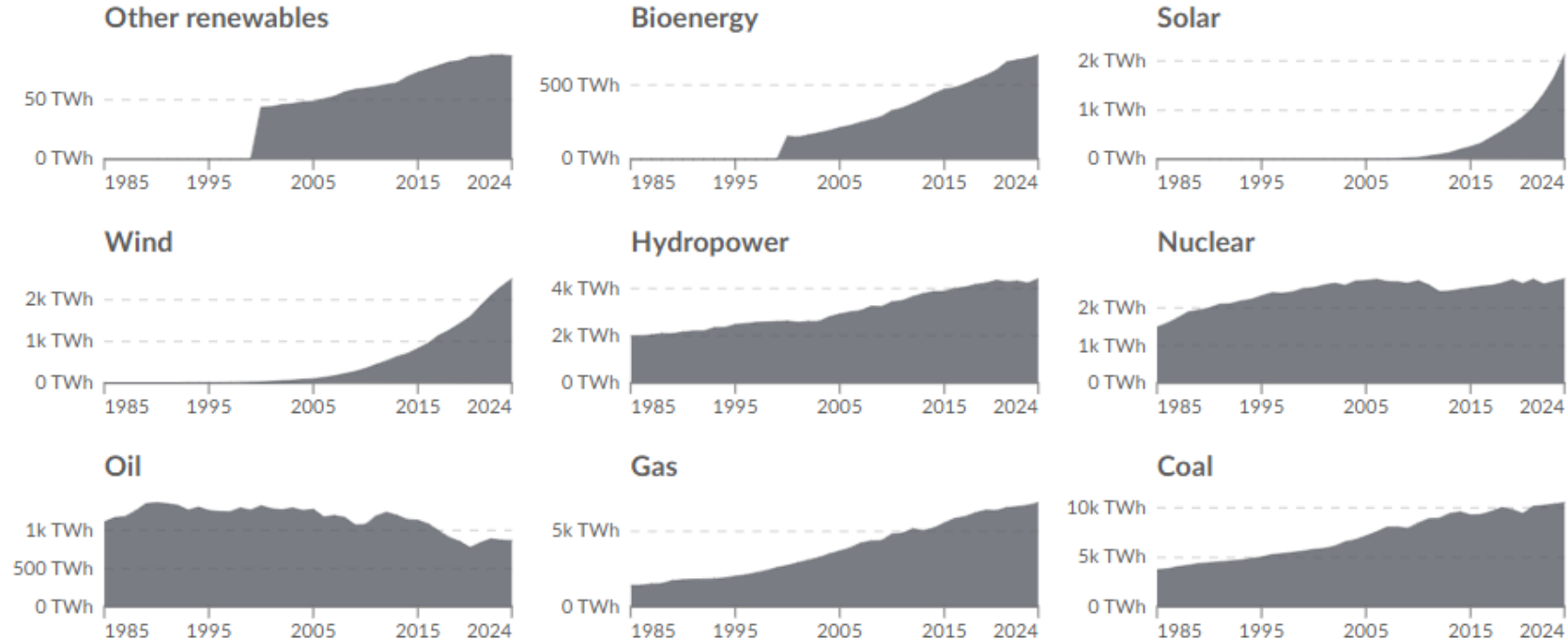


Table

Chart

Edit countries and regions

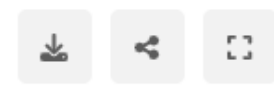
Settings



Data source: Ember (2026); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) - [Learn more about this data](#)

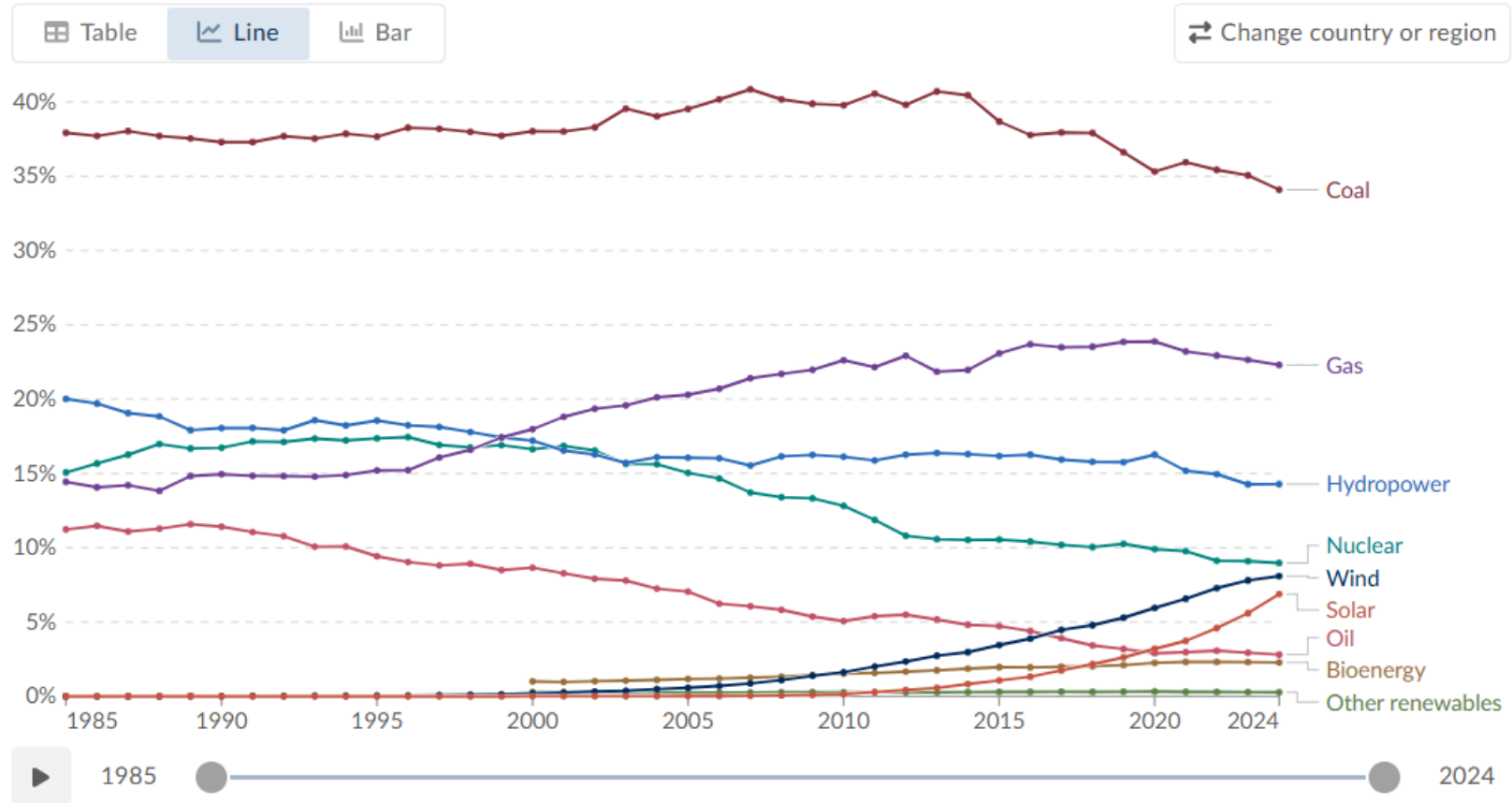
Note: "Other renewables" include geothermal, wave, and tidal.

OurWorldinData.org/energy | CC BY



Share of electricity production by source, World

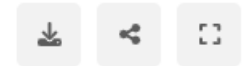
Our World in Data



Data source: Ember (2026); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) - [Learn more about this data](#)

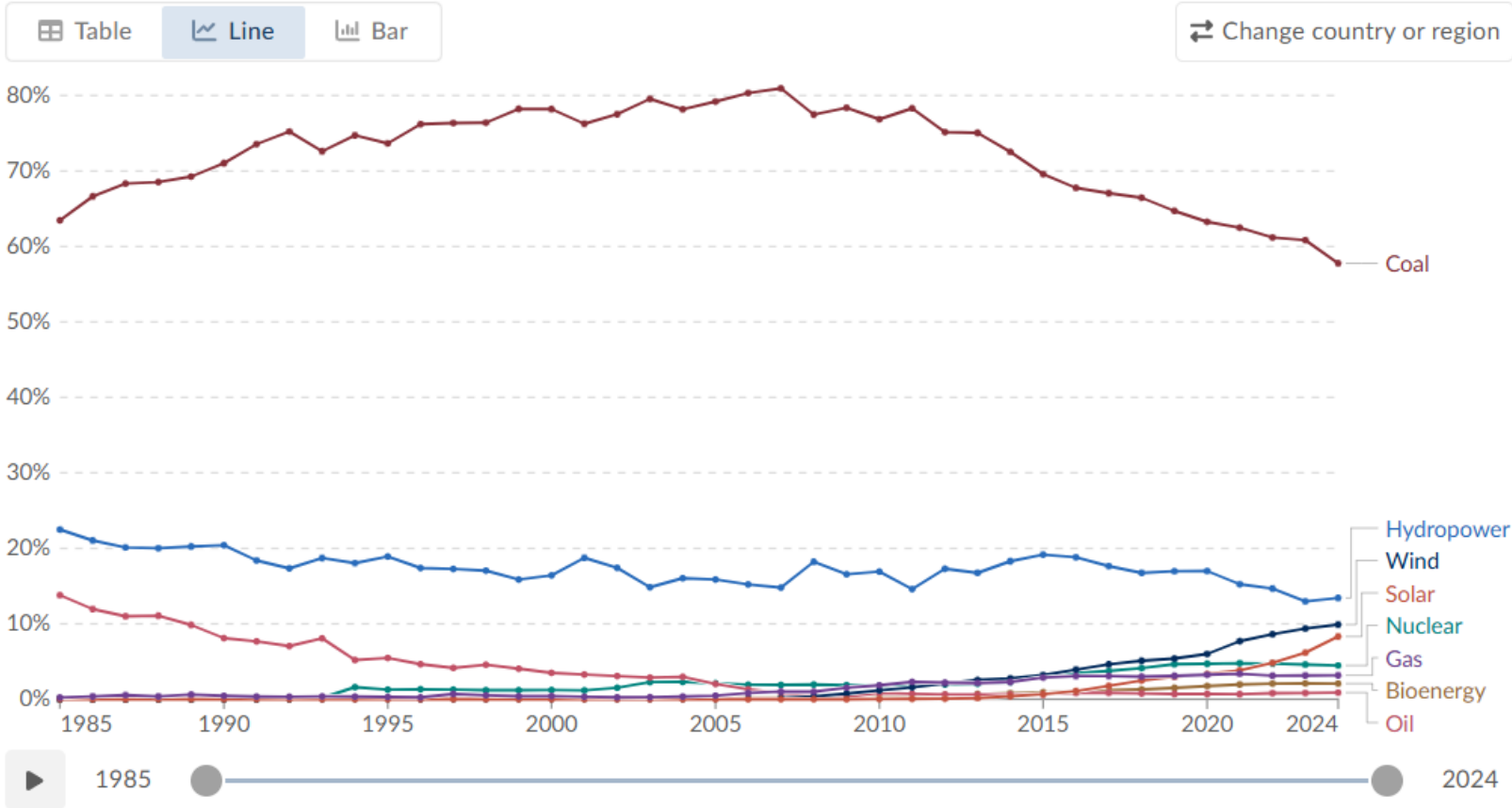
Note: "Other renewables" include geothermal, wave, and tidal.

OurWorldinData.org/energy | CC BY



Share of electricity production by source, China

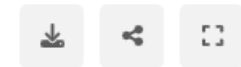
Our World in Data



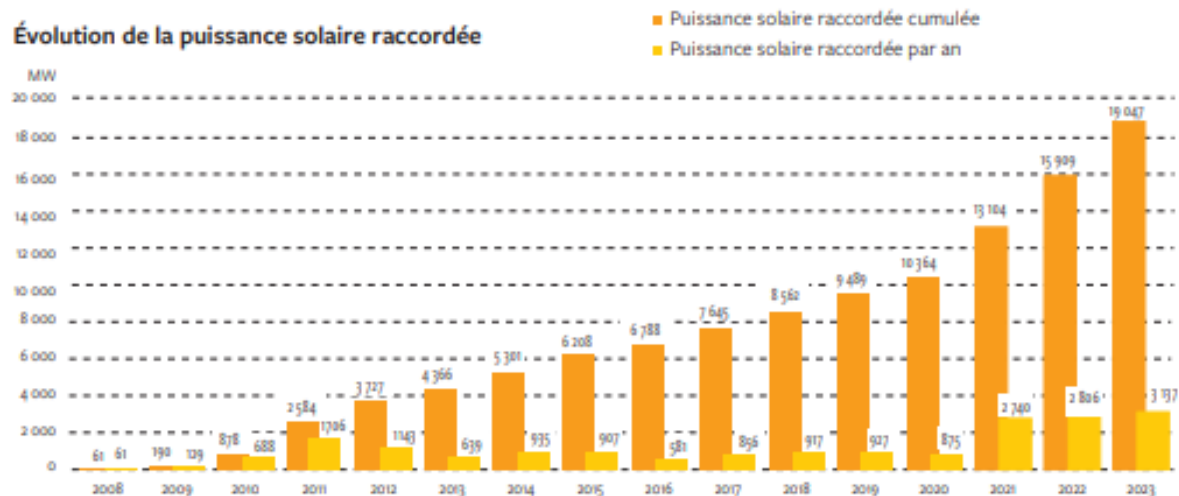
Data source: Ember (2026); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) - [Learn more about this data](#)

Note: "Other renewables" include geothermal, wave, and tidal.

OurWorldinData.org/energy | CC BY



Évolution de la puissance solaire raccordée



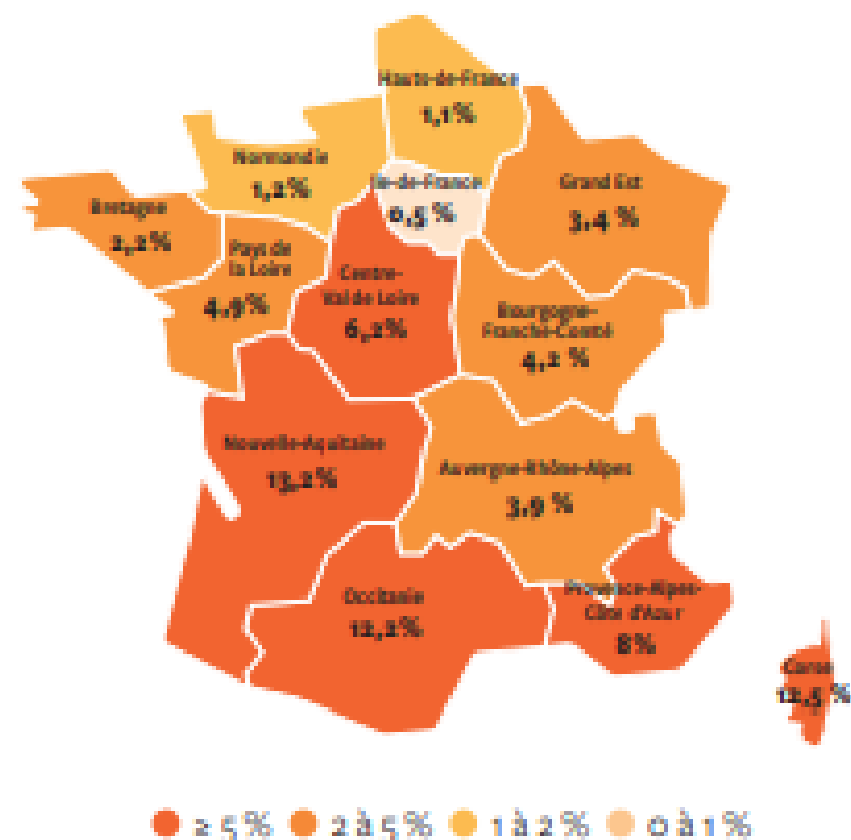
Parc solaire **19 047 MW**

+ 3 137 MW sur l'année 2023

**Le solaire
a couvert
4,9 %**

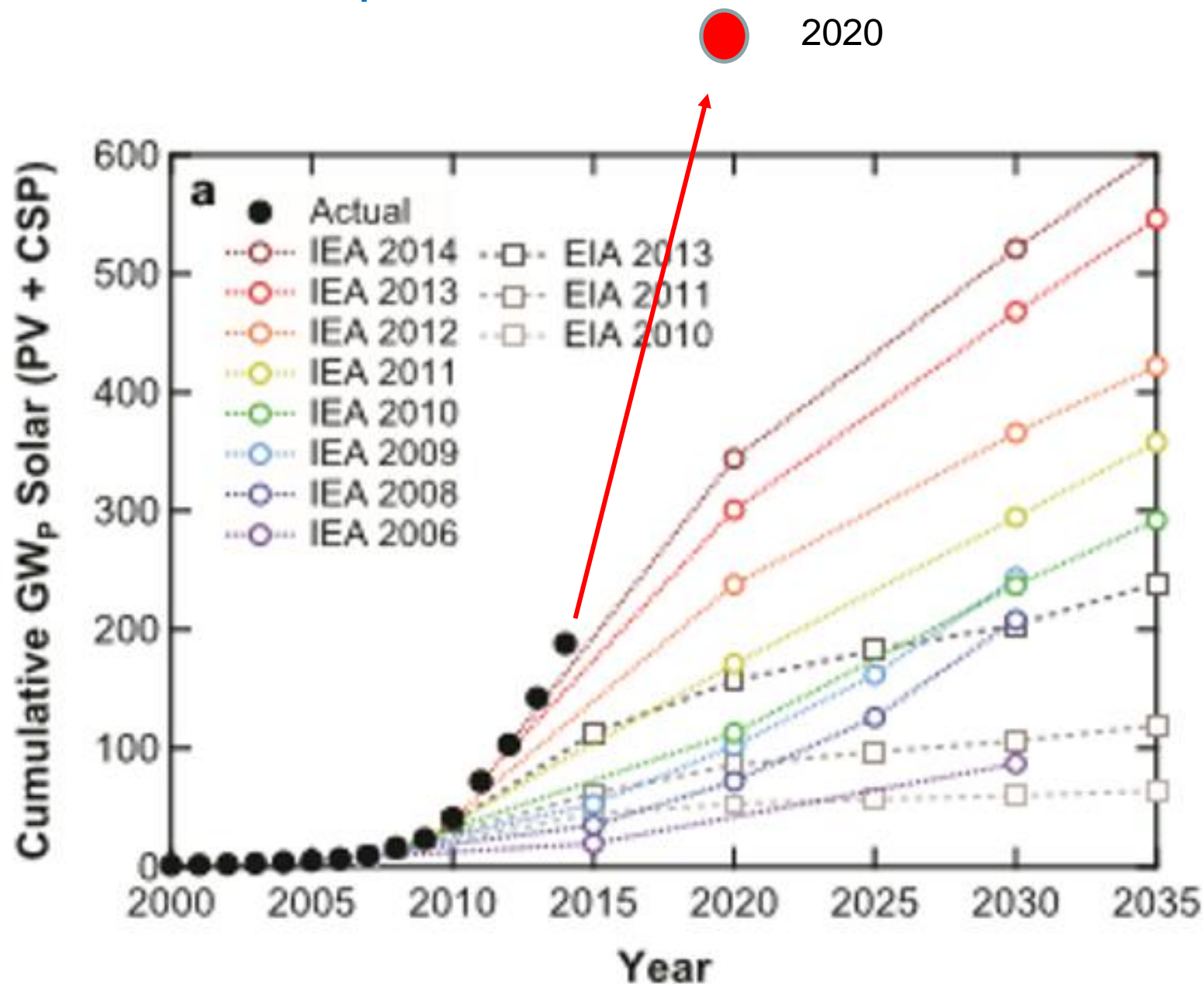
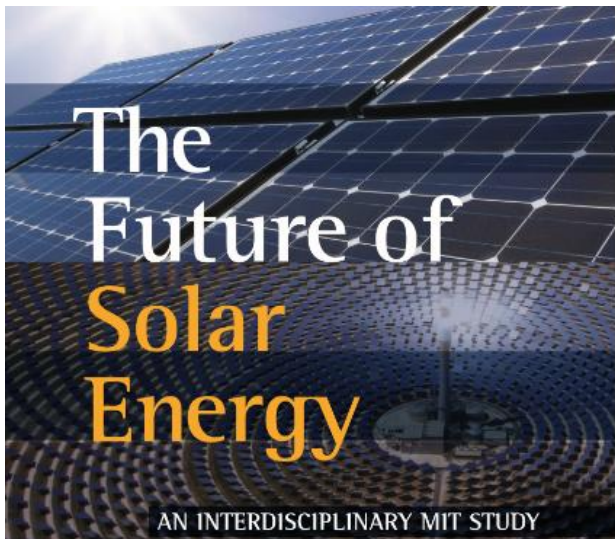
de l'électricité
consommée en 2023

Couverture de la consommation par la production solaire en 2023



2015

Les limites des prévisions





The Electrotech Revolution

The shape of things to come

Daan Walter
Sam Butler-Sloss
Kingsmill Bond, CFA

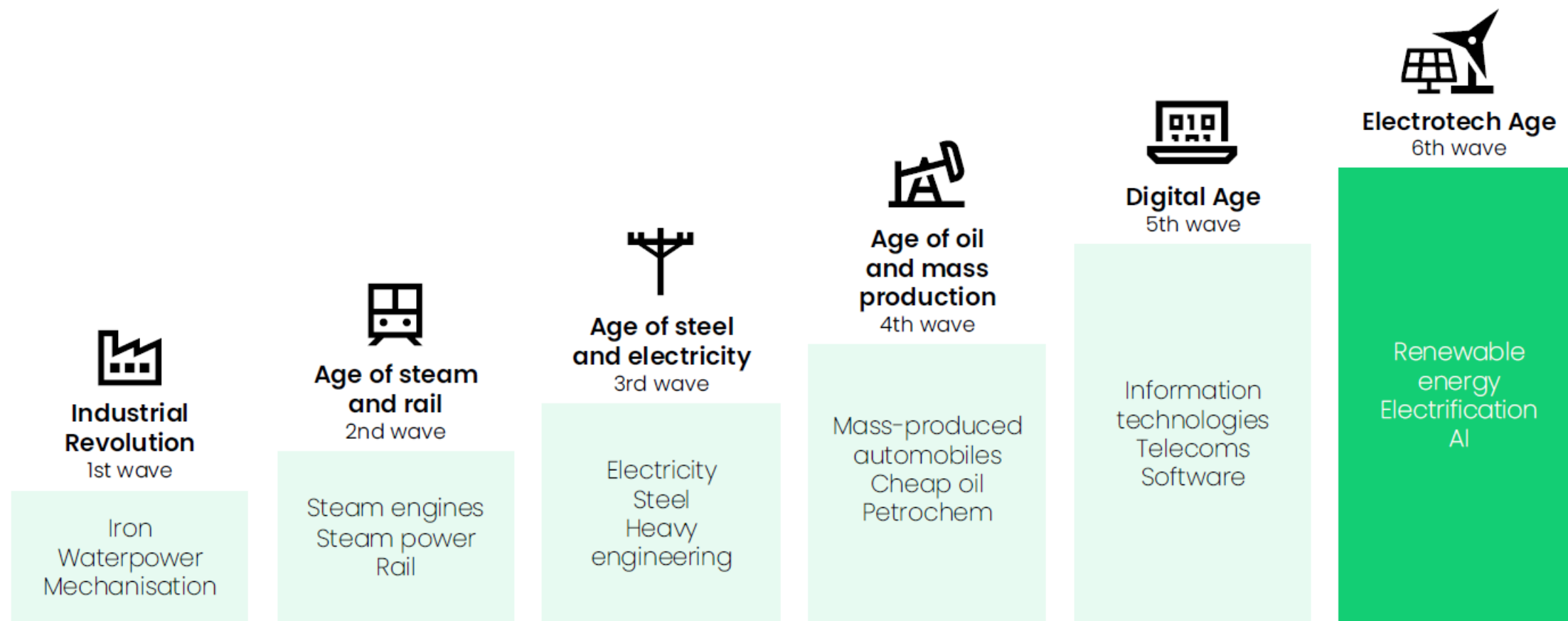
September, 2025



Daniel Lincot, Conférence lhedate 16 janvier 2026

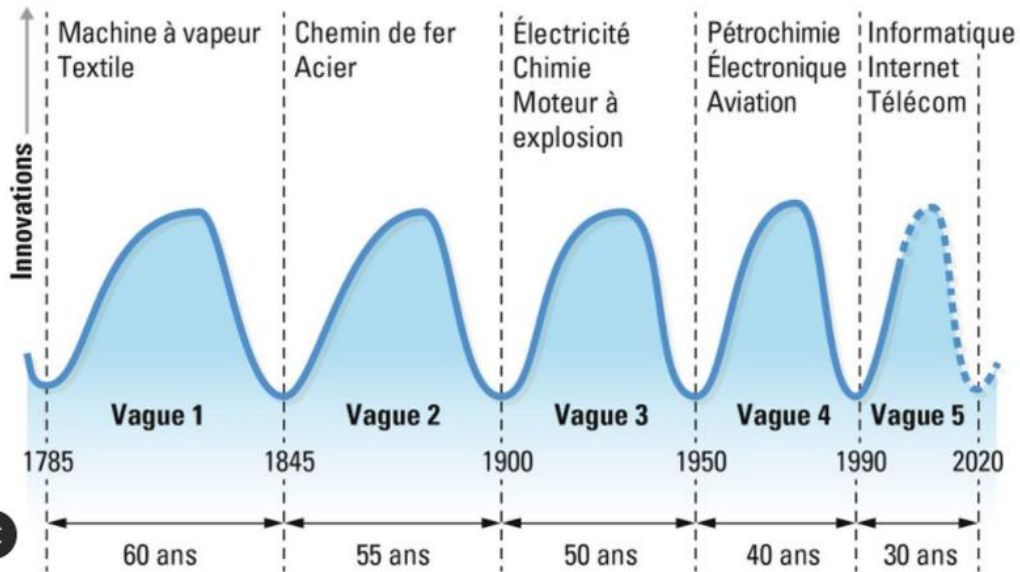
This is the age of electrotech

It is the latest in a long line of technology shifts

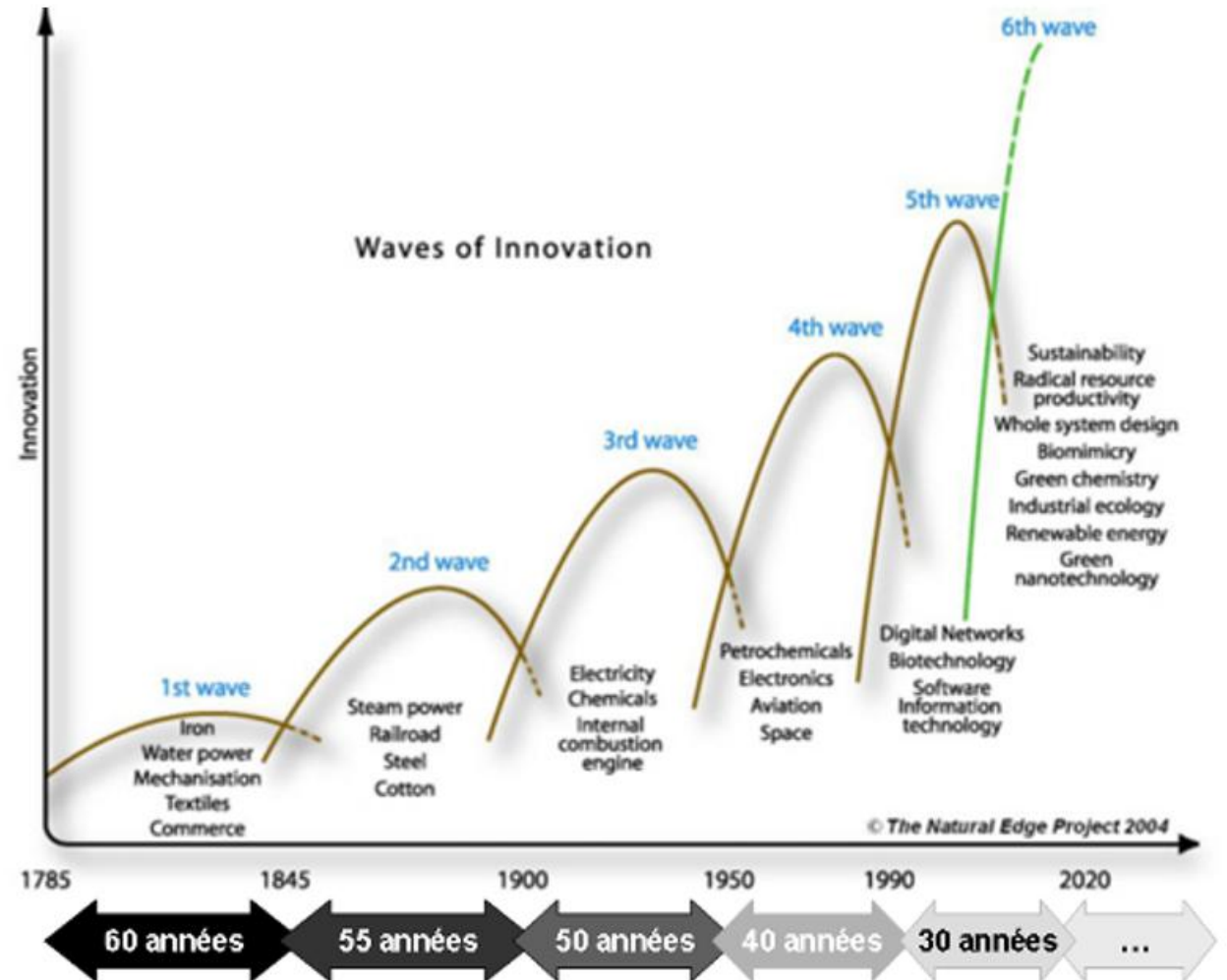


Les processus d'innovation : Les cycles de Kondratieff- Schumpeter

Les cycles de l'innovation de Schumpeter et leur prolongement



© Belin Éducation/Humensis, 2020 Sciences économiques et sociales Term
© Droits réservés

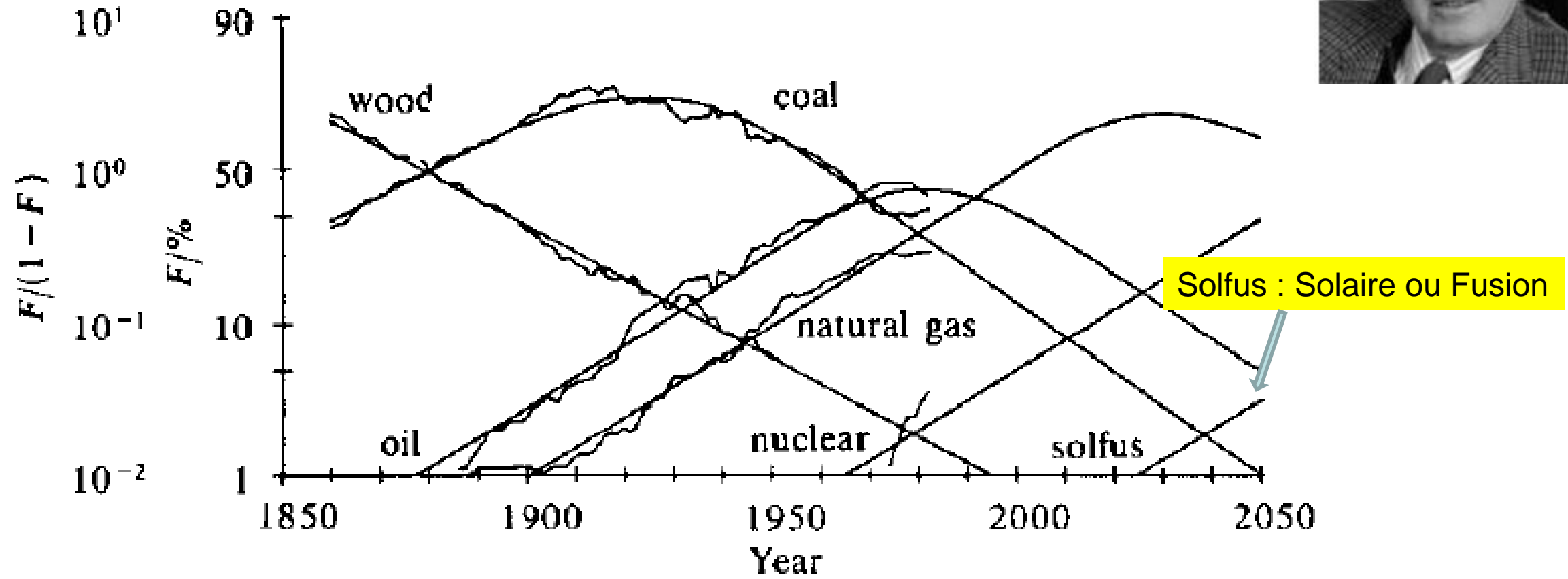


© The Natural Edge Project 2004

Kondratiev N D, 1926 "Die langen Wellen in der Konjunktur" *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik* 56 573 - 609

C. Marchetti « Nuclear and its future » Perspectives in Energy, 1992, volume 2, pages 19-34

Marchetti C, Nakićenović N, 1979 "The dynamics of energy systems and the logistic substitution model" report RR-79-13, IIASA, Laxenburg, Austria

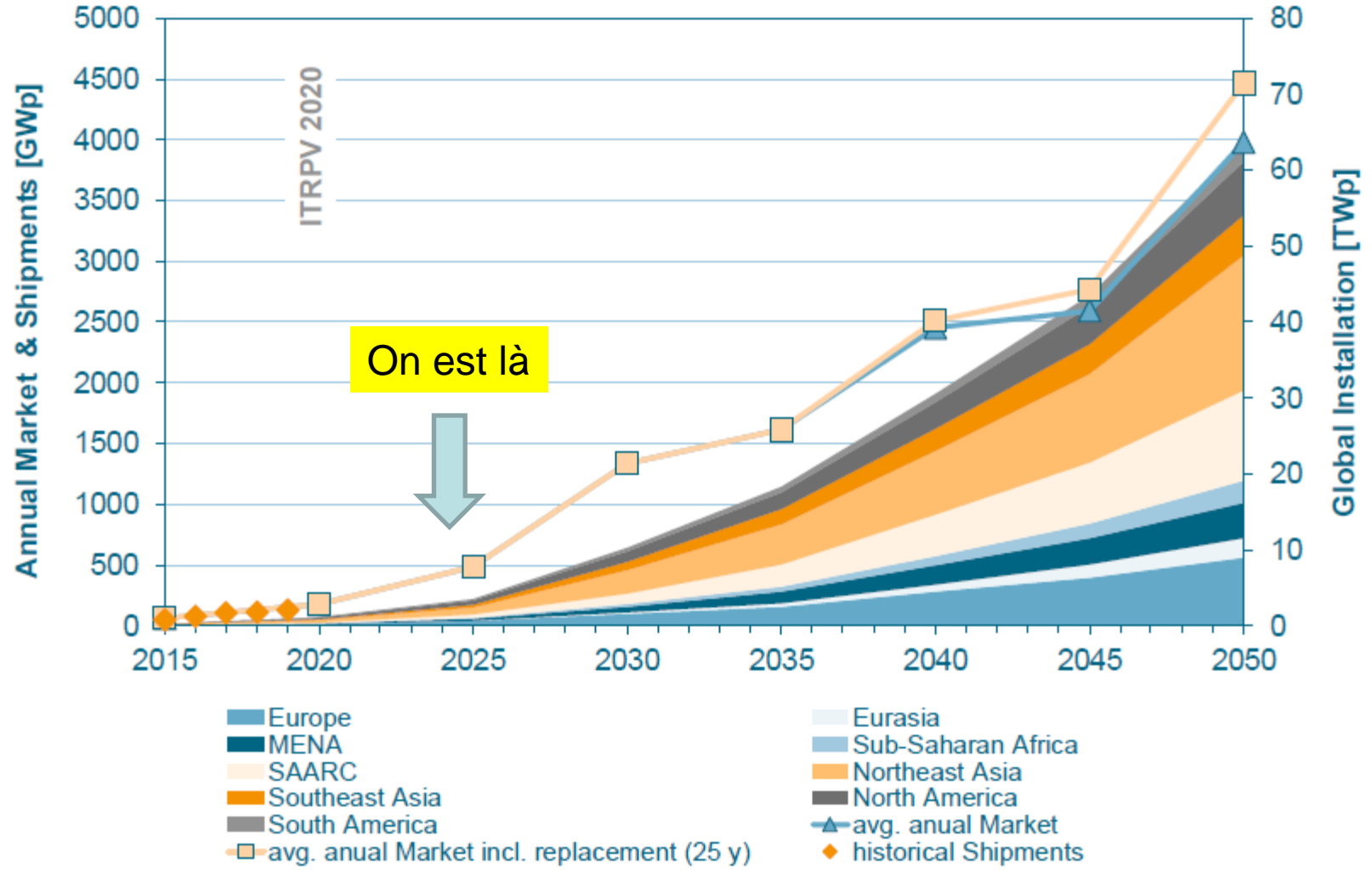


The solfus code (solar-fusion) is intended to include the possible use of solar energy, although the dilution and modulation of solar light makes it a poor candidate for large-scale energy production. Source: Marchetti and Nakićenović (1979).

Des prévisions décoiffantes, faut-il les croire, est ce possible ?

Global PV Installation and corresponding PV market

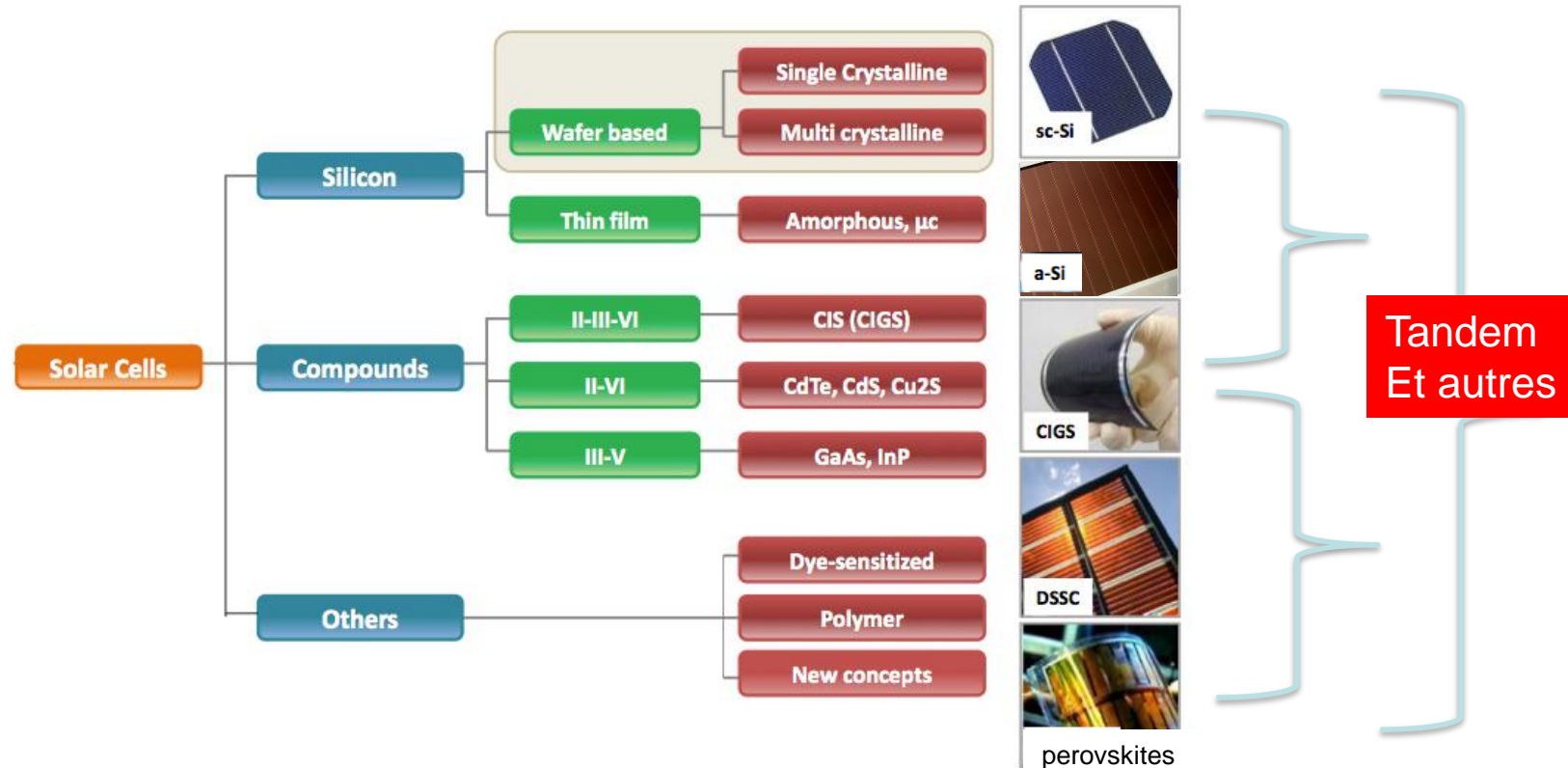
Broad electrification scenario (all sectors)



Vision générale : Innovations, convergences et évolutions

Avant 2020 : $R < 30\%$
Différentiation + Foisonnement

Après 2020 : $R > 30\%$
Convergence



Matériaux inorganique → électronique & microélectronique → organique → nanotechnologies-Photonique
 Biologie ?

Une nouvelle frontière pour le photovoltaïque

La légèreté, la flexibilité

→ Nouveaux concepts

→ Nouveaux systèmes

Showing benefits of light, flexible PV in urban environment (Building BIPV, evolving spaces, events, etc.)

the use of decorative nets for building renovation in Paris (2023)



the wrapping of Pont-Neuf in Paris by Christo (1985)



Jun 2023

SOYPV selected for the Innovation Program of Paris Metropole : Quartiers Métropolitains d'innovation

SOYPV program winner

PV system with flexible CIGS
modules* integrated in a net



SOYPV system inaugurated in Aulnay-sous-Bois on Nov. 18, 2024

“Giant PV blind” (>12 m²) deployed on
the facade of a building with >1.25 kW
installed power



Résumé

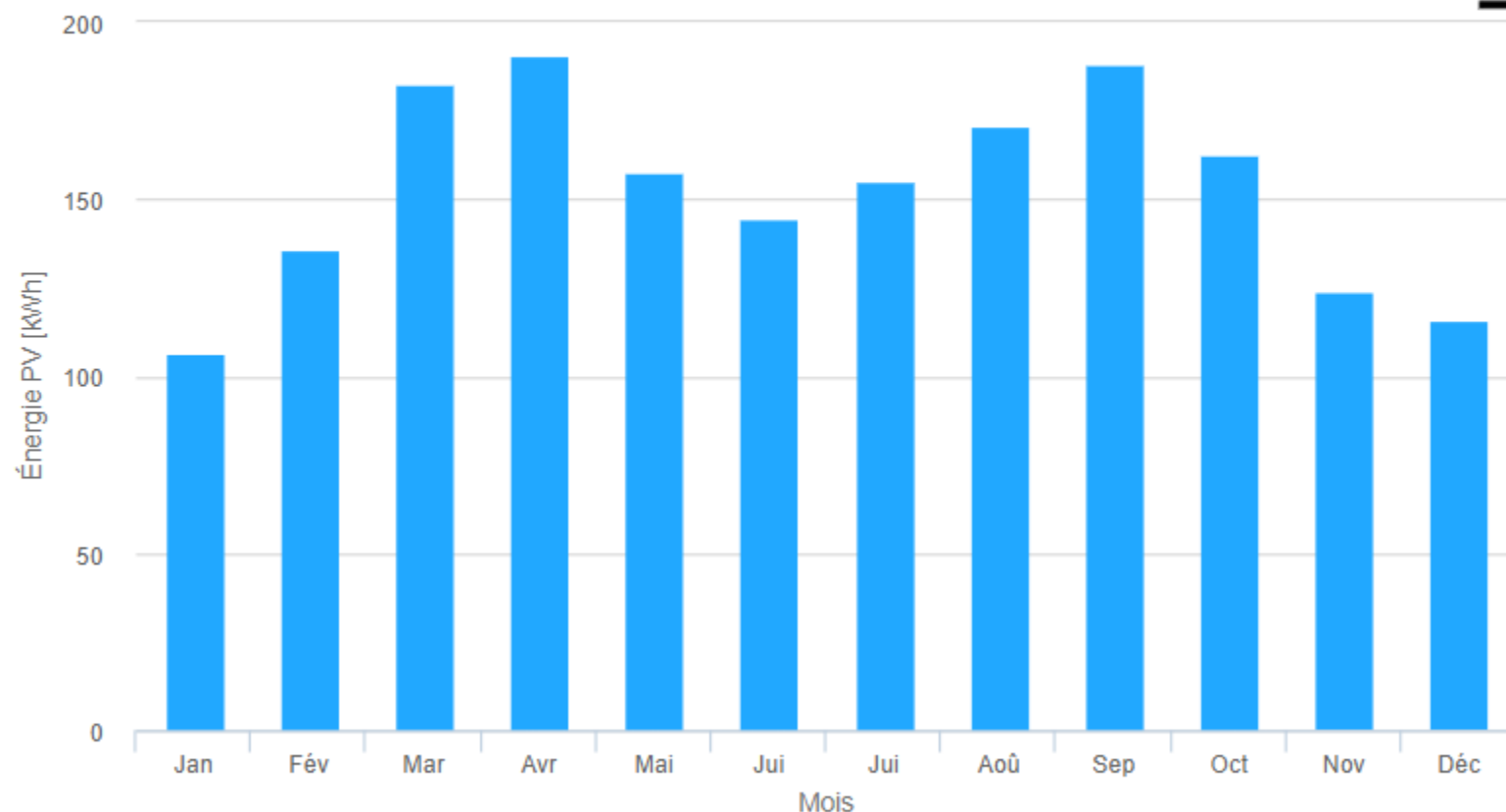
Entrées fournies:

Emplacement [Lat/Lon]:	48.933,2.497
Horizon:	Calculé
Base de données:	PVGIS-SARAH2
Technologie PV:	Silicium cristallin
PV installée [kWp]:	2.3
Pertes du système [%]:	14

Résultats de la simulation:

Angle d'inclinaison [°]:	90
Angle d'azimut [°]:	0
Production annuelle PV [kWh]:	1834.37
Irradiation annuelle [kWh/m ²]:	1009.55
Variabilité interannuelle [kWh]:	72.97
Changements de la production à cause de:	
Angle d'incidence [%]:	-4.54
Effets spectraux [%]:	1.9
Température et irradiance faible [%]:	-5.56
Pertes totales [%]:	-21

Production énergétique mensuelle du système PV fixe



Production annuelle : **1834 kWh**

Mars 2025

Énergies renouvelables : ces innovations françaises qui dessinent l'avenir du photovoltaïque | TF1 INFO entre 51



The screenshot shows a news article interface. At the top left is a back arrow and the 'TF1 INFO' logo. At the top right are icons for a user profile, a 'DIRECTS' button, and a notification bell with '14' alerts. The main content area features a large photograph of a building facade with solar panels being installed. Two workers are visible near the panels. Below the photo is the 'notre PLANÈTE' logo and the text 'PANNEAUX SOLAIRES CES NOUVEAUTÉS QUI VONT TOUT CHANGER'. At the bottom left of the photo area is a play button icon and the text 'Source : JT 13h WE'. At the bottom right is the 'TF1' logo. To the right of the photo is the article title 'Énergies renouvelables : ces innovations françaises qui dessinent l'avenir du photovoltaïque' in large white text. Below the title is the author information 'Par V. F | Reportage : Amandine CREFF et Erinna FOURNY' and the publication date 'Publié le 15 mars 2025 à 17h56'.

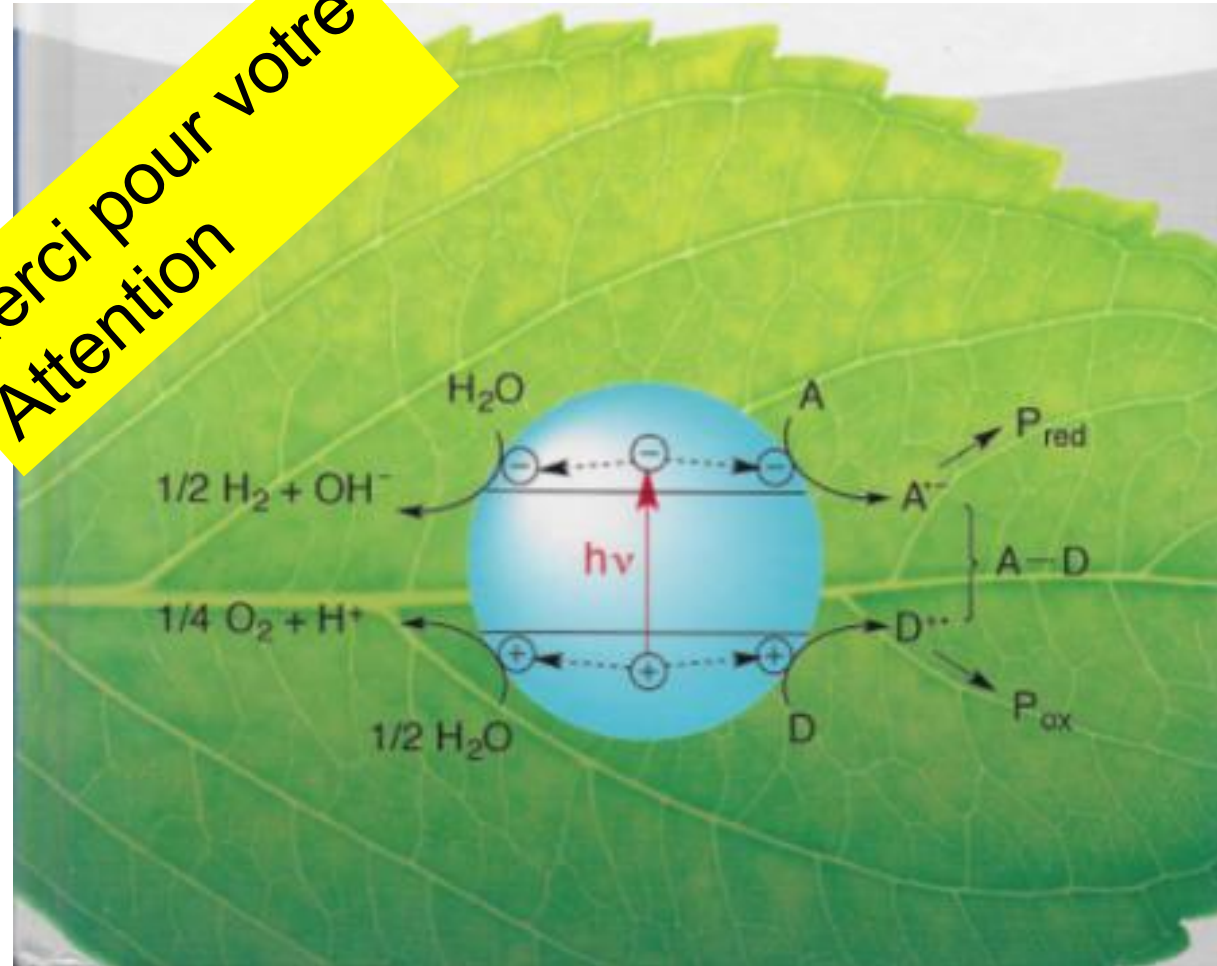
- **La filière photovoltaïque est un secteur de pointe pour les chercheurs français.**



Un nouvel Horizon

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

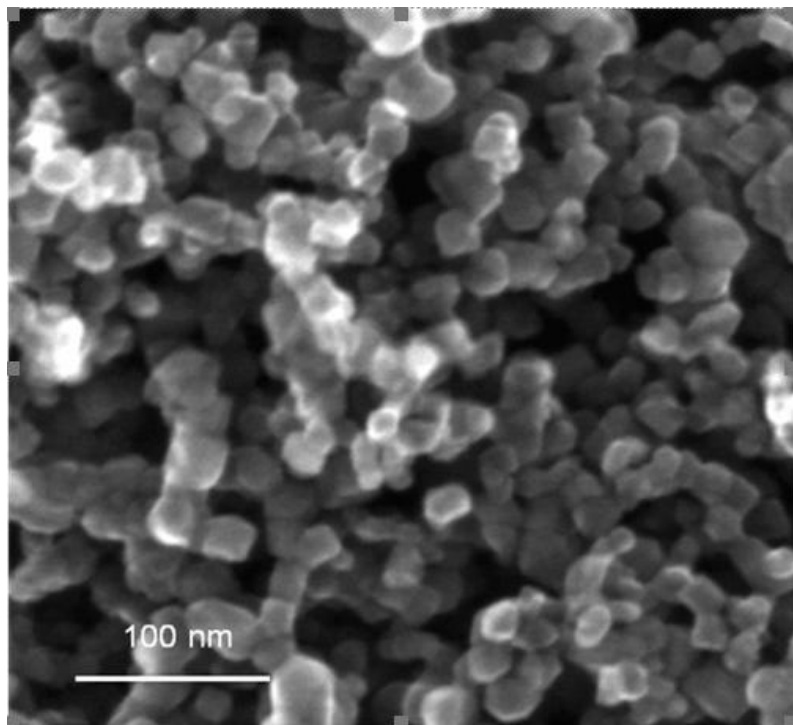
Merci pour votre
Attention



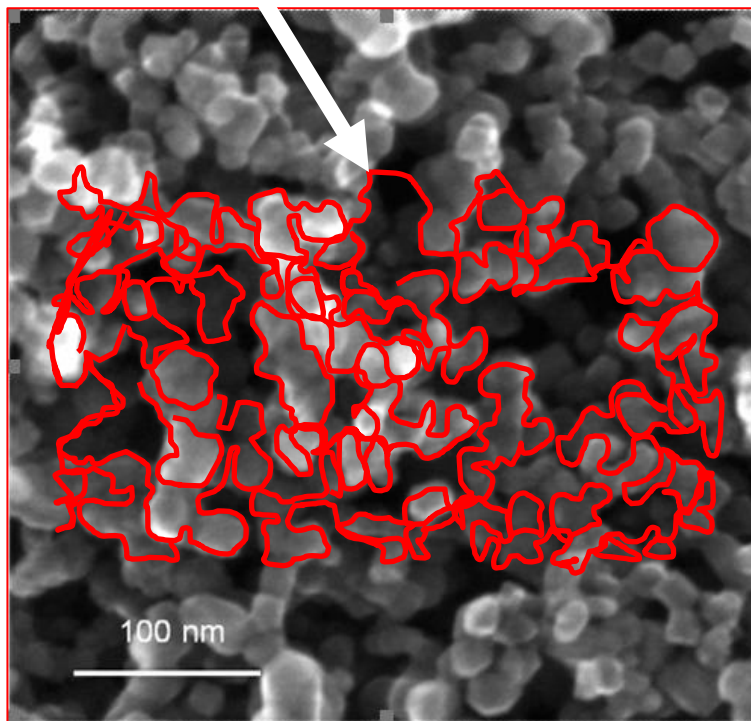
Les cellules à colorants : l'irruption des concepts de la photosynthèse dans le photovoltaïque

- Photovoltaïque moléculaire
- Découverte du concept de réseaux interpénétrés

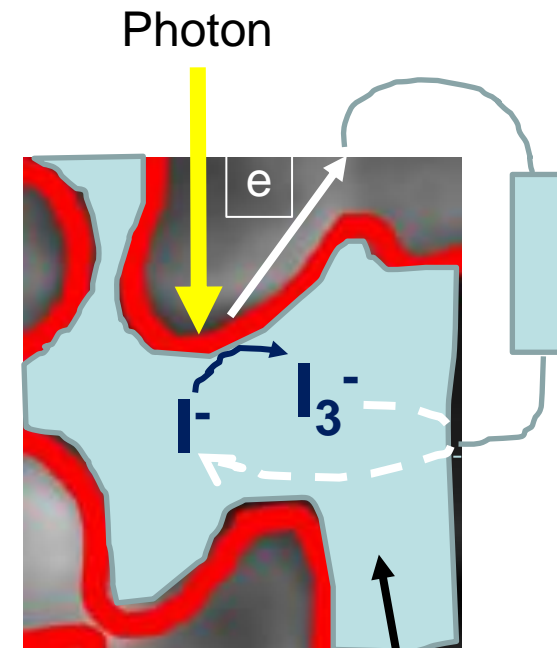
Matrice poreuse de TiO_2



Adsorption d'un colorant



Multiplication de la surface développée
 $1 \text{ cm}^2 \rightarrow 1000 \text{ cm}^2$



Injection d'un électrolyte iodure

