



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

Chaire Innovation technologique  
Liliane Bettencourt 2021-2022

*Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique*



Fondation  
Bettencourt  
Schueller

*Reconnue d'utilité publique depuis 1987*

Mercredi 26 janvier 2022

# « L'énergie solaire : analyse de la ressource et de ses transformations »

Daniel LINCOT

La ressource solaire : importance, variabilités,  
caractérisation et prévision par des moyens d'observation de la Terre

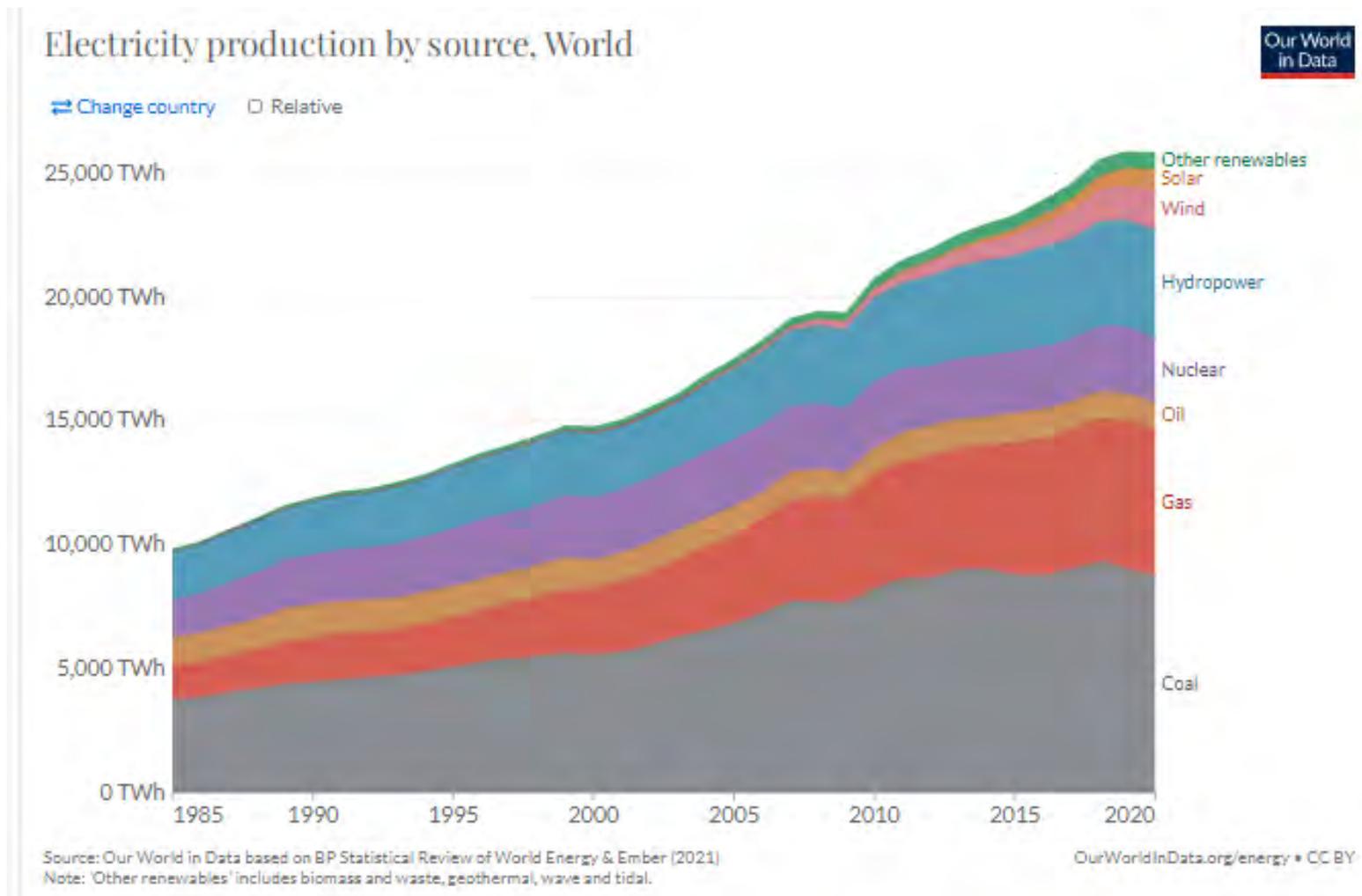
Philippe BLANC

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

# Retour sur la leçon inaugurale

# Production électrique mondiale par source : énergie finale

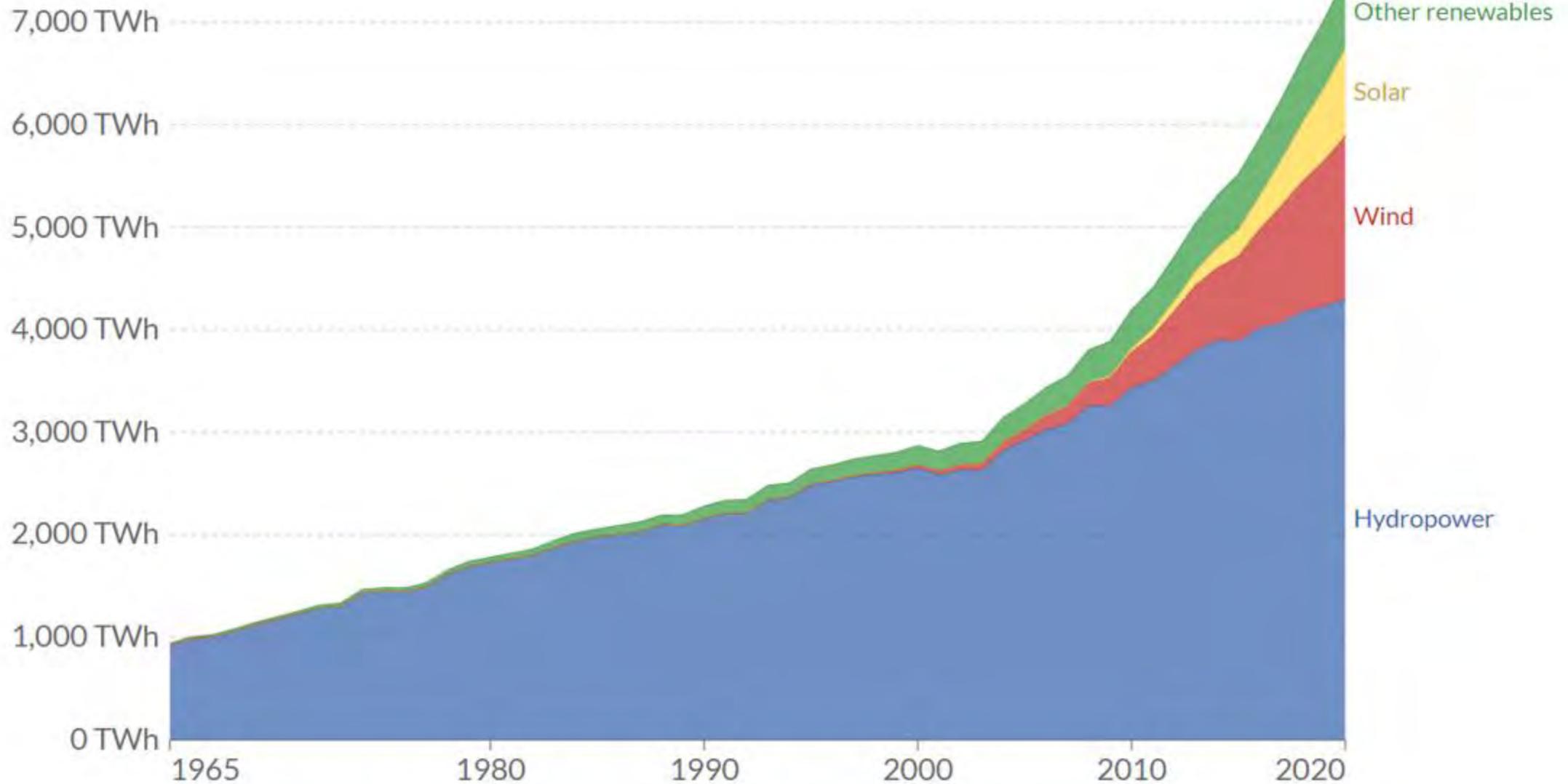
<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>



Total 2020: 25865 TWh  
Charbon: 8735 TWh  
Gaz : 5892 TWh  
Pétrole : 1128 TWh  
Nucléaire: 2616 TWh (6923 TWh)  
Eolien: 1590 TWh (3540 TWh)  
Solaire : 844 TWh (1743 TWh)

(Comptabilisés dans les statistiques de l'énergie primaire globale : équivalent en énergie primaire fossile)

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



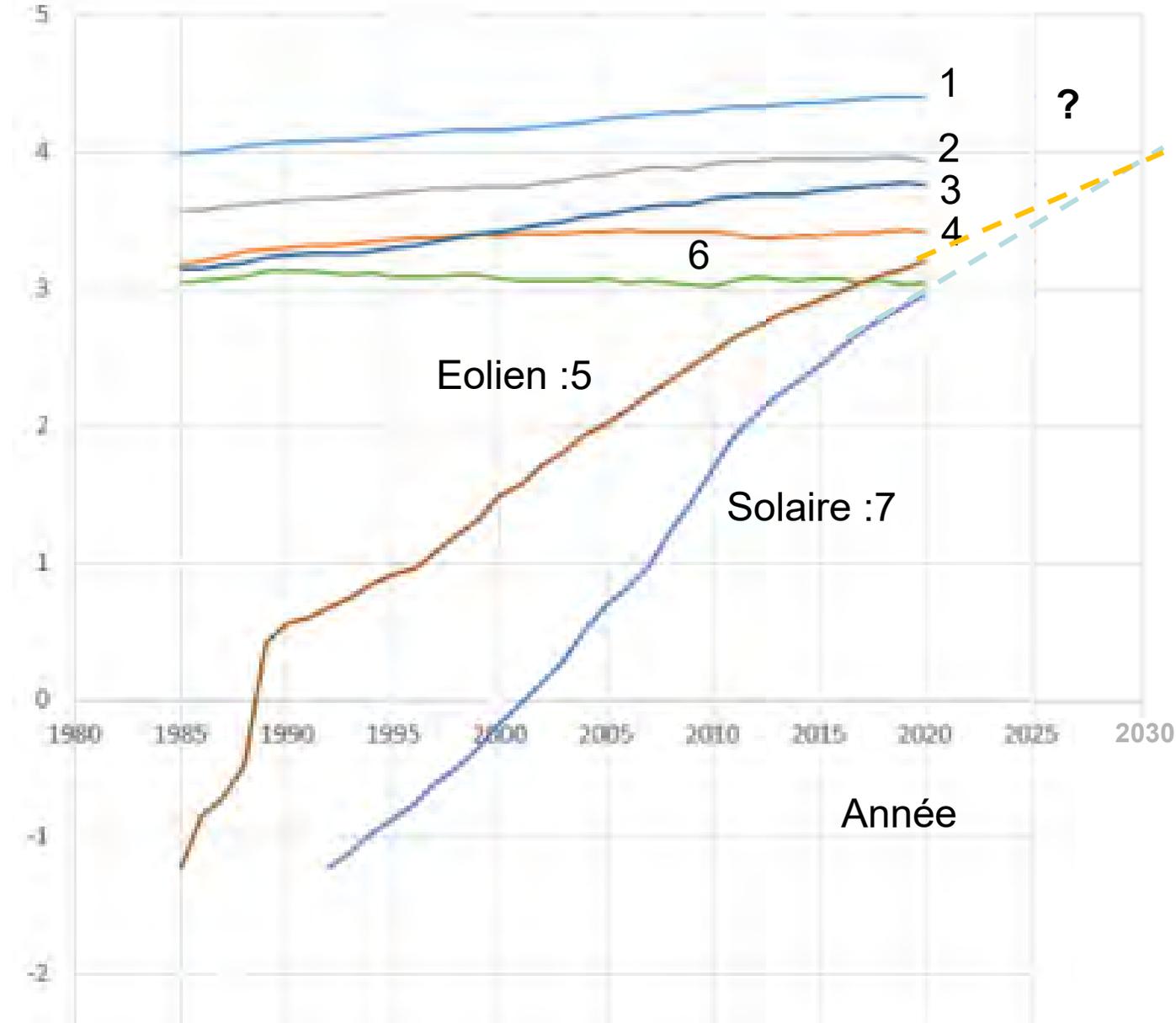
Source: BP Statistical Review of Global Energy

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

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

# 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>

# Processus de progression d'une technologie : « courbes en S »

2015

J. M. Cols Matheus,

Alta Scuola Politecnica XII Cycle | Dynamics of Innovation

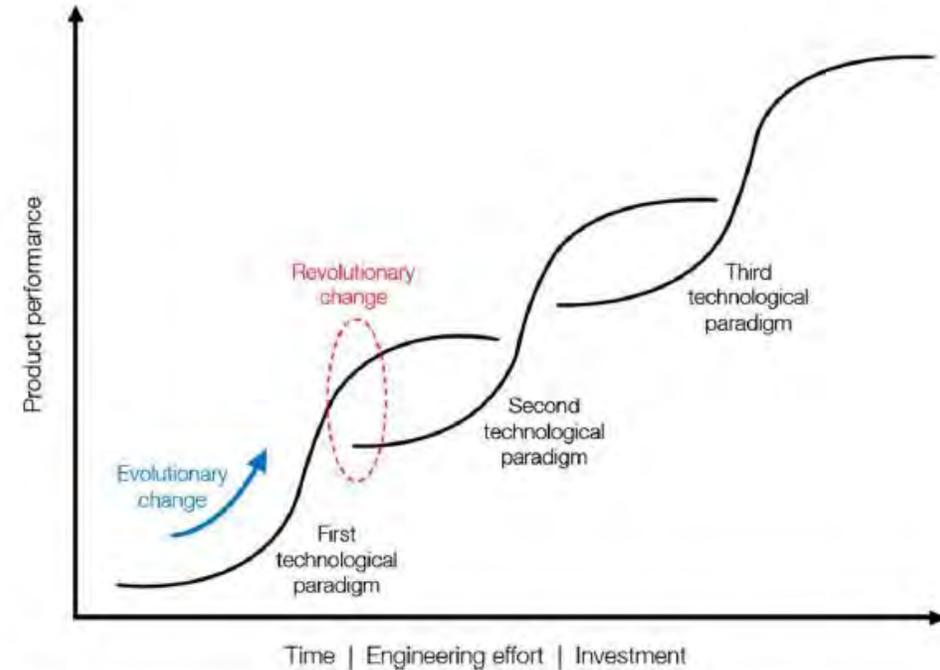
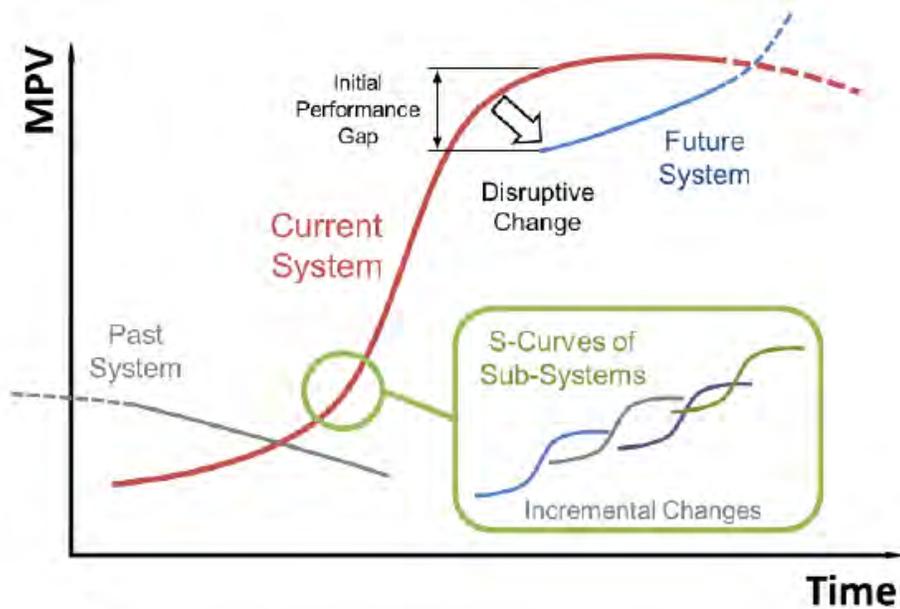


Fig. 7. S-Curve Transitions and Incremental vs. Disruptive Changes.

Fig. 2. S-curves representation of the evolution of product performance.

Horst Th. Nähler<sup>a\*</sup>, Barbara Gronauer<sup>b</sup>

<sup>a</sup>c4pi – Center for Product-Innovation, Rhönmalerring 30, 36088 Hünfeld, Germany

<sup>b</sup>StrategieInnovation, Rhönmalerring 30, 36088 Hünfeld, Germany

The Constituent Elements of the Paradigm for Electric Power Transmission and its Emergence from the perspective of Nikola Tesla

Daniel Lincot , Collège de France, 26-1-2022

Technology life-cycles in the energy sector – Technological characteristics and the role of deployment for innovation

Joern Huenteler<sup>a,b,\*</sup>, Tobias S. Schmidt<sup>c,d</sup>, Jan Ossenbrink<sup>a</sup>, Volker H. Hoffmann<sup>a</sup>

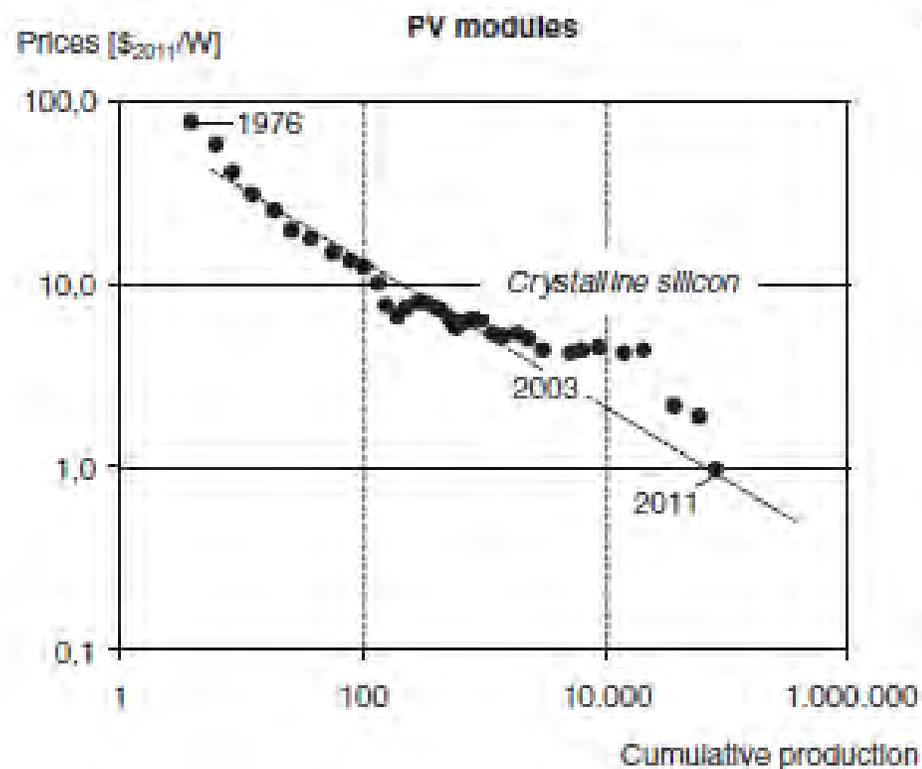
<sup>a</sup> Department of Management, Technology and Economics, ETH Zurich, Switzerland

<sup>b</sup> Belfer Center for Science and International Affairs, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, USA

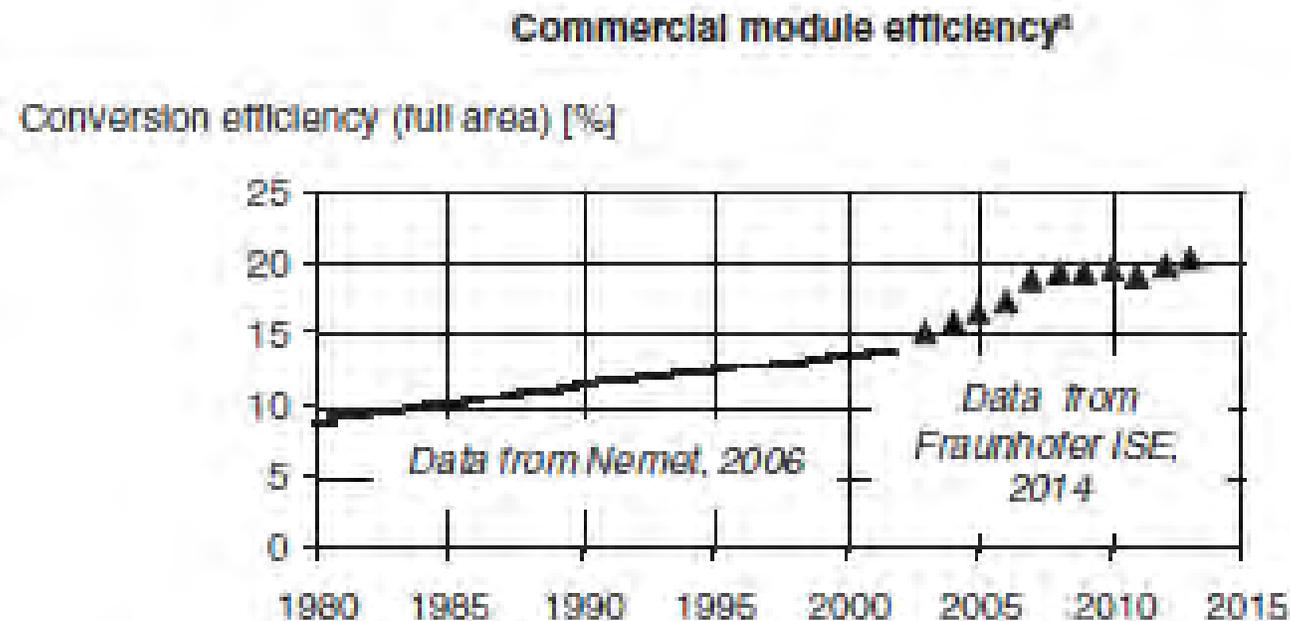
<sup>c</sup> Department of Humanities, Social and Political Sciences, ETH Zurich, Switzerland

<sup>d</sup> Precourt Energy Efficiency Center, Stanford University, USA

## Coûts d'investissement

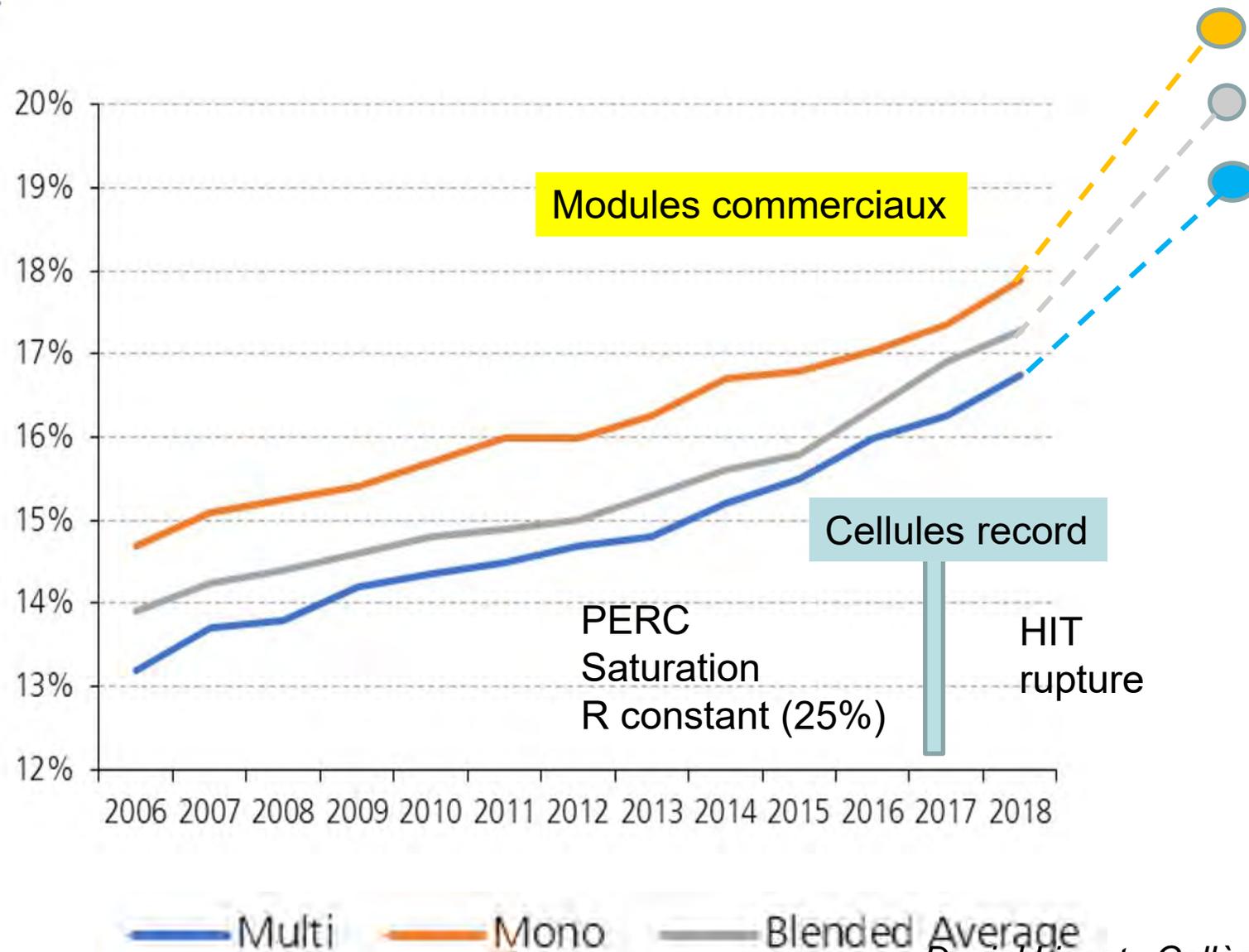


## Rendement



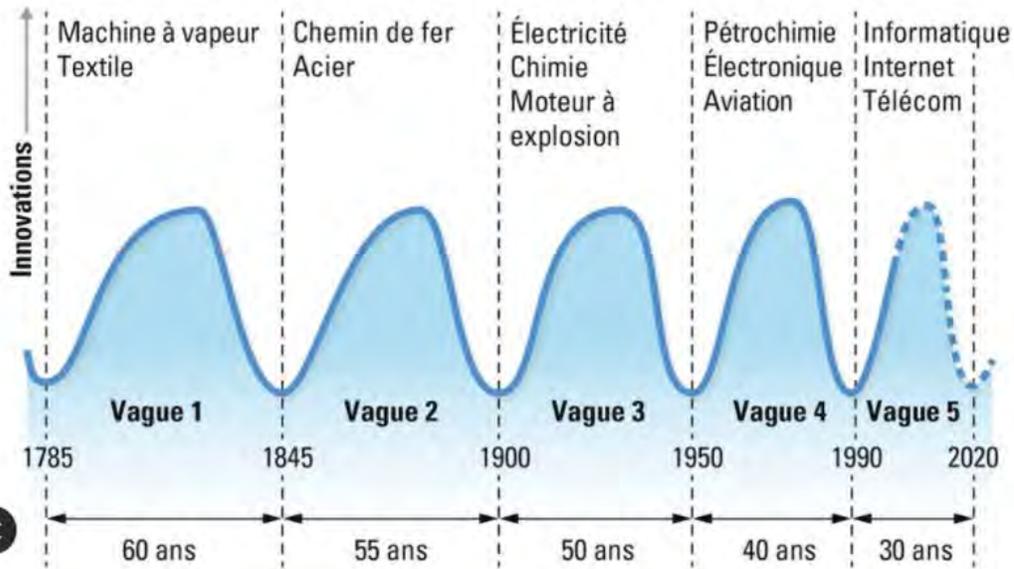
# Passage des cellules record aux modules commerciaux

Progression très importante des rendement commerciaux



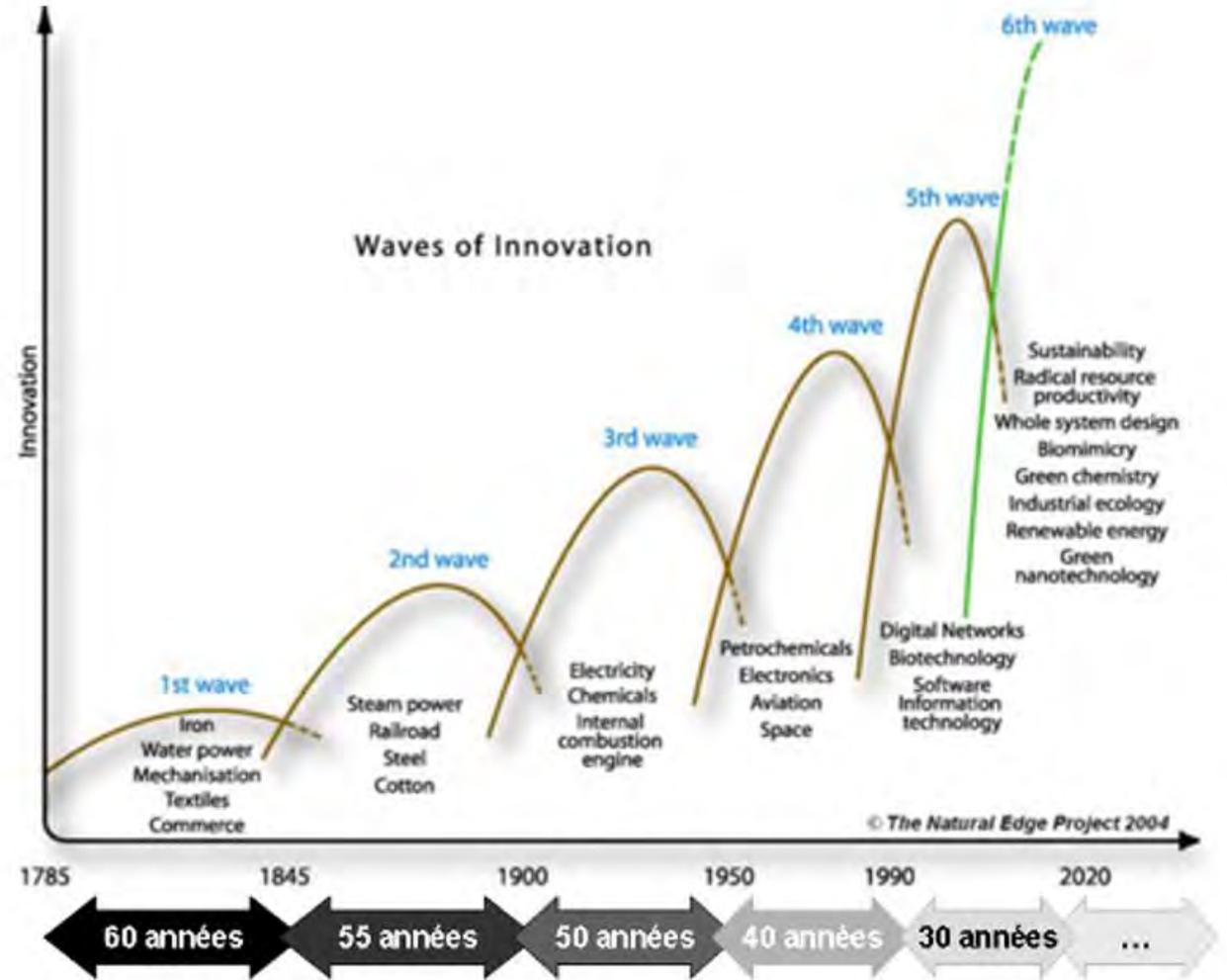
# Les processus d'innovation : Les cycles de Kondratieff- Schumpeter

Les cycles de l'innovation de Schumpeter et leur prolongement



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

Waves of Innovation



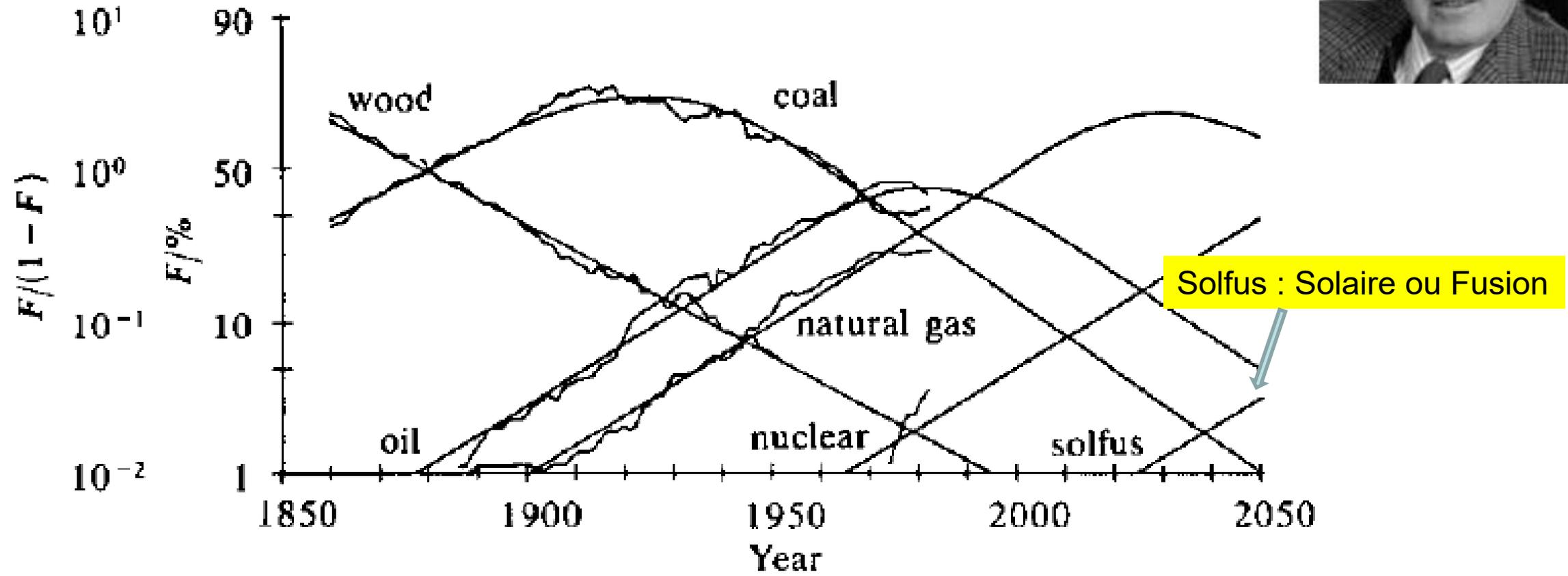
© The Natural Edge Project 2004

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

Prospective

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

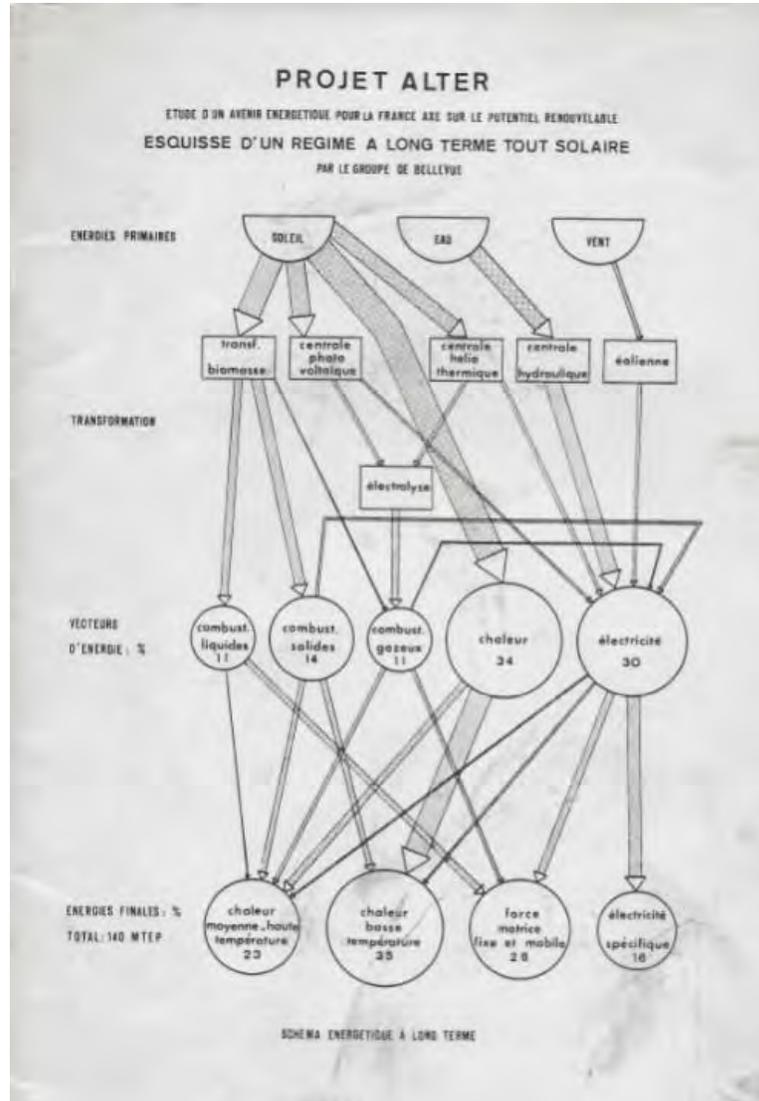
Marchetti C, Nakićenović N, 1979 "The dynamics of energy systems and the logistic substitution model" report RR-79-13, IIASA, Laxenburg, Austria



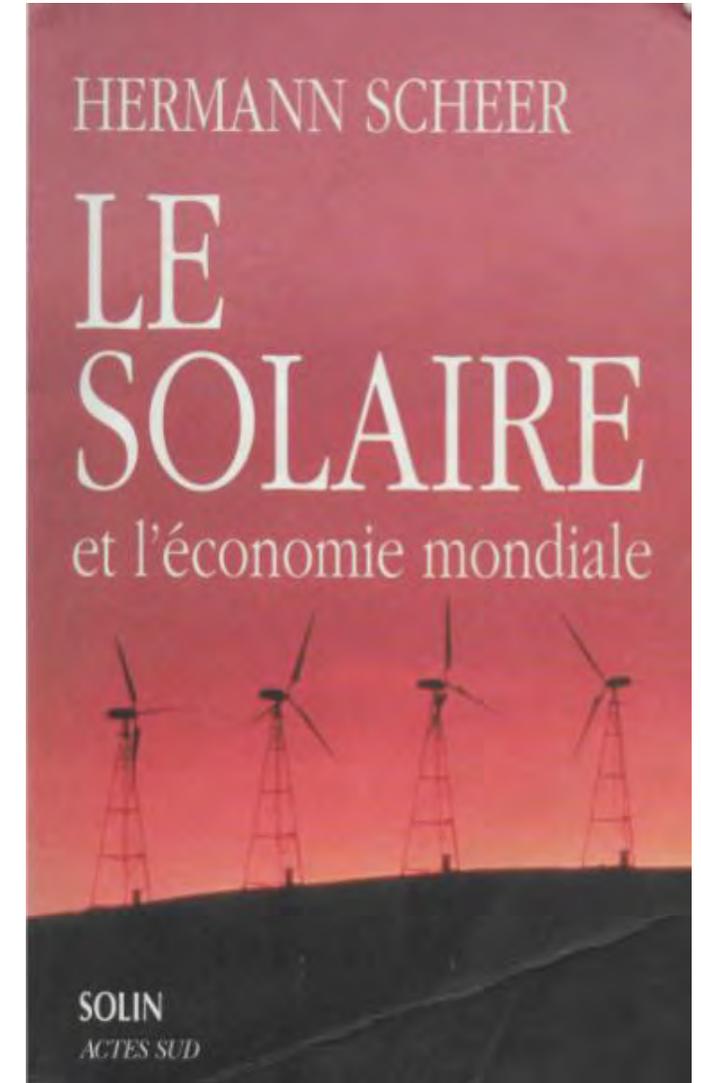
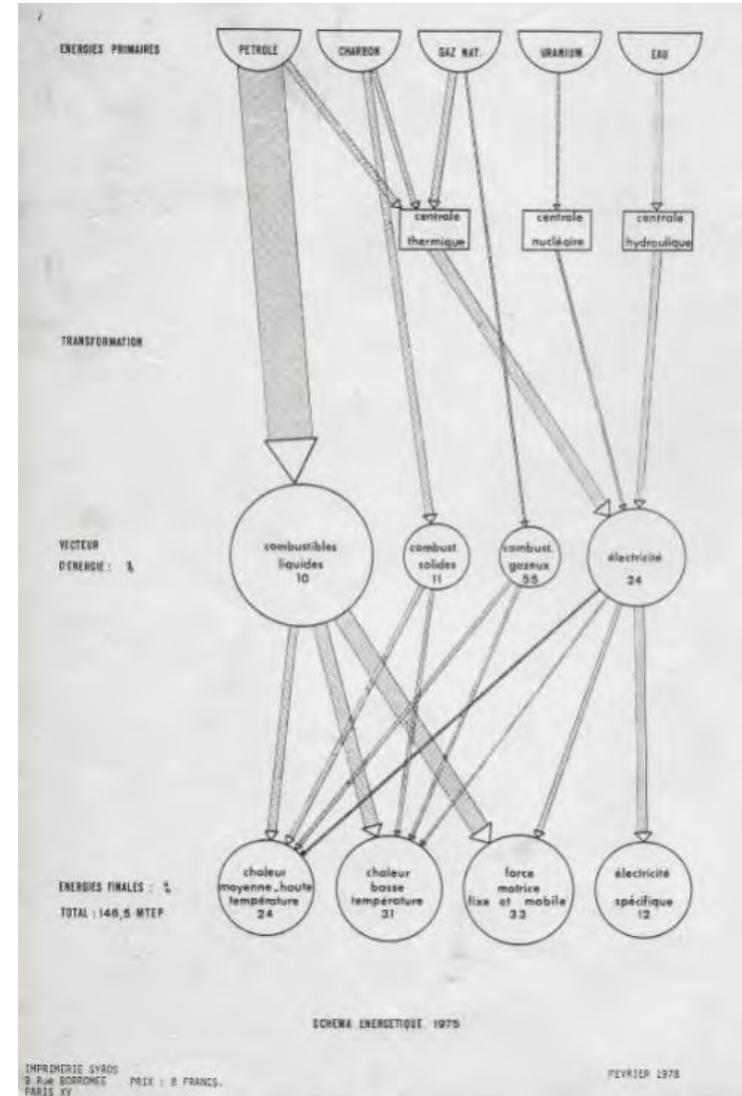
The solfus code (solar-fusion) is intended to include the possible use of solar energy, although the dilution and modulation of solar light makes it a poor candidate for large-scale energy production. Source: Marchetti and Nakićenović (1979).

# Scénarios solaires

## Projet ALTER (1978- France)



## Hermann SCHEER (1999-Allemagne)



« L'énergie solaire : analyse de la  
ressource et de ses transformations »

# L'énergie...à la Prévert ou à la Vian

$$\text{Energie} = \text{puissance} \times \text{temps}$$

joule (J)

watt (W)

seconde (s)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

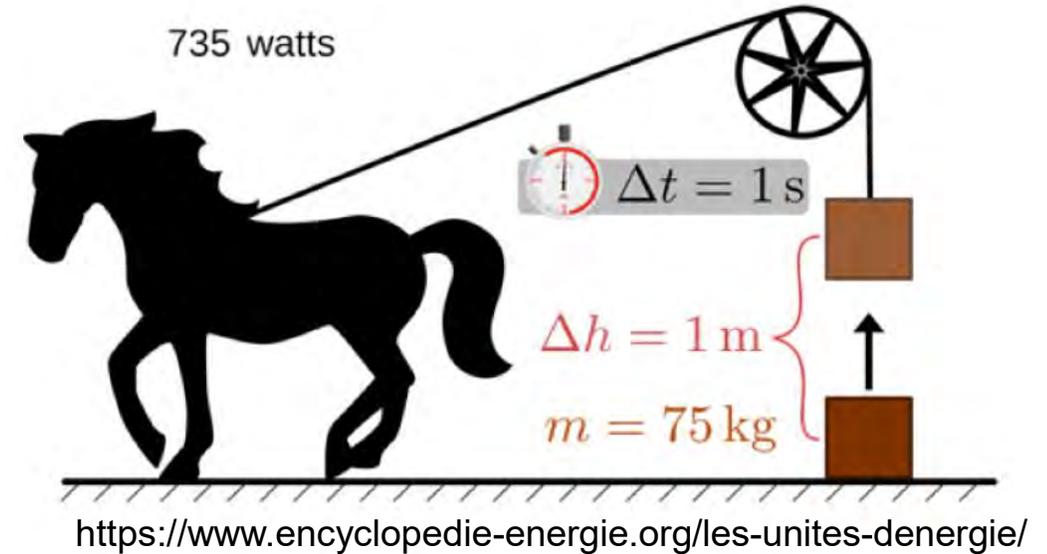
**1 kWh = 1kW pendant une heure = 3,6 millions de joules**

- Consommation d'un homme par jour : 2,3 kWh
- Consommation d'une voiture électrique : 17 kWh pour 100 km
- Une tonne montée de 367 m : 1 kWh
- Une tonne de pétrole : 11630 kWh
- Une tonne de charbon : 812 kWh
- Un litre d'essence : 10 kWh
- 10 litres d'eau bouillante : 1kWh
- 100g de Nutella : 0,6 kWh

L'énergie d'un photon  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ kWh} = 1 \text{ eV}$

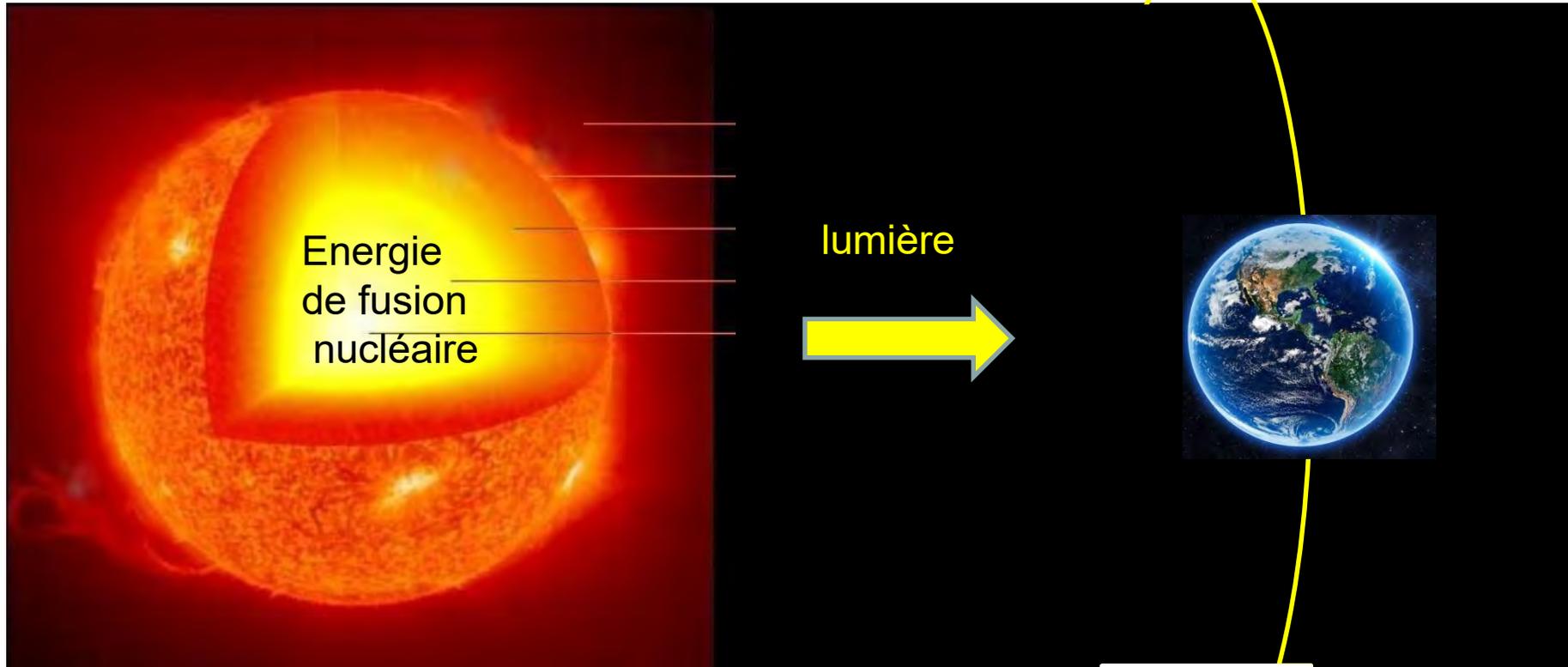
L'énergie solaire en plein soleil (1000 W)  
sur un  $\text{m}^2$  pendant une heure : 1 kWh

La puissance



1 cheval (CV) : 735 W  
1 personne : 200 W (0,27 CV)  
1 voiture : 100 CV soit 73500 W (73,5 kW)  
1 centrale électrique : 1 GW soit 1,36 million CV  
L'humanité : 17000 GW (17 TW)  
La lumière solaire sur  $1 \text{ m}^2$  : 1000 W  
La lumière solaire sur  $1 \text{ km}^2$  : 1GW

**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

Puissance consommée par l'humanité : 17 TW

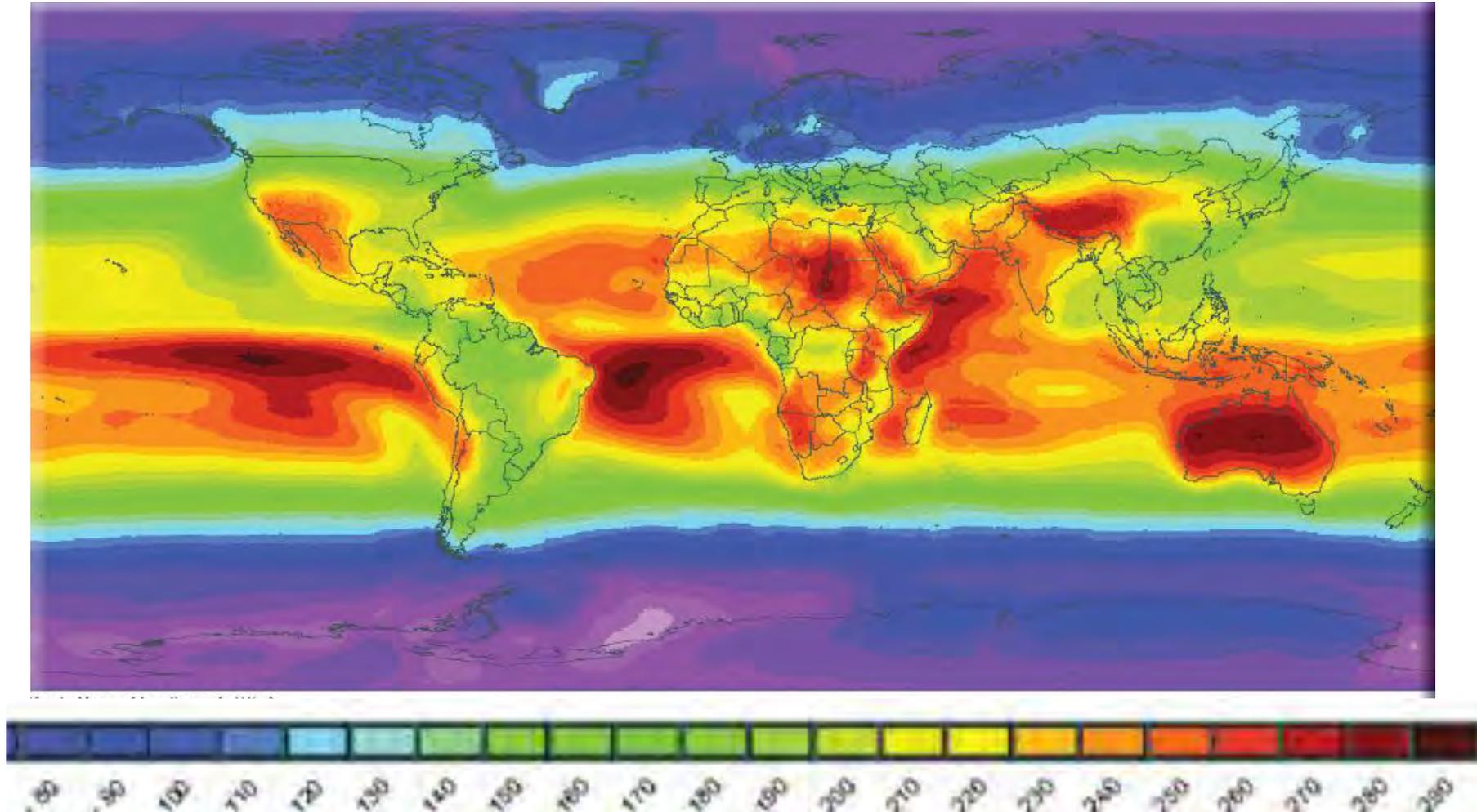
**Rapport : 10 000**

**Puissance reçue par  $m^2$  : 1360 W**

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Structure\\_du\\_Soleil.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Structure_du_Soleil.jpg)

Daniel Lincot , Collège de France, 26-1-2022

# Irradiation moyenne au niveau du sol en Watt/m<sup>2</sup> : 200 W/m<sup>2</sup> (342 à l'extérieur de l'atmosphère )



Pour 17 TW

100 W : 170 000 km<sup>2</sup>  
410 km x 410 km

200 W : 85 000 km<sup>2</sup>  
290 km x 290 km

290 W : 58 600 km<sup>2</sup>  
242 km x 242 km

Si R=20%

920x920 km<sup>2</sup>

651x651 km<sup>2</sup>

541x541 km<sup>2</sup>

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



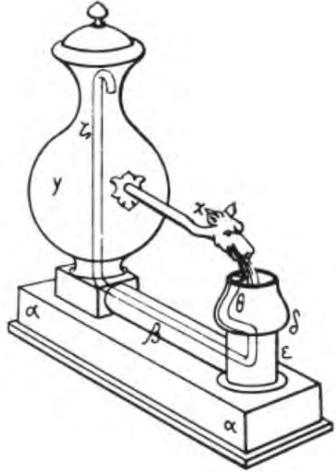
A consulter :

<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>

# Antiquité Moyen age

**-300** Philon de Bysance



**-213** Miroirs d'Archimède  
Siège de Syracuse



<https://lenergie-solaire.net/histoire>

**-100** Héron d'Alexandrie  
Chaleur → mécanique :  
Eolipyle, Thermoscope, Fontaine



**+IV-V** Anthénius de Tralles  
premier récit « miroirs d'archimède »  
Mention Multi miroirs

**1269** Vitellio écrit un ouvrage  
relatant les miroirs

**1284** Roger Bacon  
fabrique des miroirs  
« Soumis à la pression  
de l'époque »

Grand trou noir

# La renaissance

**1561** Leonard de Vinci

Projet inachevé de De Vinci (XVI<sup>ème</sup> siècle EC) d'un miroir de plus de 6 km de diamètre (!) pour l'industrie du textile avec stockage dans une piscine d'eau en ébullition

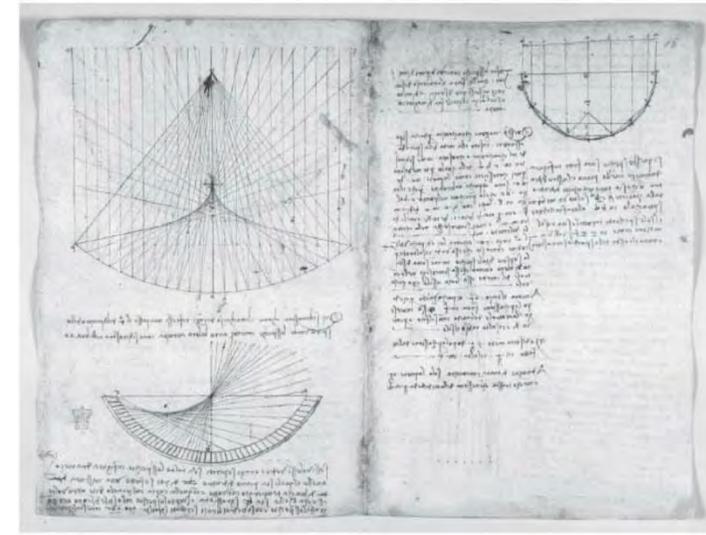


Figure 4.7. A page from Leonardo's workbook shows his design for an enormous concentrating mirror he hoped to build.

<https://lenergie-solaire.net/histoire>

**1615** Salomon de Caus

reprend l'idée de Héron mais avec concentration avec un miroir

**1619** G. Magnini fabrique des miroirs concaves qu'il diffuse auprès des princes italiens, calculs Ami de Galilée

« Traité des effets admirables du miroir sphérique concave »

**1637** R. Descartes ne « croit pas » aux miroirs ardents

**1642** Athanasius Kircher refait des essais concluants sur miroirs d'Archimède (avec 5 miroirs)

**1662** François Villette (Lyon) fabrique des miroirs ardents présentés à Louis XIV (Cassini)  
« Miroirs magiques »



## Faits marquants 18<sup>eme</sup> Siècle

**1726** Charles François Dufay

Transport à grande distance de l'énergie rayonnante

« four à double réflexion mis en œuvre en 1968 par Felix Trombe »

**1747** Buffon prouve la réalité de la chaleur solaire

En présence de Louis XVI

Principe analogue aux héliostats de Themis (1986)

**1767** De Saussure mesure de l'élévation de température

Dans des caisses vitrées

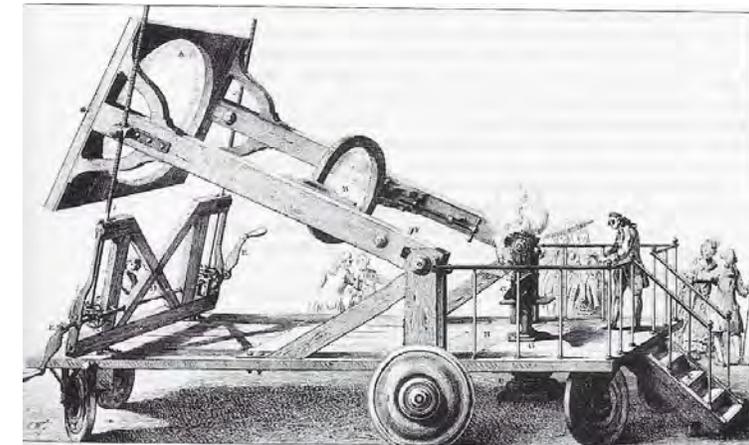
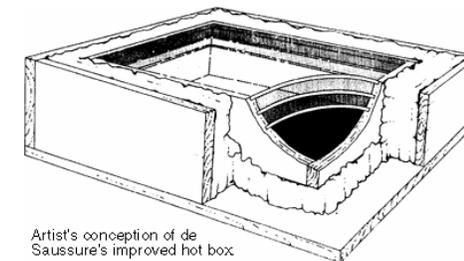
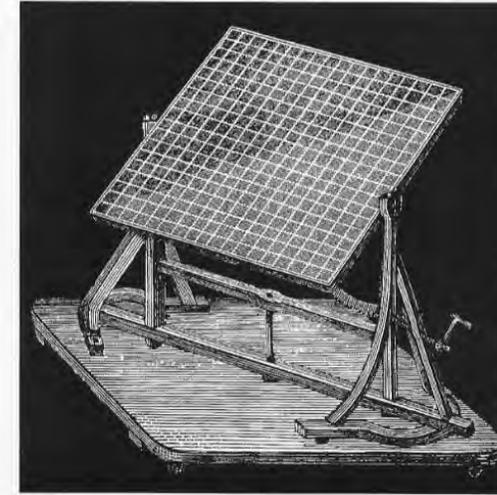
Critique par Ducarla, Lettre de Saussure à Buffon

**1774** Lavoisier démonstration de la chaleur solaire

Avec concentration par lentilles (faites par St Gobain)

Interrogation fondamentale:

Quelle est l'intensité calorifique du rayonnement solaire ?



« Le 5 octobre, vers une heure de l'après-midi, le ciel n'étant pas bien net, nous avons exposé, sur un charbon, au foyer de notre lentille, un pièce de deux liards ; environ une demi minute après, elle s'est trouvée complètement fondue et en bain [...] »

« La fusion du fer forgé demande beaucoup plus de chaleur que celle du cuivre. Nous n'avons pu produire l'activité nécessaire sans resserrer les rayons par l'interposition d'une seconde lentille. Nous nous sommes servis pour cela d'une lentille de verre solide, de 8 pouces et demi de diamètre (23 cm) et de 22 pouces 8 lignes de foyer placée à 8 pieds 7 pouces de la première ; le foyer brûlant se trouve à 1 pied au delà du centre de la petite lentille et a 8 lignes de diamètre. »

« Nous avons exposé à ce foyer, dans un charbon creux, des copeaux de fer forgé, qui s'y sont fondus presque à l'instant en bain parfait ; ce fer, ainsi fondu, a bouillonné puis détonné comme aurait fait du nitrate en fusion ; et il en partait une grande quantité d'étincelles qui produisaient en l'air, et en petit, l'effet des étoiles d'artifice [...] » (*Œuvres de Lavoisier recueillies par son Exc. le Ministre de l'Instruction Publique*, cité par F. Trombe, 1950).

Source : François Pharabod, « Des miroirs ardents aux centrales solaires », l'énergie solaire en France, Editions du comité des travaux historiques et scientifiques , 1995

# Des avancées fondamentales

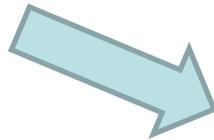
## Rayonnements visible, calorique, chimique

**1770** Carl Wilhelm Scheele (1742-1786)  
découvre que la lumière noircit le chlorure  
d'argent « effet mystérieux »

**1800** Découverte des rayons caloriques  
William Herschel (1728-1822)  
« le thermomètre répond dans la zone infrarouge »

**1801** Découverte des rayons chimiques  
Johan Ritter (1776-1810)  
« par symétrie il devrait y avoir un autre  
rayonnement de l'autre côté du spectre visible »

Chlorure d'argent sous lumière rouge → reste blanc  
Chlorure d'argent sous lumière bleue → noirci  
« Rayons chimiques »



Photographie + Photovoltaïque

Premières déterminations approchées  
de la puissance solaire  
en plein soleil

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

**1834** John Herschel (mesure la puissance solaire  
Au cap de Bonne Espérance 19,15 cm de glace fondue

**1838** Claude Pouillet (1790-1868)  
fait la mesure à Paris 17,86 cm

Note : Le rendement lumière solaire → chaleur  
est très élevé (>70%)

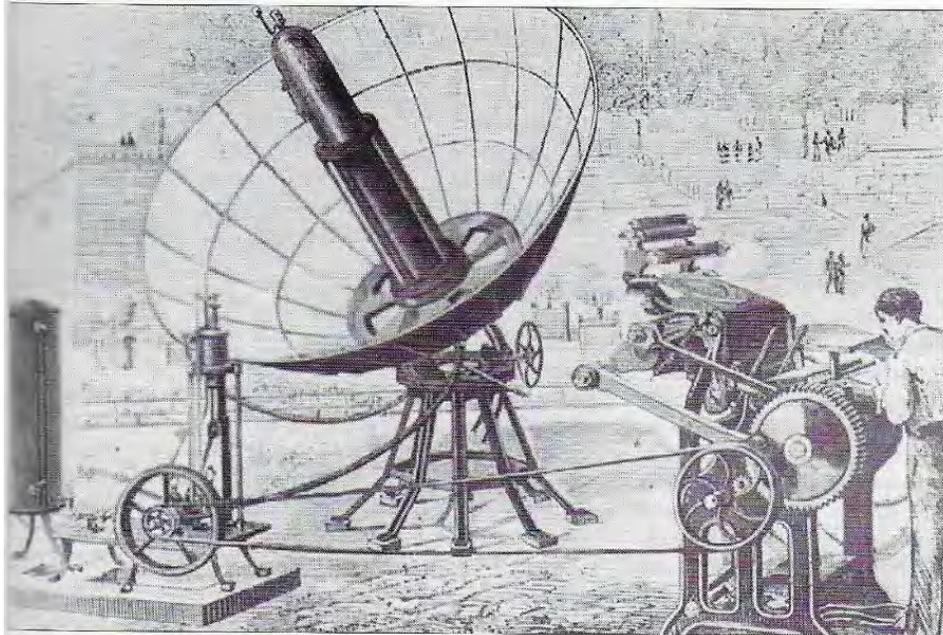
# La naissance de l'industrie solaire

**1860** Augustin Mouchot (1825-1912)  
Commence à construire des moteurs solaires

**1868** John Ericsson aux états unis

**1869** Parution du livre majeur  
d'Augustin Mouchot

**1878** démonstration expo universelle  
(Mouchot et Pifre) **médaille d'or**



*2022 A. Mouchot  
entre dans la  
« nouvelle histoire  
de France »  
Dossier Nouvel  
Observateur*

## LA CHALEUR SOLAIRE

ET SES

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

PAR

A. MOUCHOT

35 Gravures intercalées dans le texte

Nouveau Tirage

Préface de Marcel PERROT

Professeur honoraire des Facultés d'Alger  
et d'Aix-Marseille  
Président d'honneur et Fondateur de la Coopération  
méditerranéenne pour l'Énergie solaire

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

ALBERT BLANCHARD

9, rue de Médicis, Paris 6<sup>e</sup>

1980

**Début de l'aventure industrielle, développements en Algérie**

*Daniel Lincot , Collège de France, 26-1-2022*

## 1870-1920 : Naissance de l'industrie solaire et du rêve solaire

**1877** Jules Verne « Les indes noires » « La houille manquera un jour, cela est certain. Un chômage forcé s'imposera au monde entier si quelque nouveau combustible ne remplace pas le charbon »

**1901** Emile Zola , « Travail » « Quelle victoire, s'il réussissait à faire du soleil le moteur universel ! »



Vision d'une économie solaire, avec stockage de la chaleur dans de grandes cuves

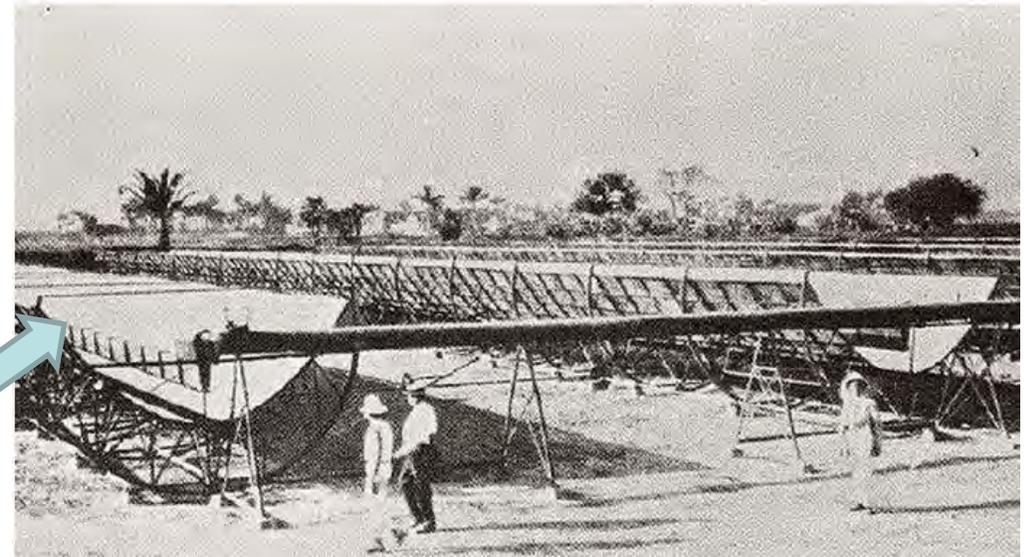
### 1900-1920 développement d'une industrie solaire

→ Chauffe-eau solaires (USA)

→ Applications industrielles

**1901** Aubrey Eneas, moteur solaire  
(10 m de diamètre)  
Pompage 10 cv

**1910** Frank Shumann 1<sup>ère</sup> centrale solaire moderne en Egypte



**Le pétrole jaillit et l'industrie solaire s'écroule, première guerre mondiale**

# 1945-2020 La longue marche des projets d'énergie solaire thermique

1946 Felix Trombe (1906-1985) (CNRS) : projet de four solaire à concentration pour transformations chimiques à haute températures

1950-1965 Développement de projets en Afrique (Algérie, institut de l'énergie solaire)

1964 Marcel Perrot « livre « La houille d'Or »

1968 Construction par le CNRS du four solaire d'Odeillo « La cathédrale du soleil »  
Grands projets d'états : le solaire est une industrie stratégique (Ch. de Gaulle)

1973 Premier choc pétrolier

23 juin 1979 : *Création du jour du soleil*

1983 Démarrage de Themis (production d'électricité) : 2 MW

1986 Arrêt de Thémis

1990-2008 Traversée du désert

2008 Projet Desertec

2020 renaissance du solaire thermique (exemple du Maroc, Algérie)





Félix Trombe © CNRS Photothèque



Themis



Odeillo four solaire © Rabatakeu - Wikimedia CC

Dossier : L'énergie solaire en France, comité d'histoire, CTHS, 1995

A voir aussi :

Laboratoire PROMES : <https://www.promes.cnrs.fr/>  
<https://www.ledepartement66.fr/dossier/themis-solaire-innovation/>

# 1945-2020 La longue marche des projets d'énergie solaire thermique

1946 Felix Trombe (CNRS) : projet de four solaire à concentration pour transformations chimiques à haute températures

1950-1965 Développement de projets en Afrique (Algérie, institut de l'énergie solaire)

1964 Marcel Perrot « livre « La houille d'Or »

1968 **Construction par le CNRS du four solaire d'Odeillo** « La cathédrale du soleil »  
Grands projets d'états : le solaire est une industrie stratégique (Ch. de Gaulle)

1973 **Premier choc pétrolier**

23 juin 1979 : *Création du jour du soleil*

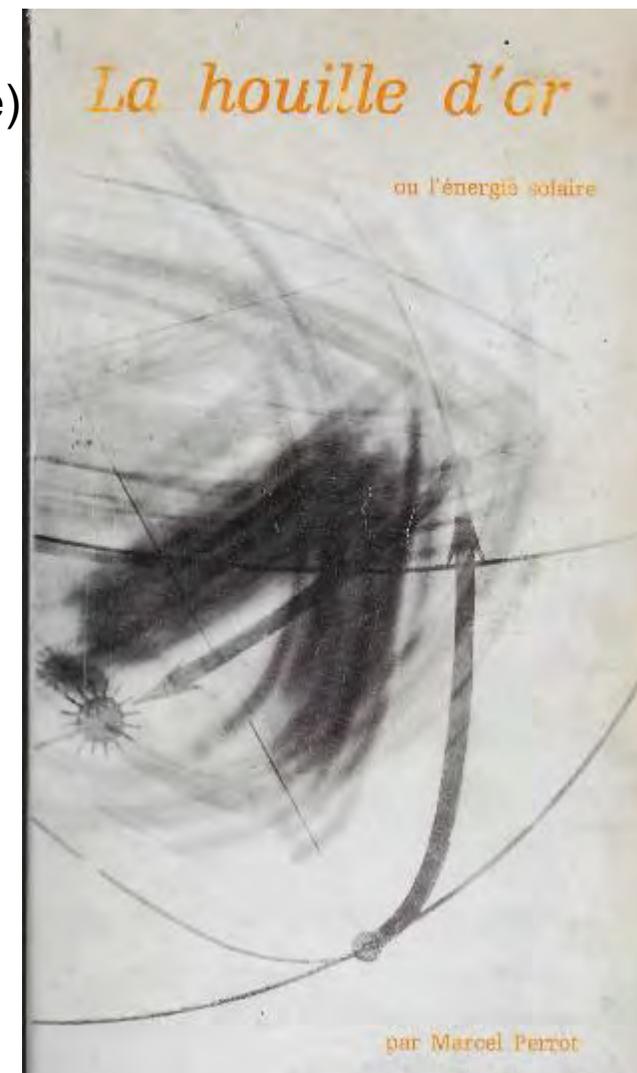
1983 Démarrage de Themis (production d'électricité) : 2 MW

1986 **Arrêt de Thémis**

1990-2008 Traversée du désert

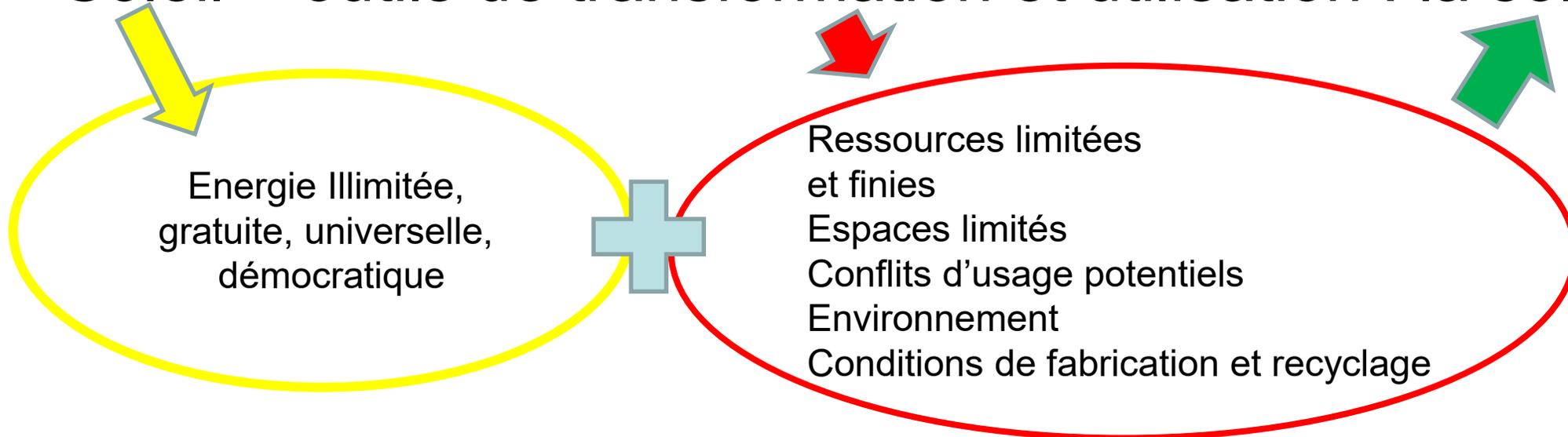
2008 Projet Desertec

2020 renaissance du solaire thermique (exemple du Maroc, Algérie)



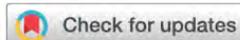
# La question des ressources terrestres

- Soleil + outils de transformation et utilisation : la solution



A-t-on suffisamment de matériaux pour fabriquer les convertisseurs à grande échelle (photovoltaïque, à concentration, éolien...)?

**Exemple des cellules au silicium : abondance des matériaux, criticité...**



Cite this: *Energy Environ. Sci.*, 2021, 14, 5587

## Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption

Yuchao Zhang,<sup>†\*</sup> Moonyong Kim,<sup>†\*</sup> Li Wang,<sup>†\*</sup> Pierre Verlinden<sup>†\*</sup> and Brett Hallam<sup>†\*</sup>

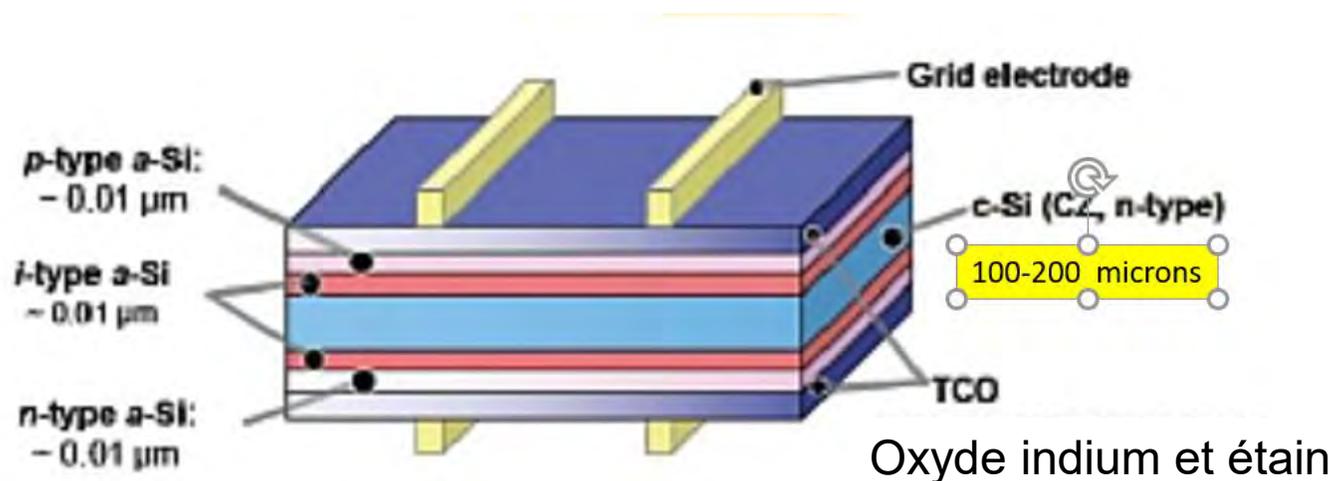
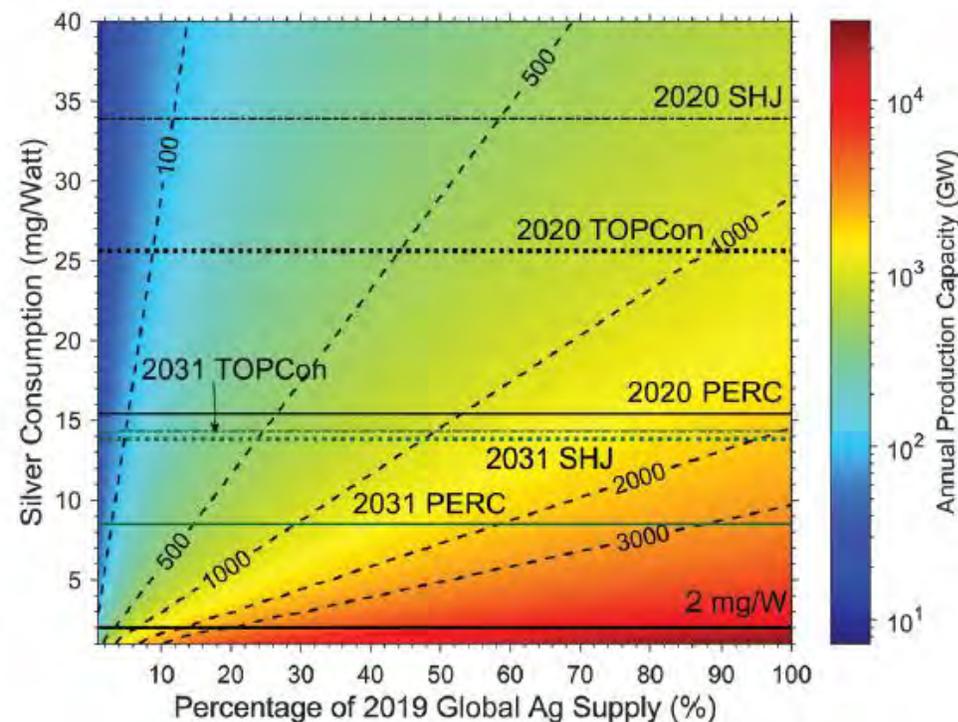


Table 1 Mass fraction, global reserves, and supply for silver, indium, and bismuth

	Mass fraction (kg kg <sup>-1</sup> )	Global reserves (tonnes)	Total supply in 2019 (tonnes)
Ag <sup>26,27</sup>	$7.5 \times 10^{-8}$	560 000	29 000
In <sup>26,31,32</sup>	$2.5 \times 10^{-7}$	15 000–50 000	2100
Bi <sup>26,36</sup>	$8.5 \times 10^{-9}$	320 000	21 000



# Physics of Solar Cells: from basics principles to material science

1<sup>st</sup> edition PVSchool2018: *Physics of Solar Cells: from basics to nanoscience*

2<sup>nd</sup> edition PVSchool2020: *Physics of Solar Cells: from basic principles to advanced characterization*



## *Physics of Solar Cells: from basics principles to material science*



Les Houches School of Physics, 3-8 April 2022

Applications before February 14th : <https://sunlit-team.eu/pv-school-2022/>



**Quelques références en relation avec le sujet du cours**

**....En particulier du côté des recherches, très actives, en histoire des sciences**

**Let It Shine, The 6000 Year Story of Solar Energy**, John Perlin, New World Library, 2013

« **Mettre le soleil en bouteille** » : les appareils de Mouchot et l'imaginaire solaire au début de la troisième république  
François Jarrige, Revue Romantisme, 150(2010)85-96

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00556580/document>

**Face à la puissance : une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel**,  
François Jarrige, Alexis Vignon, La découverte, 2020

**Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique française**, 1945-1986, Pierre Teissier  
Annales historiques de l'électricité 2013/1 (N° 11), pages 11 à 25

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01591134/document>

**Histoire des énergies renouvelables en France**, 1880-1990,  
Histoire, Philosophie et Sociologie des Sciences, Anaël Marrec, Doctorat de l'Université de Nantes, 2018

[https://www.researchgate.net/publication/330439605\\_Histoire\\_des\\_energies\\_renouvelables\\_en\\_France\\_1880-1990](https://www.researchgate.net/publication/330439605_Histoire_des_energies_renouvelables_en_France_1880-1990)

**Construire une histoire de l'énergie solaire**

L'exemple d'une initiative originale d'une  
recherche solaire méditerranéenne

**Sophie Pehlivanian** Rives méditerranéennes, 2015

<https://journals.openedition.org/rives/4957?lang=fr>

**Histoire de l'énergie solaire en France**, Science,  
Technologie et patrimoine d'une filière d'avenir  
Sophie Pehlivanian,  
Thèse de l'Université de Grenoble, 2014

**L'énergie solaire en France**, ouvrage collectif sous la direction d'Alexandre Herléa,  
Editions du comité des travaux historiques, 1995