



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 2 février 2022

Histoire des technologies photovoltaïques (1839-2021) : presque deux siècles de découvertes, d'innovations, d'aventures humaines

Daniel LINCOT

Edmond Becquerel et l'innovation technologique : la physique « appliquée aux arts et à l'industrie »

Christine BLONDEL

daniel.lincot@cnsr.fr

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

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



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Innovation technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022

Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



Mercredi 2 février 2022

Histoire des technologies photovoltaïques (1839-2021) : presque deux siècles de découvertes, d'innovations, d'aventures humaines

Daniel LINCOT

daniel.lincot@cirs.fr

1869 Le lego de la matière : Le tableau de Mendeleïev

1	IA 1 H Hydrogène																VIIIA 2 He Hélium	
2	3 Li Lithium	4 Be Beryllium										III A 5 B Bore	IVA 6 C Carbone	VA 7 N Azote	VIA 8 O Oxygène	VII A 9 F Fluor	10 Ne Neon	
3	11 Na Sodium	12 Mg Magnésium										13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon	
4	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
6	55 Cs Césium	56 Ba Baryum	* *	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhénium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon
7	87 Fr Francium	88 Ra Radium	** **	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
			* lanthanides	57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium
			** actinides	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Photovoltaïque et photographie

ARAGO décrit la fabrication du Daguerréotype

RAPPORT

DE M. ARAGO

SUR LE

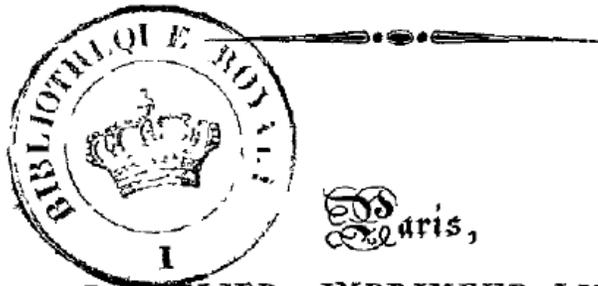
DAGUERRÉOTYPE,

Lu à la séance de la Chambre des Députés
le 3 juillet 1839,

ET

A L'ACADÉMIE DES SCIENCES,

séance du 19 août



BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

Du Bureau des Longitudes, etc.,
QUAI DES AUGUSTINS, 55.

1839

Les alchimistes réussirent jadis à unir l'argent à l'acide marin. Le produit de la combinaison était un sel blanc qu'ils appelèrent *lune* ou *argent corné* (1). Ce sel

jouit de la propriété remarquable de noircir à la lumière, de noircir d'autant plus vite que les rayons qui le frappent sont plus vifs. Couvrez une feuille de papier d'une couche d'argent corné ou, comme on dit aujourd'hui, d'une couche de chlorure d'argent; formez sur cette couche, à l'aide d'une lentille, l'image d'un objet; les parties obscures de l'image, les parties sur lesquelles ne frappe aucune lumière resteront blanches; les parties fortement éclairées deviendront complètement noires; les demi-teintes seront représentées par des gris plus ou moins foncés.

- 18?? « Charles » et les silhouettes
- 1802 Wedwood (Humphry Davy)

Sel blanc applé « lune »
ou « argent corné » : **AgCl**

1566

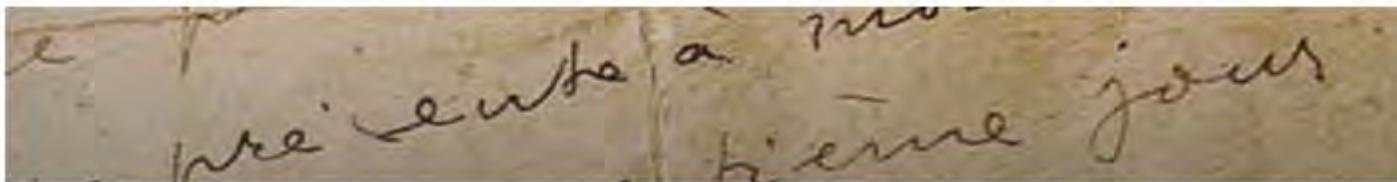
(1) Dans l'ouvrage de FABRICIUS (*De rebus metallicis*), imprimé en 1566, il est déjà longuement question d'une sorte de *mine d'argent* qu'on appelait *argent corné*, ayant la couleur et la transparence de la corne, la fusibilité et la mollesse de la cire. Cette substance, exposée à la lumière, passait du *gris jaunâtre au violet*, et, par une action plus long-temps prolongée, *presque au noir*. C'était l'argent corné naturel.

Cette substance, exposée à la lumière
Passait du gris jaunâtre au violet...presque au noir.
C'était l'argent corné naturel

1816 N. Niepce

1835 L. Daguerre (**AgI**)

1839 janvier → Arago académie
des sciences



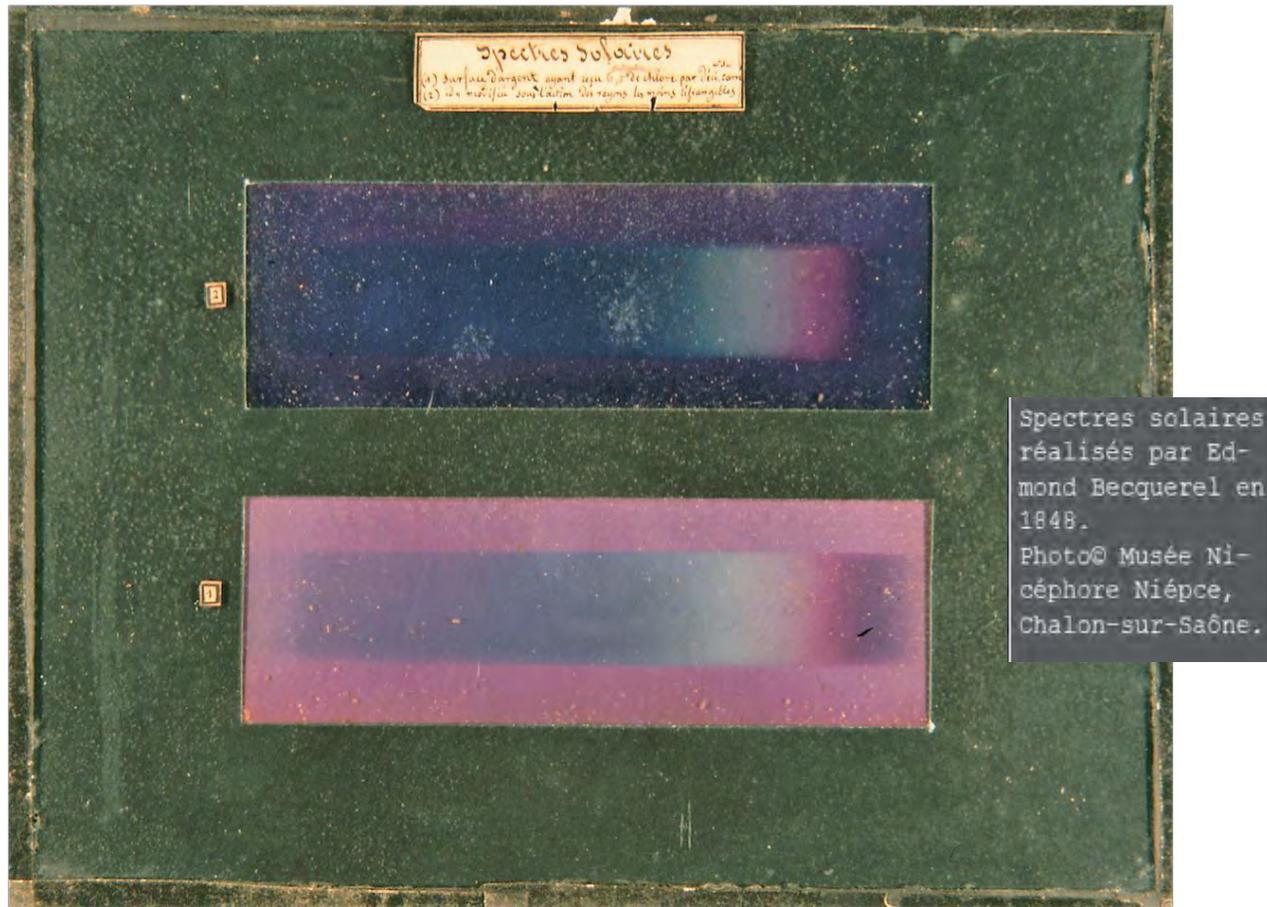
François Arago (1786 – 1853) et le régime photographique - Sicard Monique

Le 19 août 1839, à l'Académie des sciences, quai Conti, François Arago dévoilait publiquement les procédés de fabrication du daguerréotype. Une foule se pressait aux portes. La séance était attendue avec impatience : dès le mois de janvier de la même année, le physicien avait annoncé l'invention merveilleuse sans révéler cependant les secrets de sa fabrication. En six mois, les imaginations s'étaient enflammées. En France, à l'étranger, des inventeurs s'étaient mis fiévreusement au travail pour redécouvrir la technique dont il avait vanté la simplicité. « Cette découverte, annonçait-il, la France l'a adoptée ; dès le premier moment, elle s'est montrée fière de pouvoir en doter libéralement le monde entier. »

Edmond Becquerel et la photographie

2005- Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie Thèse de Jérôme Fatet, Université Claude Bernard Lyon 2, Histoire et philosophie des sciences

1848 Edmond Becquerel réalise les premières photographies couleur du spectre solaire



Peindre avec la lumière, entre art et sciences, les prémices de la photographie couleur au 19^{ème} siècle

Bertrand Lavédrine dans « L'impressionnisme entre Art et Science, Hermann 2015

2018 A l'origine des couleurs des images photochromatiques d'Edmond Becquerel Thèse Vicor de Seauve, Thèse ENS PSL

2020 thèse théorique école polytechnique

La découverte de l'effet photovoltaïque

4 Novembre 1839

30 juillet 1839

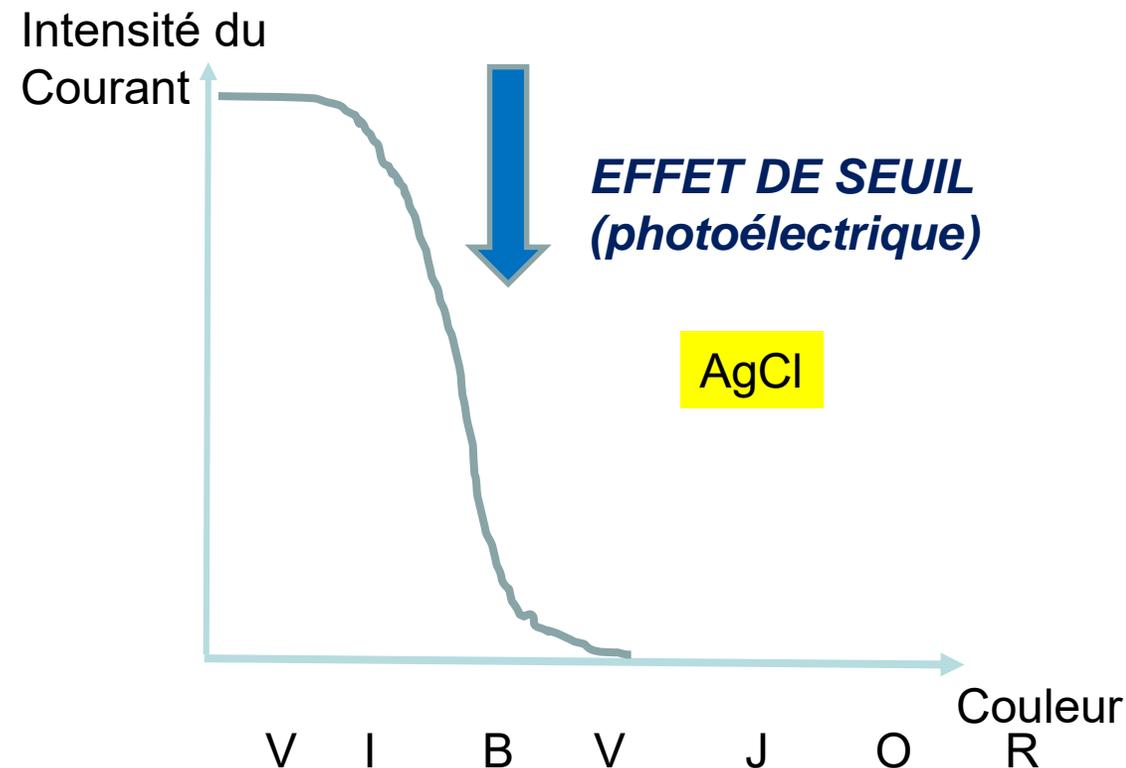
MÉMOIRES LUS.

ÉLECTRO-CHIMIE. — *Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques; par M. EDMOND BECQUEREL.* (Extrait par l'auteur.)

» Madame de Sommerville d'abord, puis M. Biot, avaient montré que le papier sensible préparé avec le chlorure d'argent était inégalement influencé quand on le présentait à la lumière solaire sous différents écrans; mais actuellement, à l'aide du procédé précédemment indiqué, on n'aura plus besoin de comparer les teintes diverses du chlorure d'argent pour juger de l'effet des moyens chimiques, puisque cet effet sera mesuré par l'intensité du courant électrique produit dans l'action de la lumière sur les parties constituantes des corps.

« on n'aura plus besoin
puisque cet effet sera mesuré par l'intensité du courant électrique
Produit dans l'action de la lumière sur les parties constituantes des corps »

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





Edmond Becquerel: A passion for Light



200th Birth Anniversary, 7th December 2020, Paris

THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS

VOLUME 32, NUMBER 5

MAY, 1960

1960

Becquerel Photovoltaic Effect in Binary Compounds

RICHARD WILLIAMS

RCA Laboratories, Princeton, New Jersey

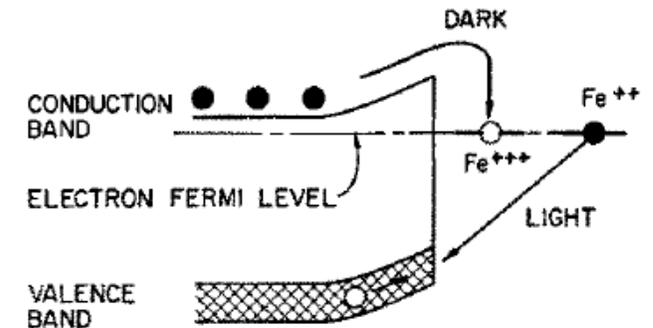
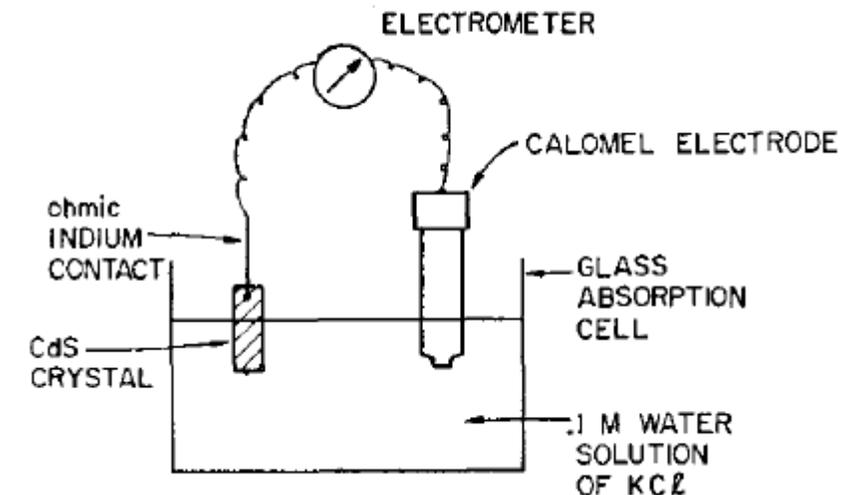
(Received December 10, 1959)

BECQUEREL observed the first photovoltaic effect in 1839.¹ He used an electrode consisting of a sheet of platinum covered with a thin layer of silver chloride.

Very recently, some important contributions to understanding of the photovoltaic effect in semiconductor-electrolyte systems have appeared in studies of the electrode properties of elemental semi conductors.

¹ E. Becquerel, *Compt. rend.* **9**, 561 (1839).

² W. H. Brattain and C. G. B. Garrett, *Bell System Tech. J.* **34**, 129 (1955).



1839 Les premiers semi-conducteurs photovoltaïques (E. Becquerel)

AgCl, AgBr, AgI, Cu₂O, CuO, Cu(Zn)O

The periodic table shows the following elements highlighted with red circles: Ag (Silver), Cu (Copper), Zn (Zinc), Se (Selenium), Br (Bromine), I (Iodine), and O (Oxygen). The element O is also highlighted with a green circle. The elements are arranged in groups IA through VIIIA and periods 1 through 7. The lanthanides and actinides are shown at the bottom.

1	2											10					
1	2											10					
3	4											10					
11	12											18					
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
* lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
** actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	

35 ans après, Le sélénium prend le relais...

1	IA 1 H Hydrogène																	VIIIA 2 He Hélium
2	3 Li Lithium	4 Be Beryllium										5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Neon	
3	11 Na Sodium	12 Mg Magnésium										13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Sélénium	17 Cl Chlore	18 Ar Argon	
4	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
6	55 Cs Césium	56 Ba Baryum	* Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon
7	87 Fr Francium	88 Ra Radium	** actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
				57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium
				89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium



1817
Berzelius
sélénium

1873 Découverte de la photoconductivité

Willoughby Smith (et May), Ingénieur électricien, durant la pose du câble télégraphique transatlantique (1860-1870)

<https://www.histv.net/willoughby-smith>

A l'idée d'utiliser des barres de sélénium pour détecter les défauts dans les câbles électriques

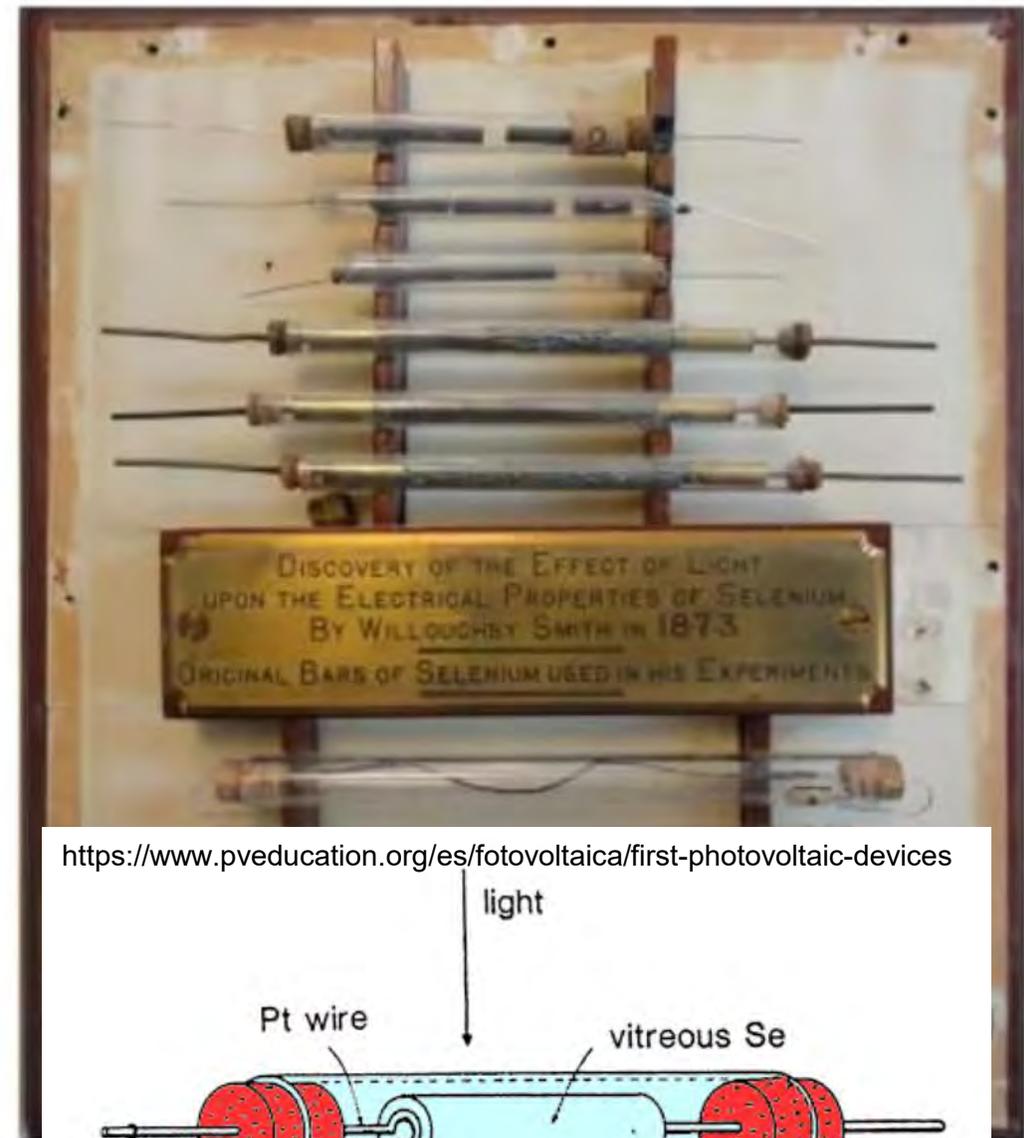
La nuit cela marche très bien...le jour pas du tout. Il a l'idée de mesurer la résistance : elle diminue avec l'éclairement → application en photométrie

1877 (Re)découverte du photovoltaïque

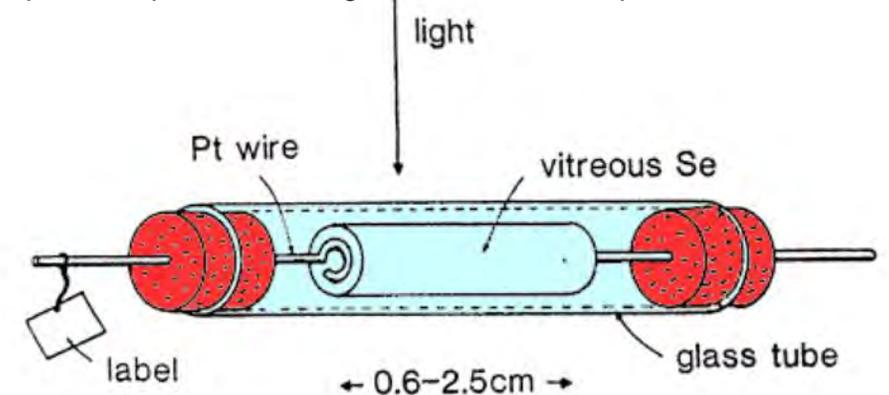
William Adams et Richard Day observent la production d'un « photocourant » après application d'une polarisation

W. Smith, « The action of light on selenium », Journal of the Society of Telegraph Engineers 2 (1873)32

W. Adams, R. Day, « The action of Light on Selenium », Philosophical Proceedings of the Royal Society of London 25 (1877)115



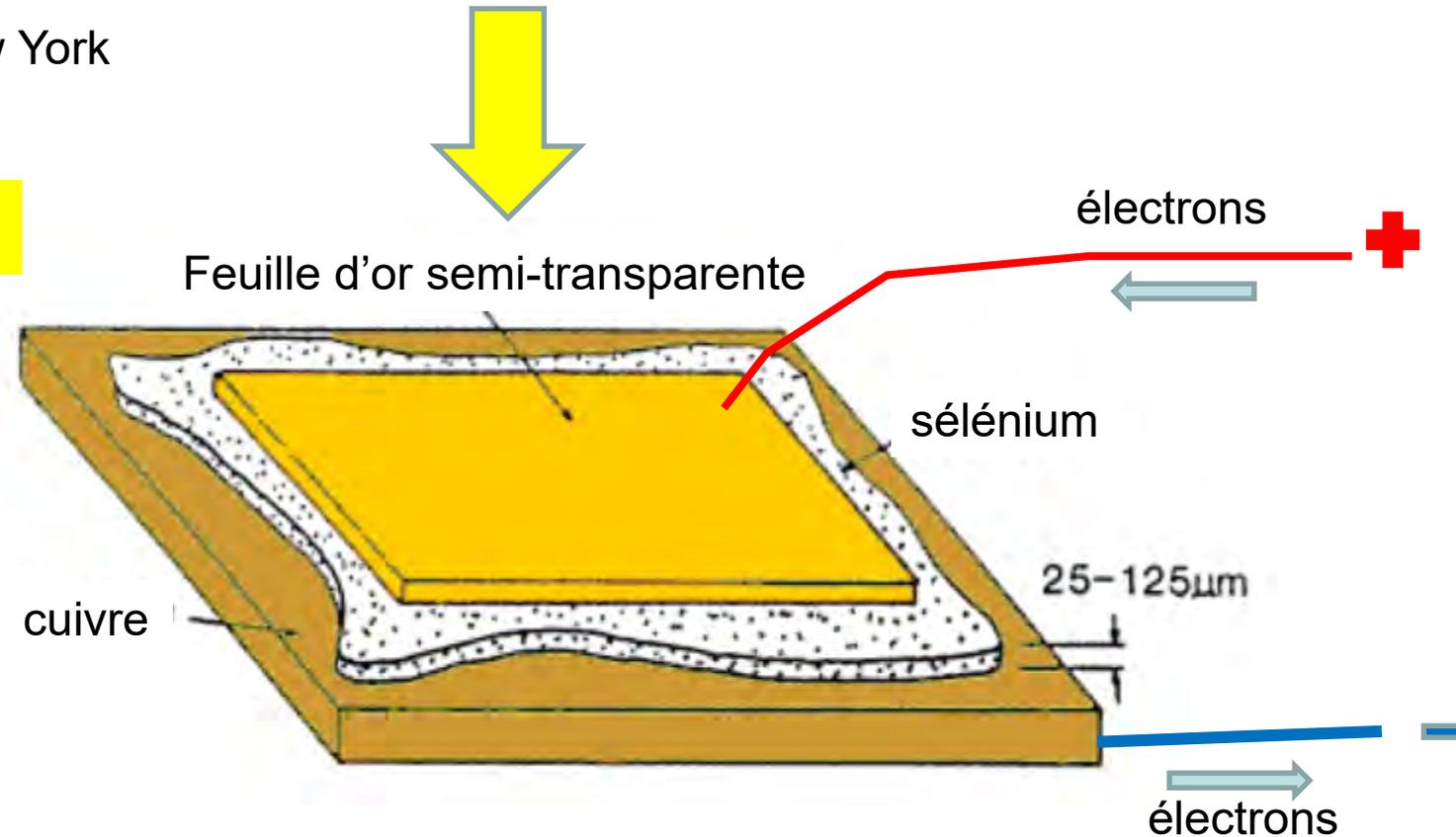
<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/first-photovoltaic-devices>



Naissance de la première cellule solaire « tout solide », en couches minces

1883 Charles Fritts, New York

30 cm²



<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaiica/first-photovoltaic-devices>

C. E. Fritts, «On a New Form of Selenium Photocell», *American J. of Science*, vol. 26, p. 465, 1883

1884 : Charles Fritts Premier système photovoltaïque sur un toit de New York



- Envoi d'échantillons en Europe : W. von Siemens, J. C. Maxwell convaincus
- mais beaucoup de sceptiques : « magic plates », « mouvement perpétuel »
- **Besoin de Théorie**

J. Perlin

1887 Découverte de l'effet photoélectrique dans le vide

Ultraviolettes Licht und elektrische Entladung. 983

XIV. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung; von H. Hertz.

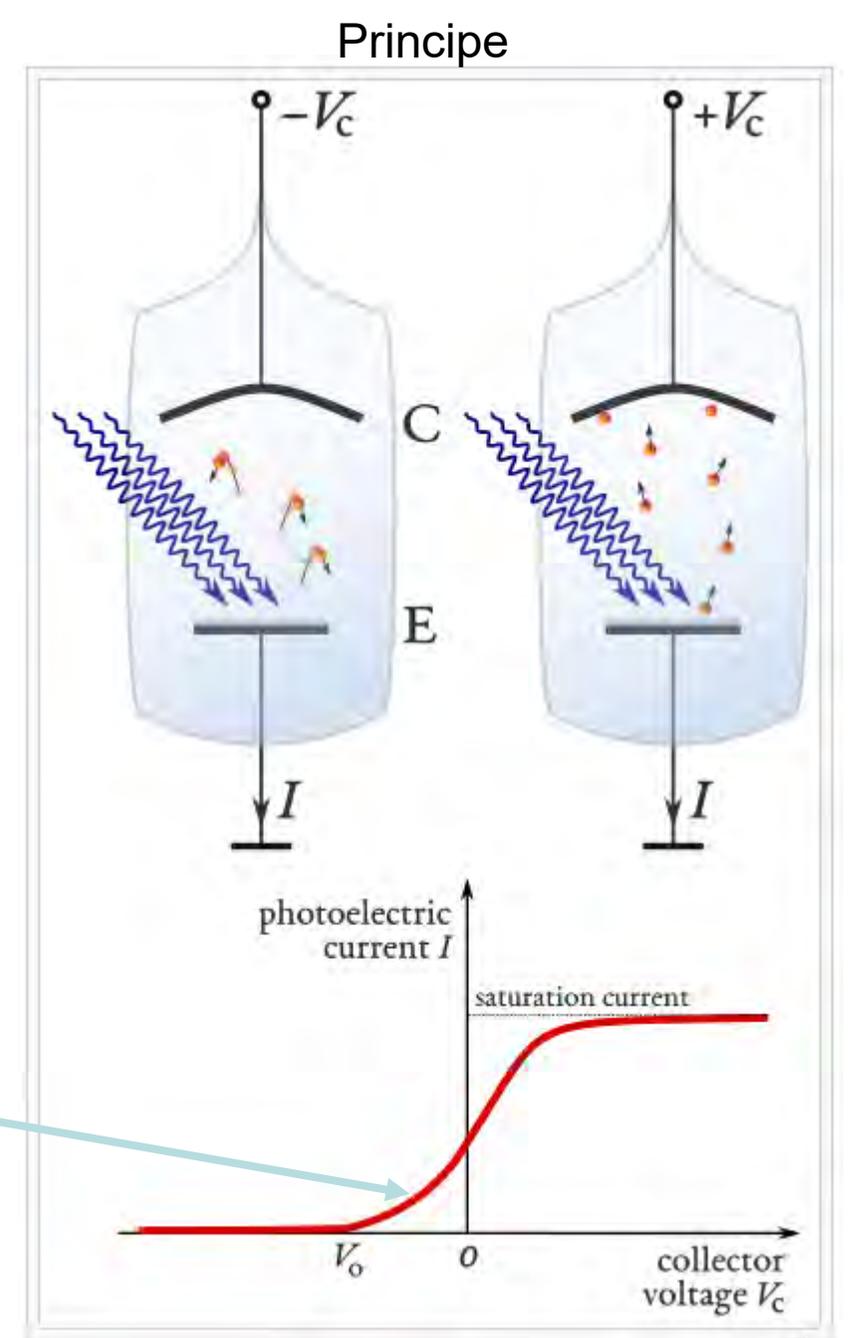
(Hierzu Taf. VII Fig. 8—11.)

Heinrich Hertz



1) Hertz, Wied. Ann. 31. p. 421. 1887.

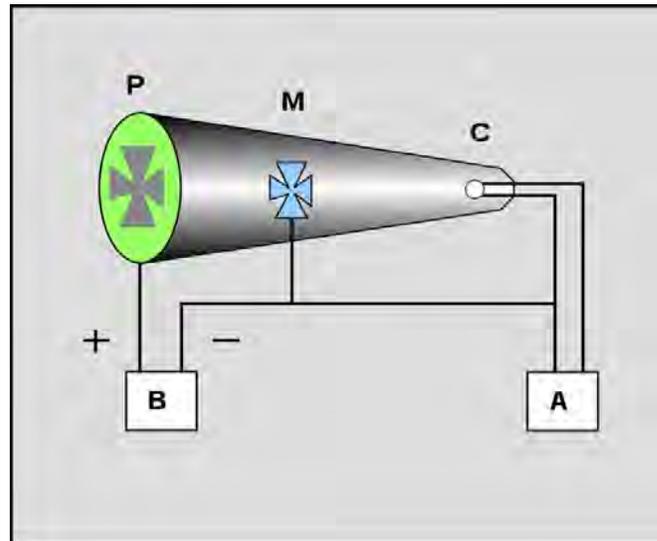
Comportement photovoltaïque



30 avril 1897

Annonce de la découverte de l'électron

Joseph John Thomson



Prix Nobel de Physique en 1906

Source : wikipedia

1900 Plank

1902

9. Ueber die lichtelektrische Wirkung; von P. Lenard.

(Hierzu Taf. I, Fig. 1 u. 2.)

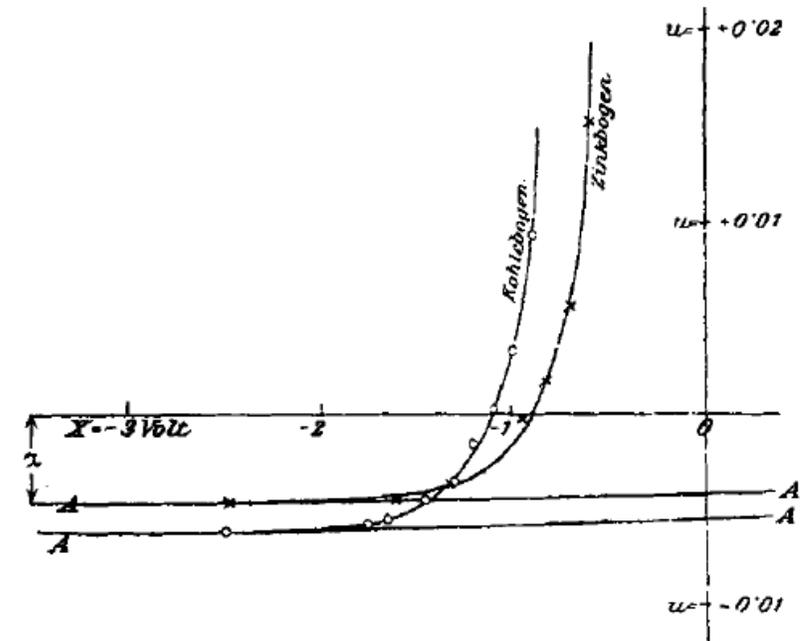
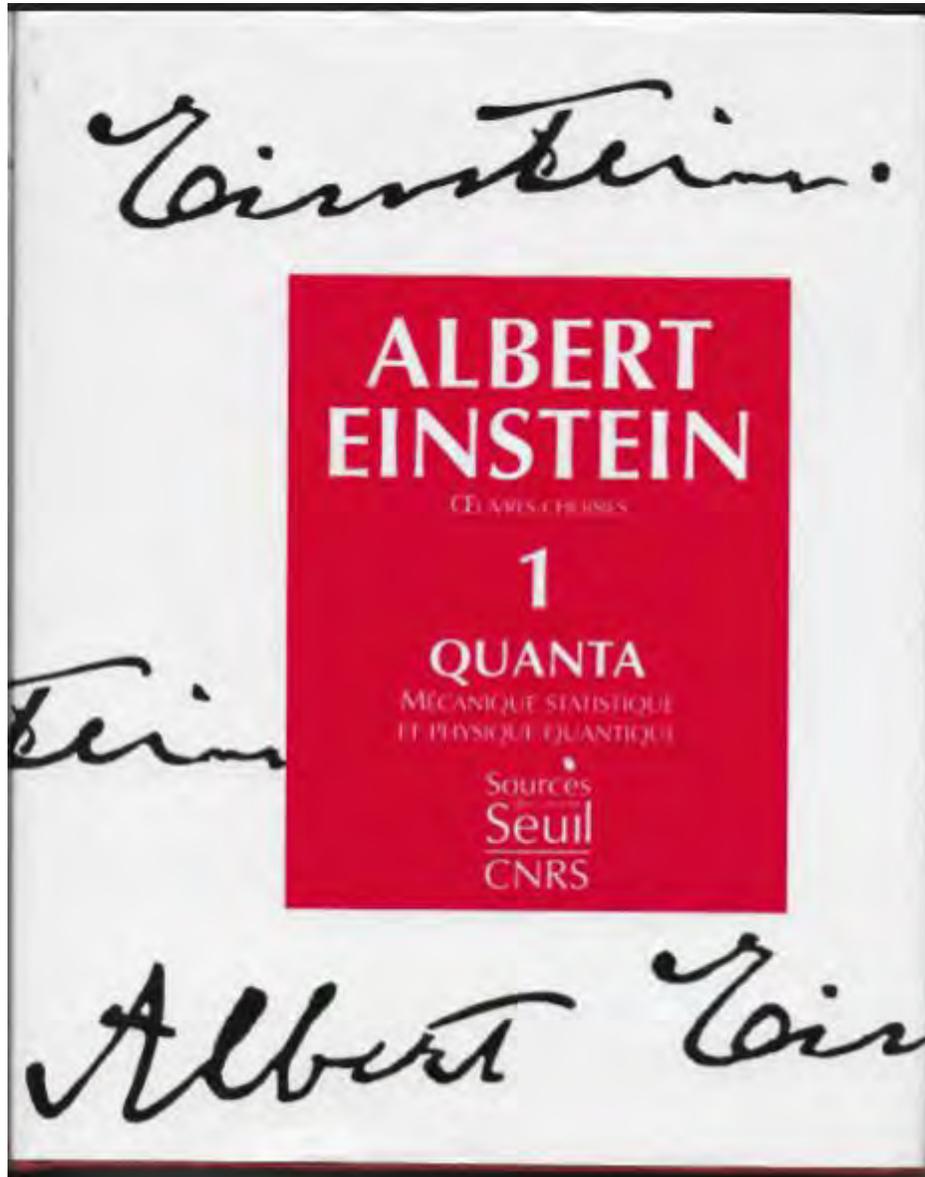


Fig. 2.

1905 L'article fondateur d'Albert Einstein



Un point de vue heuristique concernant la production
et la transformation de la lumière

[Annalen der Physik, vol. XVII, 1905, p. 132-148.]

De fait, il me semble que les observations portant sur le « rayonnement noir », la photoluminescence, la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette, et d'autres classes de phénomènes concernant la production ou la transformation de la lumière, apparaissent comme plus compréhensibles si l'on admet que l'énergie de la lumière est distribuée de façon discontinue dans l'espace. Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayon lumineux émis par une source ponctuelle, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue sur des espaces de plus en plus grands, mais est constituée d'un nombre fini de quanta³ d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc.

Dans ce qui suit, je vais présenter le cours des idées et relater les faits qui m'ont conduit au point de vue ici exposé, dans l'espoir que d'autres chercheurs pourront en tirer profit.

Evènements clés des technologies photovoltaïques I (adapté de Wolf, 1972)

1927 Cellules Cu_2O (Grondahl & Geiger)

1928 Théorie des bandes dans les solides : M. Strutt, F. Bloch, Léon Brillouin, R. Kronik & W. Penney ...

1930 Théorie des barrières semi-conductrices : Walter Schottky

1931 Théorie de la diffusion des électrons (H. Dember)

1932 CdSe Audibert et Sora

1939 Théorie des Barrières Métal /semi-conducteur (N. Mott/ W. Schottky)

1939 cellules Ti_2S à 1% de rendement

1939 Théorie de la jonction P-N (William Shockley)

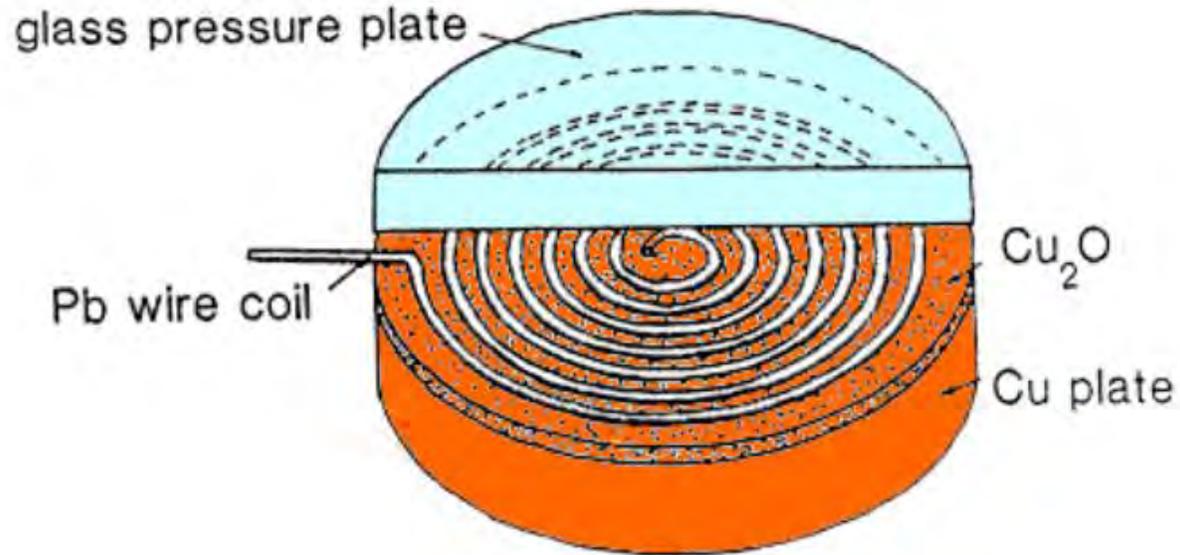
1941 Première cellule au silicium (Russel Ohl)

1954 Cellules Silicium 6% de rendement (Pearson, Chapin & Fuller)

1955 Premières cellules $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ (Reynolds et al.)

1927

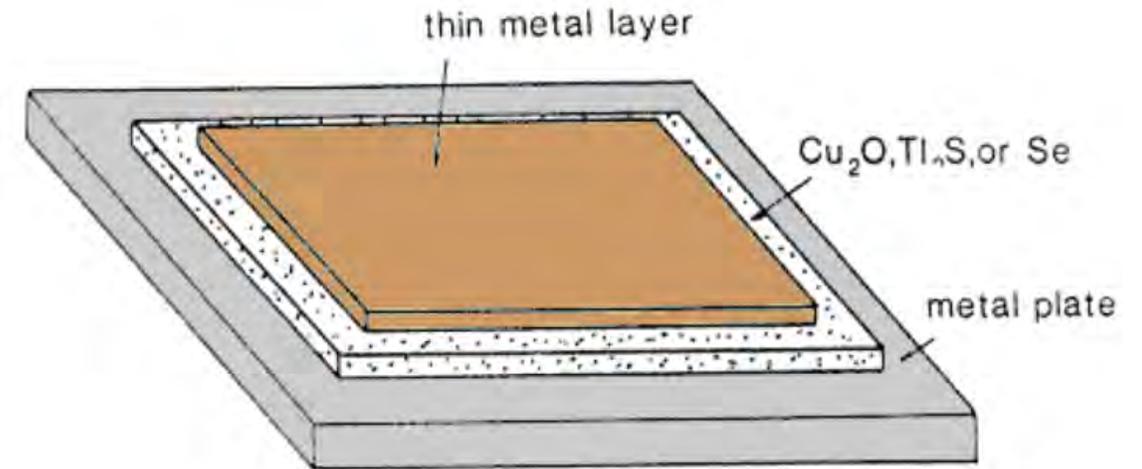
L. O. Grondahl, «The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell», Review of Modern Physics, vol. 5, p. 141, 1933.



1927

1931: Se L. Bergmann,

1939 : Tl₂S F. C. Nix y Treptwo, A. W.



1930-1940

1932 CdSe Audibert et Sora

Evènements clés des technologies photovoltaïques II (adapté de Wolf, 1972)

1955 Théorie des cellules solaires (Pfann, Roosbroeck, Prince)

1956 Physique du solide, sciences des matériaux Jacques Friedel (1921-2014) Médaille d'or CNRS 1970

1956 Premières cellules GaAs

1957 amélioration de la théorie des jonctions p-n (Sah, Noyce et Shockley)

1958 Rendement des cellules solaires et largeur de bande interdite (Loferski, Rappaport et Wysocki)

1958 Lancement satellite Vanguard

1958 Cellules solaires au silicium en France (Michel Rodot)

1959 Théorie des réponses spectrales, mécanismes de pertes (Wolf)

1960 résistances séries, grilles de collecte (Wolf, Rauschenback)

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

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

WILLIAM SHOCKLEY AND HANS J. QUEISSER

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

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

In order to find an upper theoretical limit for the efficiency of p - n junction solar energy converters, a limiting efficiency, called the *detailed balance limit* of efficiency, has been calculated for an ideal case in which the only recombination mechanism of hole-electron pairs is radiative as required by the principle of detailed balance. The efficiency is also calculated for the case in which radiative recombination is only a fixed fraction f_r of the total recombination, the rest being nonradiative. Efficiencies at the matched loads have been calculated with band gap and f_r as parameters, the sun and cell being assumed to be blackbodies with temperatures of 6000°K and 300°K, respectively. The maximum efficiency is found to be 30% for an energy gap of 1.1 eV and $f_r = 1$. Actual junctions do not obey the predicted current-voltage relationship, and reasons for the difference and its relevance to efficiency are discussed.

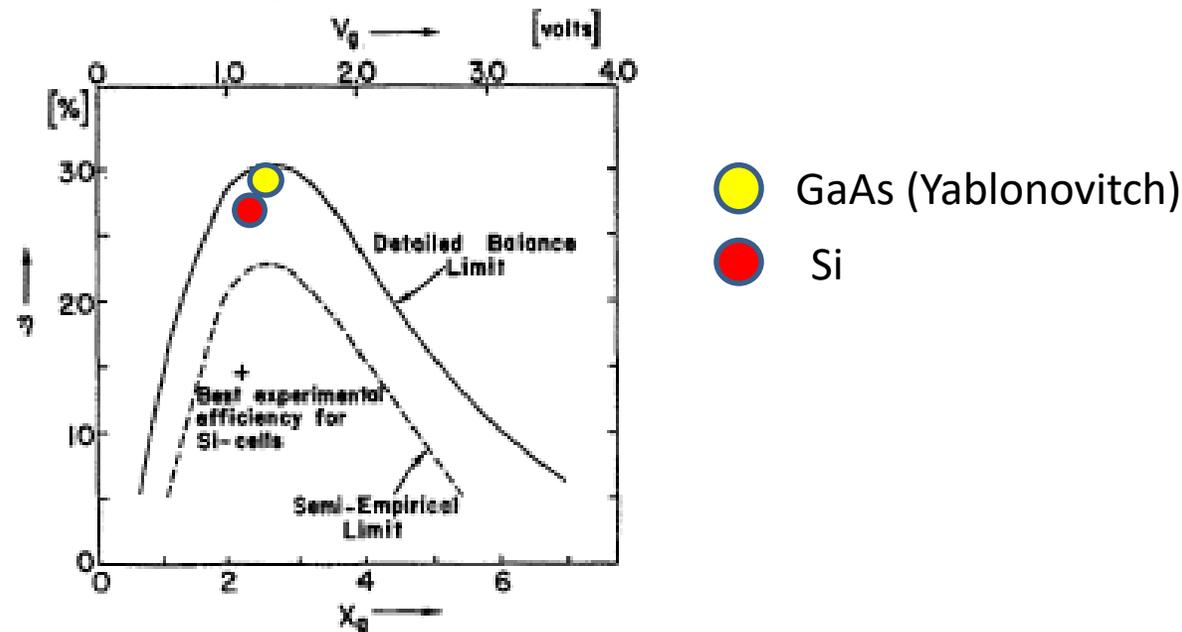


FIG. 1. Comparison of the "semiempirical limit" of efficiency of solar cells with the "detailed balance limit," derived in this paper. + represents the "best experiment efficiency to date" for silicon cells. (See footnote 6.)

Evènements clés des technologies photovoltaïques III (adapté de Wolf, 1972)

1961 Cellules CdTe 5-6% rendement (D. A. Cusano)

1966 Cellules CdTe (J. Lebrun, France)

1969 Silicium amorphe hydrogéné (R. Chittick et al.)

1973 Cellules CdS/Cu₂S spatiales (SAT, France)

1976 Cellules au silicium amorphe (W. Spear and P. Lecomber, Ionel Solomon in France)

1976 Cellules CIGS (L. Kazmerki)

1985 Cellule Organique 1% (C. W. Tang)

1991 Cellules à colorants (Michael Graetzel)

2001 Cellules organiques interpénétrées 3% de rendement (Univ. Linz)

2003 Nouveaux concepts photovoltaïques (Martin Green)

2007 Piégeage optique, plasmonique (Beck, Polman, Catchpole)

2009 Cellules Perovskite hybride (T. Miyazaka)

2010 Cellules CZTS (cuivre zinc étain soufre) (D. Mitzi, IBM)

2010 Cellules à particules quantiques (NREL)

2019 Cellule 6 jonctions GaAs sous concentration à 47,1 %

2021 Cellule tandem Si-Perovskite à 29,5% (Oxford PV)

Le soleil au service de l'humanité
1973, Unesco, Paris

NEW TECHNOLOGY FOR CdS - Cu₂S SOLAR CELLS OF HIGH RELIABILITY
J. BESSON, J. FREMY, T. NGUYEN DUY, G. PICHARD
SAT 41, Rue Cantagrel - PARIS
W. PALZ
CNES - PARIS

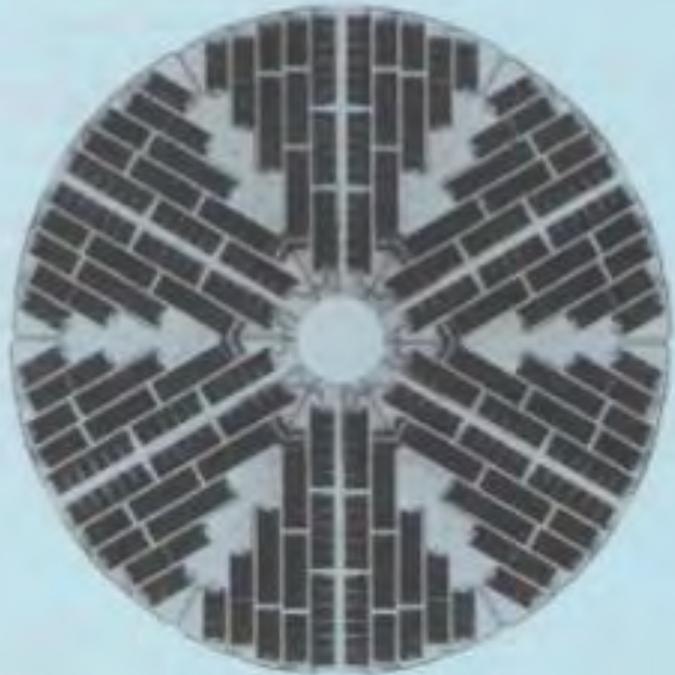
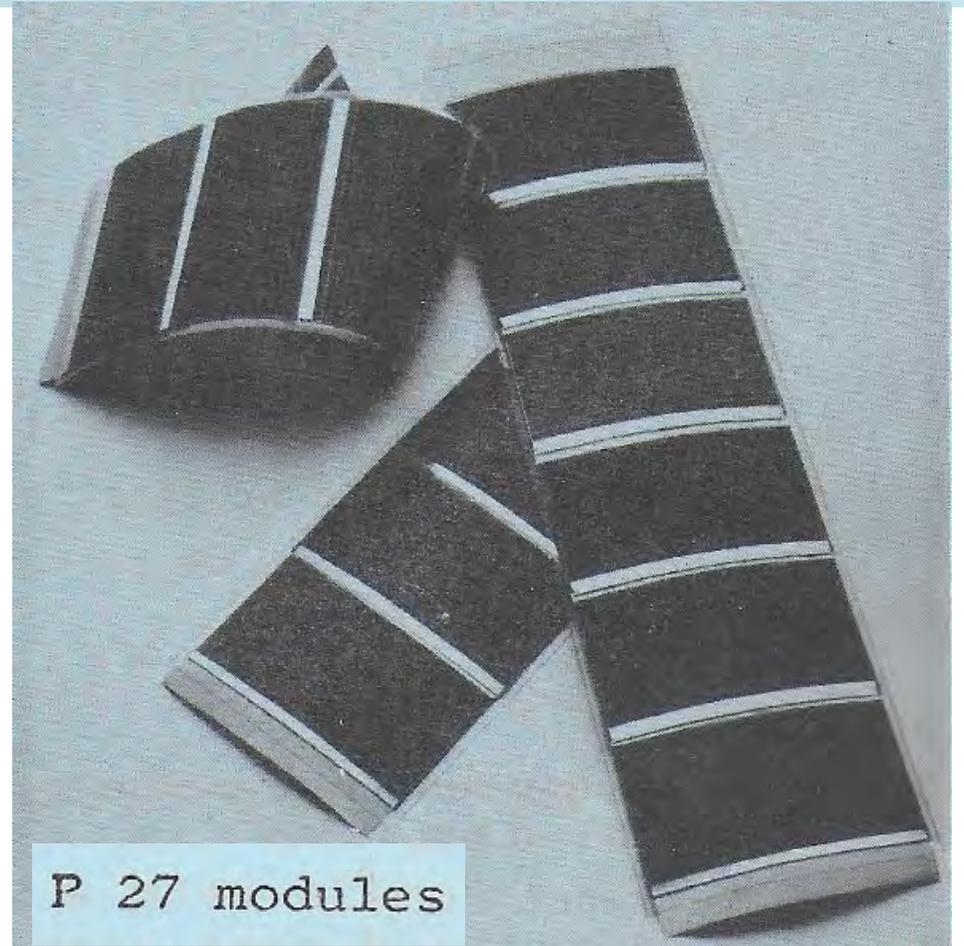
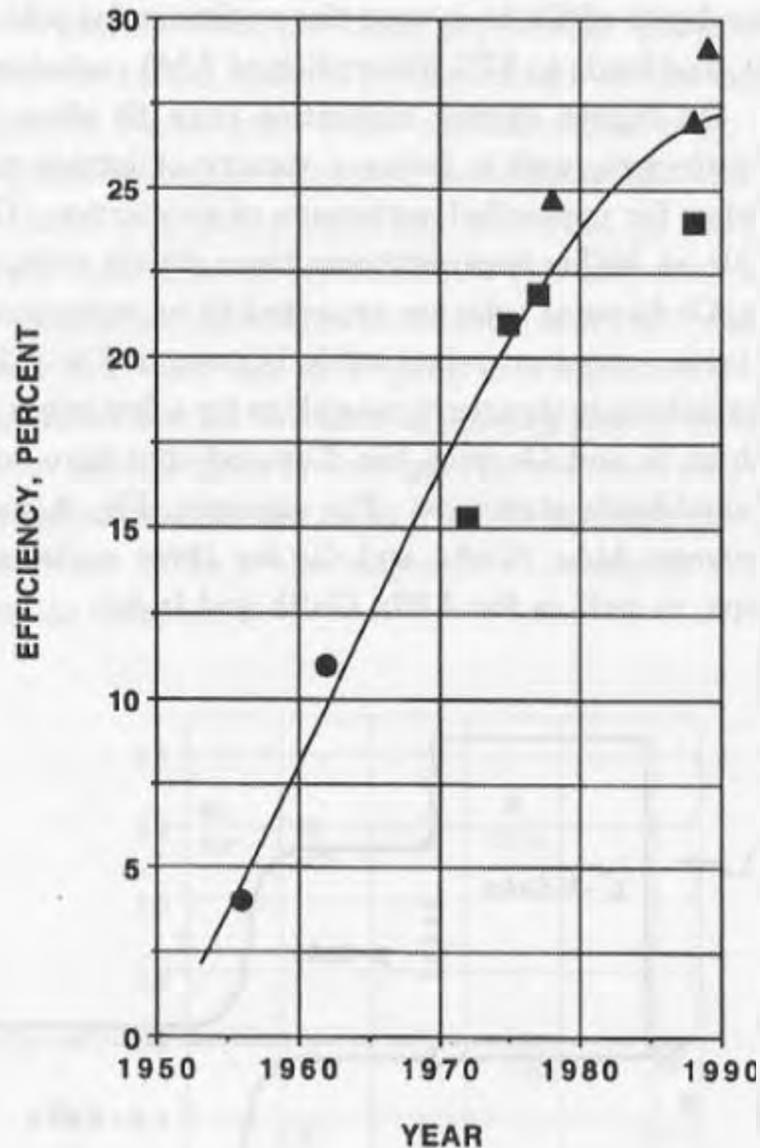


Figure 8 - Essor balloon solar generator, diameter: 2 m, maximum power: 70 watts under 100 mW cm⁻² AM1, 35°C

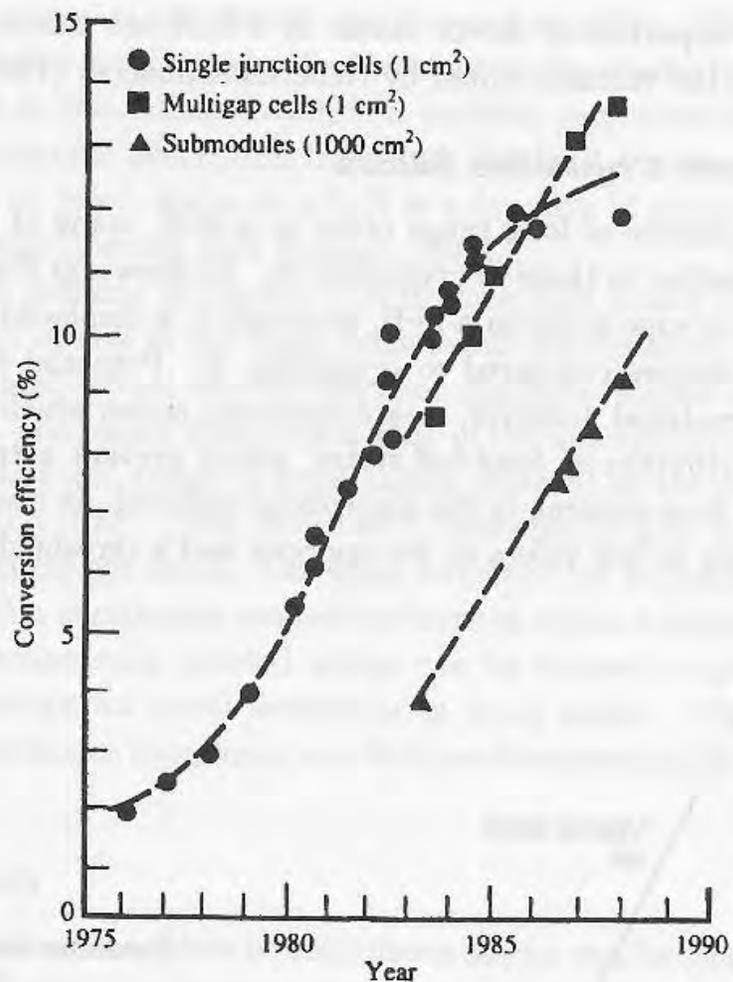


P 27 modules

GaAs

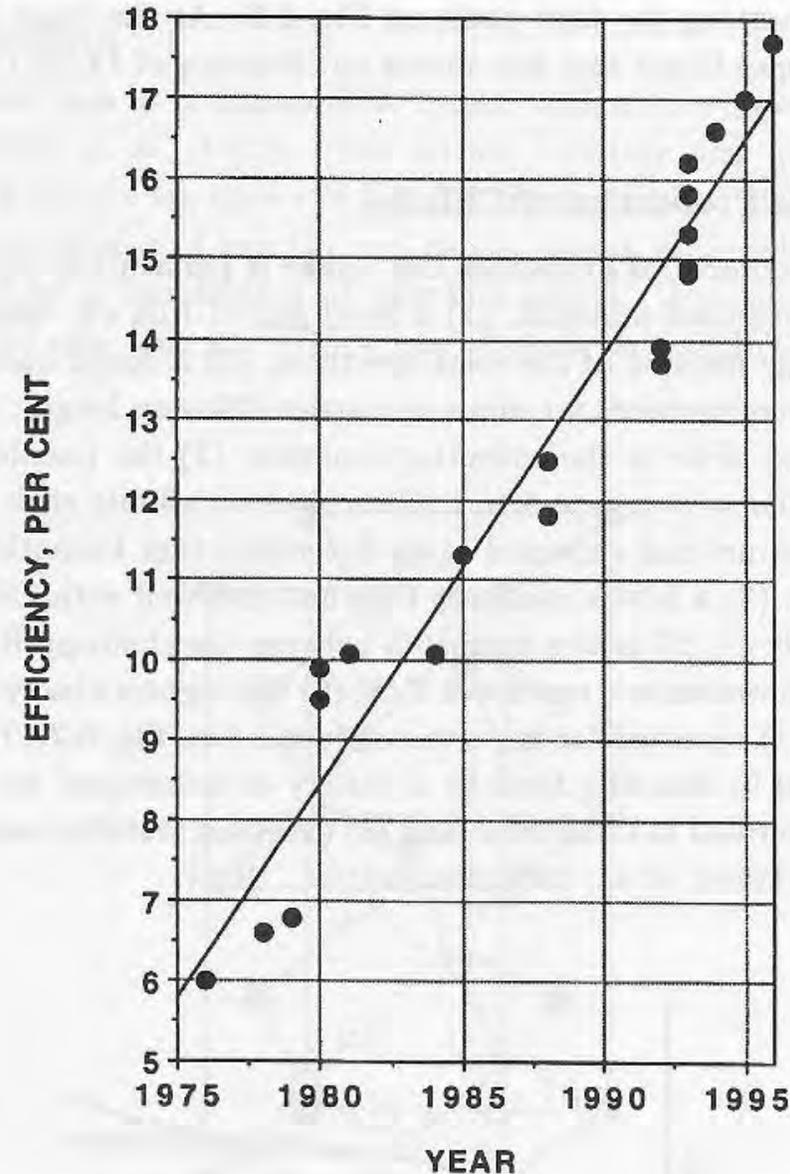


Silicium amorphe



CIGS

Prend le relais de Cu₂S



La mise en place des grandes conférences internationales

1961 Conférence photovoltaïque américaine



1994 Conférence photovoltaïque mondiale



1977 Conférence européenne, Luxembourg



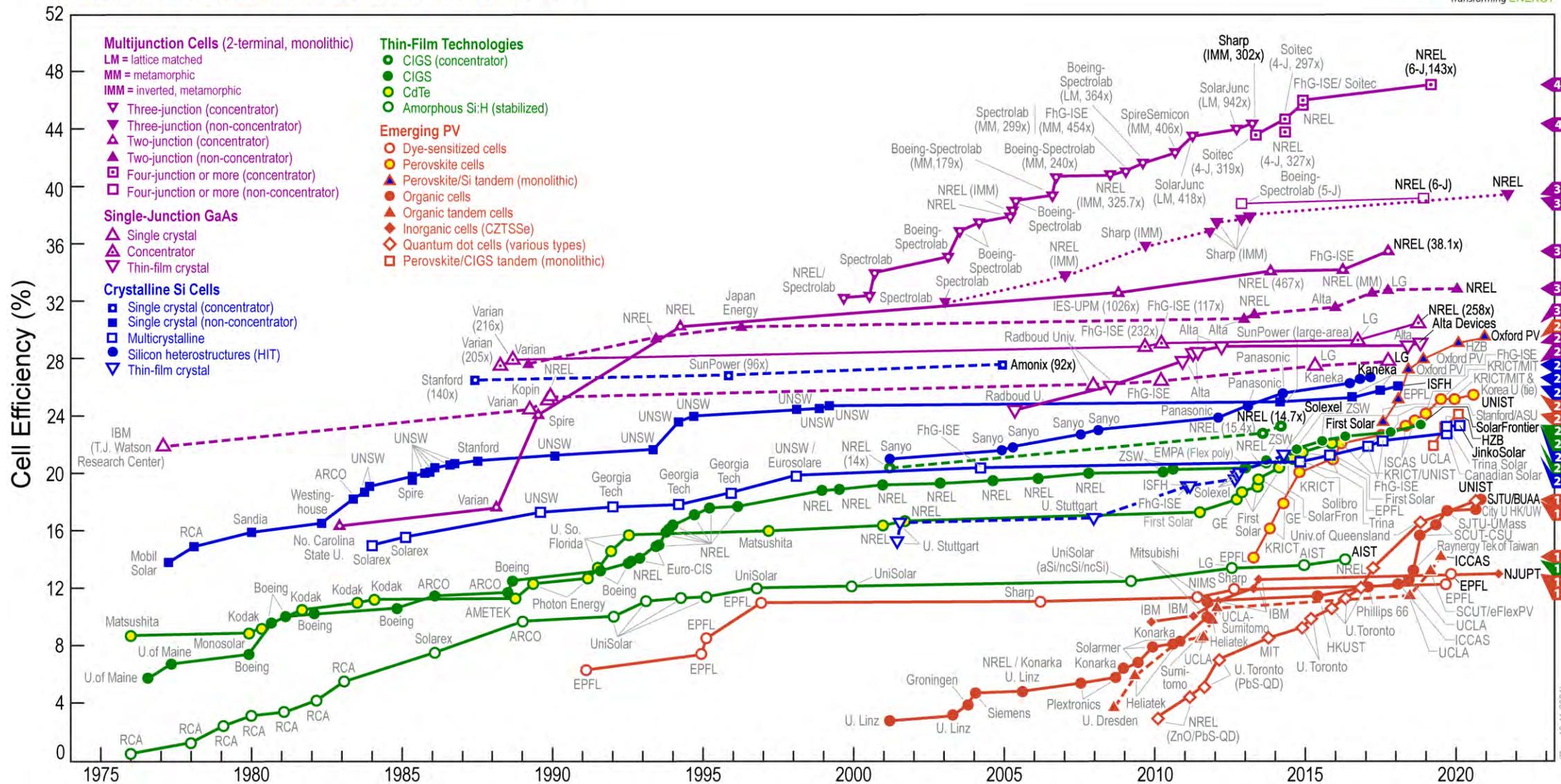
1984 Conférence photovoltaïque Asie



Participants of the Committee meeting at Luxembourg (from left to right).
Sitting: Karl-Heinz KREBS, Rolf BUHS, John GOLDSMITH, Albert STRUB, Len MAGID, Henry DURAND, Horst FISCHER, Wolfgang PALZ, Klaus REINHARTZ. Standing: Bryan WILSON, Michel RODOT, Roger VAN OVER-STRÆTEN, Fred TREBLE, Antoon KIPPERMAN, Giovanni SONCINI, Henry BRANDHORST, Moe FORESTIERI, Michel BRUNET, Sergio PIZZINI, Boris BOIKO, Denis NICOLAY.

The full Picture

Best Research-Cell Efficiencies



Absorber material/ technology	PCE [%]
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se},\text{S})_4$	11.2
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	11.6
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	11.6
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	9.6
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	9.4
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	9.5
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	13.2
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	11.5
$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$	12.5
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	12.4
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	12.2
$(\text{Ag},\text{Cu})_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	12.5

Inorganiques

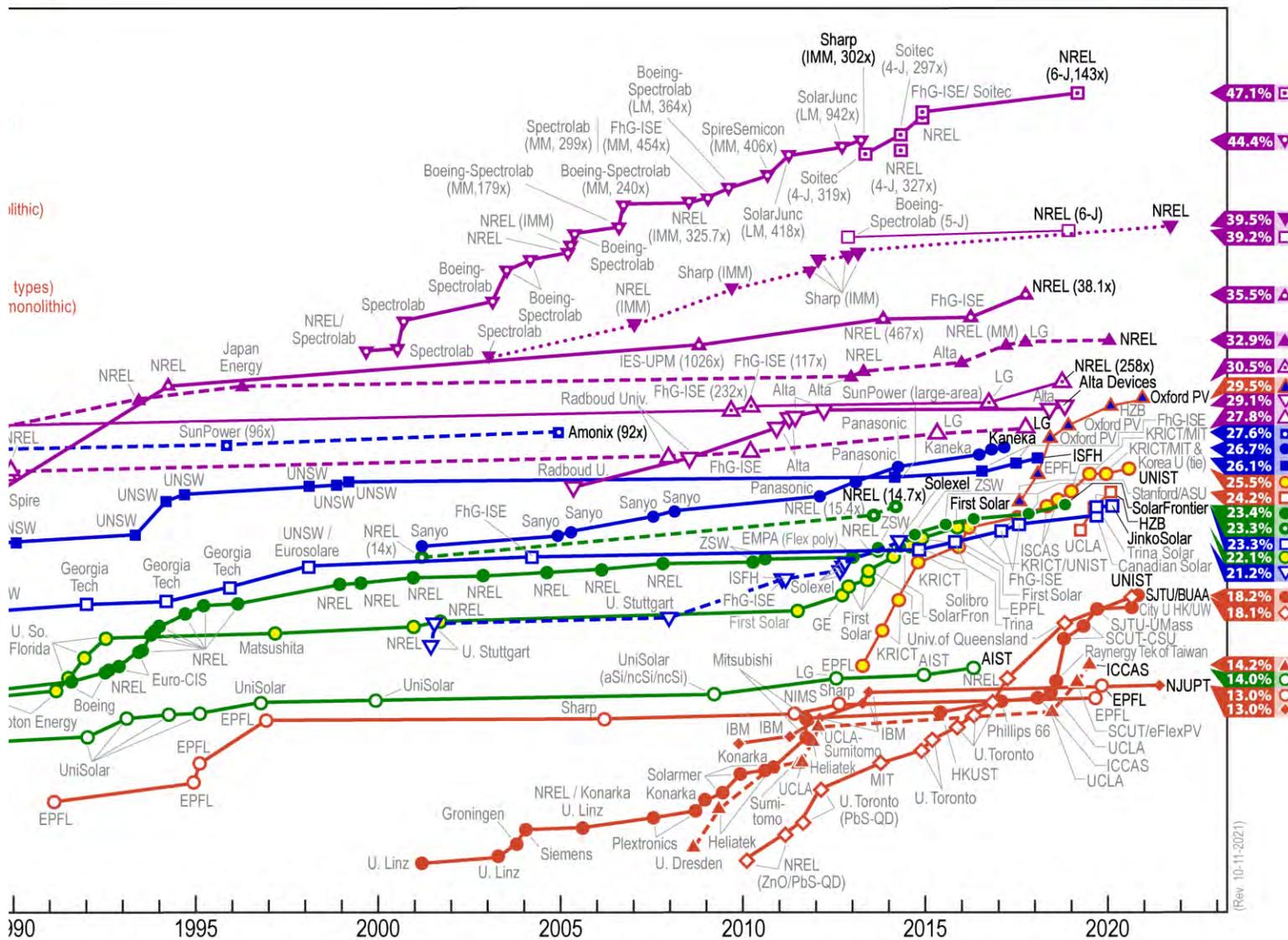
Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials (Version 2)

Osbel Almora, Derya Baran, Guillermo C. Bazan, Christian Berger, Carlos I. Cabrera, Kylie R. Catchpole, Sule Erten-Ela, Fei Guo, Jens Hauch, Anita W. Y. Ho-Baillie, T. Jesper Jacobsson, Rene A. J. Janssen, Thomas Kirchartz, Nikos Kopidakis, Yongfang Li, Maria A. Loi, Richard R. Lunt, Xavier Mathew, Michael D. McGehee, Jie Min, David B. Mitzi, Mohammad K. Nazeeruddin, Jenny Nelson, Ana F. Nogueira, Ulrich W. Paetzold, Nam-Gyu Park, Barry P. Rand, Uwe Rau, Henry J. Snaith, Eva Unger, Lidice Vaillant-Roca, Hin-Lap Yip, and Christoph J. Brabec**

$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	
$\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{0.78}\text{Ge}_{0.22})\text{Se}_4$	
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	$\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	$\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$
$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$	$(\text{Cu}_{0.99}\text{Ag}_{0.01})_{1.85}(\text{Zn}_{0.8}\text{Cd}_{0.2})_{1.1}\text{SnS}_4$
Sb_2Se_3	$\text{SbSeI}:\text{Sb}_2\text{Se}_3$
Sb_2Se_3	Sb_2S_3
Sb_2Se_3	
Sb_2Se_3	
Sb_2Se_3	
Sb_2Se_3	

The full Picture

es



Et maintenant?

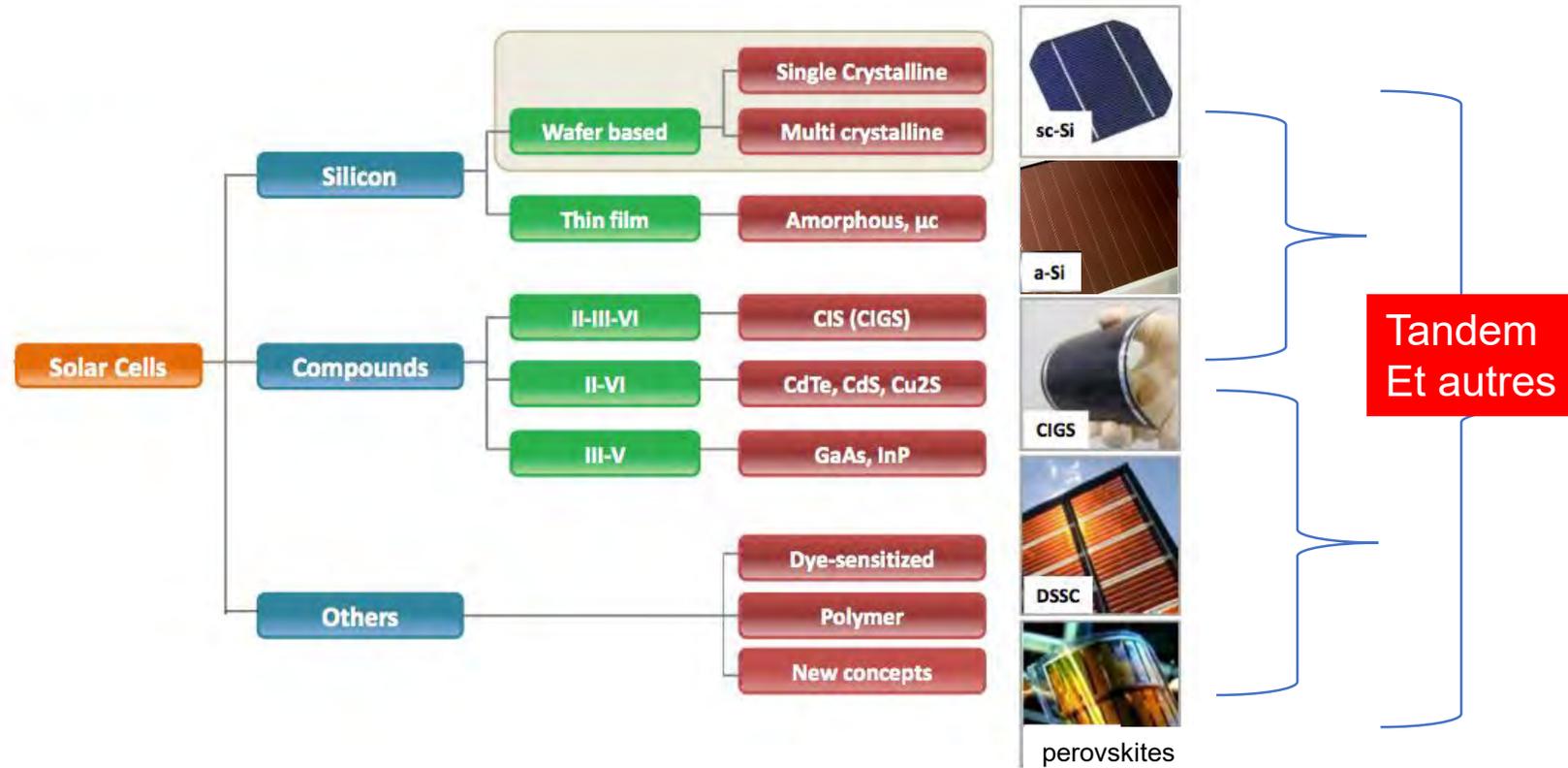
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

Daniel Lincot , Collège de France, 2-2-2022

Vision générale : Innovations, convergences et évolutions

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

Après 2020 : $R > 30\%$
Convergence



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

Quelques références

- Recherches sur les effets chimiques de la lumière solaire au moyen des courants électriques, Edmond Becquerel
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, IX(1839)145-149
- Sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, Edmond Becquerel
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, IX(1839)564-567
<https://ipvf.fr/wp-content/uploads/2020/07/Article-original-Edmond-Becquerel-1839.pdf>
- Historical development of solar cells, M. Wolf, Proceedings of the 25th Power Sources Symposium, 1972
- Photovoltaics : Coming to age, M.Green, IEEE, 1990
- The first forty years : a brief history of the modern photovoltaic age, Progress in Photovoltaics, 1(1993)67-78
- Out of the crystal maze, chapters from the history of solid state physics, L. Hoddeson et al, Oxford University Press, 1992
- The origin of the pn junction, M. Rordan, L. Hoddeson, from Crystal Fire, IEEE Spectrum, 1997.
- Photovoltaic Materials, R. Bube, Imperial College Press, 1998
- From Space to Earth, the story of Solar Electricity, John Perlin, aatec publications, 1999
- Let it Shine, the 6000 years story of solar electricity, John Perlin, New World Library, 2013
- [Archives Symposium Edmond Becquerel https://www.ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/](https://www.ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/)