

*Université d'Automne de « Sauvons le Climat »
9-10 Octobre 2009, Autrans*

Conversion Photovoltaïque de l'Énergie Solaire : Etat des technologies et évolutions

Daniel LINCOT

Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie
Photovoltaïque

(IRDEP, UMR 7174 CNRS/EDF/Chimie Paristech)

Daniel-lincot@chimie-paristech.fr

www.enscp.fr





L'IRDEP est localisée à Chatou sur l'un des trois sites d'EDF R&D

Plan de l'exposé

- La ressource solaire
- Les différentes filières photovoltaïques
- Les perspectives

La ressource solaire

Equivalences énergétiques

1 Joule = 1 W.s

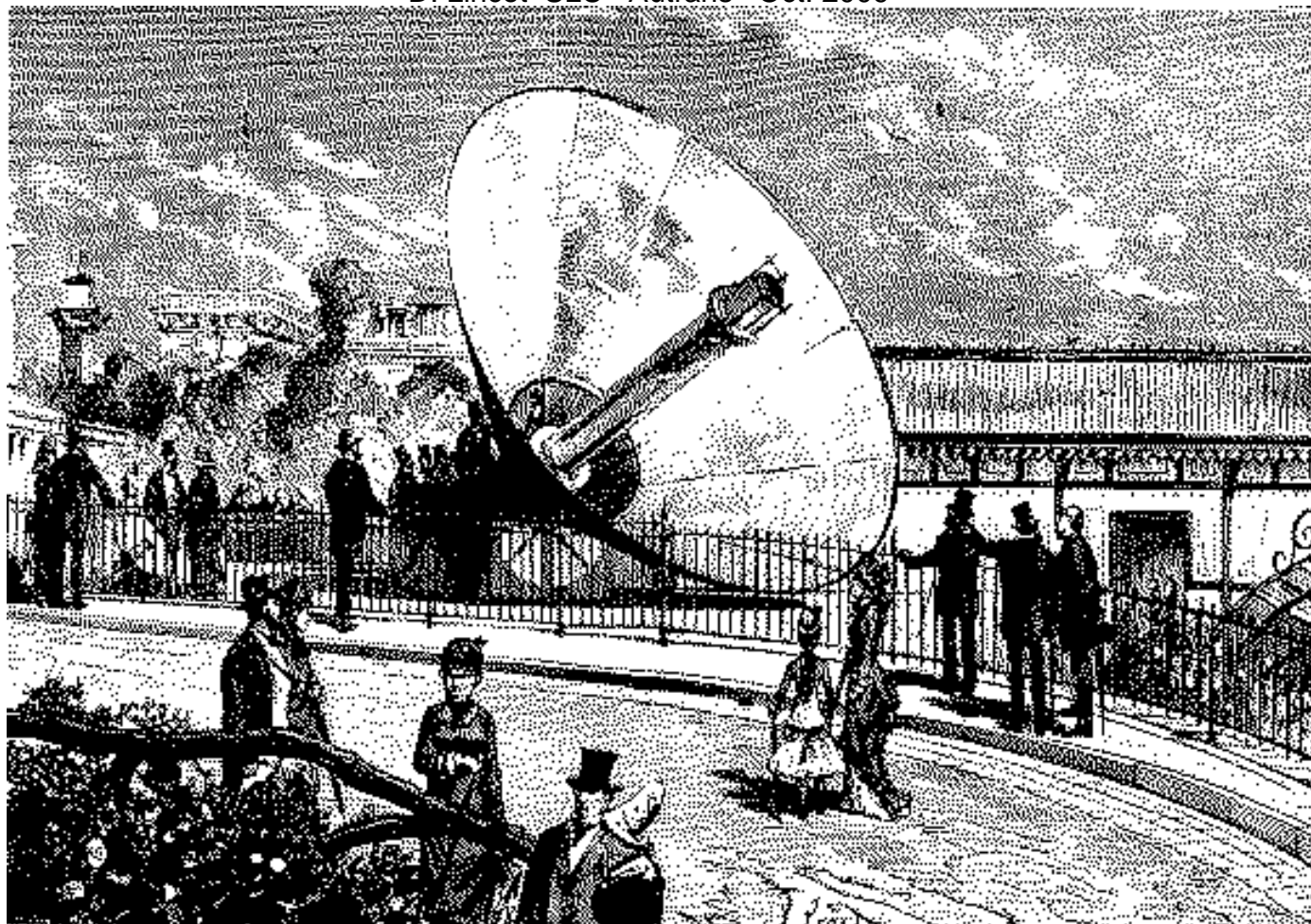
1 kWh = $3,6 \cdot 10^6$ J = 3,6 MJ

1 Tonne de pétrole = 11.6 MWh

1 baril = 159 litres

Une personne: environ 200 W

Un cheval: environ 1kW

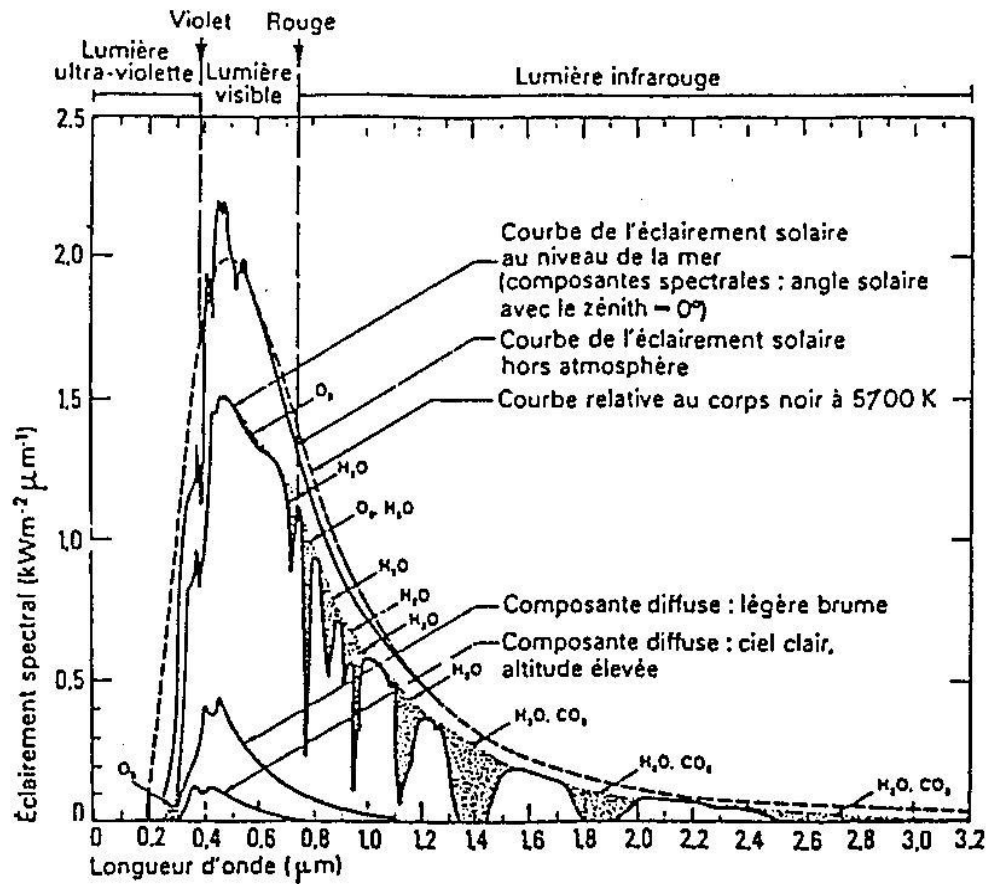


Source :
Web

Machine solaire à l'Exposition Universelle de Paris, 1878

En 1860, le professeur de mathématiques du Lycée de Tours, Augustin Mouchot a écrit "Eventuellement on ne trouvera plus de charbon en Europe...que fera l'industrie ?" Sa réponse était la maîtrise de l'énergie solaire. Après 20 ans de recherche, il a inventé le principe de la poursuite du soleil avec un capteur à concentration. La machine exposée à Paris avait un réflecteur en cuivre argenté et un circuit hydraulique dans un cylindre peint en noir, elle produisait assez de vapeur pour faire marcher un moteur avec la puissance d'un demi cheval.

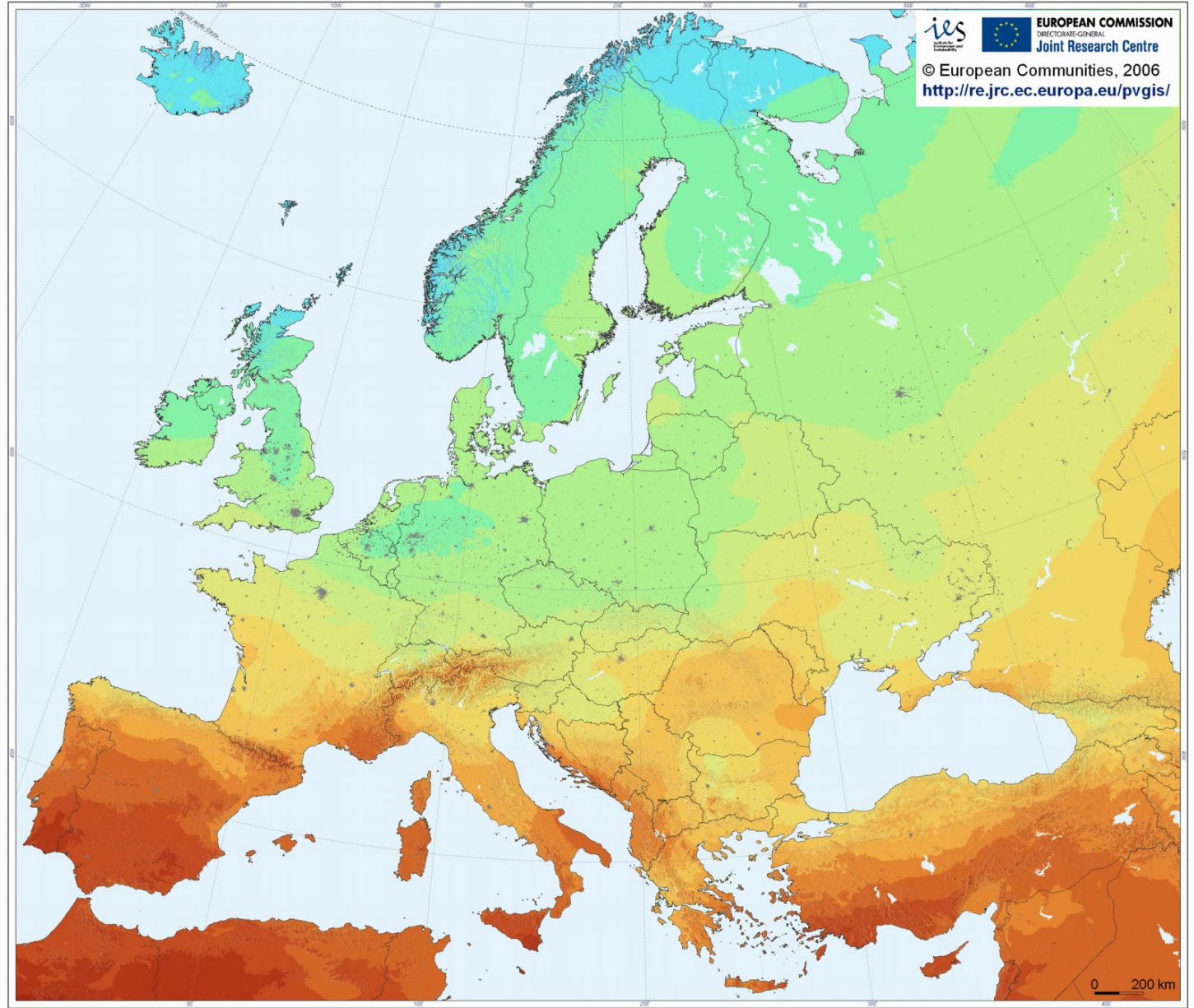
Le rayonnement solaire



Puissance incidente hors atmosphere: 1350 W/m^2

En un an : $10,6 \text{ MWh/m}^2$ soit près d'une tonne équivalent pétrole

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

Global irradiation [kWh/m²]
<600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200>

Yearly sum of solar electricity generated by 1 kWp system with optimally-inclined modules and performance ratio 0.75

Solar electricity [kWh/kWp]
<450 600 750 900 1050 1200 1350 1500 1650>

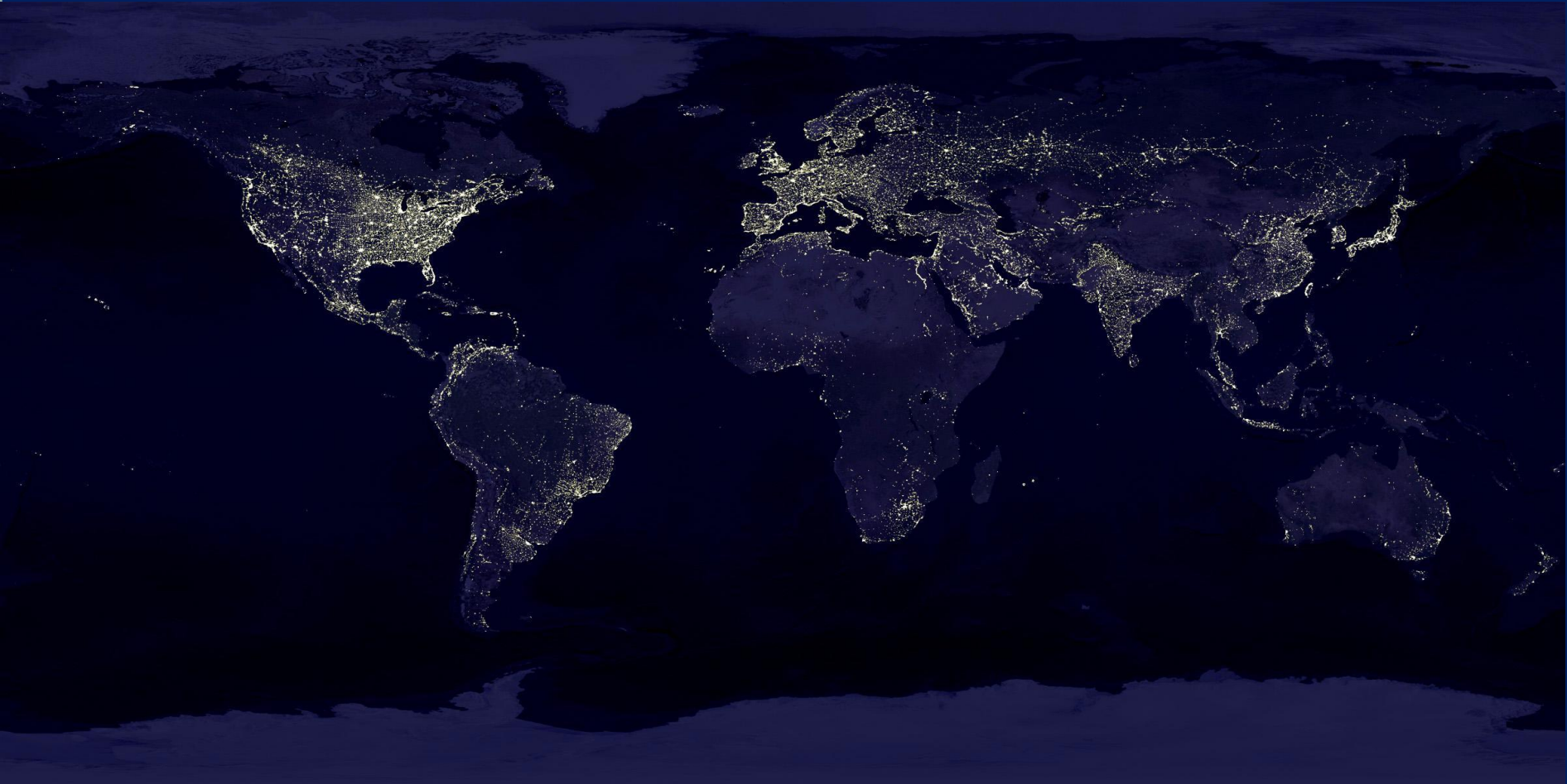
Données de base

- Puissance incidente standard (AM1.5) : 1000 W/m^2
- Energie incidente par an: 0.8 MWh/m^2 to 3 MWh/m^2
- Equivalent 550 TWh/an en France : $23 \times 23 \text{ km}^2$
- Infrastructures France (toits, routes...) : 30000 km^2
- Energie mondiale : 500 ExaJoule/an (10^{18}) : $170 \times 170 \text{ km}^2$ au sahara

Irradiation sur un plan horizontal en kWh/m² par jour (Paris)

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
<u>Globale (IGH)</u>	0.87	1.52	2.88	3.92	5.01	5.59	5.33	4.44	3.38	1.98	0.99	0.72	3.06
<u>Directe (IBH)</u>	0.25	0.5	1.27	1.68	2.3	2.67	2.51	2	1.53	0.77	0.28	0.19	1.33
<u>Diffuse (IDH)</u>	0.62	1.02	1.61	2.24	2.71	2.92	2.82	2.44	1.85	1.21	0.71	0.53	1.73

http://ines.solaire.free.fr/gisesol_1.php



<http://www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-world.html>

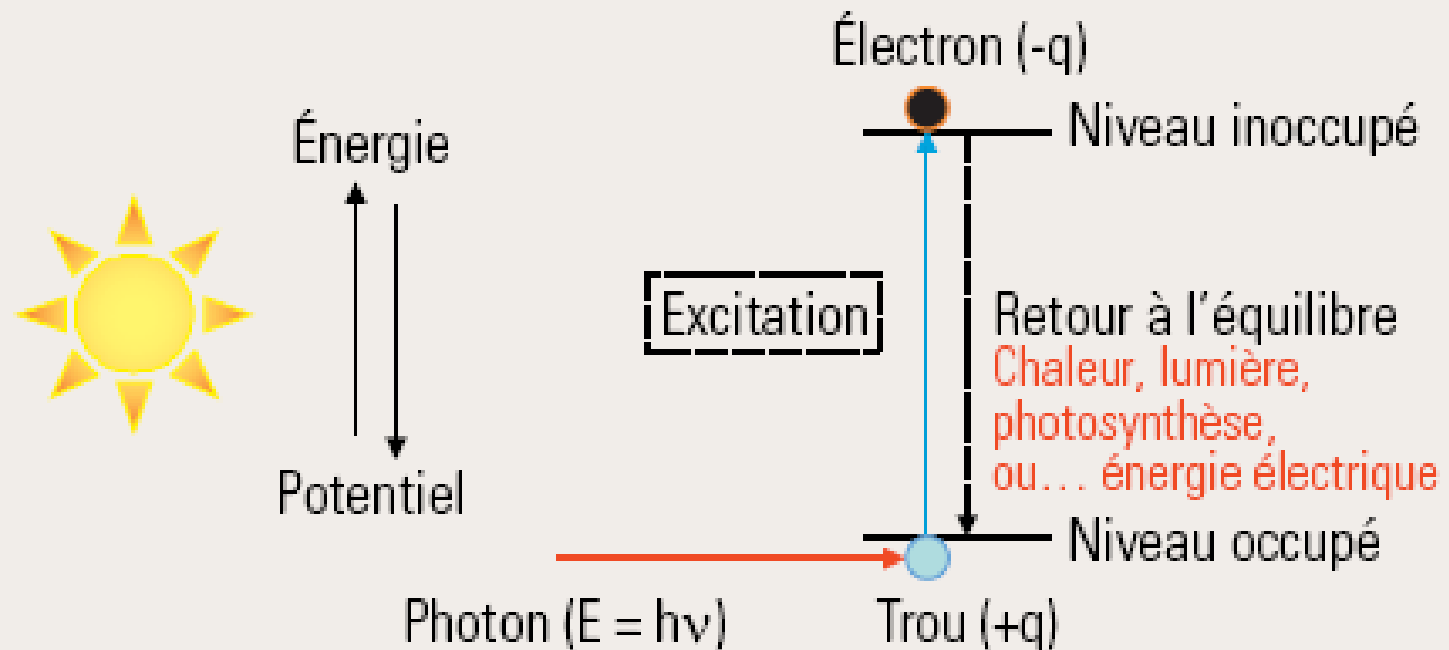
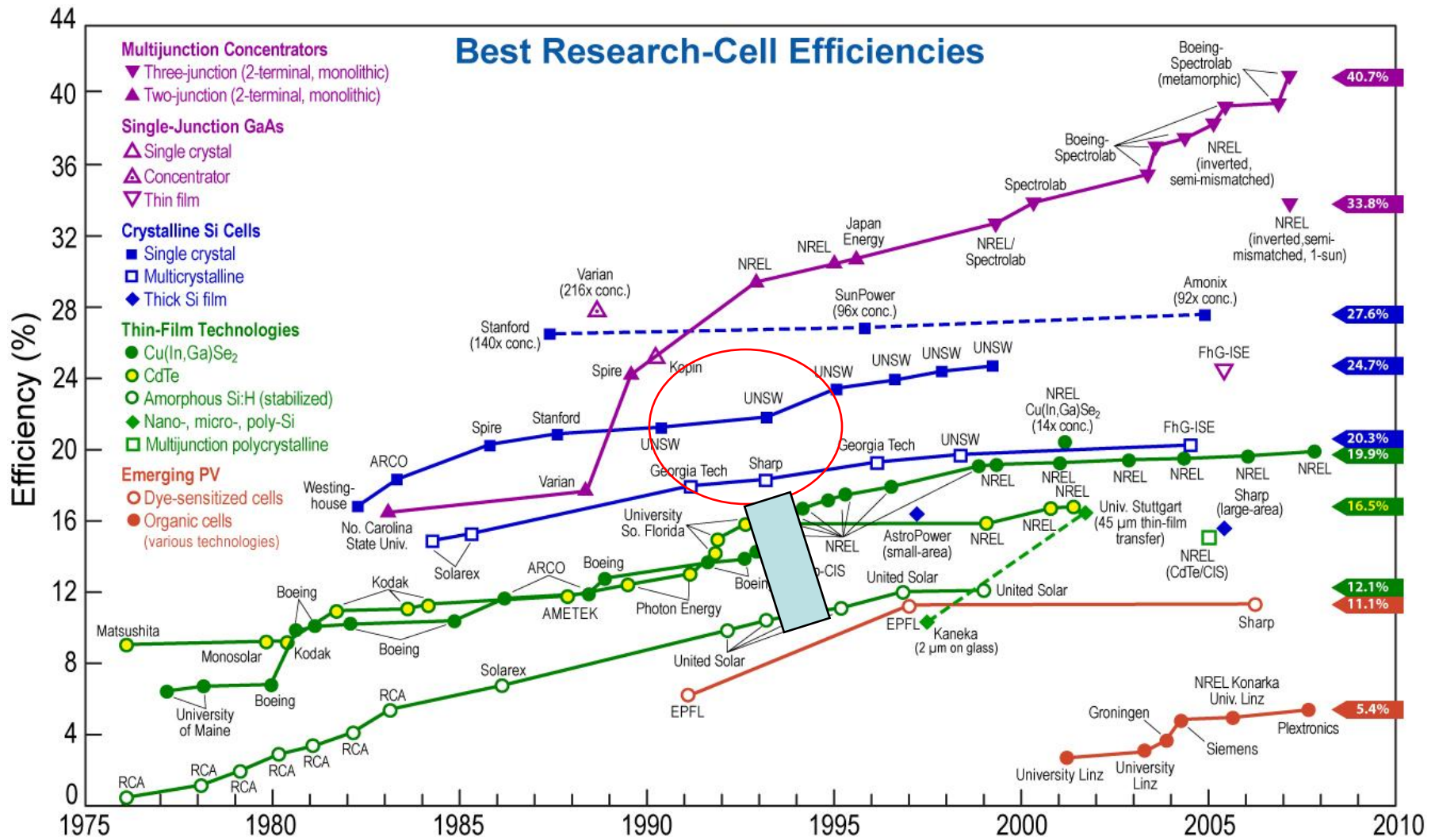


FIGURE 5

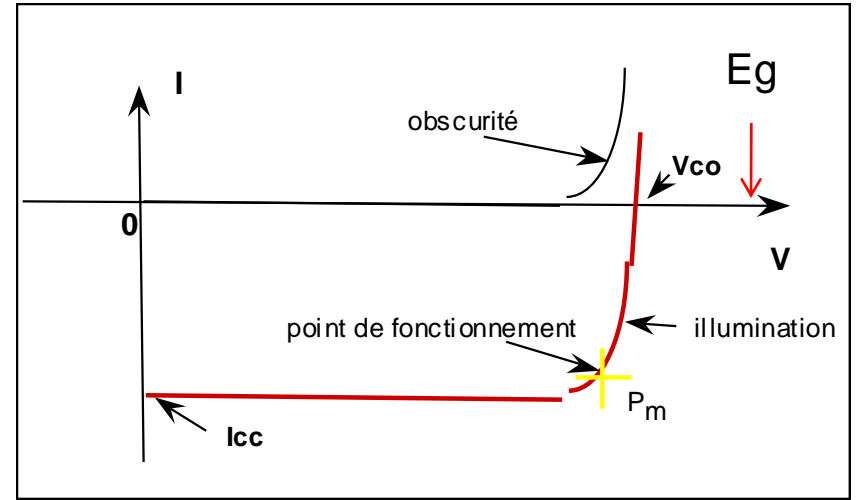
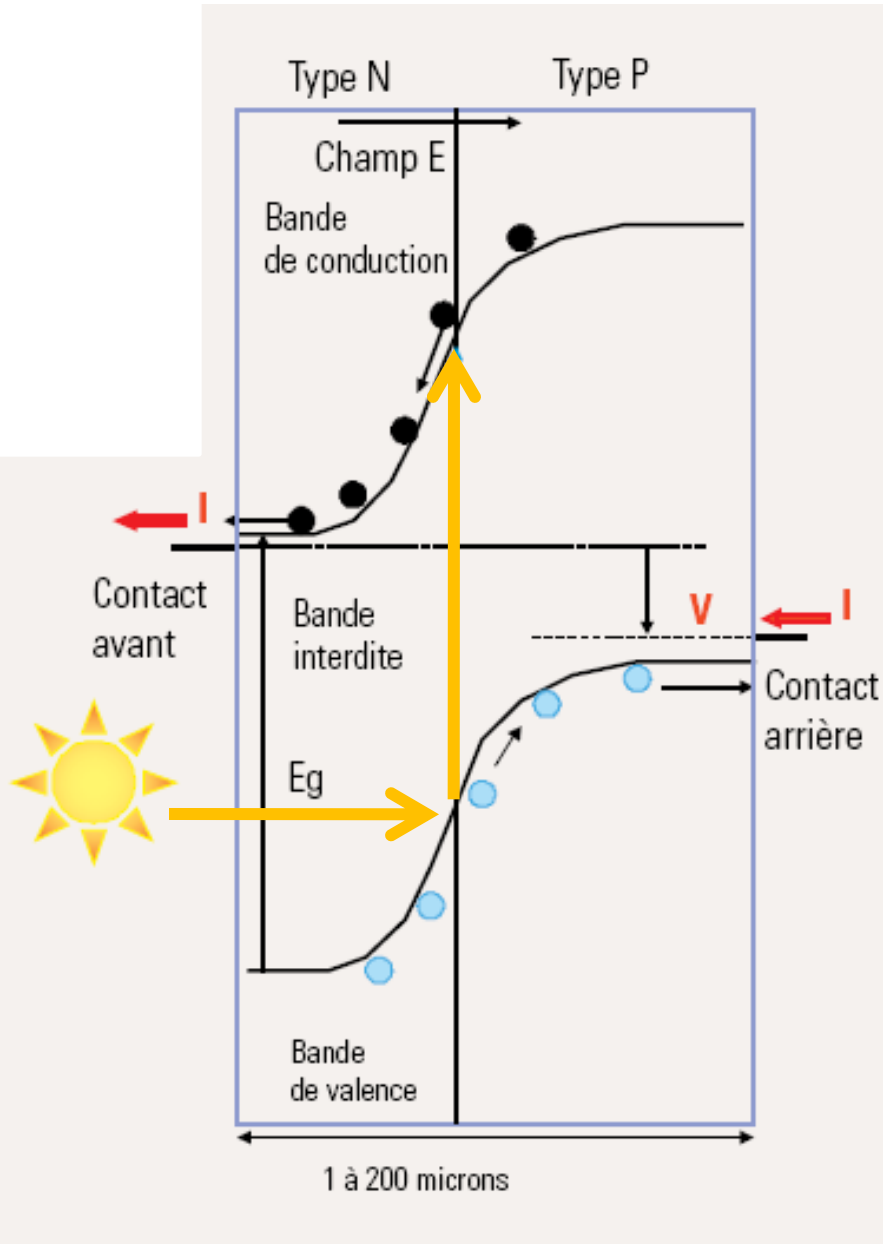
Processus d'adsorption de la lumière dans un matériau.

L'énergie en eV : une unité naturelle pour le photovoltaïque

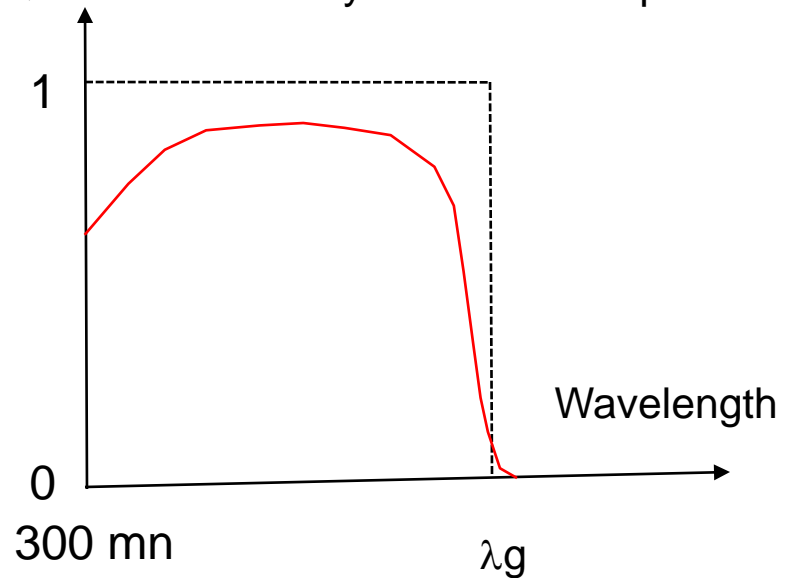
1 eV représente un 1 electron excité sous 1 V
soit : $1,6 \cdot 10^{-19}$ J



P doped Si B doped Si



Quantum efficiency = e collected / photon



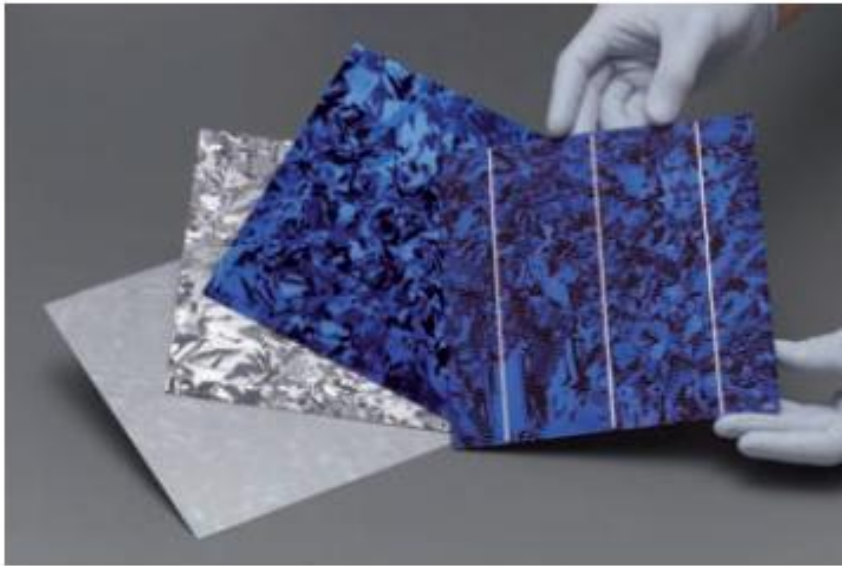


FIGURE 8
Cellule photovoltaïque silicium 20 cm × 20 cm.
 Rendement de conversion 14,75 %
 De gauche à droite : plaque Si après découpe,
 après texturation, après formation de la jonction
 et dépôt du traitement anti-réfléchissant et cellule
 finie.
 © CEA, plate-forme RESTAURE cofinancée
 par l'ADEME.

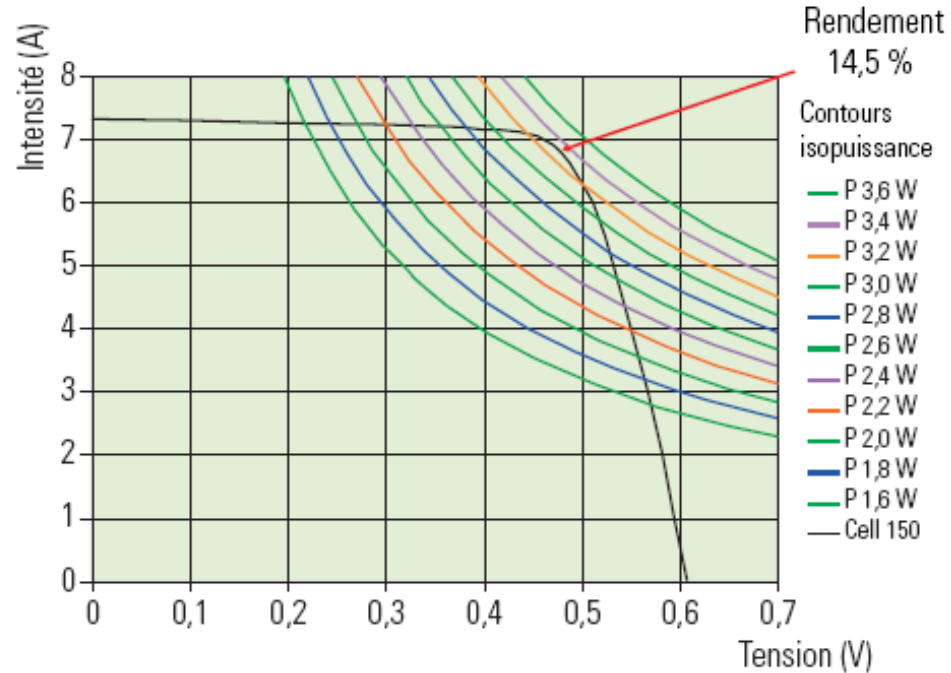
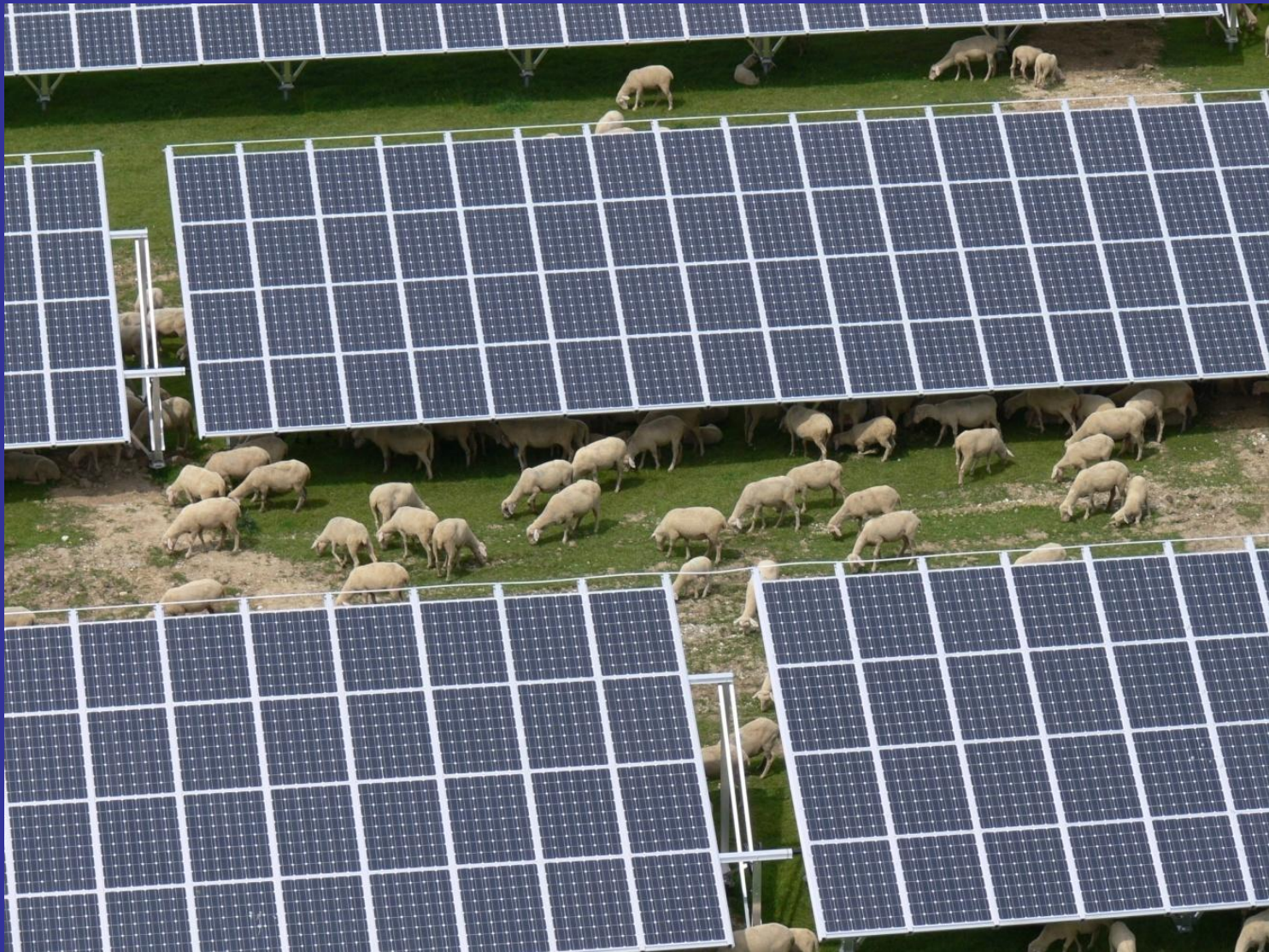


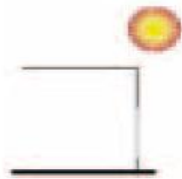
FIGURE 7
Caractéristique courant-tension
d'une cellule solaire commerciale
au silicium polycristallin
 (15 cm x 15 cm de 0,2 mm d'épaisseur)
 sous éclairage solaire normalisé 1 000 W/m².
 © Photowatt International S.A.

Si rendement = 15 % alors $P_c = 150$ W sous AM1,5
Si 1 MWh/an/m² alors 150 kWh/an/m²

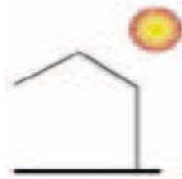
Les centrales photovoltaïques au sol (1ha \rightarrow 1 MWc \rightarrow 1-1,5 GWh/an)



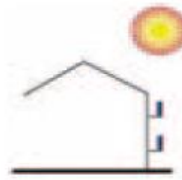
L'intégration au bâtiment



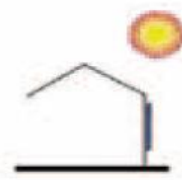
Pose en allèges



Pose en verrière sans protection arrière



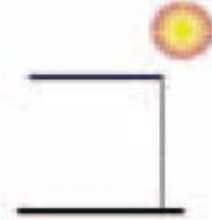
Pose en garde-corps de fenêtre, de balcon ou de terrasse



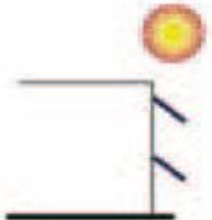
Pose en bardages, mur rideau



Pose en toiture inclinée (tuiles, ardoises,...)



Pose en toiture terrasse (membrane étanche)



Pose en brise soleil



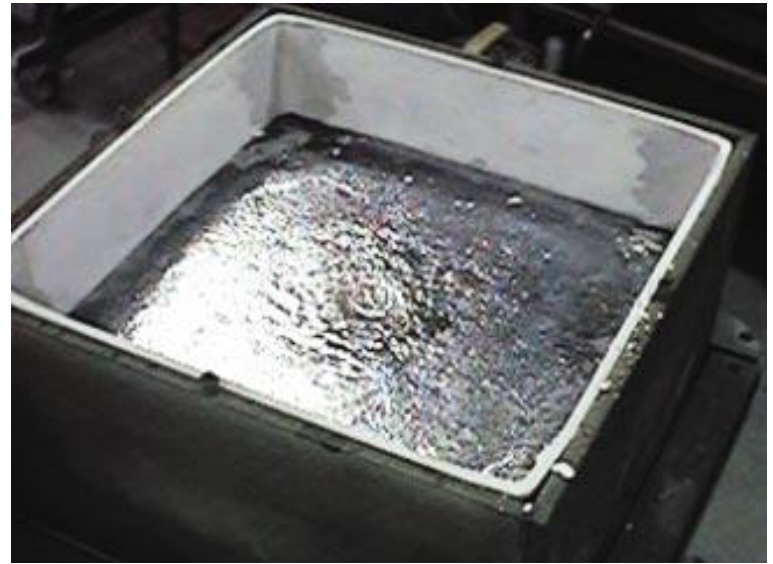
Year	Total Production(M W _p)	Annual Growth	Thin film solar cells(%)	A-Si based (%)	CdTe (%)	CIS (%)
1999	202		13,6	12,9	0,3	0,2
2000	287	42%	10,1	9,6	0,3	0,2
2001	401	40%	9,6	8,9	0,5	0,2
2002	560	39%	7,3	6,4	0,7	0,2
2003	750	34%	6,1	4,5	1,1	0,5
2004	1200	68%	6	4,4	1,1	0,5
2005	1800	45%	6,3	4,7	1,4	0,2
2006	2530	40%	7,6	4,7	2,7	0,2
2007	4280	69%	10	5,2	4,7	0,5
2008	7900	85%	12,5	5,1	6,4	1

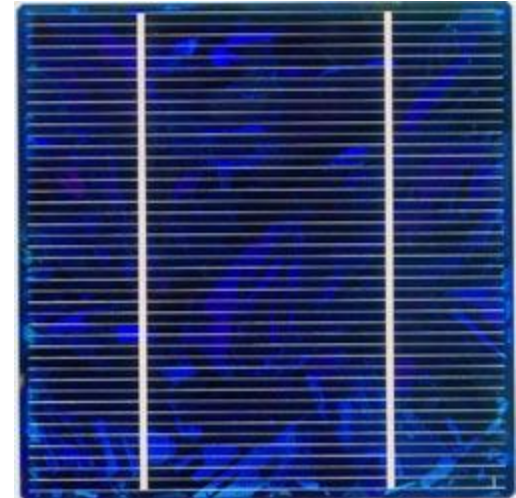
Source : Photon magazine 2009

La Filière Silicium cristallin et polycristallin « silicium massif » 88 % du marché

Labo : 24,7 % monocristallin
20 % polycristallin

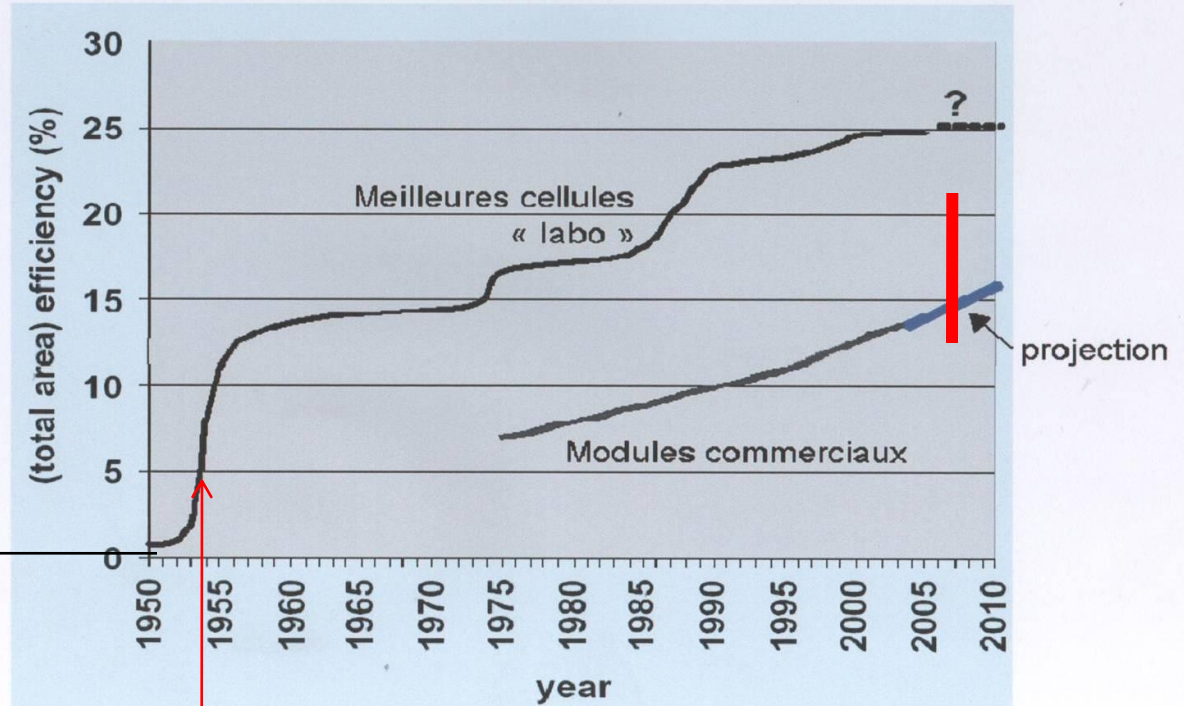
Modules : 14- 20% Mono
12-14% poly







Cellules de laboratoire & industrielles



1839

E. Becquerel
Le découvreur

1877

W.G. Adams
& R.E. Day

Cellules
Se 1%

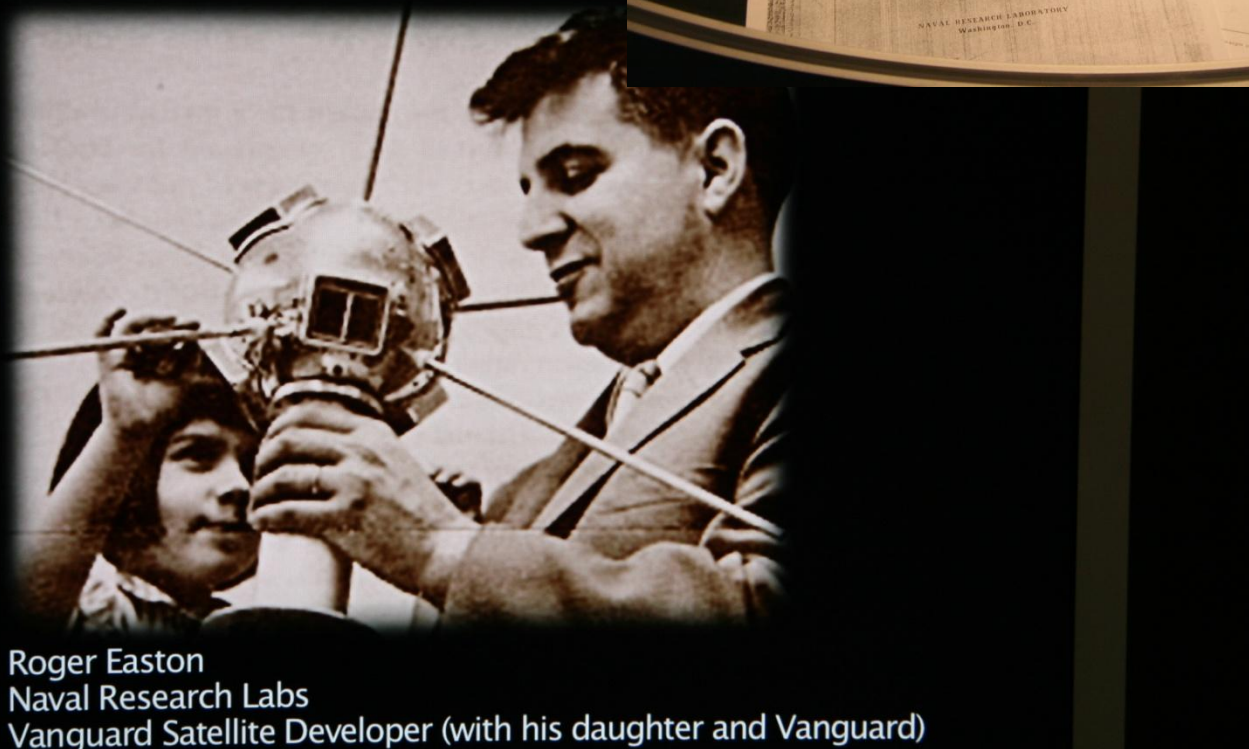
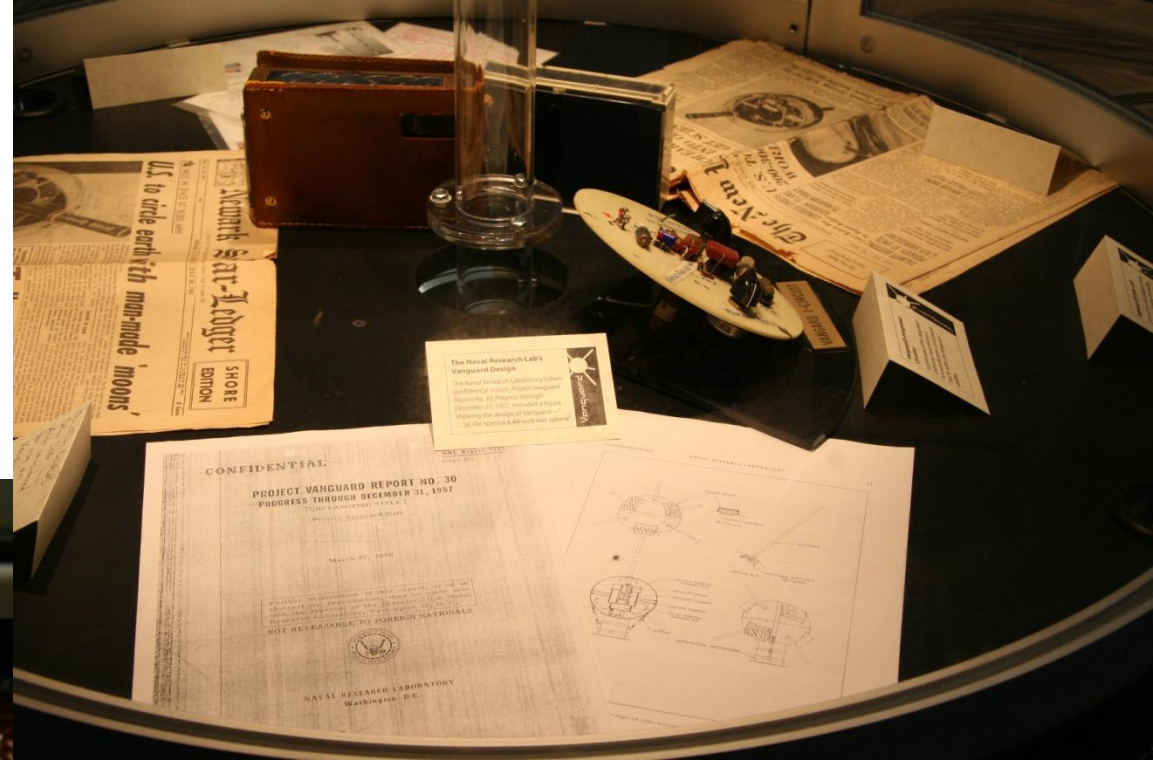
Chapin & Fuller
& Person
Si(6%)

Source : J.C. Muller

D. Lincot SLC –Autrans –Oct. 2009

Premier Satellite
Alimenté par des cellules
photovoltaïques

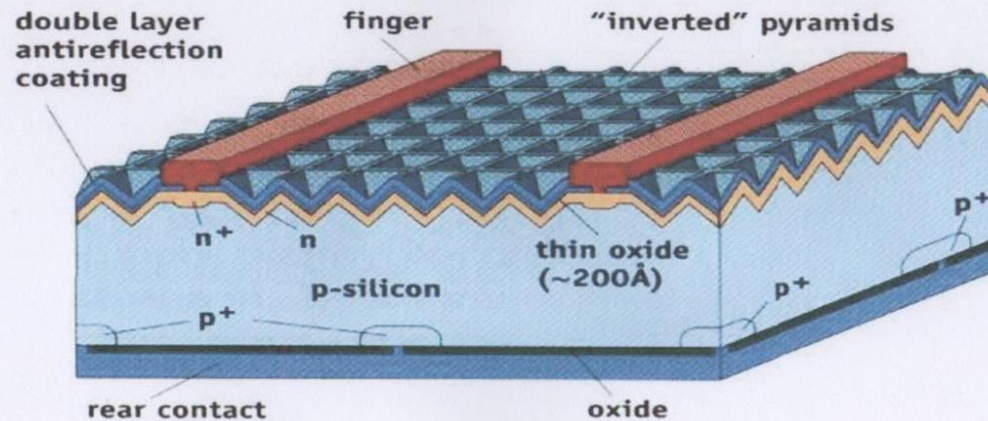
Vanguard, USA, 1958



Roger Easton
Naval Research Labs
Vanguard Satellite Developer (with his daughter and Vanguard)

Photos:
J. Wanegue

Cellule au silicium de rendement record



$$I_{cc} = 42,2 \text{ mA/cm}^2 \quad ; \quad V_{co} = 0.706 \text{ Volt} \quad ; \quad \eta_p = 24,7 \%$$

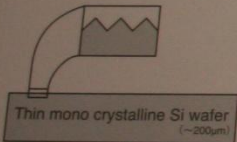
Cellule PEARL M. Green et al UNSW (Australie)

Manufacturing Process of HIT Solar Cells

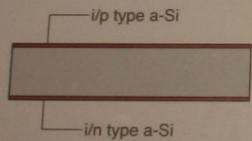
HIT: Heterojunction with Intrinsic Thin layer



Surface treatment



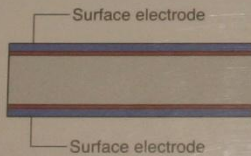
Amorphous Si deposition



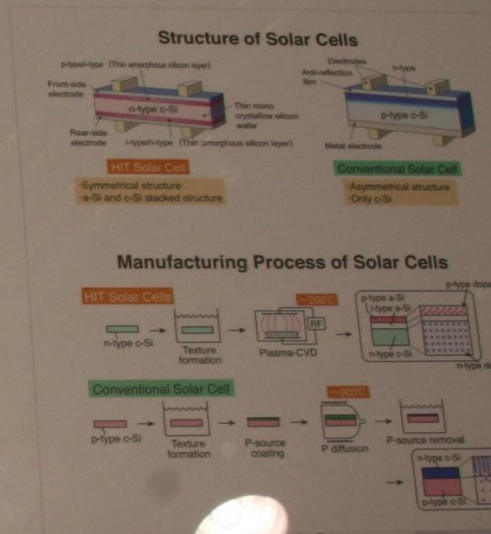
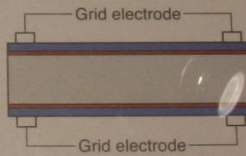
⊗ a-Si: Amorphous Si



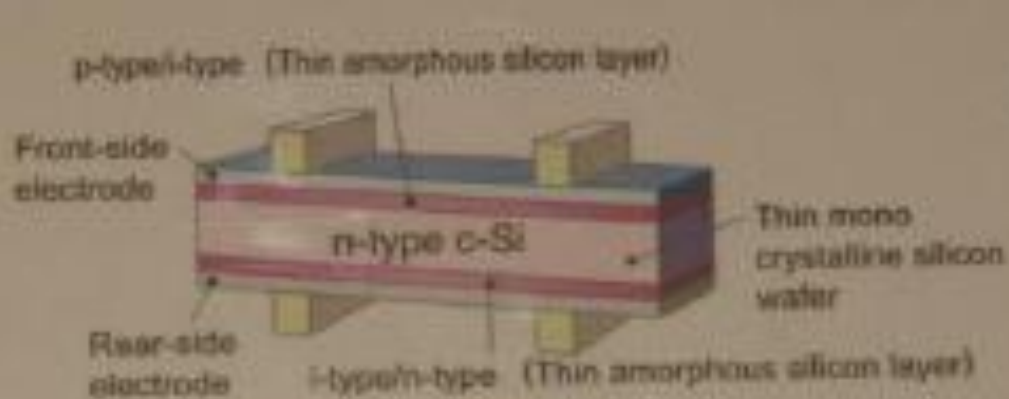
Surface electrode deposition



Grid electrode formation

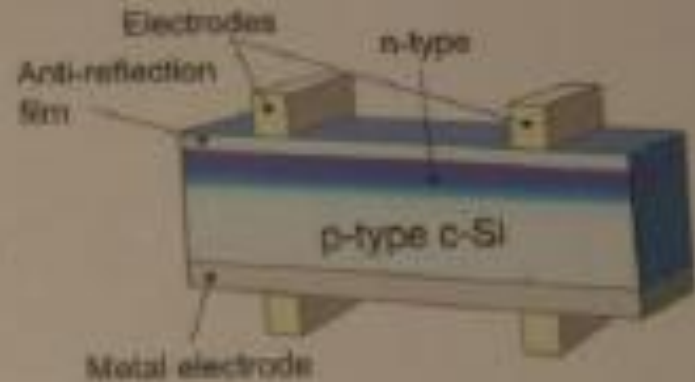


Structure of Solar Cells



HIT Solar Cell

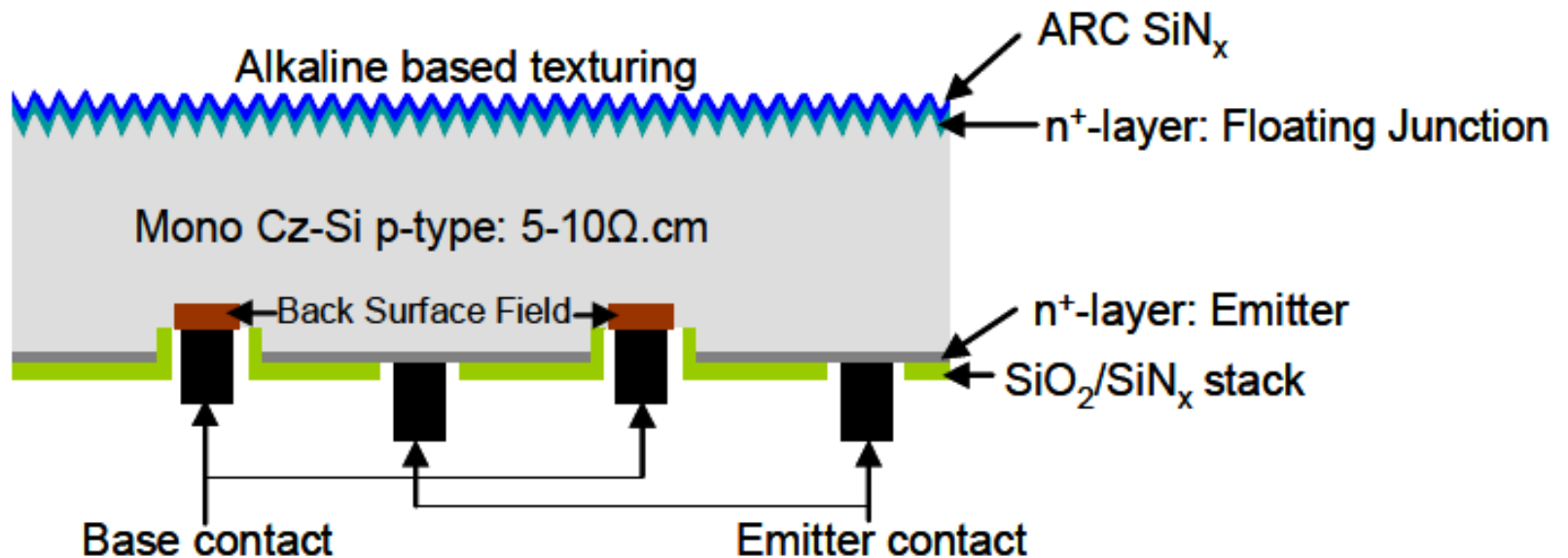
- Symmetrical structure
- a-Si and c-Si stacked structure



Conventional Solar Cell

- Asymmetrical structure
- Only c-Si

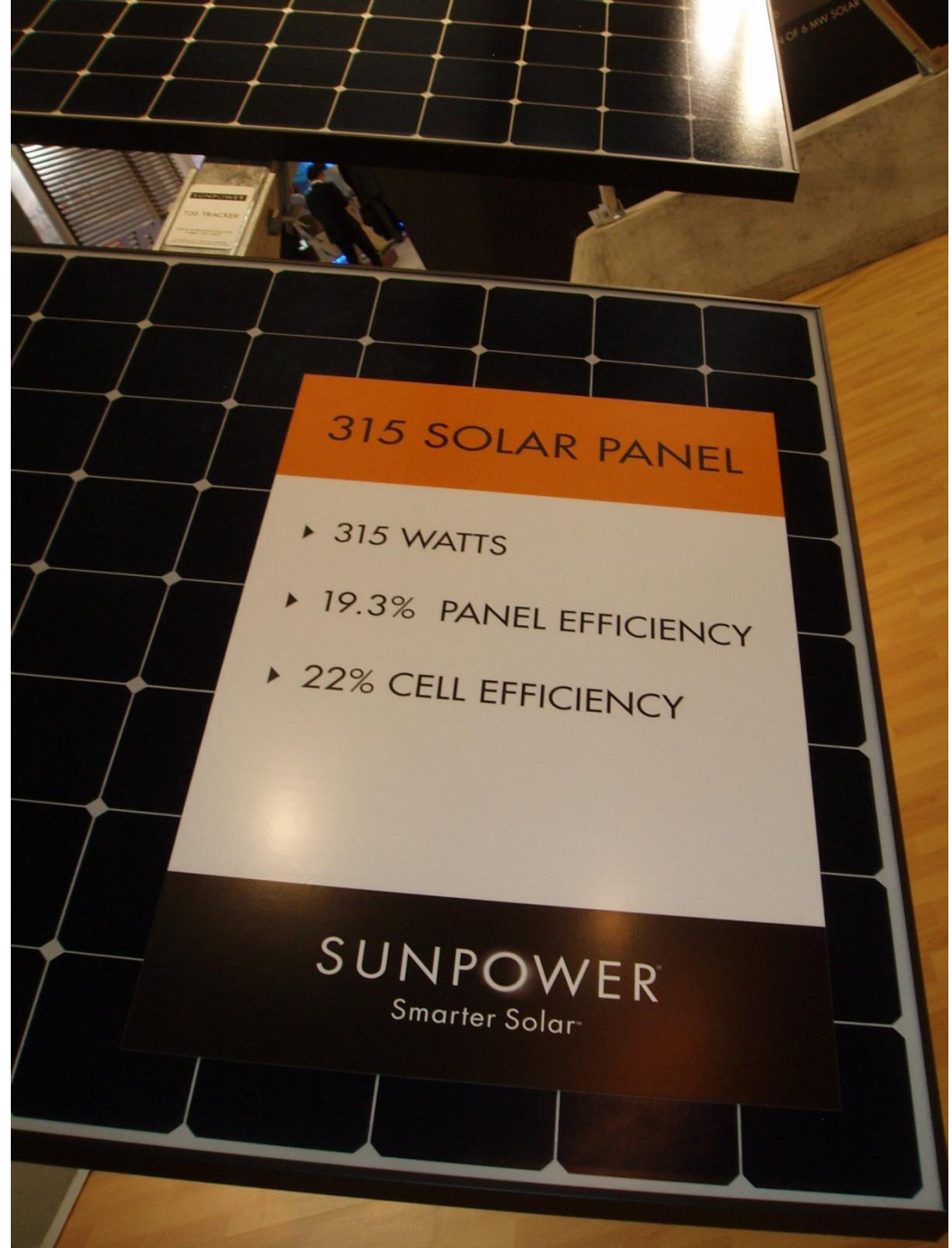
Interdigitated Back Junction solar cells



IEEE PVSEC 2009

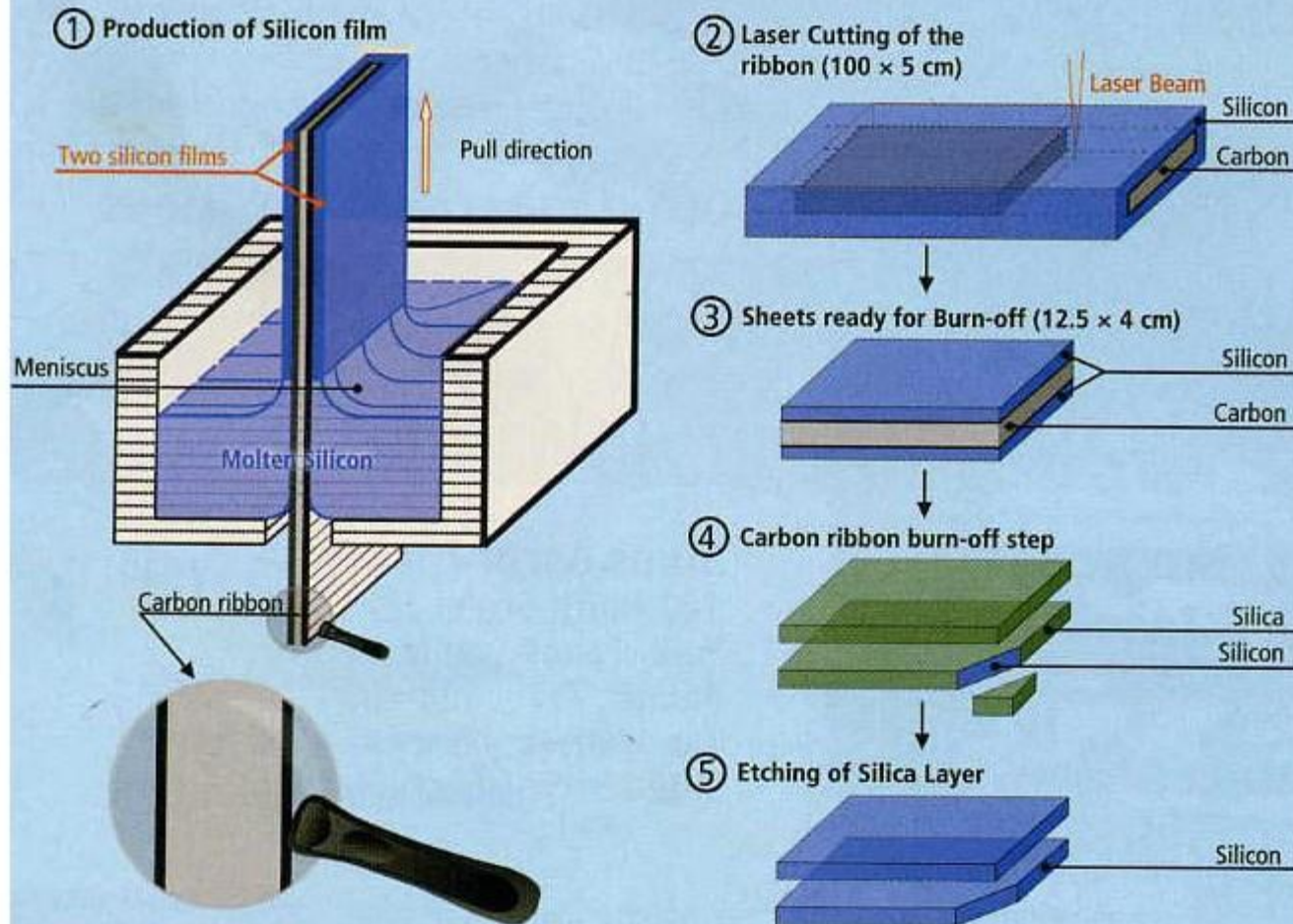
Autres tendances :

Tranches fines (100 microns)
Découpe Laser



Procédés sans découpe : Silicium Ruban

Solarforce's Ribbon on Sacrificial Carbon Template (RST) process



(Source Solarforce, graphic PHOTON International)

Procédés sans découpe : Silicium Ruban

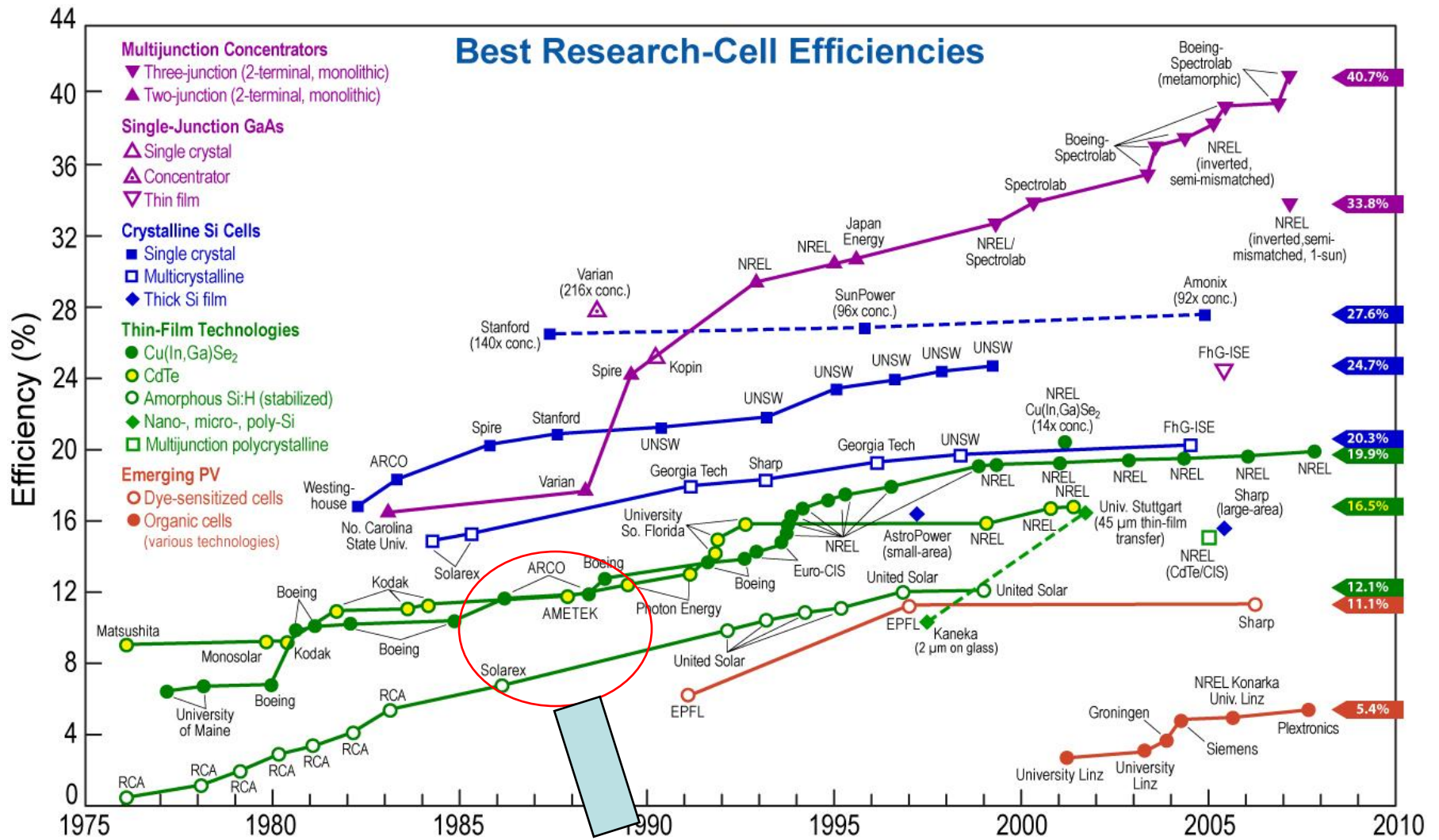


Les filières « couches minces » 12% du marché

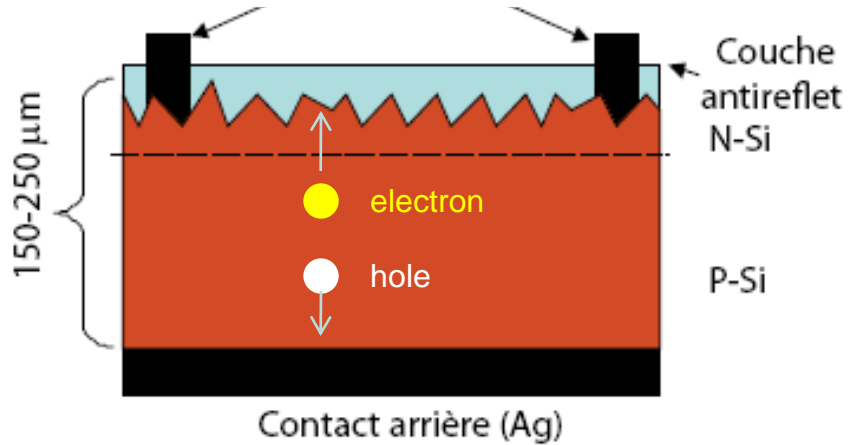
Silicium : 13% max 6-9 % modules)

Tellurure de cadmium (CdTe) : 16,5 % max 10-11% mod

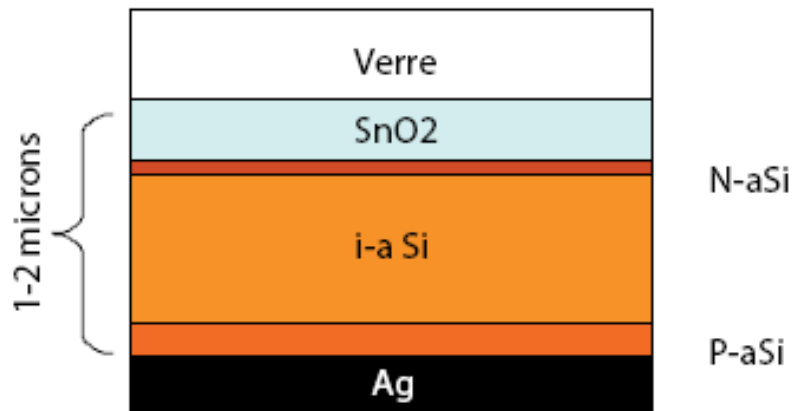
Diseleniure de cuivre et d'indium (CIS) : 20% max 10-14% mod



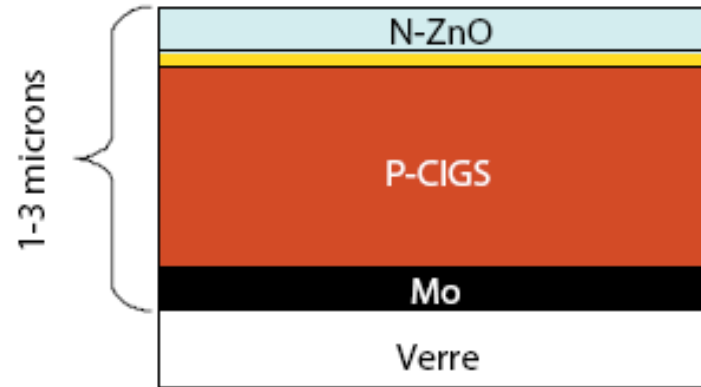
Cristalline silicon (cSi)



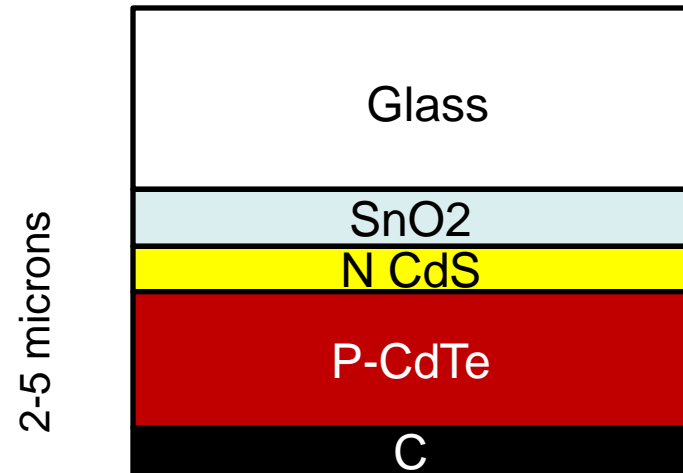
Amorphous silicon (aSi)



Copper Indium gallium diselenide (CIGS)

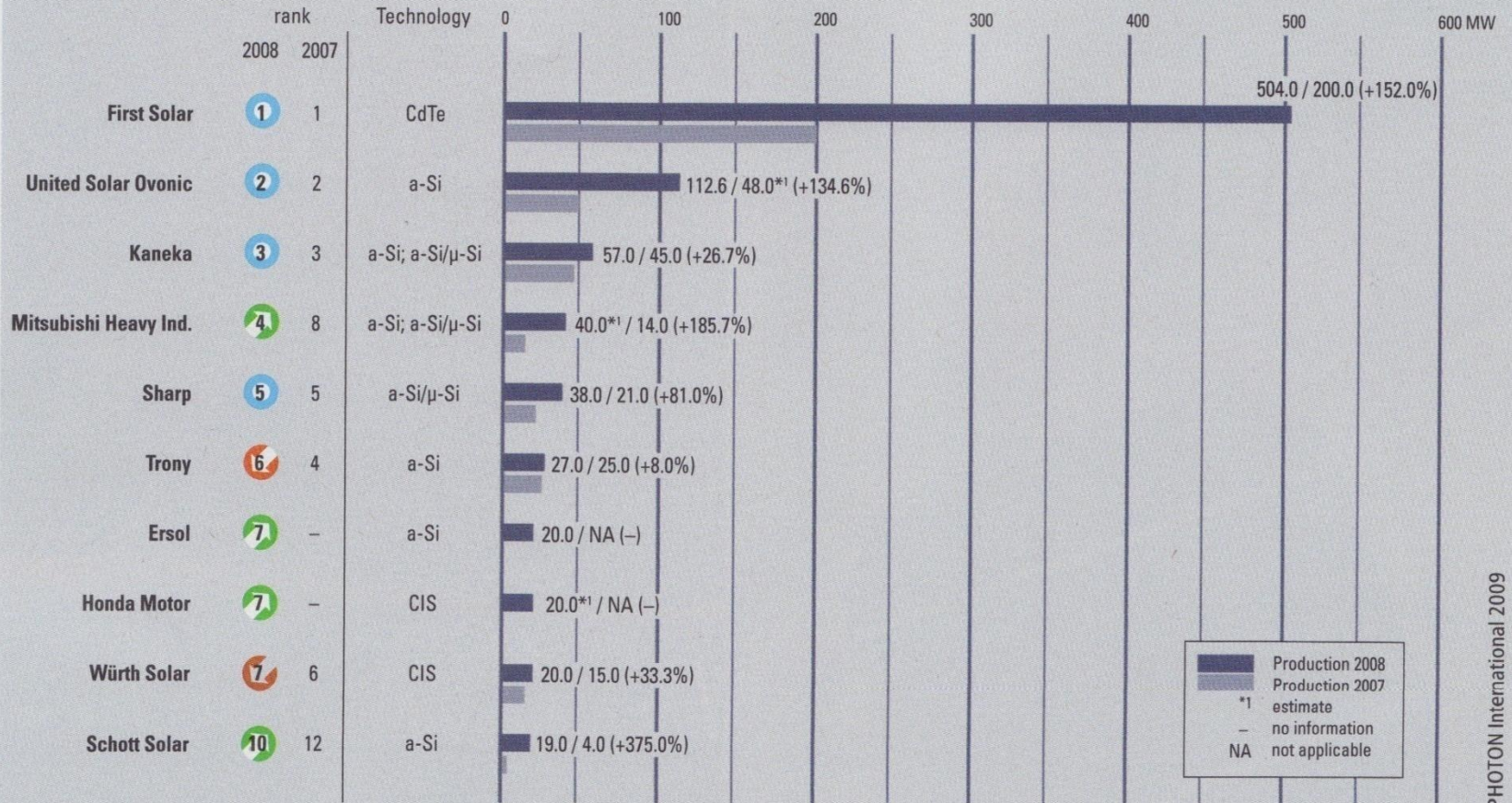


Cadmium telluride (CdTe)



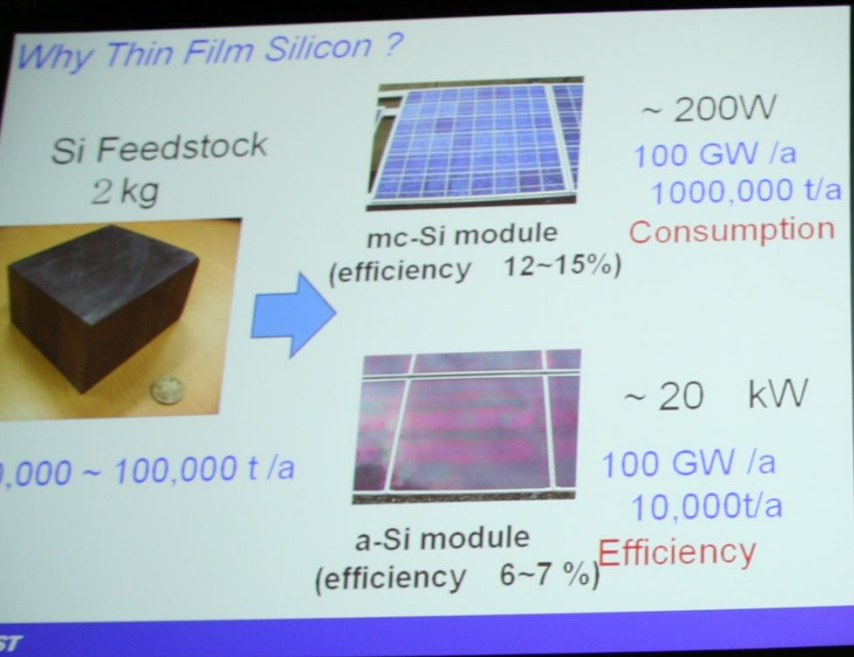
Year	Total Production(M W_c)	Annual Growth	Thin film solar cells(%)	A-Si based (%)	CdTe (%)	CIS (%)
1999	202		13,6	12,9	0,3	0,2
2000	287	42%	10,1	9,6	0,3	0,2
2001	401	40%	9,6	8,9	0,5	0,2
2002	560	39%	7,3	6,4	0,7	0,2
2003	750	34%	6,1	4,5	1,1	0,5
2004	1200	68%	6	4,4	1,1	0,5
2005	1800	45%	6,3	4,7	1,4	0,2
2006	2530	40%	7,6	4,7	2,7	0,2
2007	4280	69%	10	5,2	4,7	0,5
2008	7900	85%	12,5	5,1	6,4	1

Top 10 thin-film module manufacturers 2008

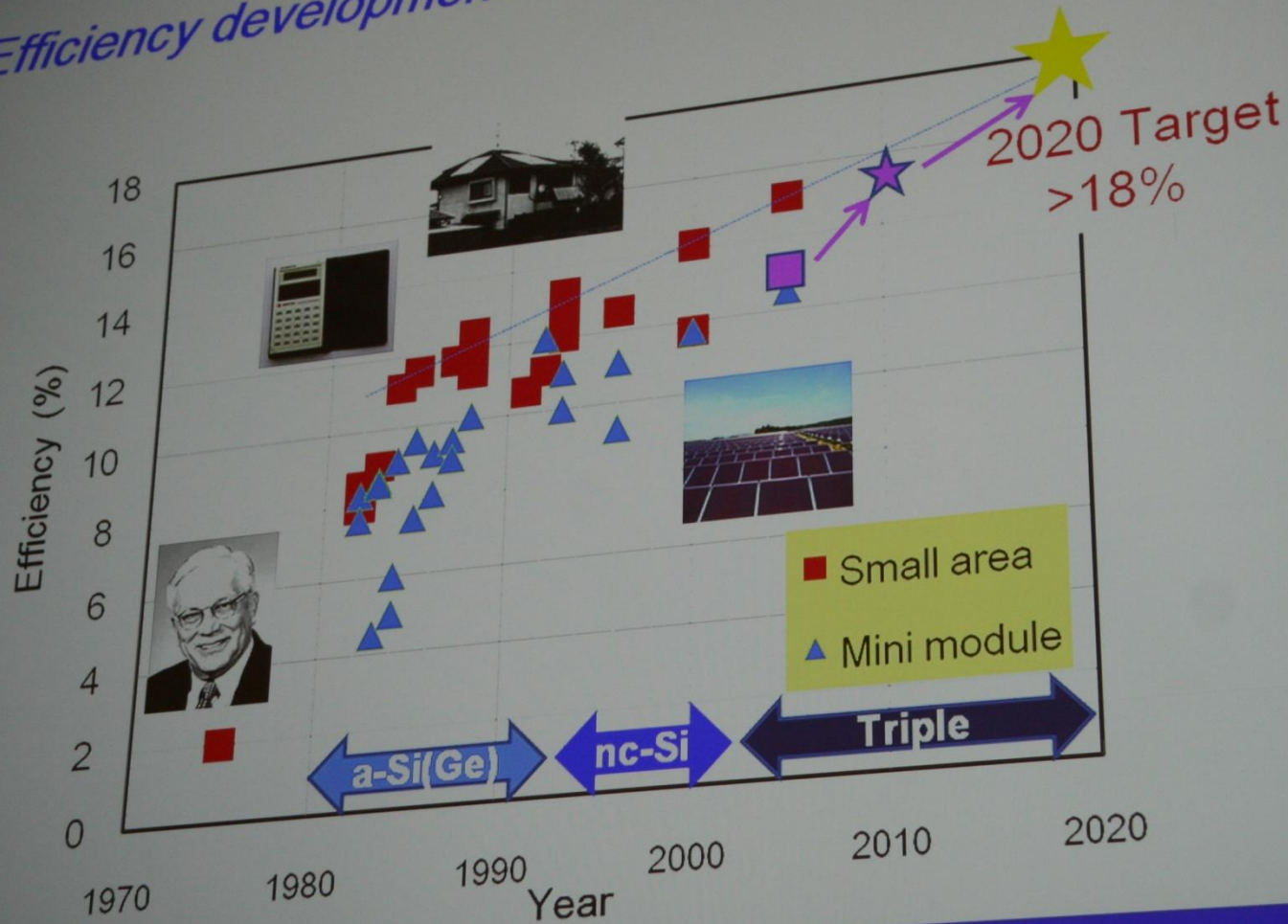


Production 2008
 Production 2007
 *1 estimate
 - no information
 NA not applicable

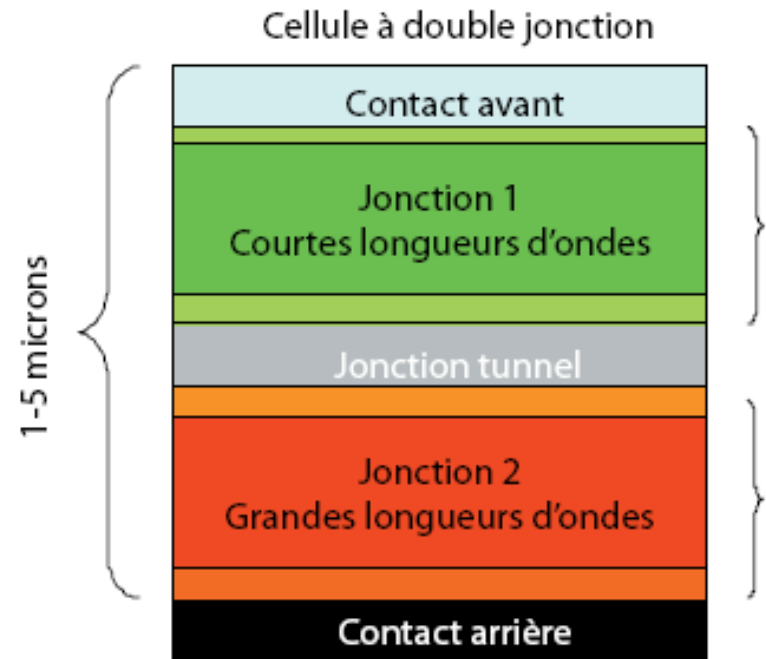
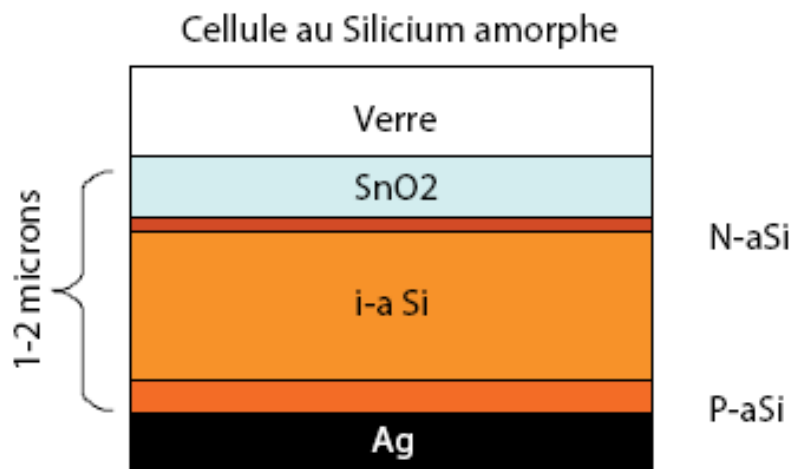
La filière Silicium couches minces



Efficiency development of thin film Si Solar Cells

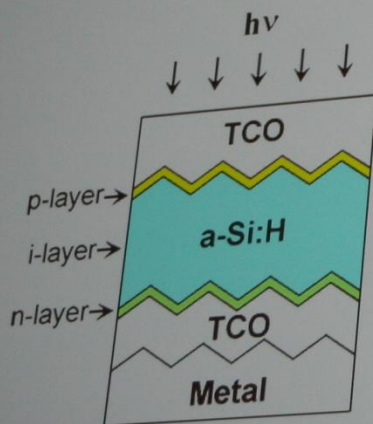


Multijunction concepts



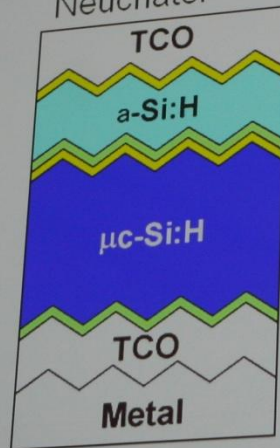
Multi-junction technology

Single junction
~9%(stab.)



Double junction
~12% (stab.)

Micromorph
Pioneered by IMT
Neuchatel



Triple junction
~13%(stab.)

Novel material



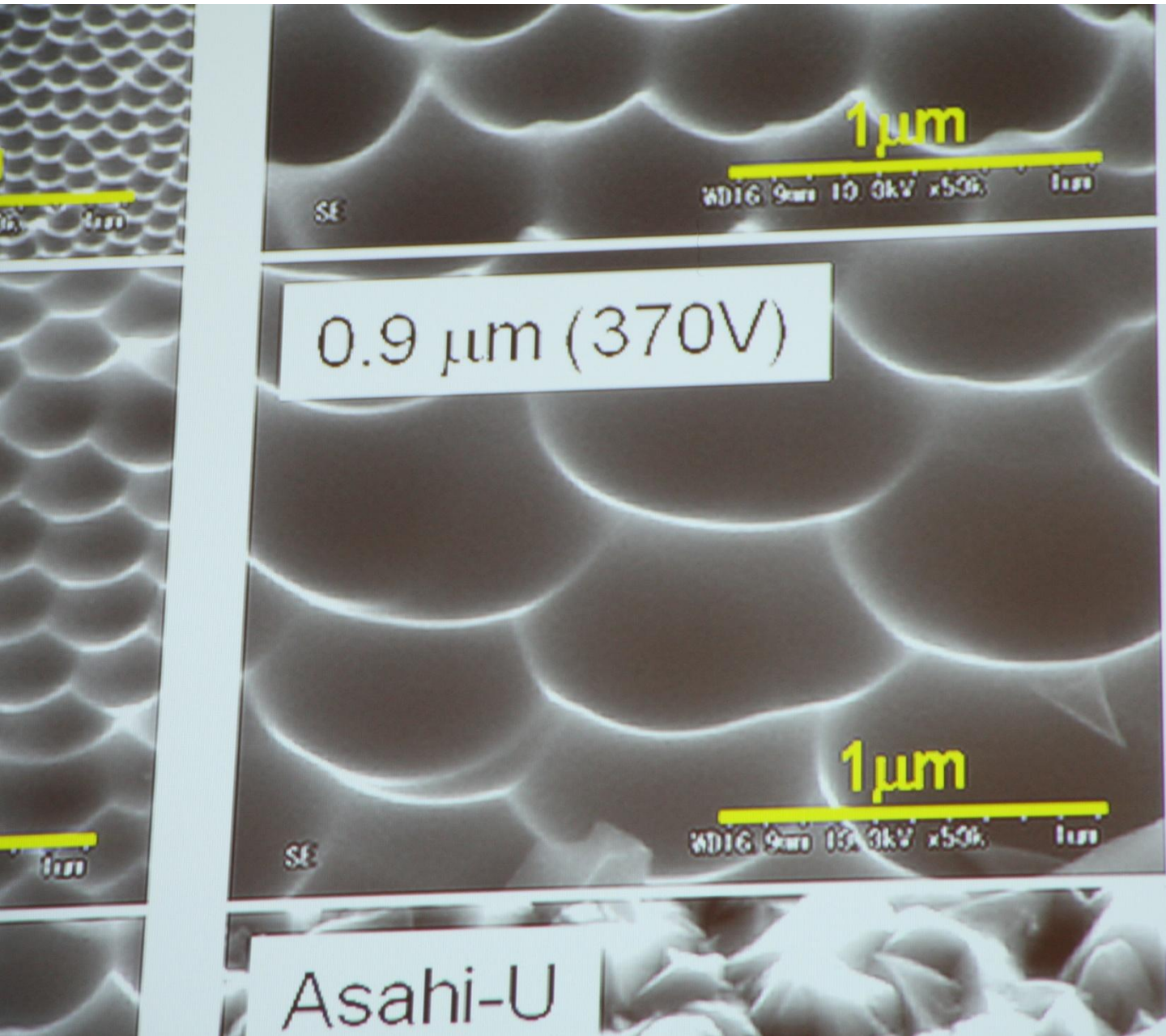
a-Si:H

a-SiGe:H
or
μc-Si:H

μc-Si:H



J. Meier 9.5% on LPCVD ZnO
Sonobe 9.3% on Asahi-U



NG UP THIN FILM MANUFACTURING

SunFab™

The world's only 5.7m² thin film production line





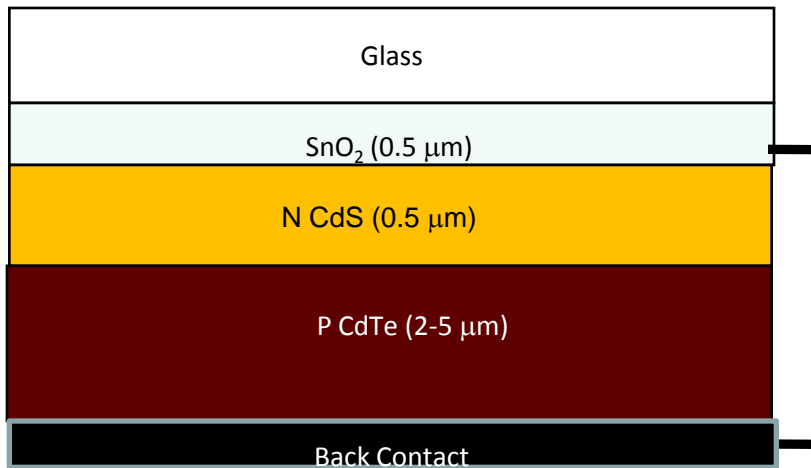


La Filière CdTe

Year	Total Production(M W _c)	Annual Growth	Thin film solar cells(%)	A-Si based (%)	CdTe (%)	CIS (%)
1999	202		13,6	12,9	0,3	0,2
2000	287	42%	10,1	9,6	0,3	0,2
2001	401	40%	9,6	8,9	0,5	0,2
2002	560	39%	7,3	6,4	0,7	0,2
2003	750	34%	6,1	4,5	1,1	0,5
2004	1200	68%	6	4,4	1,1	0,5
2005	1800	45%	6,3	4,7	1,4	0,2
2006	2530	40%	7,6	4,7	2,7	0,2
2007	4280	69%	10	5,2	4,7	0,5
2008	7900	85%	12,5	5,1	6,4	1

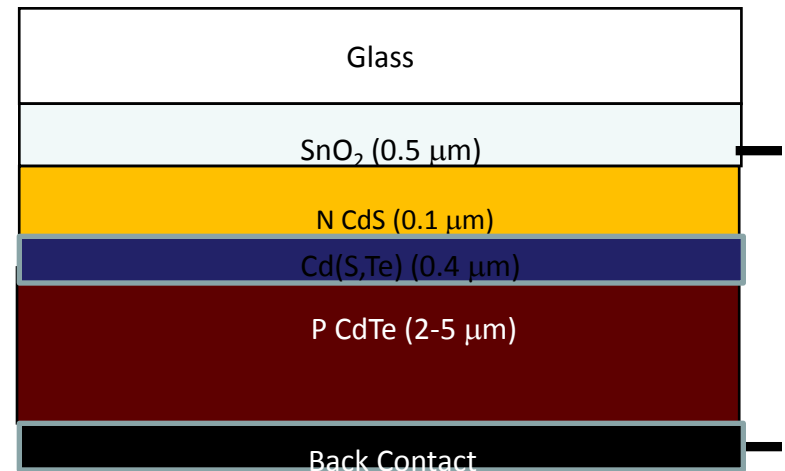
Les cellules solaires au Tellure de Cadmium

Before Annealing



Not to scale

After annealing (400-500°C)

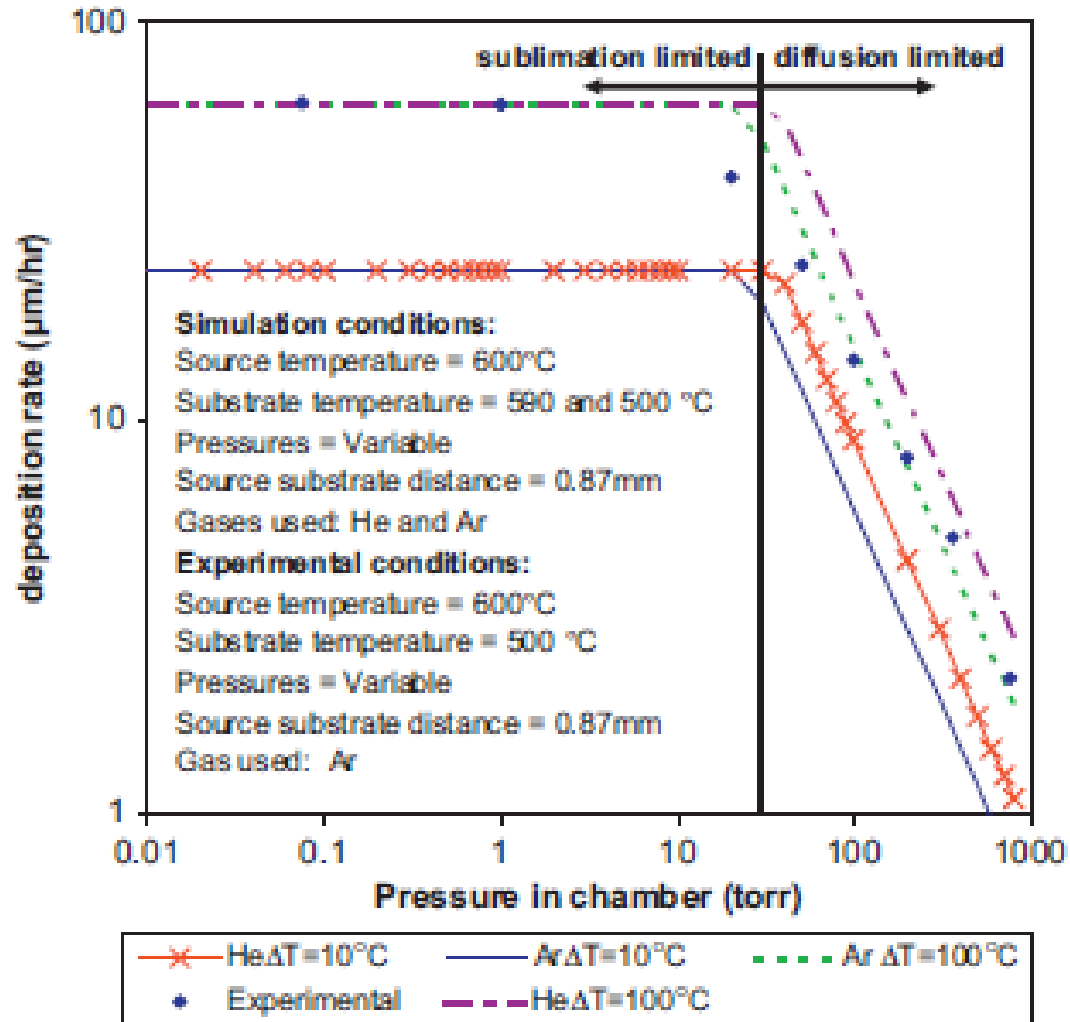


Not to scale

Rendement record 16,5 %

Rendement en production modules
10,9 %

La technique de transport à courte distance





First Solar



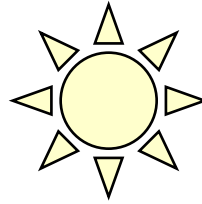
http://www.firstsolar.com/pdf/FS_brochure_FR.pdf

Example : 7 MW PV farm in France

La Filière CIS

Rendement record : 20%

Modules 10-14%



Contacts

Window Layer

ZnO (1 μm)

Buffer layer

CdS, ZnS ... 50nm

Absorber layer

Cu(In,Ga,Al)(S,Se)₂ (2 μm)

Back contact

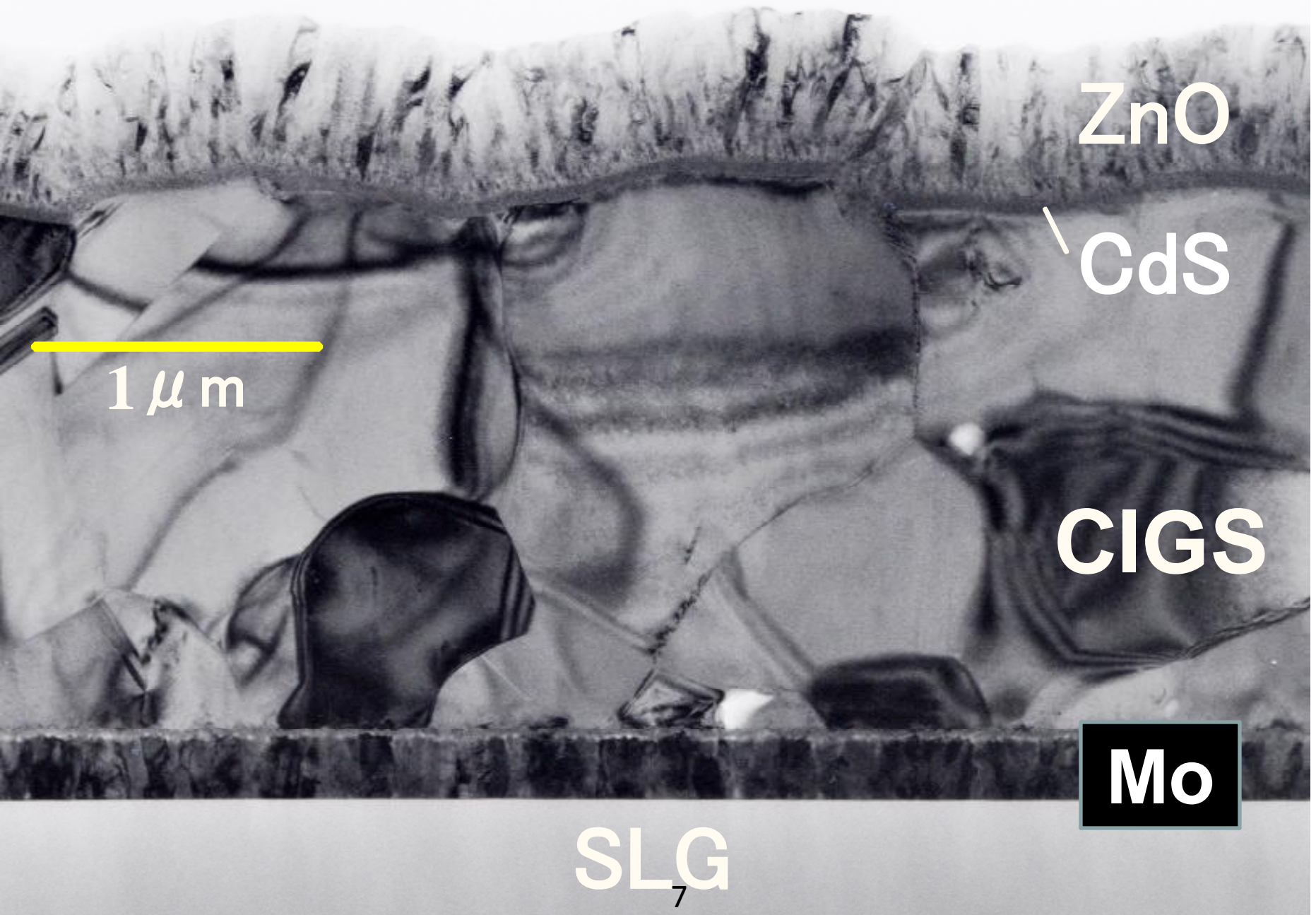
Mo (0,5 μm)

Substrate

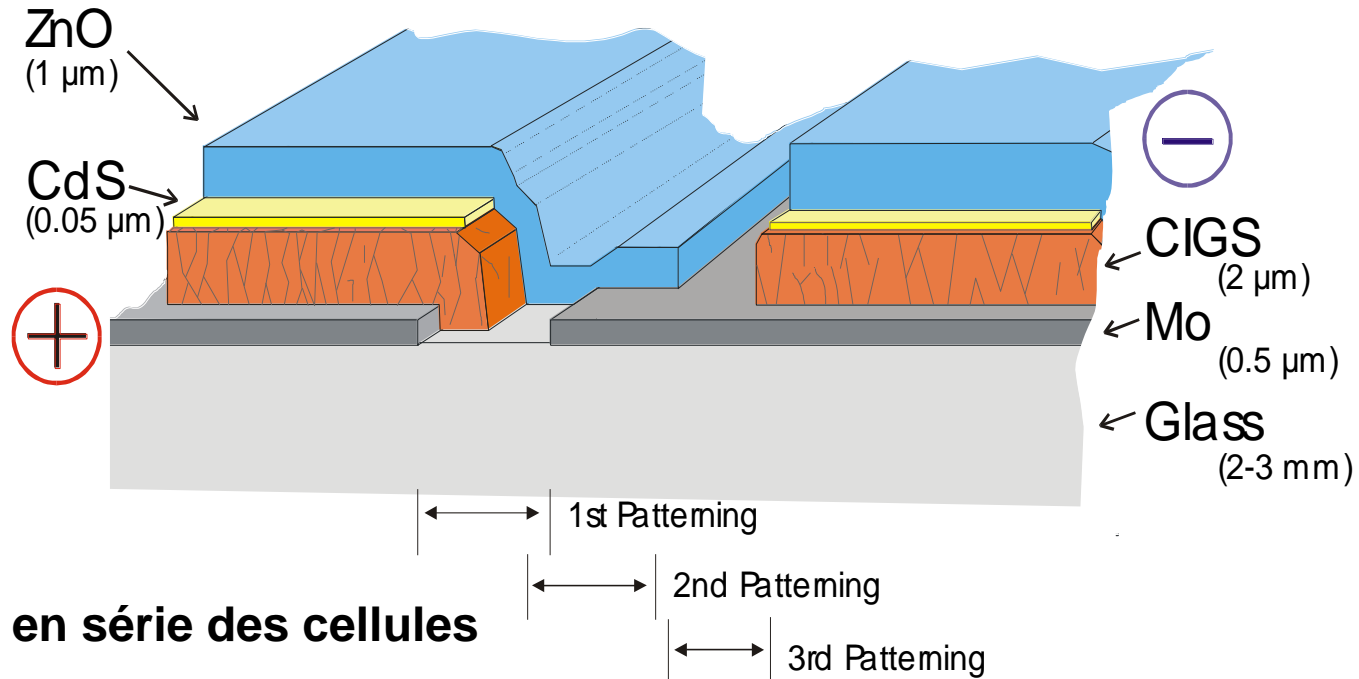
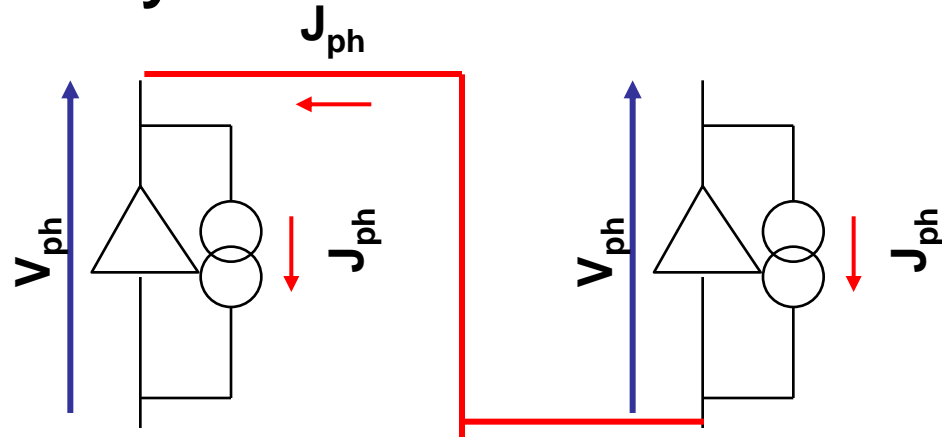
Glass or metal/plastic foil

Not to scale

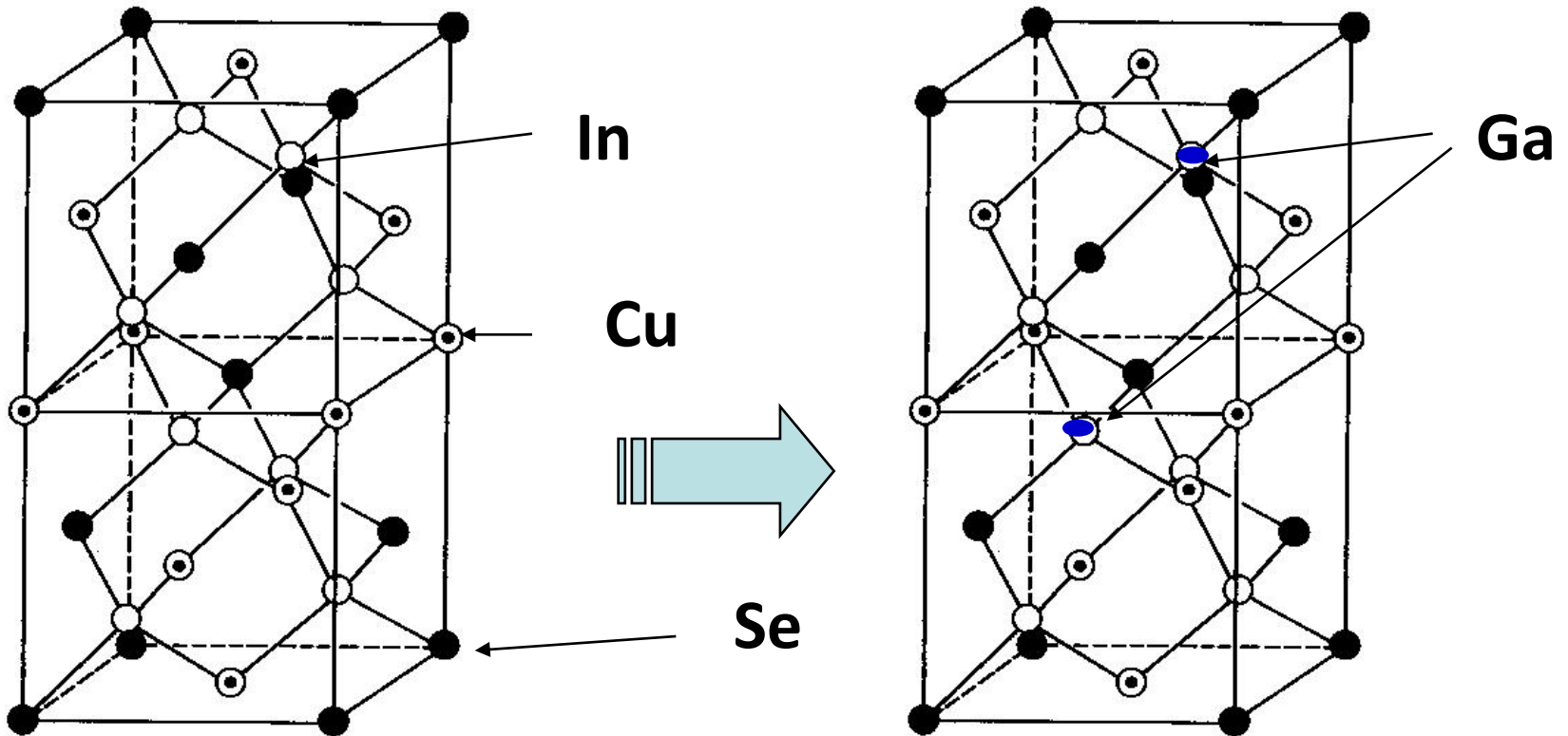
Source : Prof Nakada



Monolytic Interconnection



Par Courtoisie : Dr. Hans W. Schock (IPE)

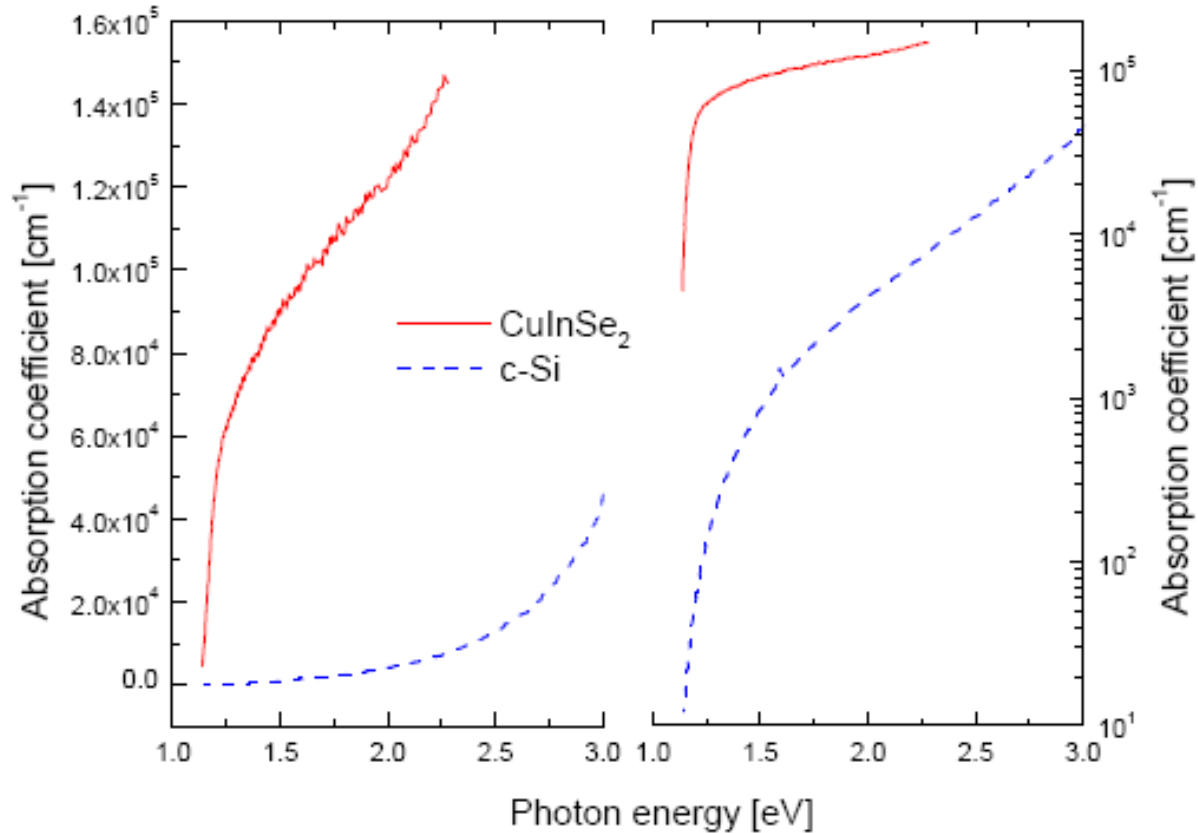


« CIS » 1 eV



1,15 eV « CIGS »





Direct bandgap (CuInSe₂)

Indirect bandgap (Si)

(additional phonon required)

Solar Cells

© F.-J. Haug, ETH Zürich

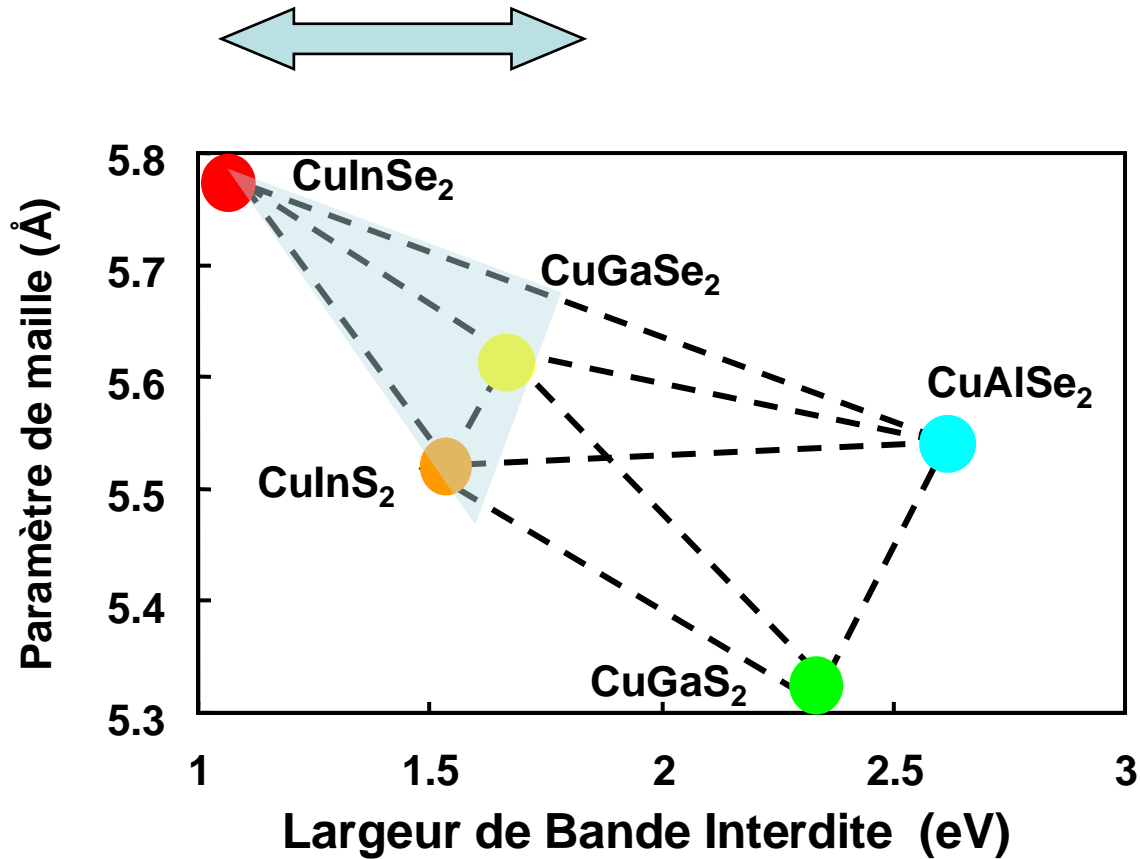


A new European record has been claimed by the Centre for Solar Energy and Hydrogen Research, Baden-Württemberg, Germany, for copper-indium-gallium-diselenide thin film solar cell, which has produced under pilot production conditions. ZSW said that a 19.6% conversion efficiency had been recorded using an inline multistage process in its automated coating plant. The results have been certified by the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.

What's really special about our success is not the actual efficiency level in itself," commented Dr. Michael Powalla, Member of the Board at ZSW. "The decisive fact is that we're producing solar cells and small modules with a CIS plant designed to perform all process steps over the area of 30 cm by 30 cm, representing a pre-industrial scale. This level of development creates the prerequisites for cutting costs as well as increasing efficiency. For such a production-level plant, the 19.6 percent for an active cell area of almost 0.5 square centimetres is actually a world record."



The chalcopyrtite materials family



Most efficient absorbers: **Cu(In,Ga)Se₂**
et **CuIn(S,Se)₂**

Source: Dr. Hans Werner SCHOCK

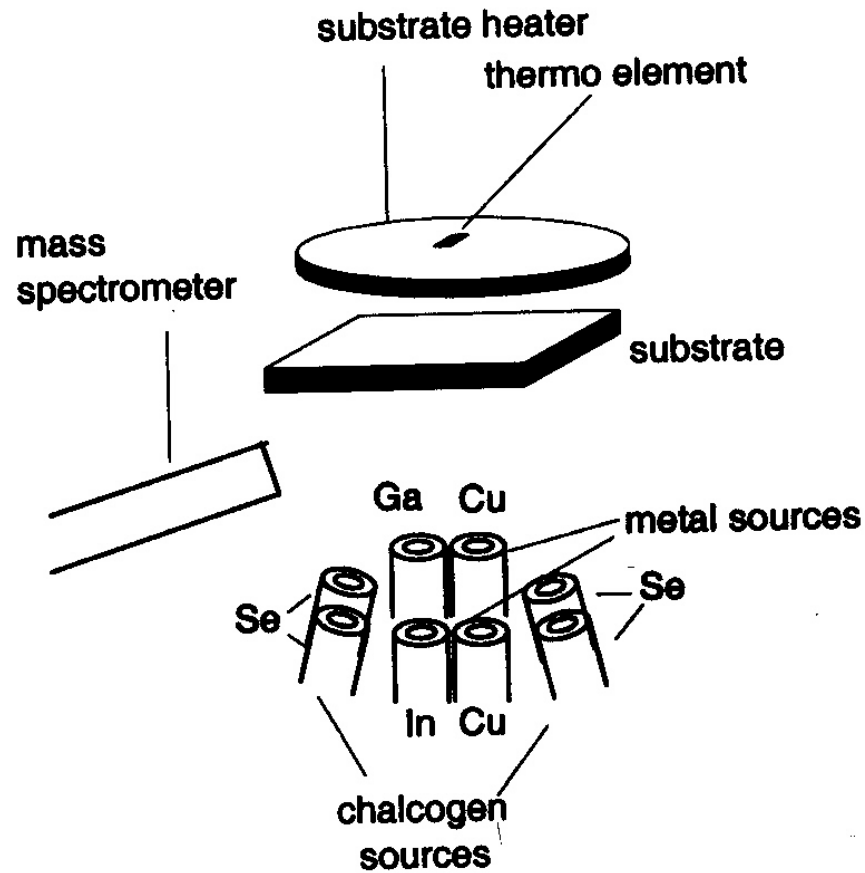


La maison Zen (Zero Energy Net) in Chambery of Alain Ricaud
Positive energy house in France <http://www.cythelia.fr>

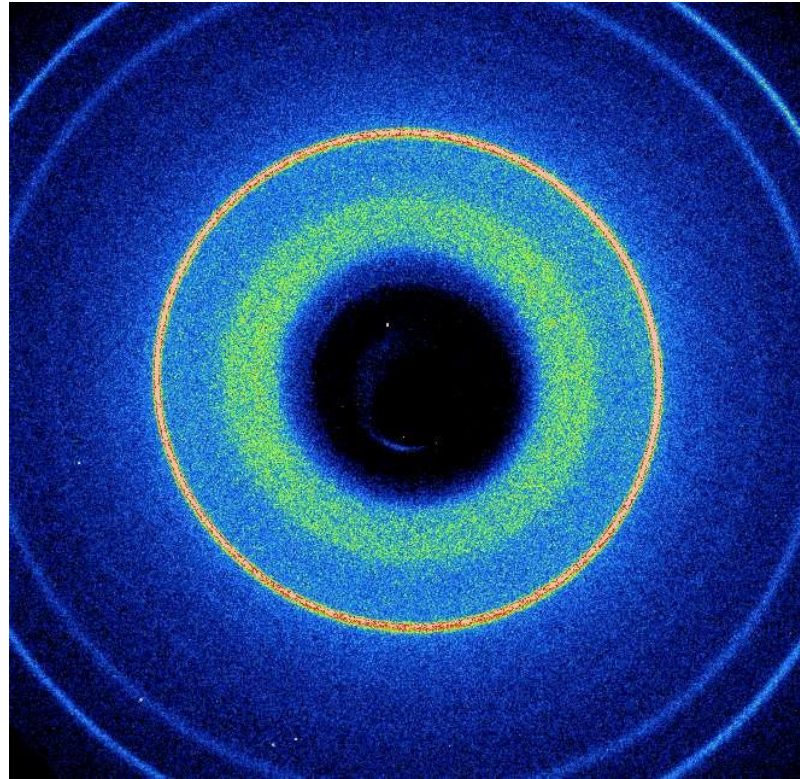
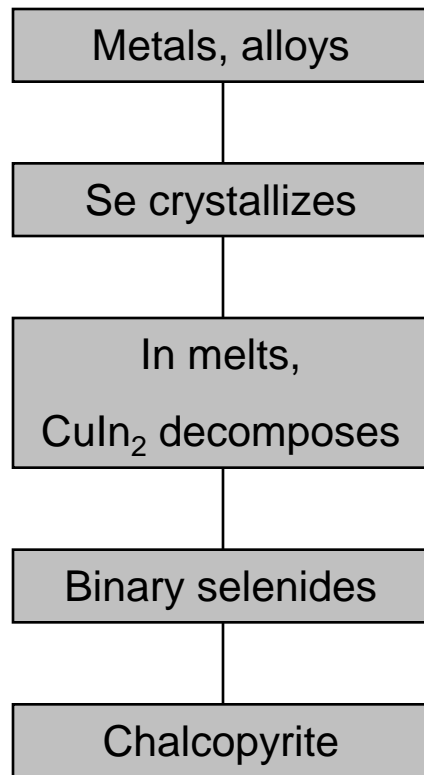


PV System CIS (Sulfurcell) 13.5 kWp 12 000 kWh/year
for 9000 kWh/year consumption

La coevaporation sous ultra vide

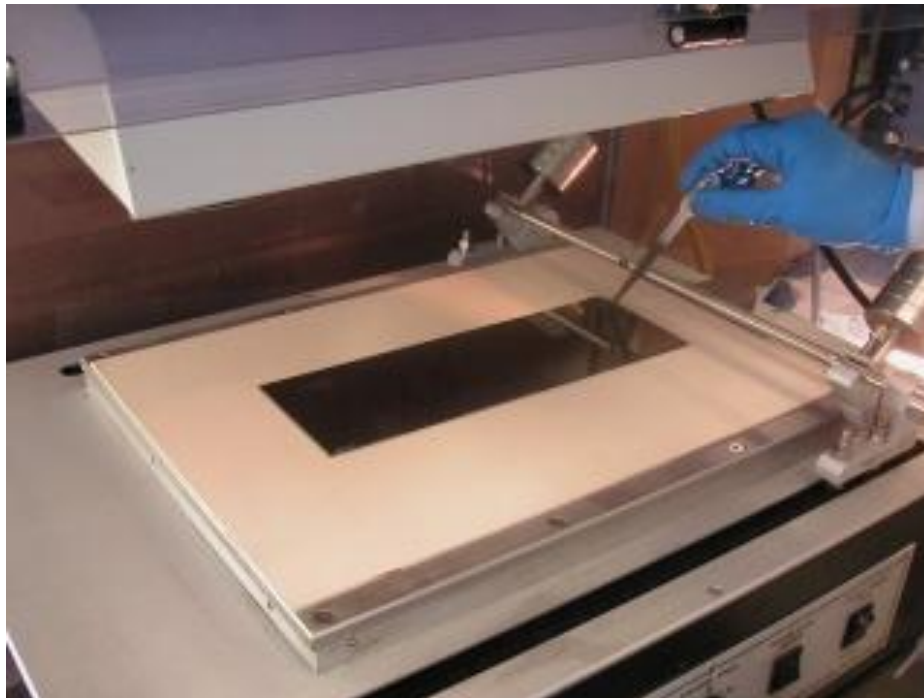


Used in NREL, Uppsala, ZSW
Industrial : Würth solar

Polycrystalline Phases during the formation of $\text{Cu}(\text{In},\text{Al})\text{Se}_2$ 

La sérigraphie (NanoSolar)

Substrate	Efficiency	Air Mass Index
Soda Lime Glass	13.6%	AM1.5 ^a
Molybdenum Foil	13.0%	AM1.5
Titanium Foil	9.5%	AM1.5
Polyimide Film	9.3%	AM0 ^b

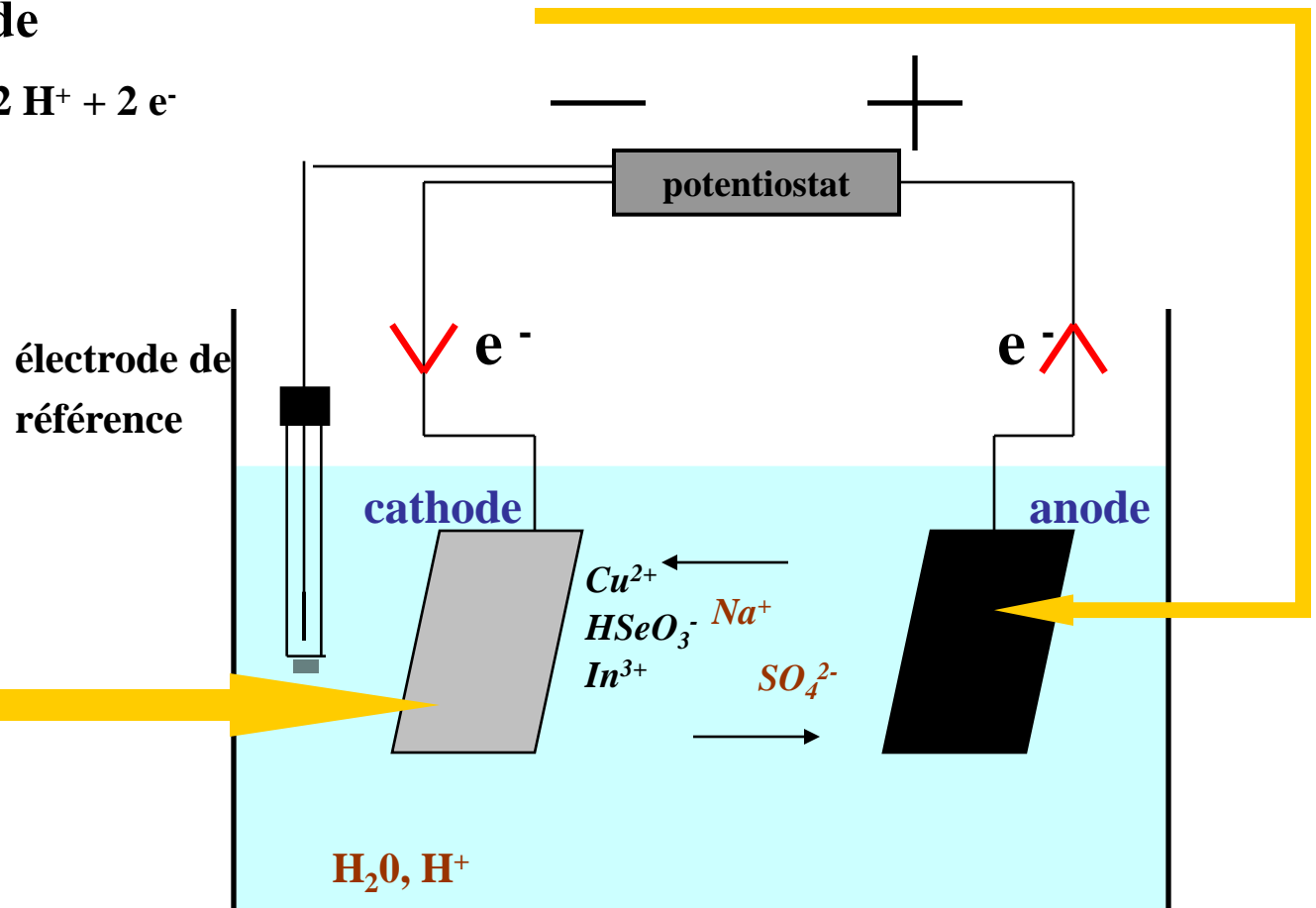
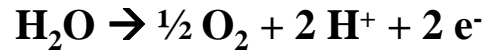


Electrodeposition (IRDEP)

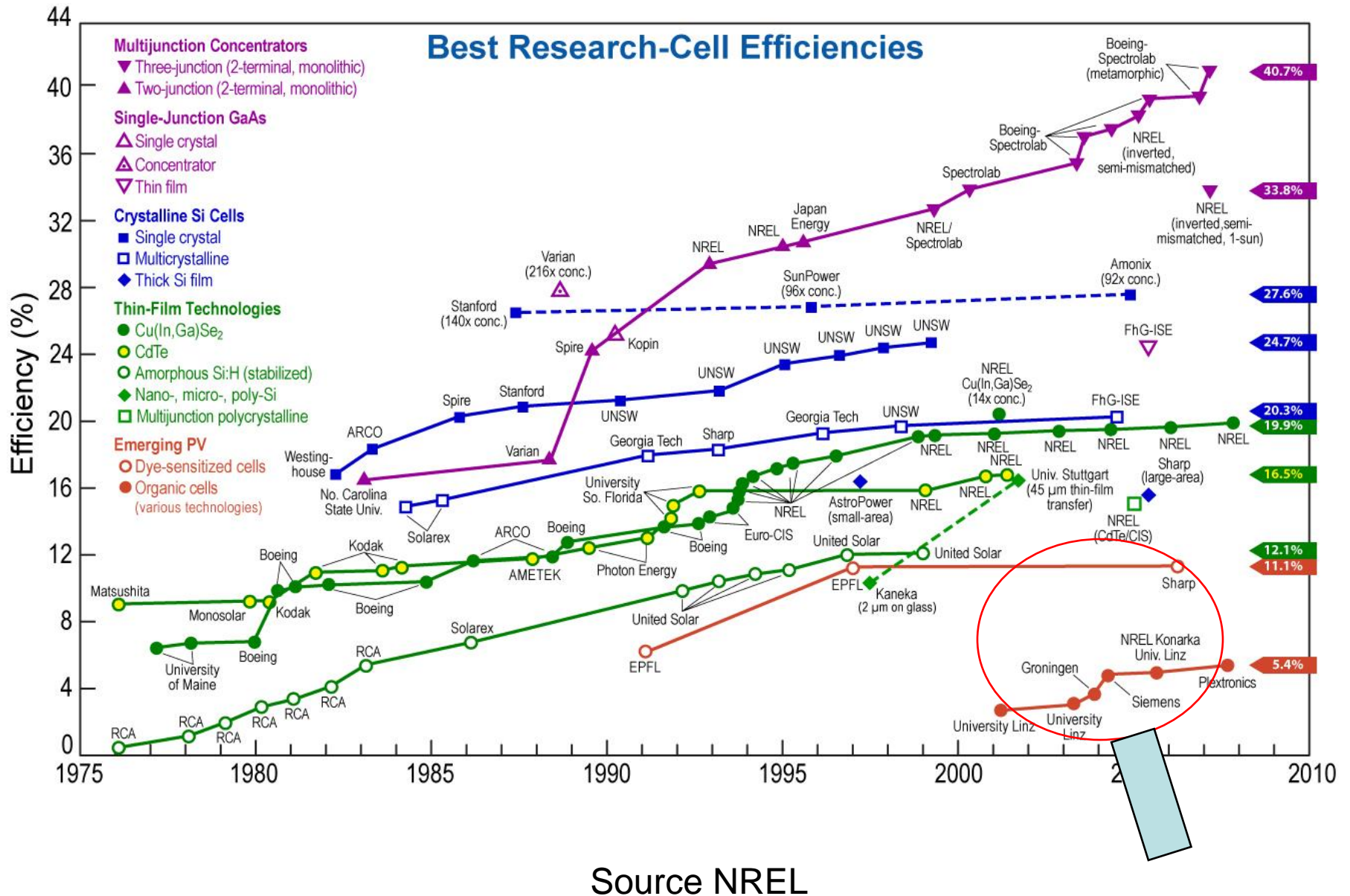
Réaction globale à la cathode



Réaction à l'anode



Les nouvelles filières à base de nanostructures organiques ou hybrides



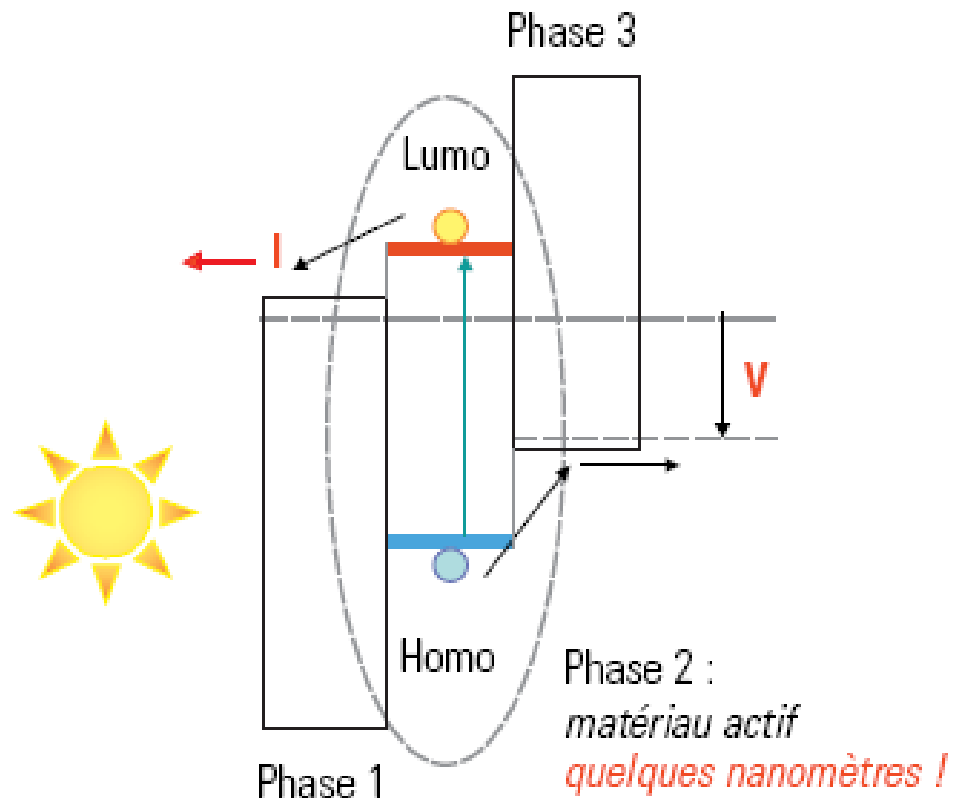


FIGURE 17

***Approche nouvelle :
photovoltaïque moléculaire.***

Les cellules nanocristallines à colorants

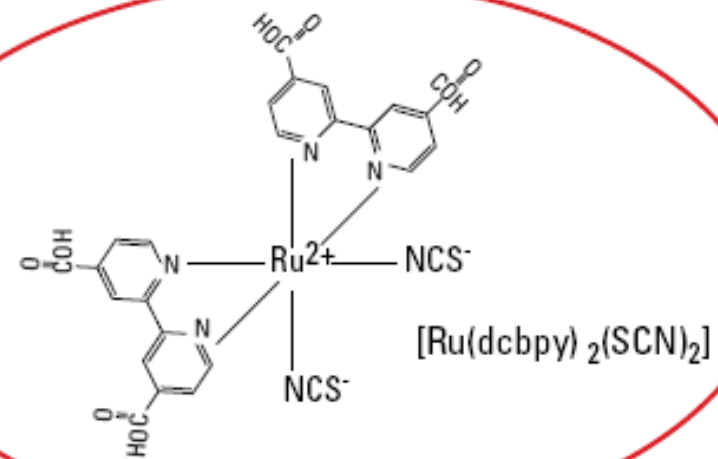
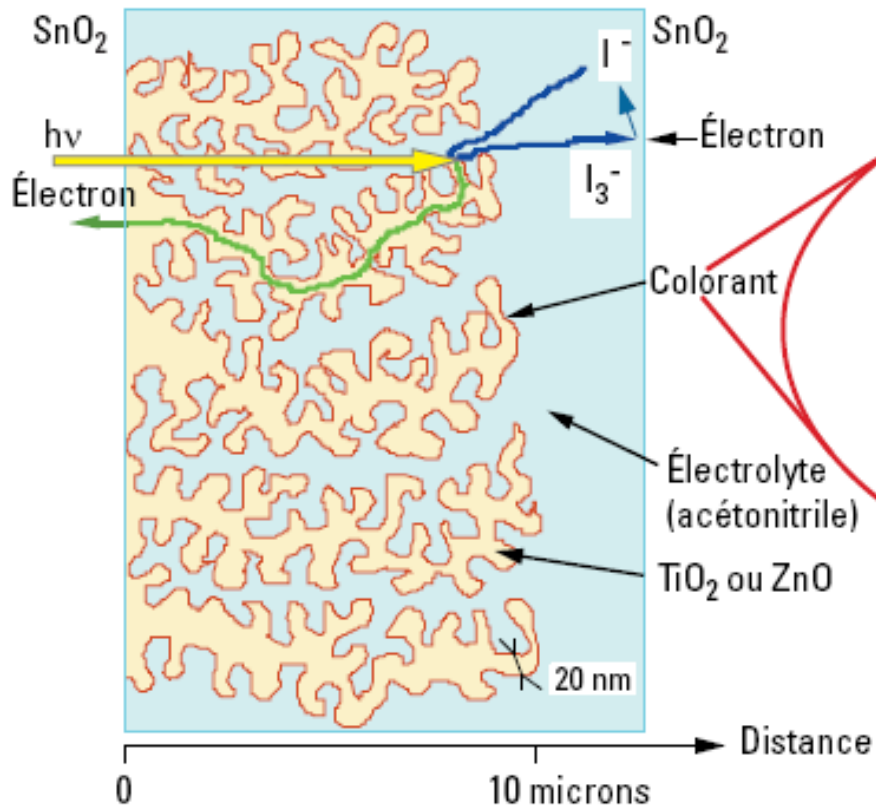
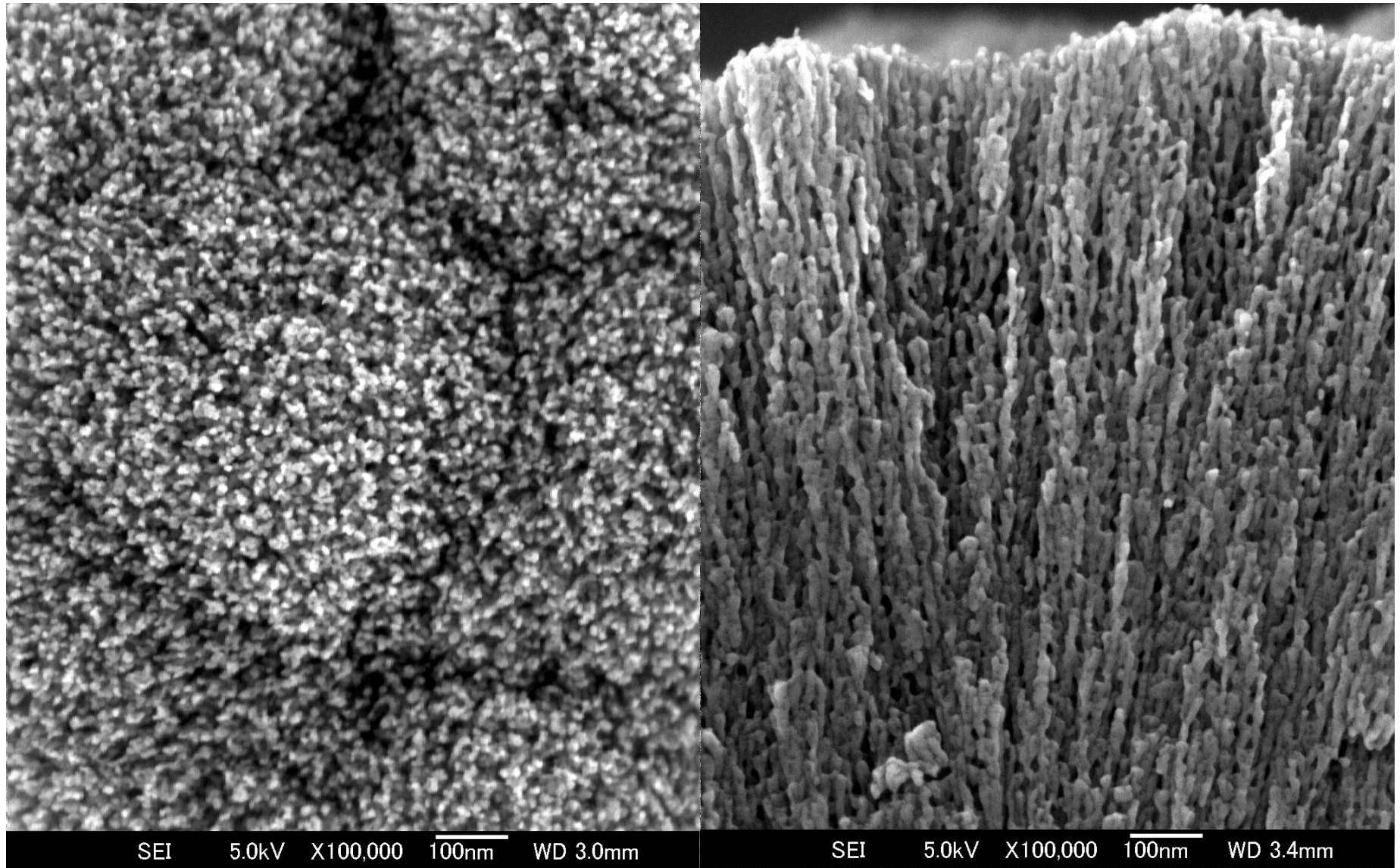


FIGURE 18
*Principe de fonctionnement
d'une cellule à colorants.*



Source : D. Lincot, T. Pauporté, ZnO nanoporeux préparé par électrolyse

High-Efficiency and Stable Mesoscopic Dye-Sensitized Solar Cells Based on a High Molar Extinction Coefficient Ruthenium Sensitizer and Nonvolatile Electrolyte**

By Daibin Kuang, Cedric Klein, Seigo Ito, Jacques-E. Moser, Robin Humphry-Baker, Nick Evans, Francine Durliaux, Carole Grätzel, Shaik M. Zakeeruddin,* and Michael Grätzel*

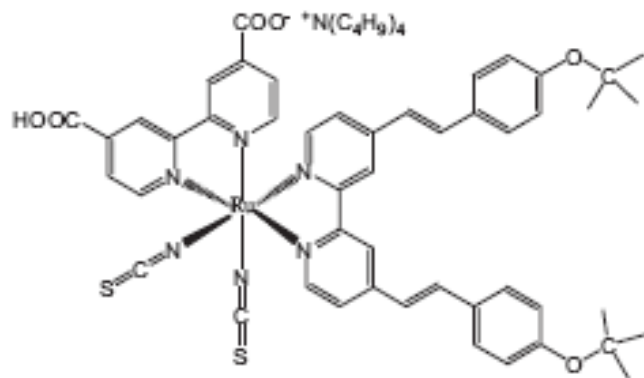


Figure 1. Molecular structure of the K77 sensitizer.

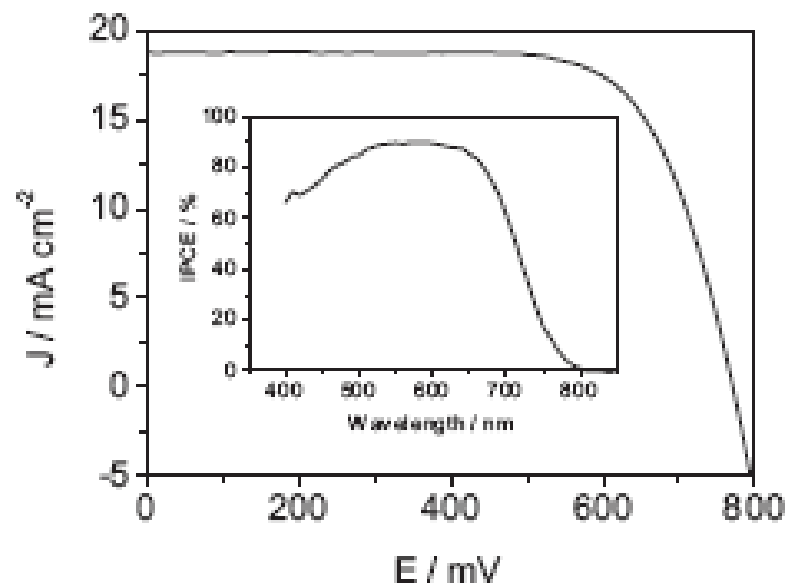
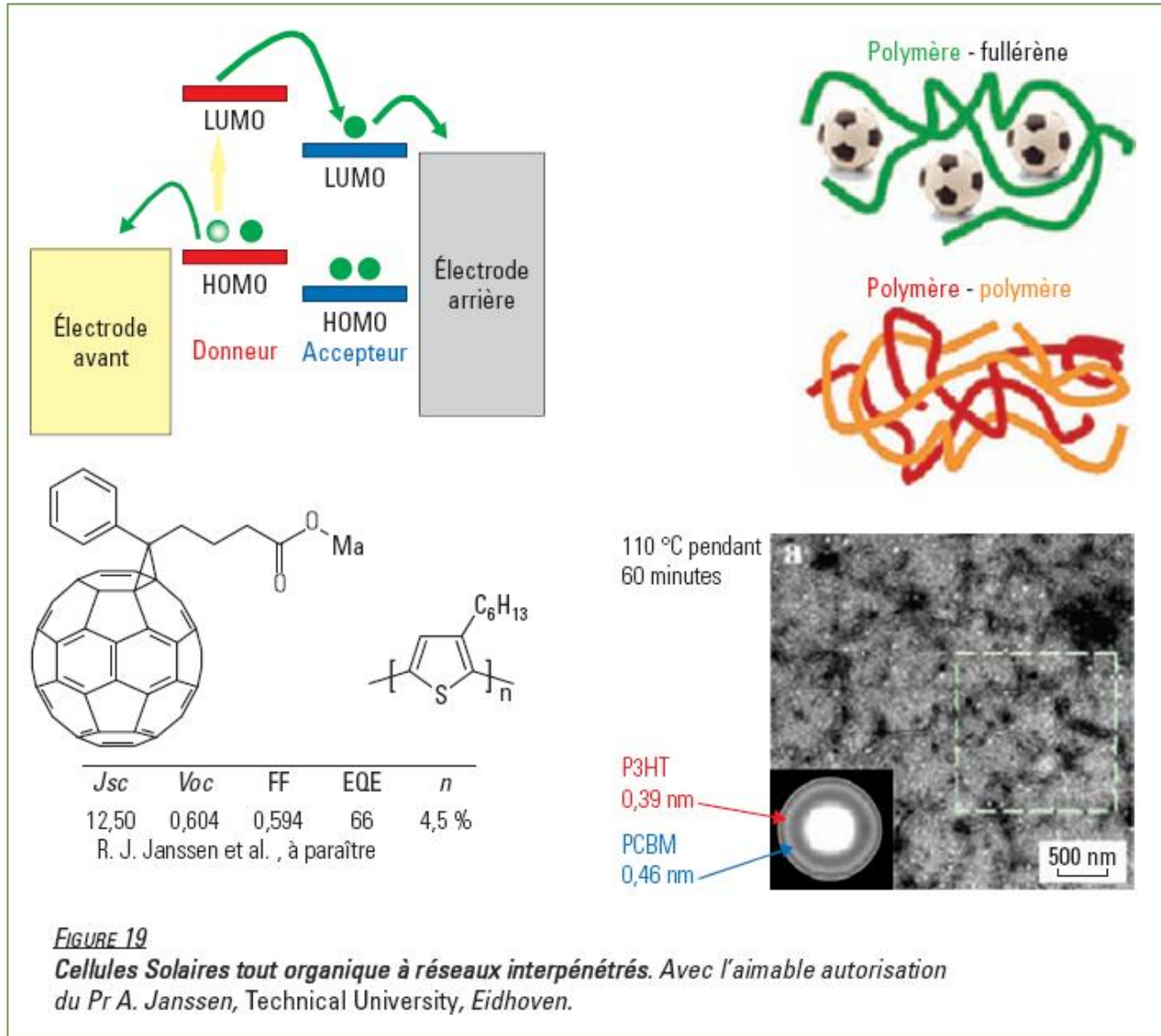
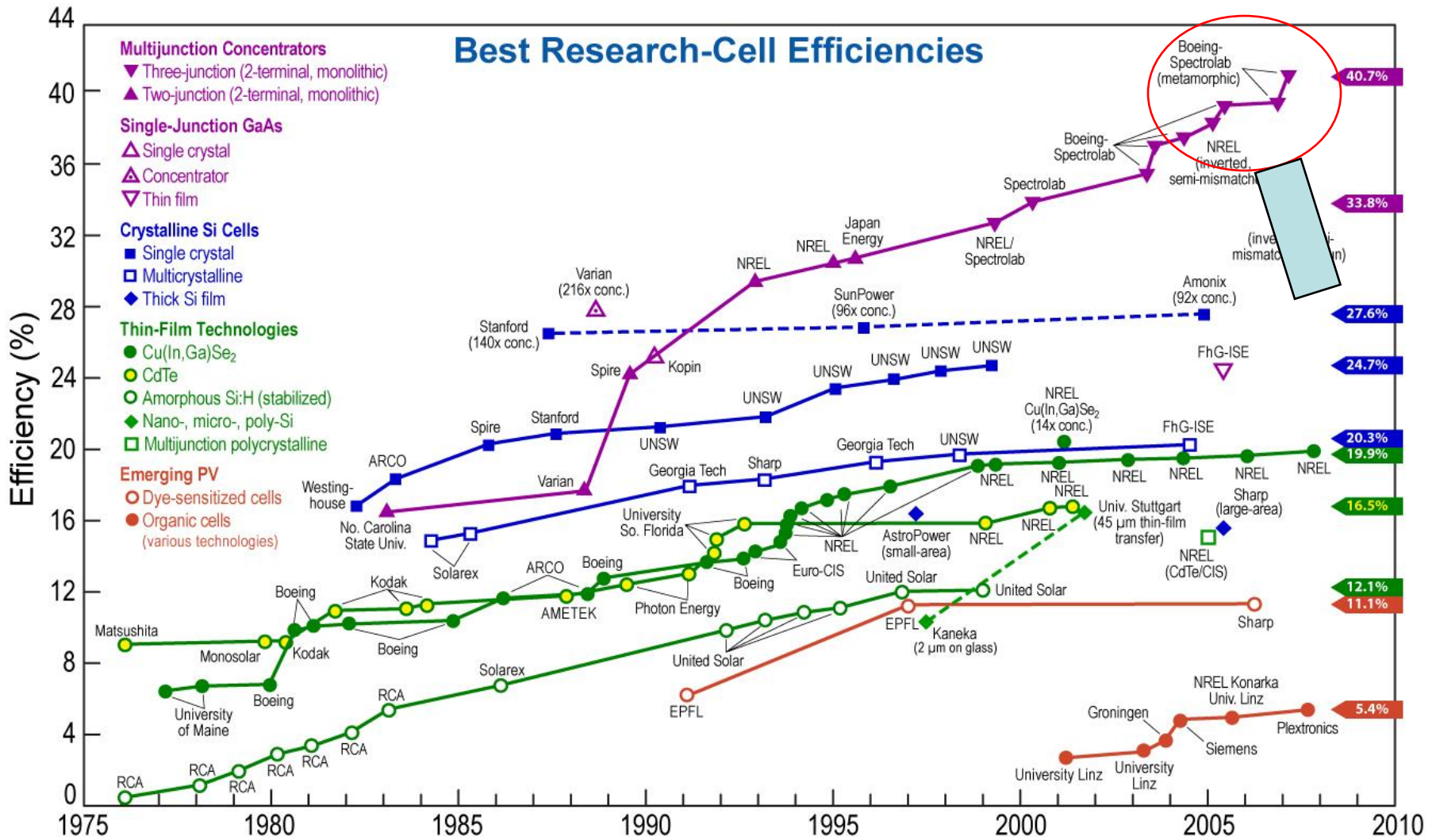


Figure 3. Photocurrent intensity–voltage characteristics of a DSC device based on the K77 sensitizer and volatile electrolyte (Z675), measured at air mass 1.5 (100 mW cm^{-2}) full sunlight illumination. Inset: Photocurrent action spectrum of the device.

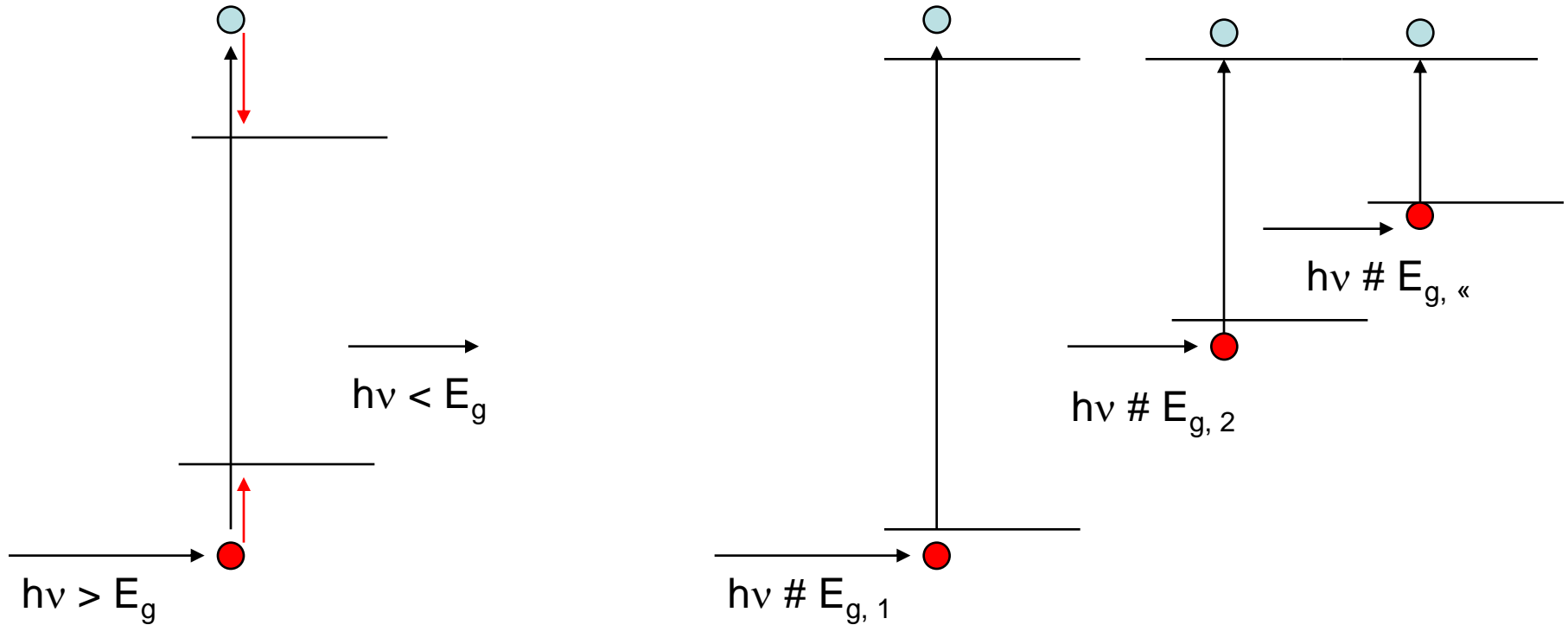
Les cellules Organiques



Les Filières très haut rendement (max théorique 86 %)



Comment accroître le rendement de conversion ?



Rendement limite simple jonction 30%

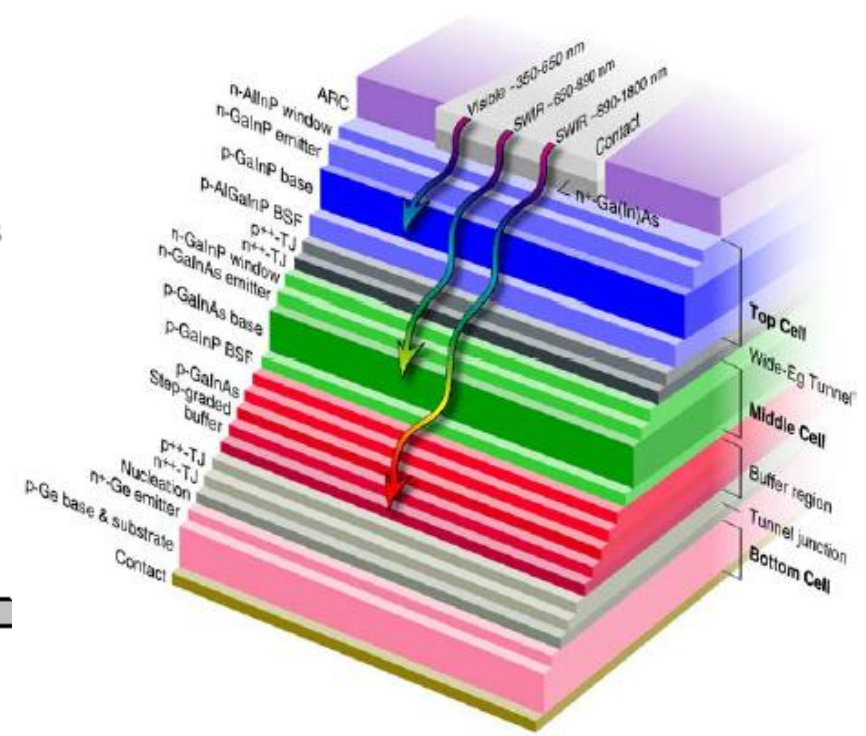
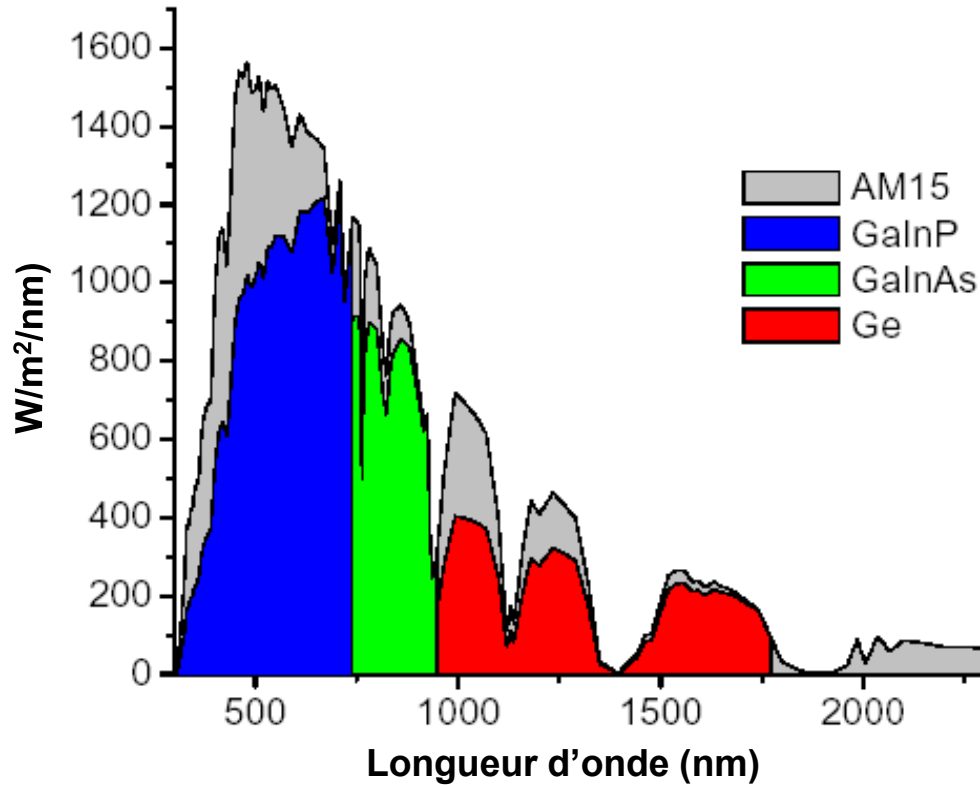
Rendement limite multijonctions 85 %

Pertes par thermalisation
Pertes par non absorption

High Efficiency Multijunction concepts

State of the art

III-V Compounds and Si based



More than 40% under concentration (x 286)

Spectrolab

Very complex, very costly

Ingénierie de bande interdite de Si par des super réseaux de particules quantiques

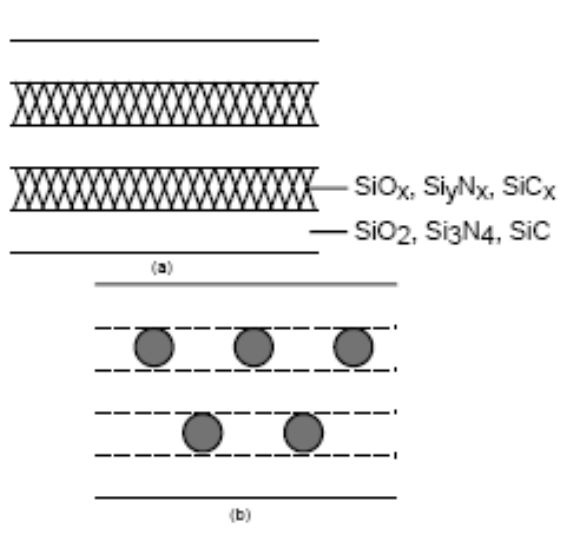
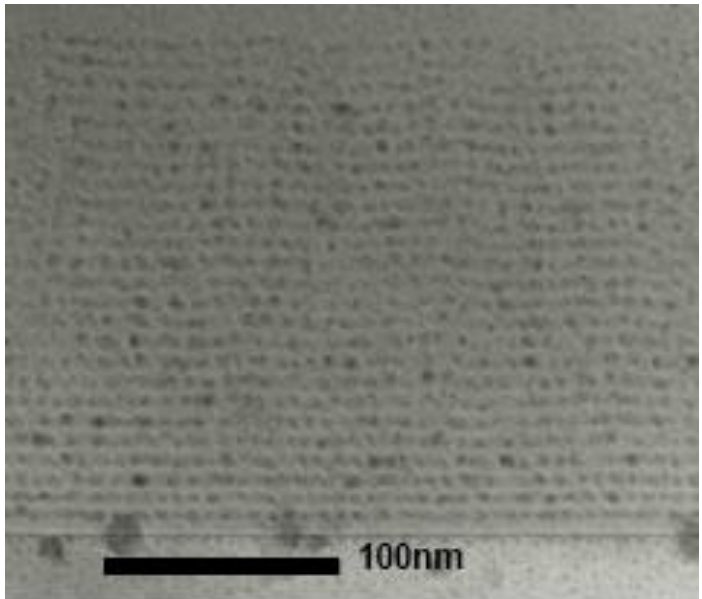
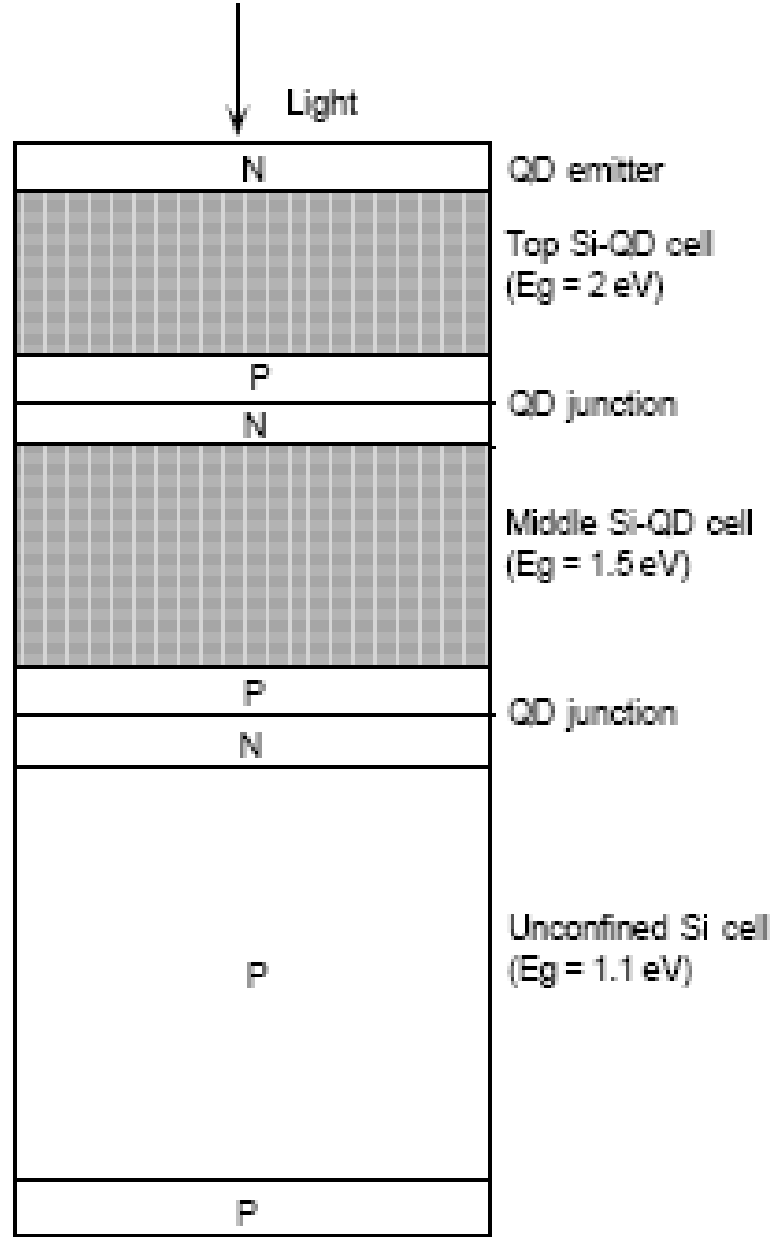


Figure 4: (a) Deposition of stoichiometric regions separated by silicon-rich regions; (b) segregation into spherical silicon quantum dots on heating.

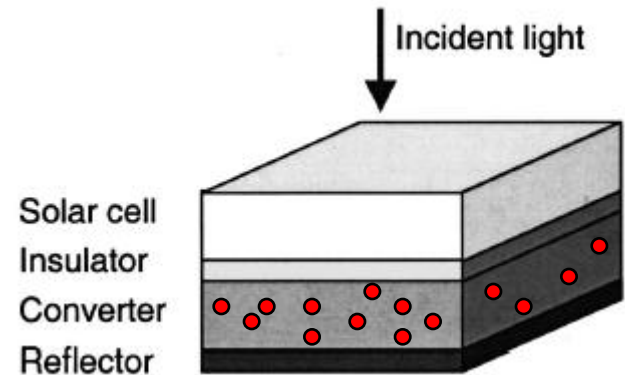
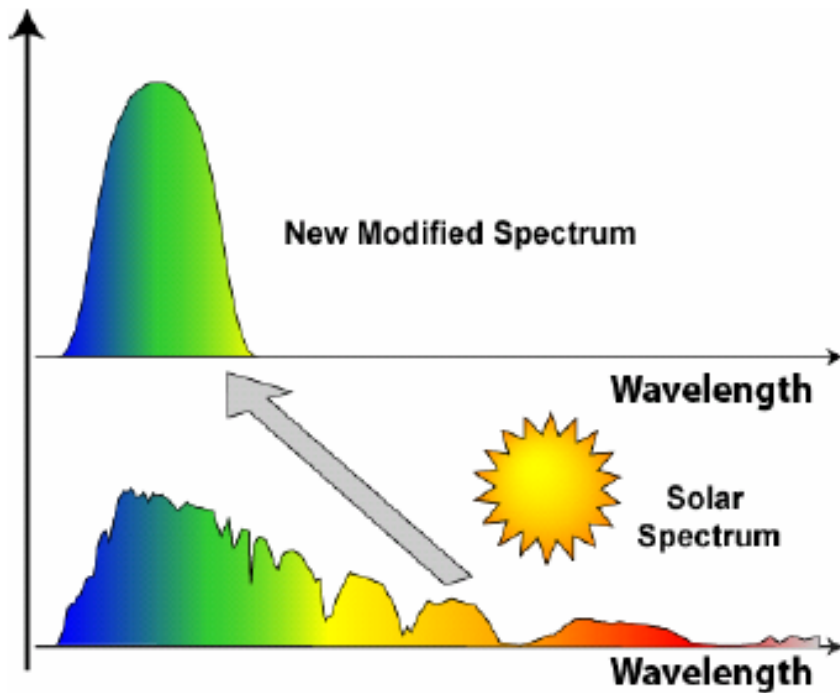


$R_{\text{theo}} = 50\%$

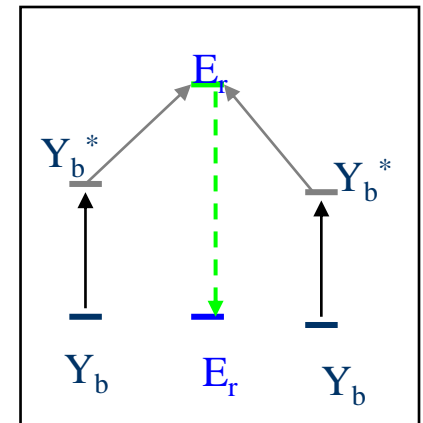


New concepts for > 40%

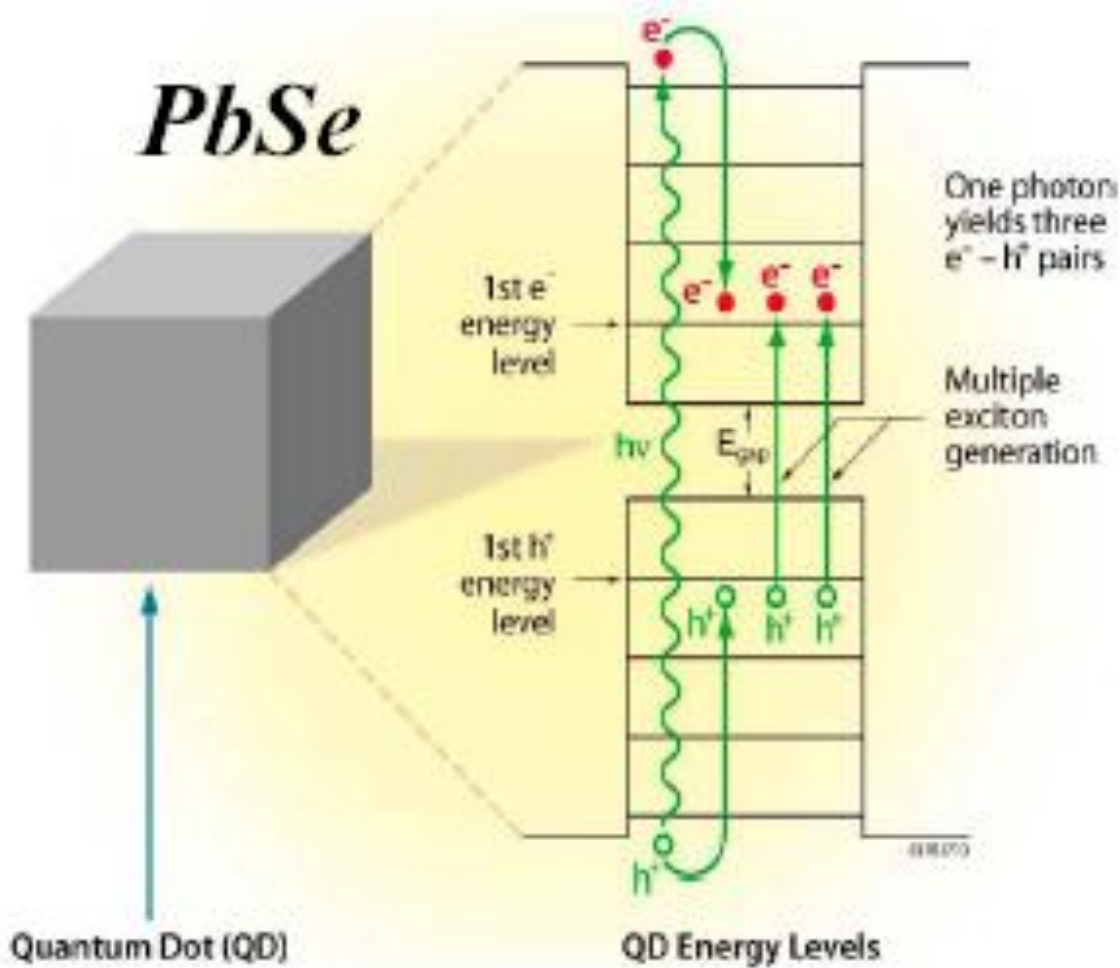
- Optical conversion of lost photons
Up Conversion, down conversion : **Nanoparticules**
- Hot Carriers **Nanoparticules**
- Ionisation par impact Nanoparticules
- Intermediate band (Quantum wells → **Nanoparticules**)
- Ferromagnetic semiconductors (J.F. Guillemoles IRDEP)



oxides, fluorides
Rare earth doped
(ex: NaYF_4)



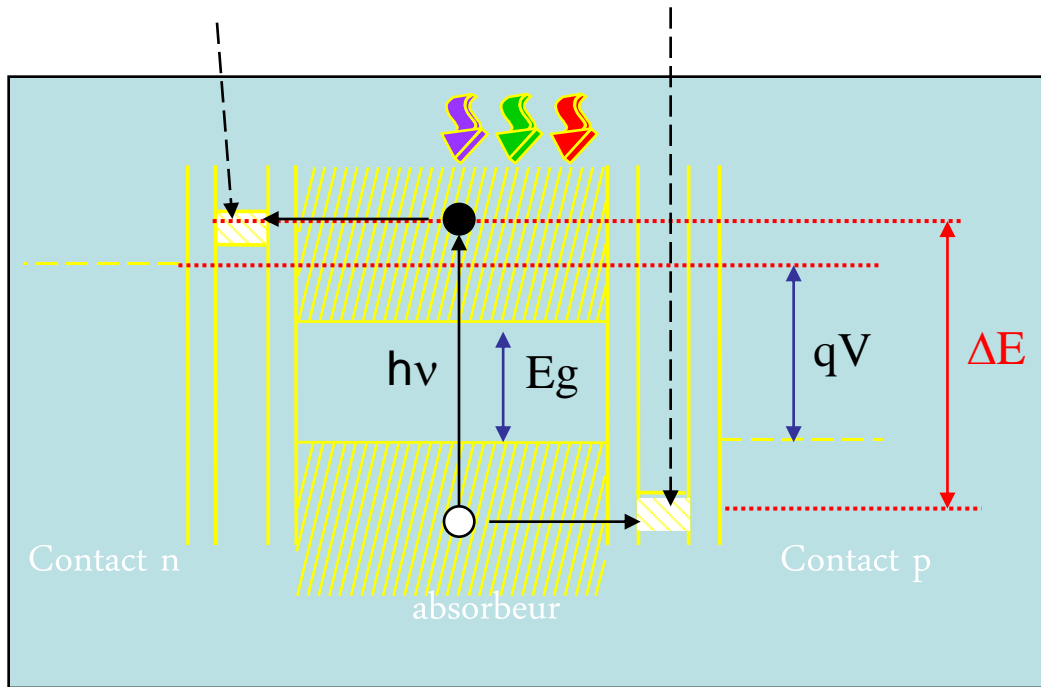
Utilisation des photons de haute énergie : ionisation par impact



Source : J.F. Guillemoles CNRS-IRDEP

Cellule à porteurs chauds

Contacts à base de nanoparticules



$$h\nu > E_g$$

Source : J.F. Guillemoles CNRS-IRDEP

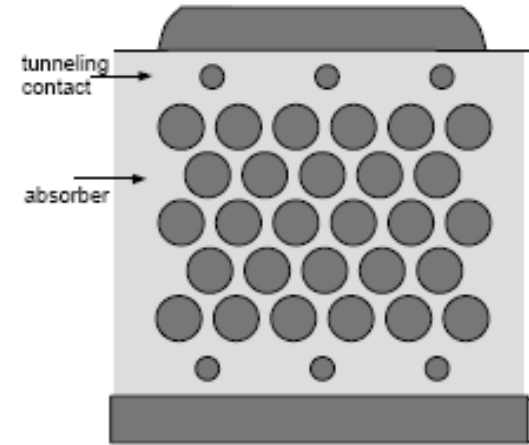
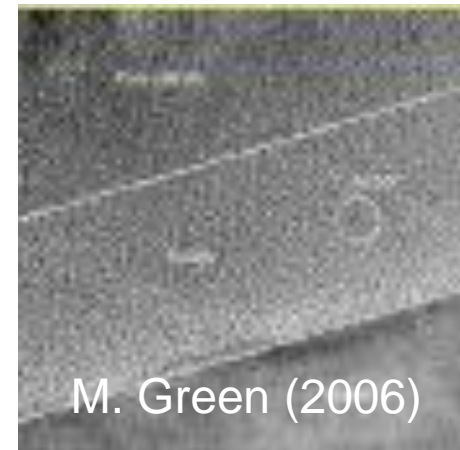
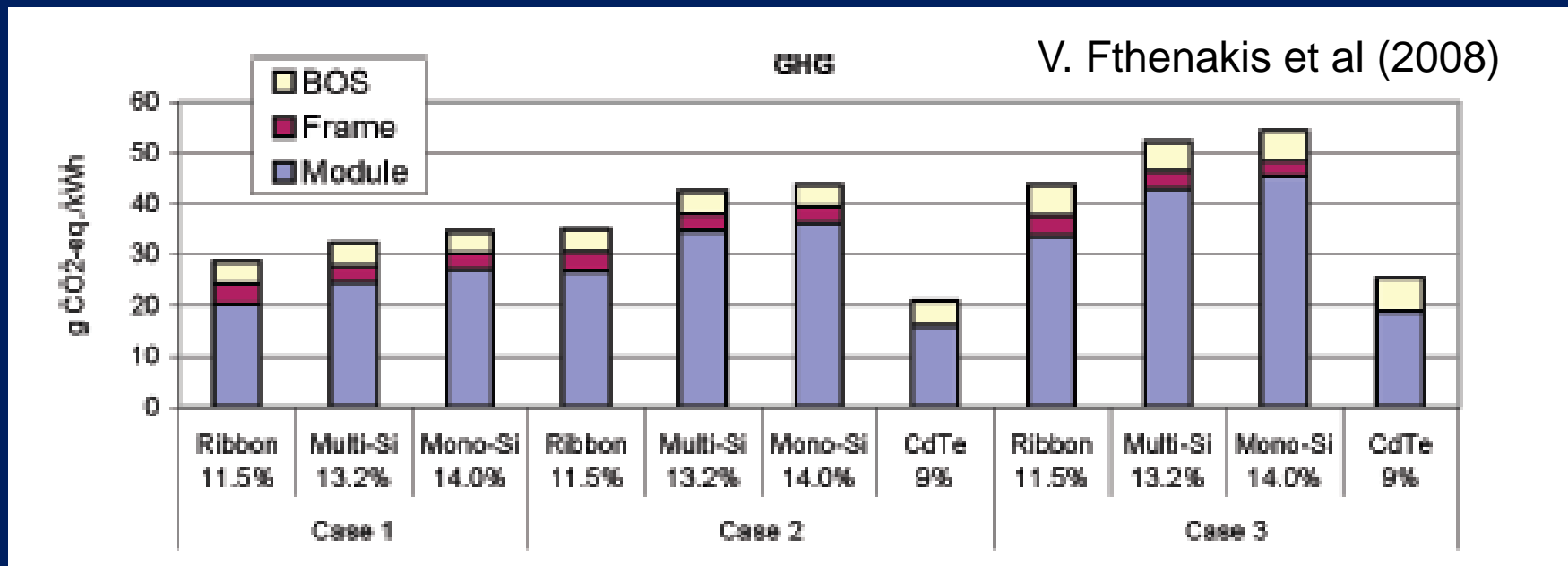


Figure 8: Conceptual silicon hot carrier cell. A quantum dot superlattice controls phononic relaxation and enhances radiative processes. Resonant tunneling through smaller quantum dots provides the contacts.



Conclusions

- Le domaine PV est en pleine effervescence (40 % croissance)
- Il s'est imposé comme contributeur clé à court terme au sein des énergies alternatives
- Toutes les filières progressent
- Grande marge d'innovation et de découvertes
- Contributeur décisif aux énergies sans CO₂



Merci pour votre attention

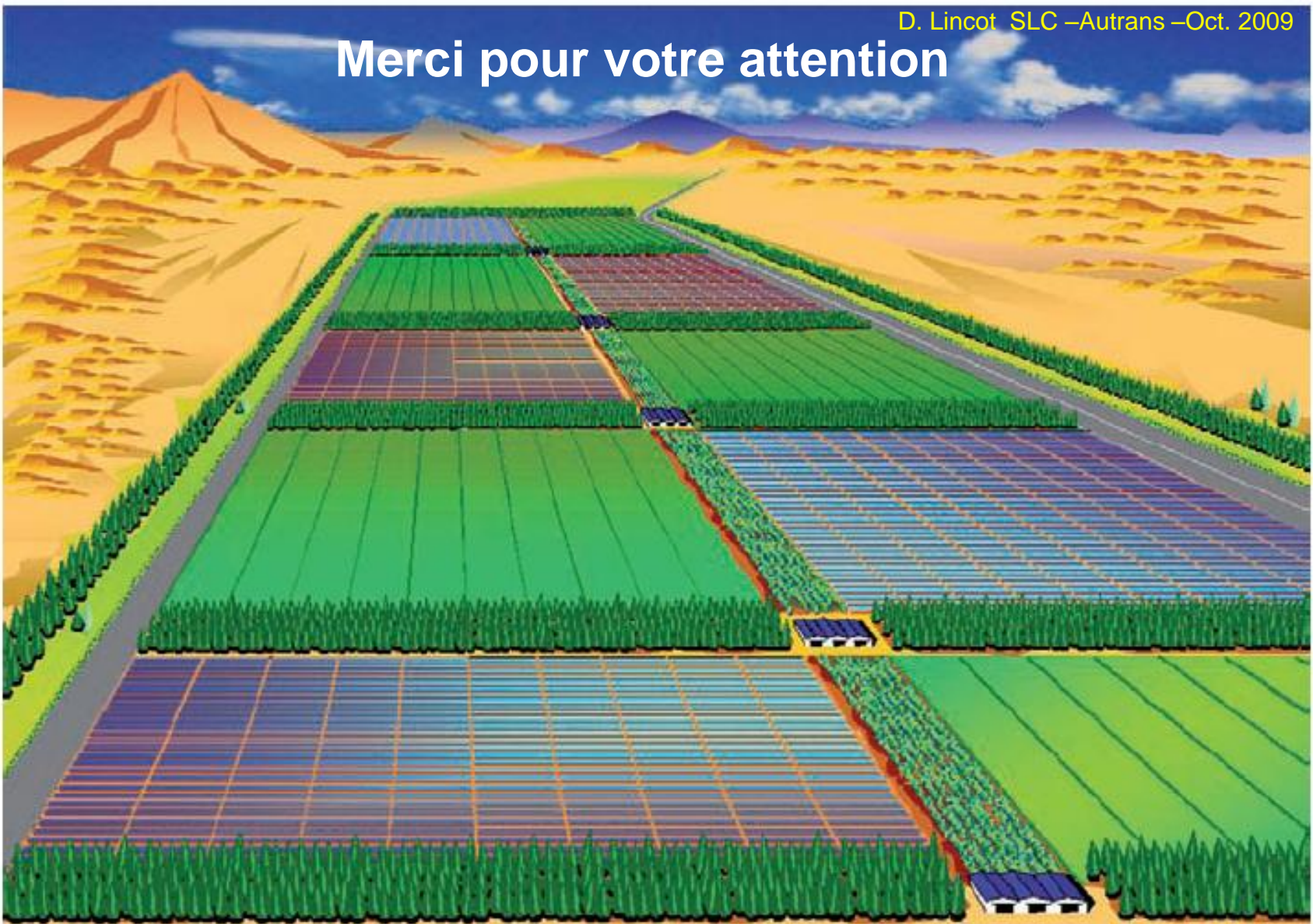


FIGURE 20

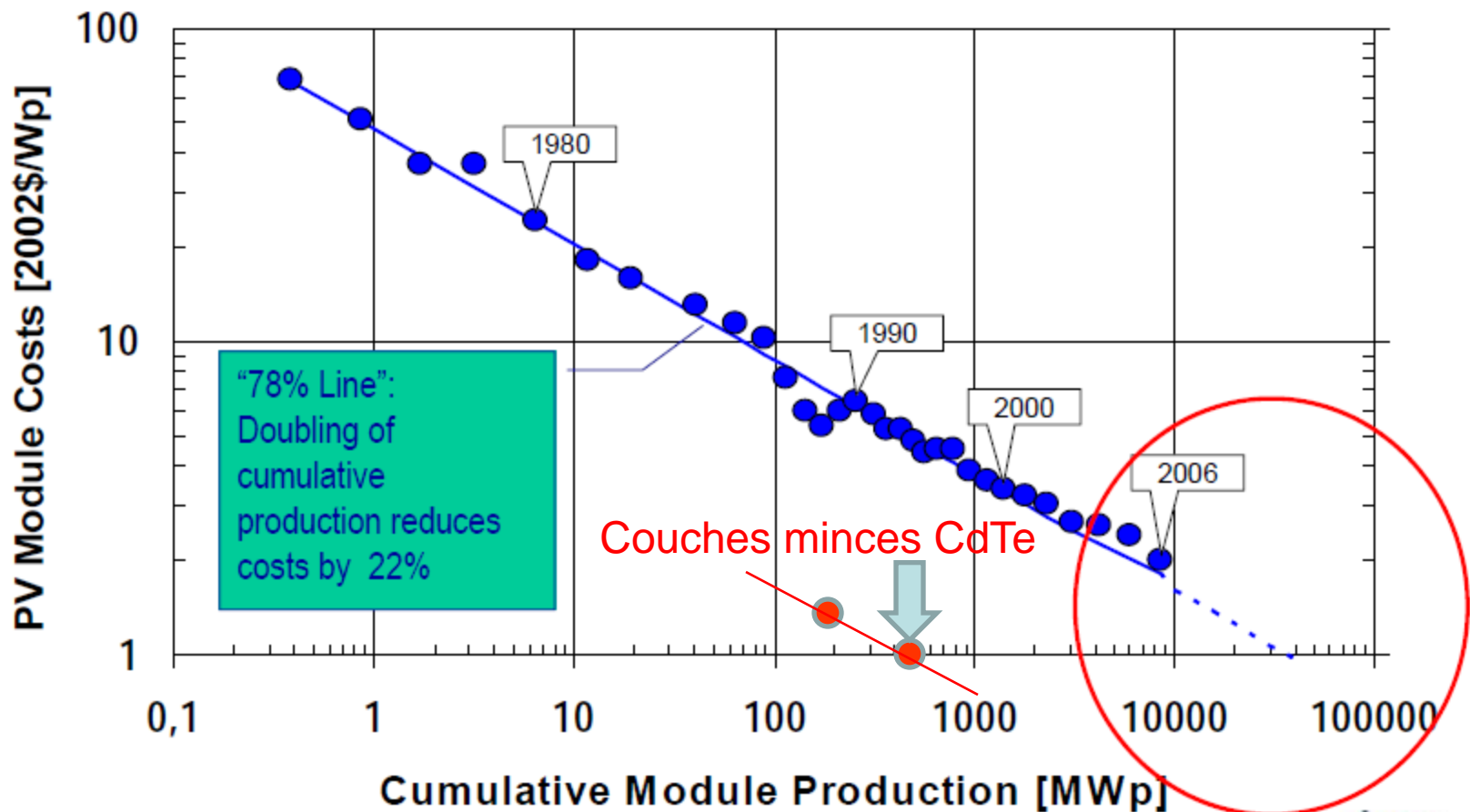
*Une prospective japonaise : l'énergie photovoltaïque à très grande échelle (Very Large Scale Photovoltaics).
Source : Energy from the desert, Feasibility of a very large scale photovoltaic generation systems (VLS-PV)
Ed. K. Kurokawa, James & James, 2003.*

Production capacities realized and predicted			
Year	Production capacity (MW)	Thin films part in production capacity %	Part of thin films in effective production
2007	8500	17	10%
2008	15000	20	12,5%
2009	25	26 est	16% est
2010	35000	30 est	18,7% est
2012	42800	35 est	21,7% est

D. Lincot, Adapted from PV Status Report 2008 (A. Yaeger-Waldau) www.jrc.ec.europa.eu



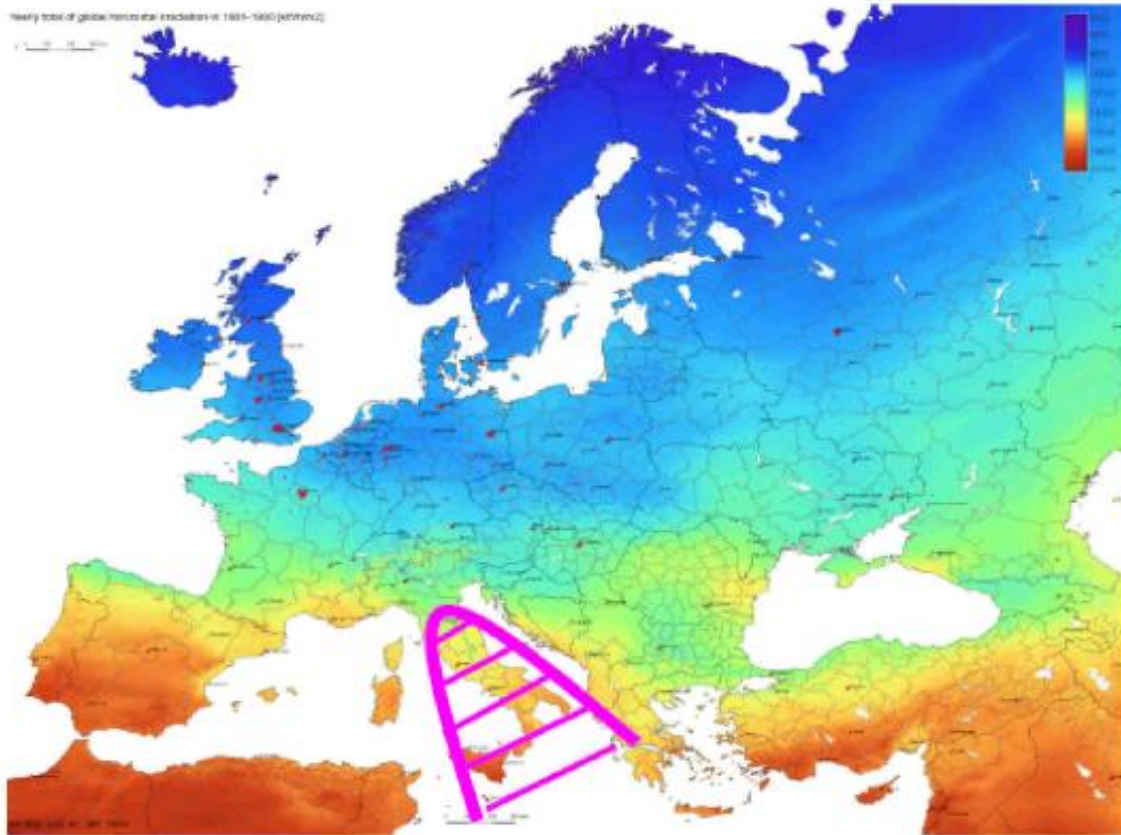
PV Technology Learning Curve since '76



Grid parity in Europe – 2010

(lines to guide the eye)

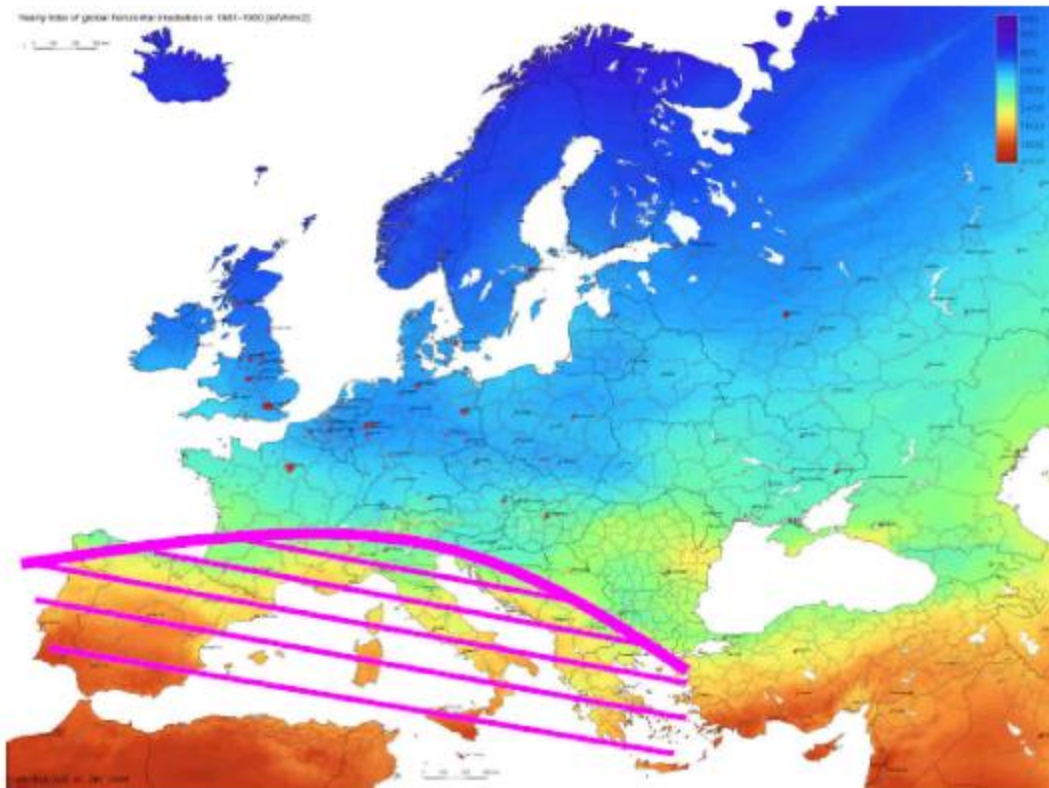
Yearly total of global horizontal irradiation in 1981–1990 (kWh/m²)



irradiation (kWh/m ² -yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.50
1000	0.30
1400	0.21
1800	0.17

Grid parity in Europe – 2015

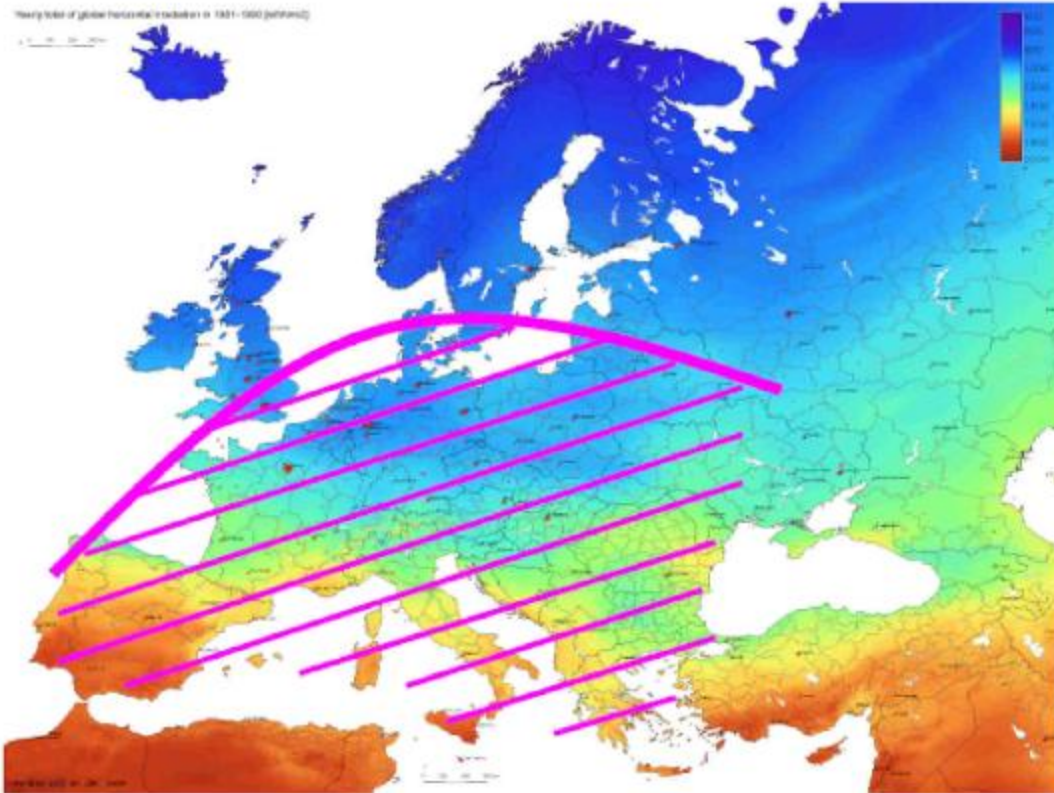
(lines to guide the eye)



irradiation (kWh/m ² .yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.42
1000	0.25
1400	0.18
1800	0.14

Grid parity in Europe – 2020

(lines to guide the eye)



irradiation (kWh/m ² .yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.33
1000	0.20
1400	0.14
1800	0.11

PV Electricity will be competitive within the next years

22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy

**AN ANALYSIS ON PV RESOURCE IN RESIDENTIAL AREAS
BY MEANS OF AERIAL PHOTO IMAGES**

Mami SUZUKI^{*1}, Masakazu ITO^{*2}, Kosuke KUROKAWA^{*1}

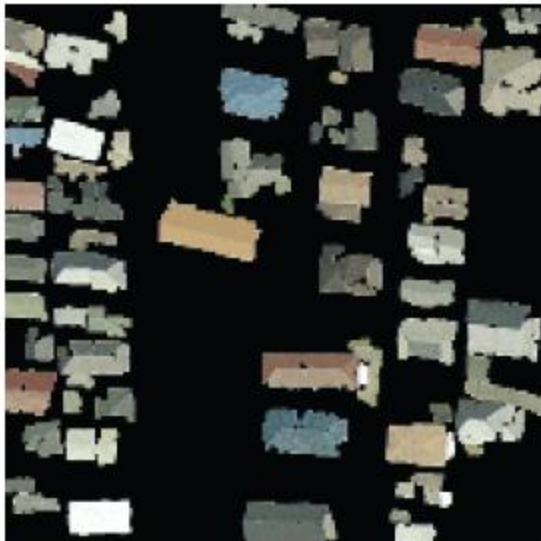
^{*1} Kosuke Kurokawa Lab., Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan, Phone: +81-42-388-7445, Fax: +81-42-388-7445,
Email: 50007645116@st.tuat.ac.jp

^{*2} Integrated Research Institute, Tokyo Institute of Technology




Koganei City in Tokyo



Areal view



Treated image

Roof shape	Installable ratio [%]	Available area (gray)
Gabled roof	50.0	
Hipped roof	62.5	
Pent roof	100.0	

Annual output energy at STC is calculated the following.

$$E_p = P_A \times (H_A / G_S) \times K \quad (4)$$

Where each parameter is;

E_p : Annual output energy [kWh/year]

P_A : PV capacity [kW]

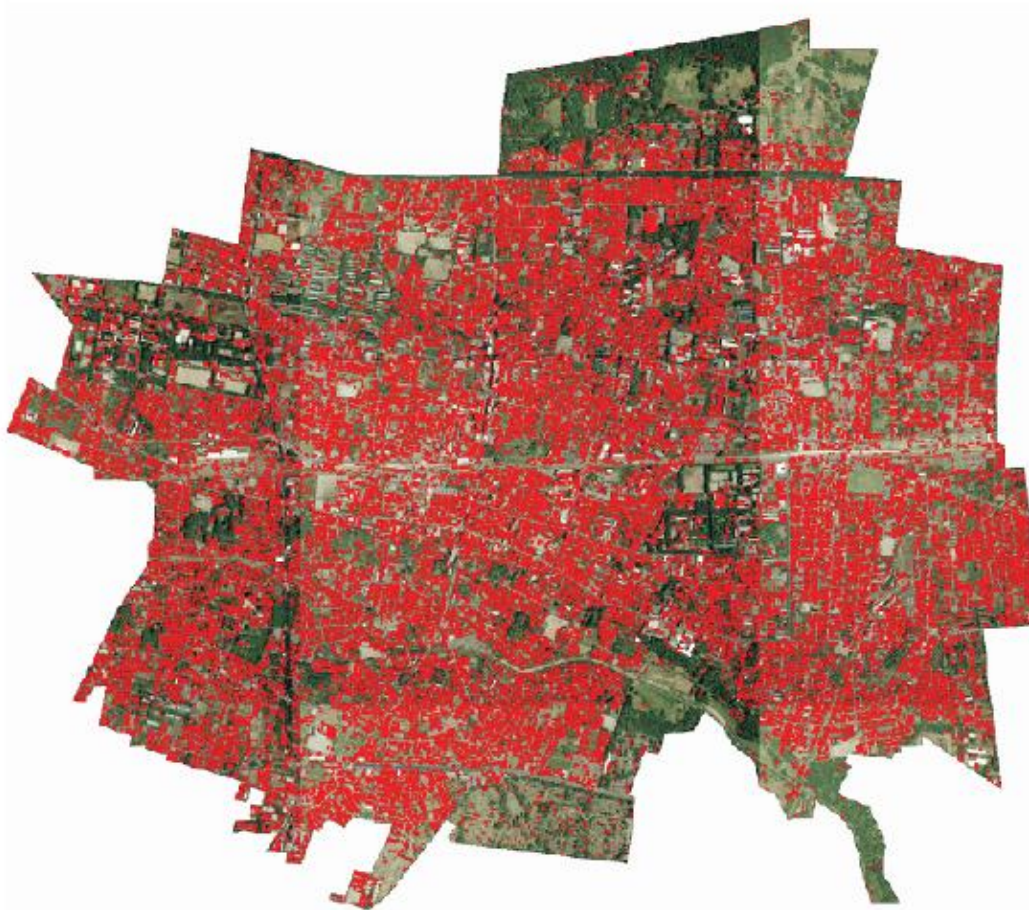
H_A : Annual in-plain irradiation [kWh/m²/year]

G_S : Irradiance at STC; 1.0 kW/m²

K : Performance ratio; 71.6 % based on Ref. [5].

Total area : 11.33 km²
 Number of inhabitants : 110 000
 Roof area : 2.73 km² about 20%

Assumption	1	2	3
Total roof area [km ²]	2.73	2.73	2.63
Available area [km ²]	2.73	1.23	1.44
Possible capacity [MW]	409.5	184.5	216.1
Annual output energy [GWh]	453.6	204.4	225.7



1 50 MW /km²

Potential for 62 000 houses
 With 3621 kWh/home/year

Figure 8: Result image in Koganei city

13 JULY 2009

PRESS RELEASE

12 companies plan establishment of a Desertec Industrial Initiative

Munich – 12 companies today signed a Memorandum of Understanding in Munich to establish a DESERTEC Industrial Initiative (DII). The objective of this initiative is to analyse and develop the technical, economic, political, social and ecological framework for carbon-free power generation in the deserts of North Africa. The DESERTEC concept, developed by the TREC Initiative of the Club of Rome, describes the perspectives of a sustainable power supply for all regions of the world with access to the energy potential of deserts. The founder companies of the DII, whose regional focus is on Europe, the Middle East and North Africa (MENA), will be:

- ABB
- ABENGOA Solar
- Cevital
- Deutsche Bank
- E.ON
- HSH Nordbank
- MAN Solar Millennium
- Munich Re
- M+W Zander
- RWE
- SCHOTT Solar
- SIEMENS

The DESERTEC Project

Le Temps
Mardi 14 juillet 2009

Economie Monde

Le soleil du Sahara chauffera-t-il un jour nos maisons?

Energie Le projet de centrale solaire «Desertec» prévoit de couvrir en 10 ans 15% des besoins en électricité de l'Europe occidentale. Douze entreprises ont donné lundi le coup d'envoi au projet

Christophe Bourdoiseau, Berlin

Les déserts africains alimentent-ils un jour l'Europe occidentale en électricité? «Ce n'est pas une vision. C'est une mission», assurent les initiateurs de «Desertec Industrial Initiative», un projet estimé à 400 milliards d'euros. «C'est la plus grande initiative privée prise contre le réchauffement de la planète, claironnent-ils. Si tout fonctionne, nous pourrions construire la première centrale solaire thermique en 2015.»

Lundi, les représentants de douze entreprises, parmi lesquelles le suisse ABB, les allemands Deutsche Bank, E.ON, RWE, Siemens, l'espagnol Abengoa Solar et le groupe agroalimentaire algérien Cevital ont signé à Munich une «déclaration d'intention» en faveur de la construction d'un gigantesque réseau électrique autour de la Méditerranée. «Desertec» pourrait générer, selon eux, deux millions d'emplois et couvrir 15% des besoins en électricité de l'Europe occidentale grâce à des centrales solaires thermiques installées dans les déserts d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient.

«La question n'est pas de savoir si nous pouvons le faire mais comment nous allons le faire», a insisté le président de l'assureur Munich Re, à la tête de l'aventure industrielle. «Si nous ne répondons pas maintenant au problème du réchauffement climatique, cela nous coûtera, au bout du compte, beaucoup plus cher. Nous le savons à Munich Re car nous sommes concernés par les catastrophes naturelles», a ajouté l'assureur.

Les organisations de protection de l'environnement ont accueilli positivement l'initiative. «Les groupes énergétiques, les instituts financiers et les industriels don-

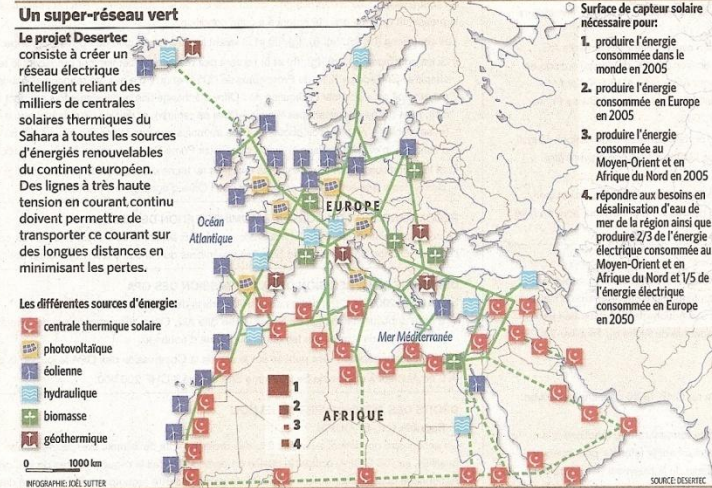
Un super-réseau vert

Le projet Desertec consiste à créer un réseau électrique intelligent reliant des milliers de centrales solaires thermiques du Sahara à toutes les sources d'énergies renouvelables du continent européen. Des lignes à très haute tension en courant continu doivent permettre de transporter ce courant sur des longues distances en minimisant les pertes.

Les différentes sources d'énergie:

- ☀ centrale thermique solaire
- ☀ photovoltaïque
- ⚡ éolienne
- 💧 hydraulique
- 🌱 biomasse
- 🔥 géothermique

0 1000 km
INFORMAGH: K&L SUTTER



- Surface de capteur solaire nécessaire pour:
1. produire l'énergie consommée dans le monde en 2005
 2. produire l'énergie consommée en Europe en 2005
 3. produire l'énergie consommée au Moyen-Orient et en Afrique du Nord en 2005
 4. répondre aux besoins en désalinisation d'eau de mer de la région ainsi que produire 2/3 de l'énergie électrique consommée au Moyen-Orient et en Afrique du Nord et 1/5 de l'énergie électrique consommée en Europe en 2050

net l'exemple au monde entier. Mais le projet ne doit pas rester lettre morte» a insisté le porte-parole de Greenpeace.

En effet, le projet n'est pas pour demain. Il faudra attendre trois ans pour obtenir une première étude de faisabilité. «Desertec doit être rentable économiquement», a insisté l'assureur. A l'heure actuelle, on ignore encore tout des emplacements, des pays et de la taille des centrales. Enfin, le budget du bureau d'étude – 1,8 million d'euros – paraît bien modeste par rapport à la taille du projet.

Les solutions techniques, elles, existent. «En soi, le projet est déjà réalisable», assure Torsten Jeworrek, membre du directoire de Munich Re. «Desertec» a choisi les cen-

trales solaires thermiques. Cette technique se distingue du photovoltaïque, qui produit directement de l'électricité. Elle fonctionne déjà en Espagne et dans le désert de Mojave en Californie. «Cette technique nous permet de réguler la production. Ce n'est pas le cas du photovoltaïque», souligne Gerhard Knies, le président de la Fondation «Desertec».

De l'électricité pour l'Afrique

Le transport du courant s'effectuera par un réseau de lignes à haute tension sans grande perte d'énergie, précisent les industriels. Pour preuve: Siemens réalise en Chine une ligne à haute tension de 5000 mégawatts sur 1400 kilomè-

tres qui transportera une quantité de courant équivalant à la production de cinq centrales nucléaires.

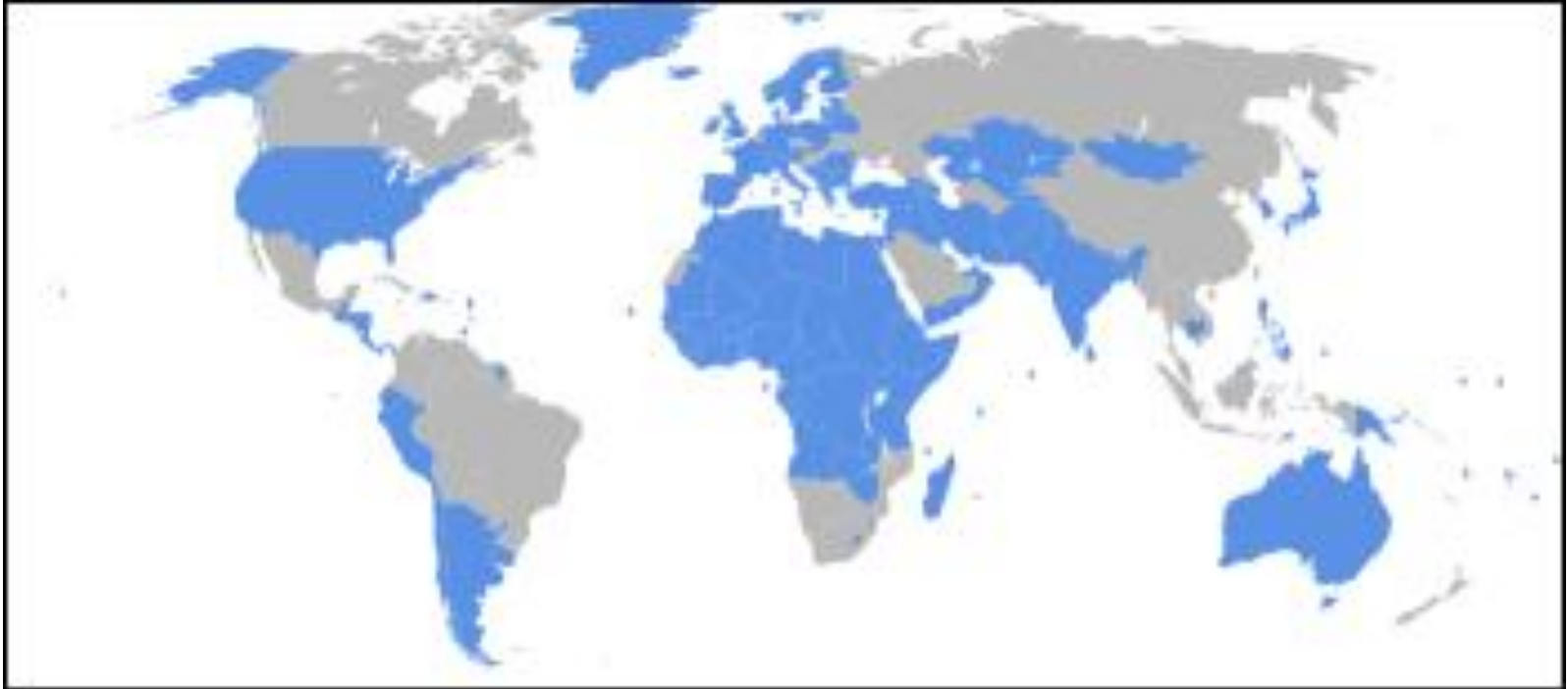
Pour l'instant, le projet est encore aux mains de l'industrie et de la finance allemandes qui ne semblent pas avoir pris encore en compte les intérêts des pays concernés. Hier, il n'y avait qu'un porte-parole de la Ligue arabe et une représentante du Ministère égyptien de l'énergie à la présentation du projet. Elles se sont contentées de quelques remerciements. Les initiateurs ont d'ailleurs été critiqués pour avoir ignoré leurs homologues africains et du Moyen-Orient. En effet, le projet est censé alimenter d'abord les pays producteurs en électricité, avant l'Europe occidentale.

<http://www.desertec.org/en/concept/>



A very positive signal:

Creation of an International Agency for Renewable Energies (2009)



Map of IRENA's Signatory States (as of 29 June 2009)

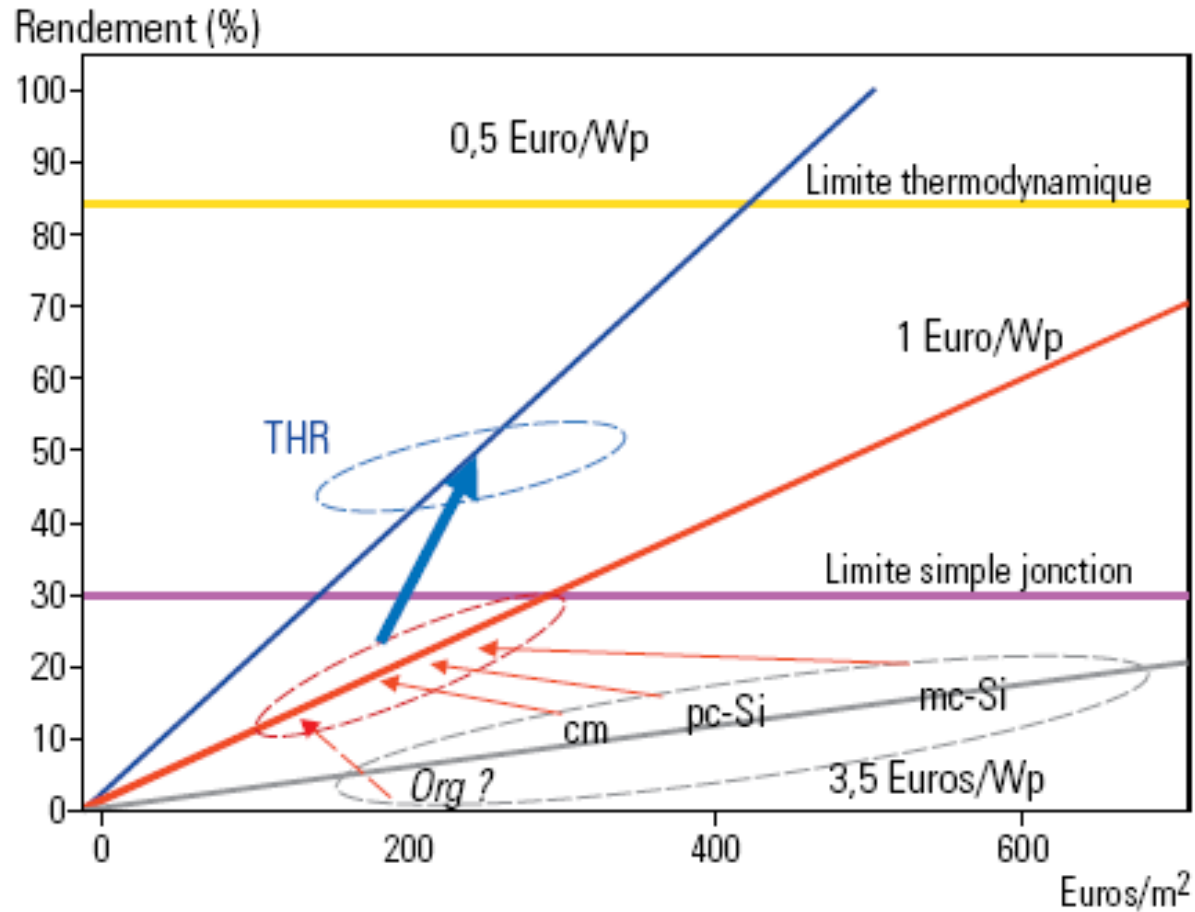


FIGURE 16

Stratégies de réduction des coûts de l'électricité photovoltaïque. Adapté de J.-F. Guillemoles.