



Conférence: Solaire photovoltaïque | Conference: Solar photovoltaics

*Conférence –débat organisée par le club électro-solaire  
CERN le Globe, GENEVE, 22 Mai 2018*

Solaire photovoltaïque :  
centrales en plein champs ou consomm-acteurs ?  
Réseaux intelligents et stockage : à quelle échelle ?

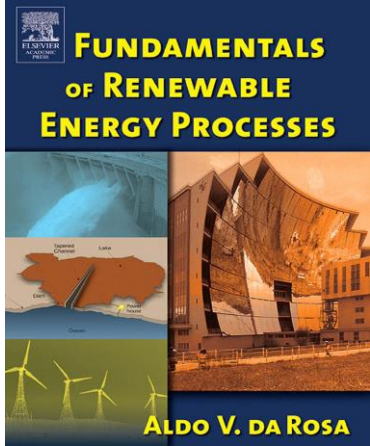
Daniel LINCOT

CNRS-Institut Photovoltaïque Ile de France (IPVF)



I N S T I T U T  
P H O T O V O L T A Ï Q U E  
D ' I L E - D E - F R A N C E

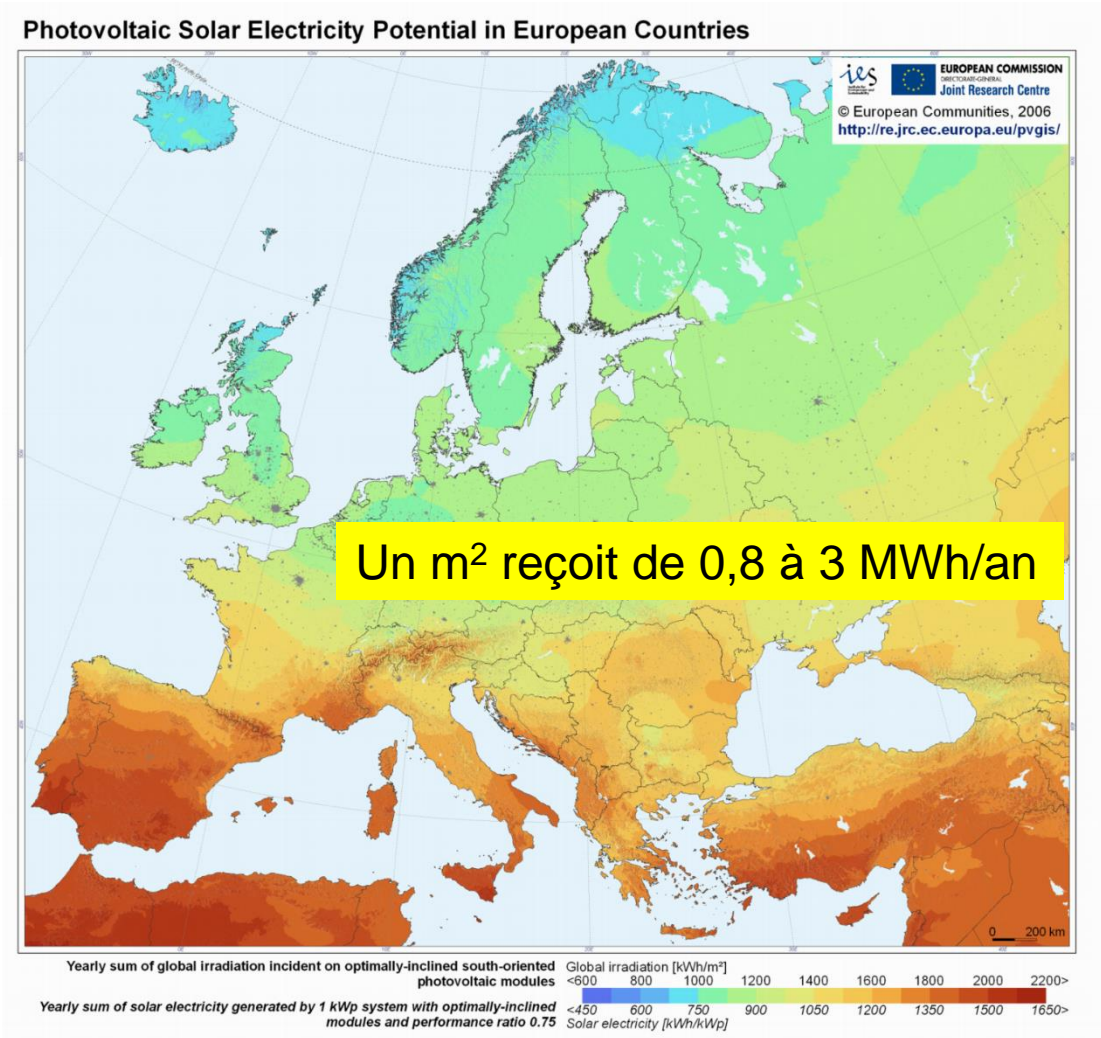




# La ressource

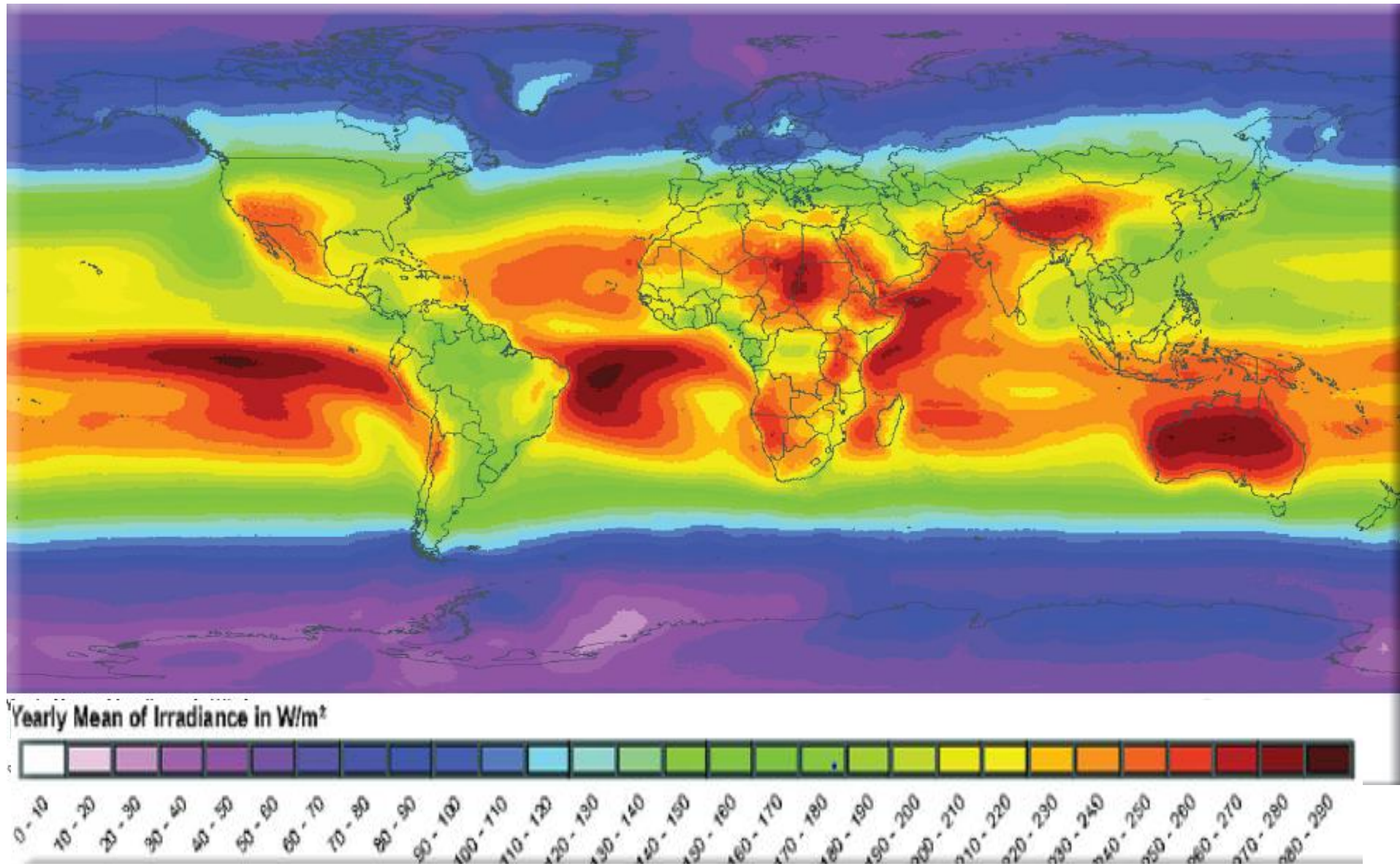
Tableau - Bilan énergétique à la surface de la Terre (1 TW = 10<sup>12</sup> watts) (d'après [1]).

<b>Puissance solaire incidente (hors atmosphère)</b>	
<b>173 000 TW</b>	
Réflexion directe	52 000 TW (30 %)
Conversion directe en chaleur	78 000 TW (45 %)
Évaporation de l'eau	39 000 TW (22 %)
Vent et vagues	3 600 TW (2 %)
Photosynthèse	40 TW (0,02 %)
Marées : 3 TW	
Géothermie : 32,3 TW	

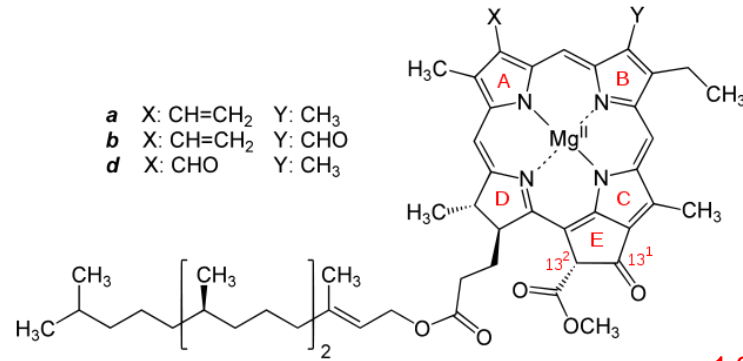
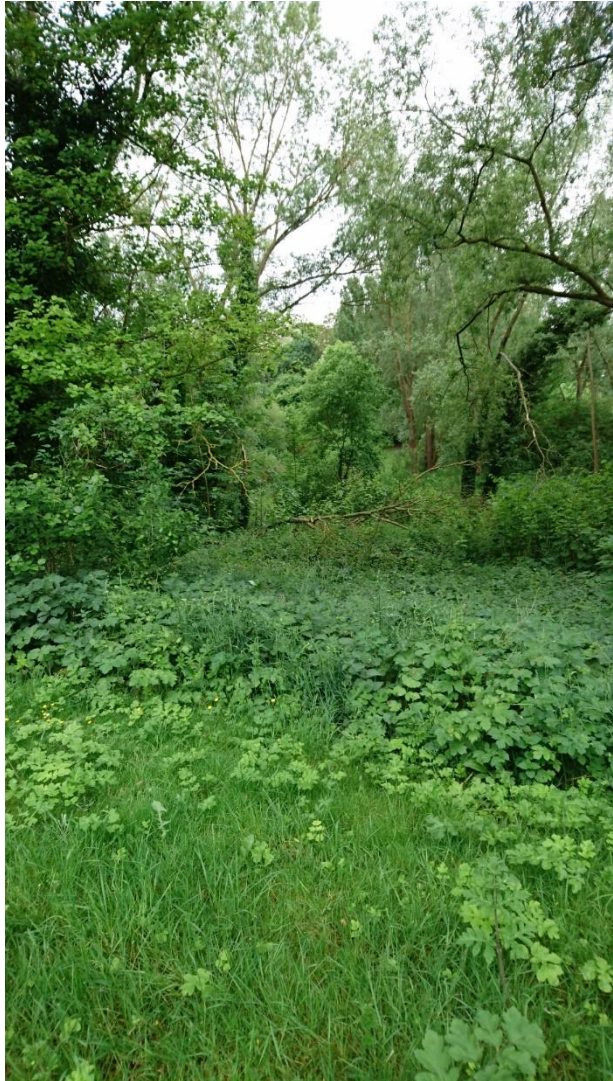




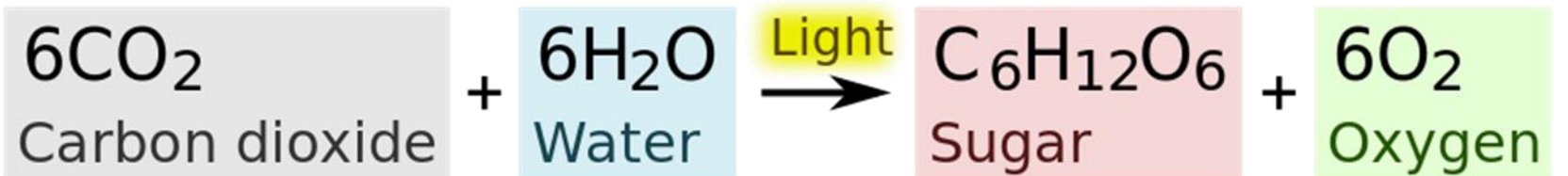
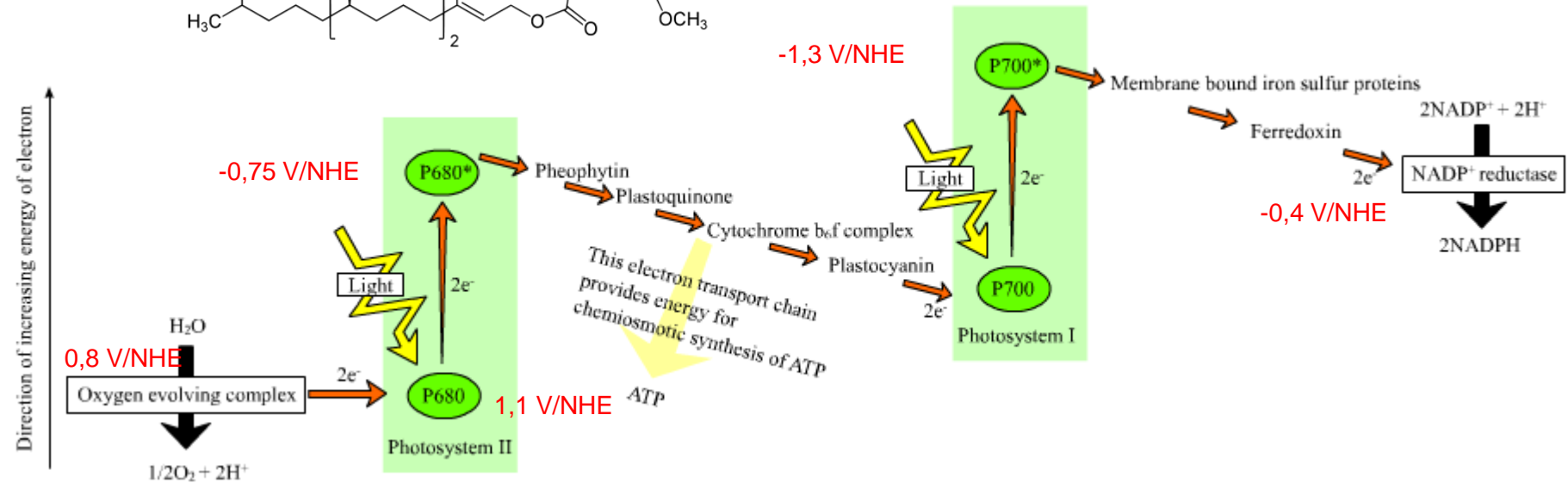
# Puissance moyenne annuelle d'énergie solaire au niveau du sol (W/m<sup>2</sup>)



# Son utilisation par la nature : Photovoltaïque → Matière → Vie

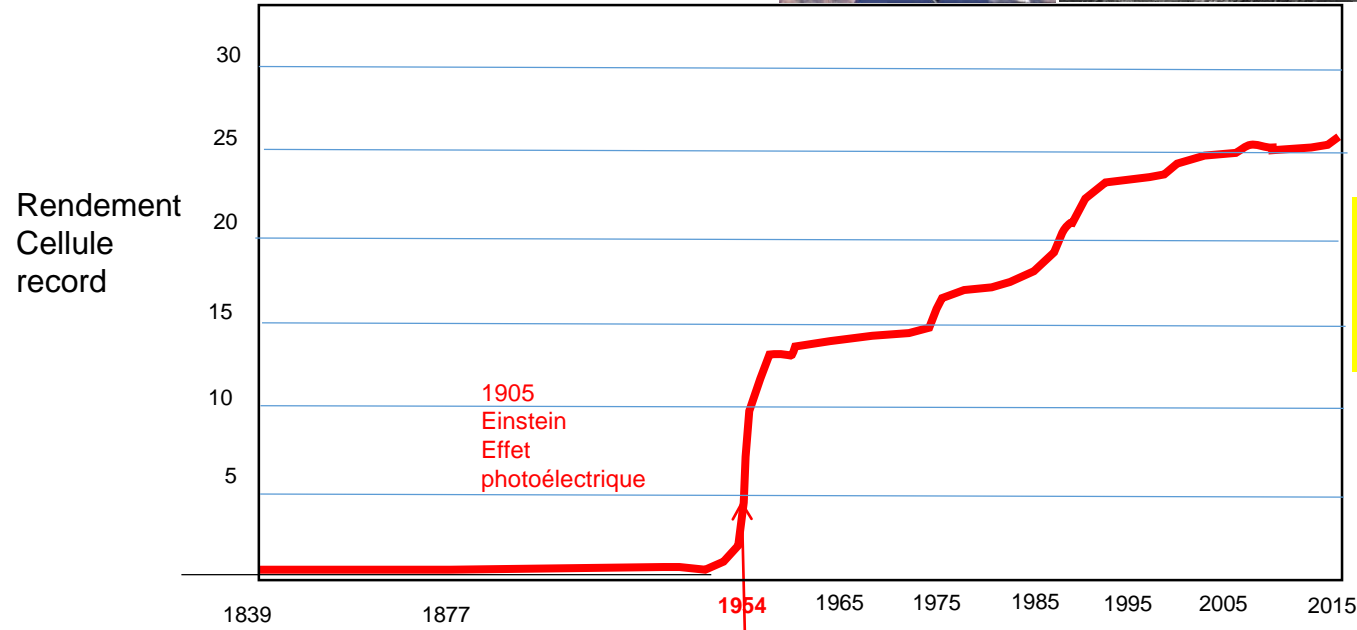


Chlorophylle → Cellule photovoltaïque moléculaire





# Les progrès scientifiques et techniques : la découverte de la conversion photovoltaïque

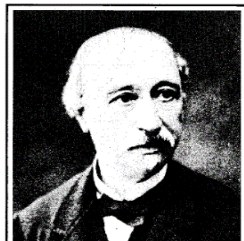


Limite théorique 29%

**26,6% (2017)**

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

EDMOND BECQUEREL  
The Discoverer of Photovoltaics

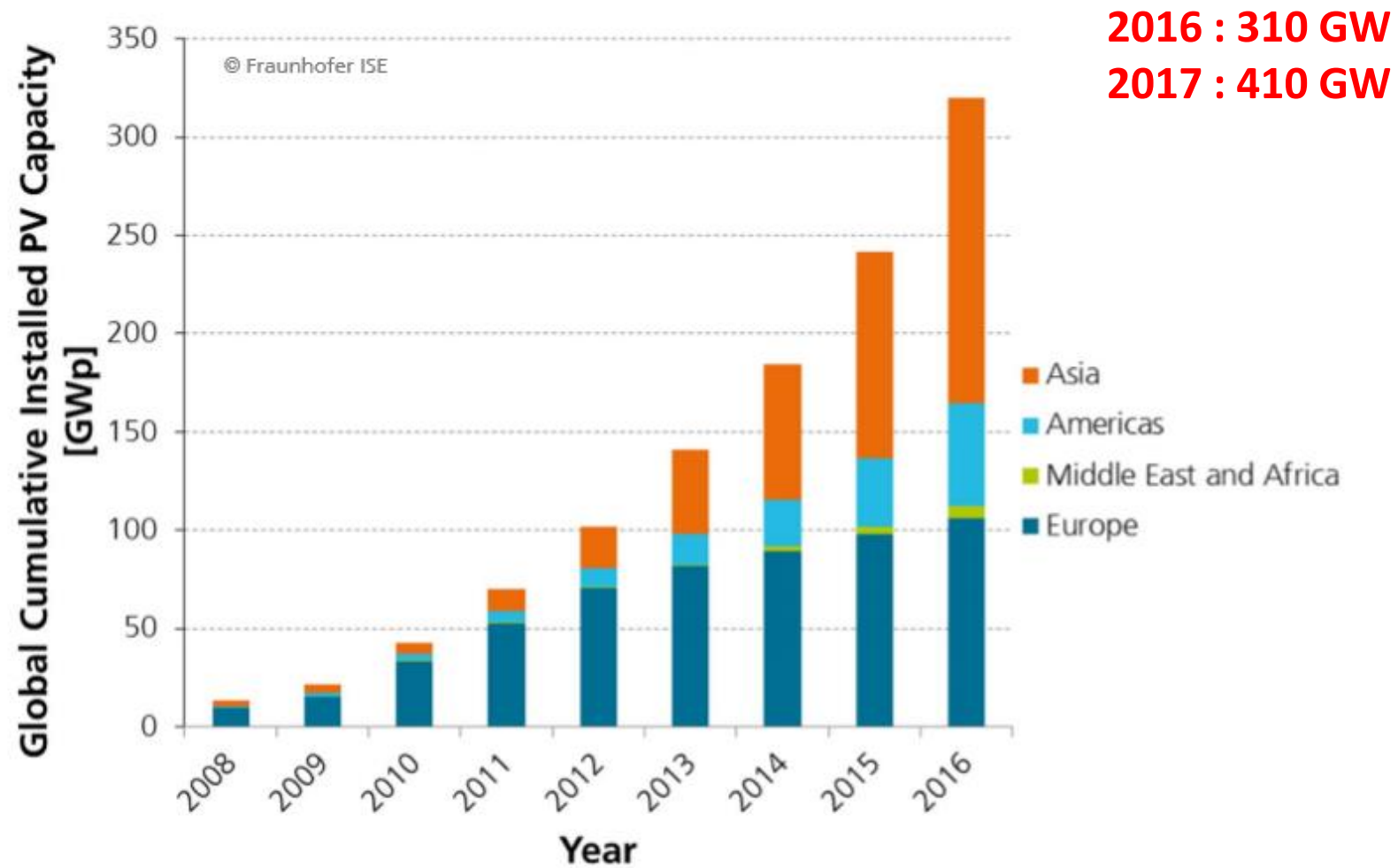


1877  
W.G. Adams  
& R.E. Day  
Cellules  
Se 1%

1954  
Chapin & Fuller  
& Person  
Si(6%)



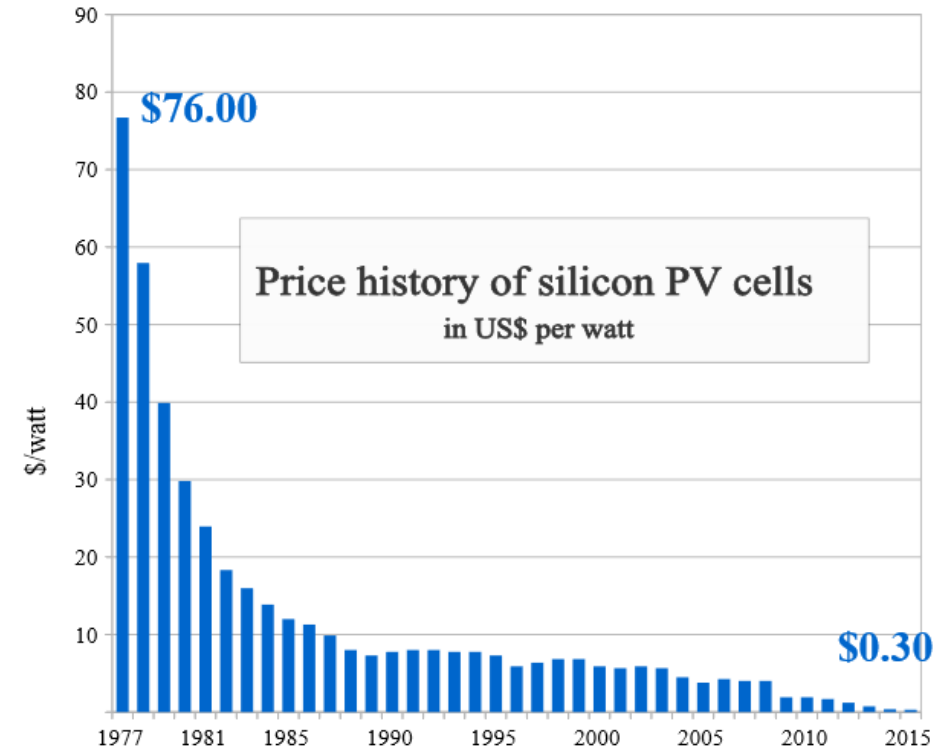
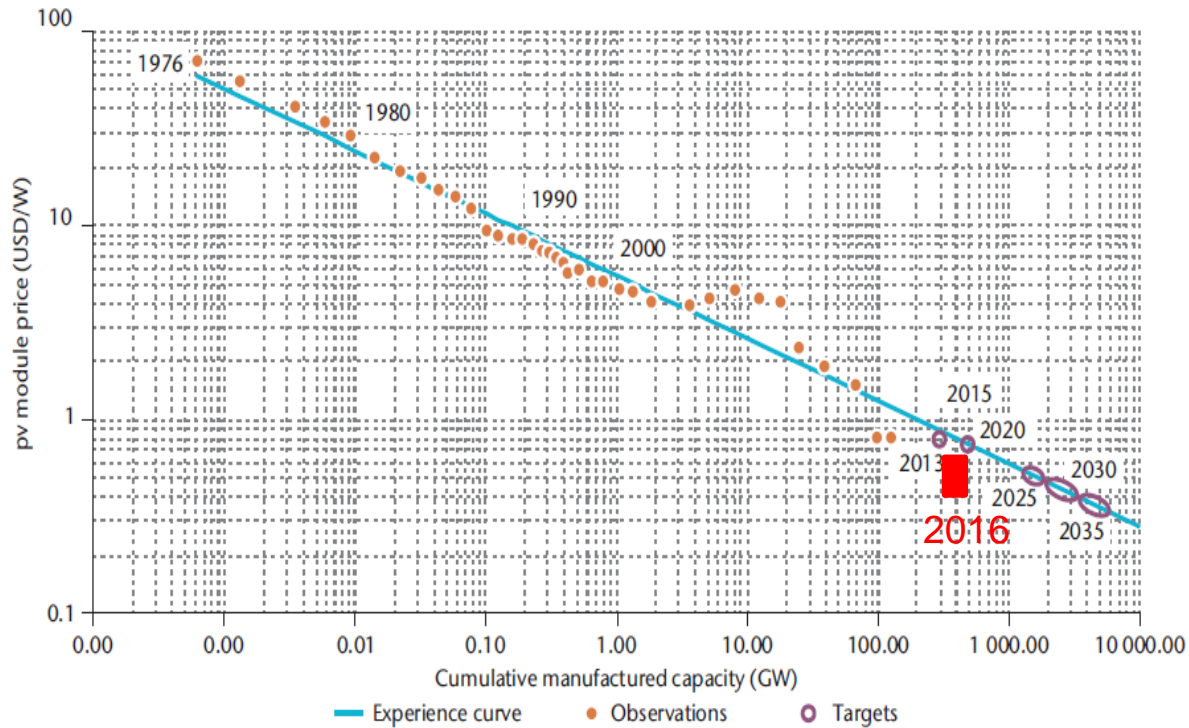
## Le passage de l'épaisseur du trait à une composante énergétique majeure



500 GW en 2020

4.4 TW en 2050 (IEA 2015)

# La réduction des coût de fabrication des modules « la loi de Moore du PV »

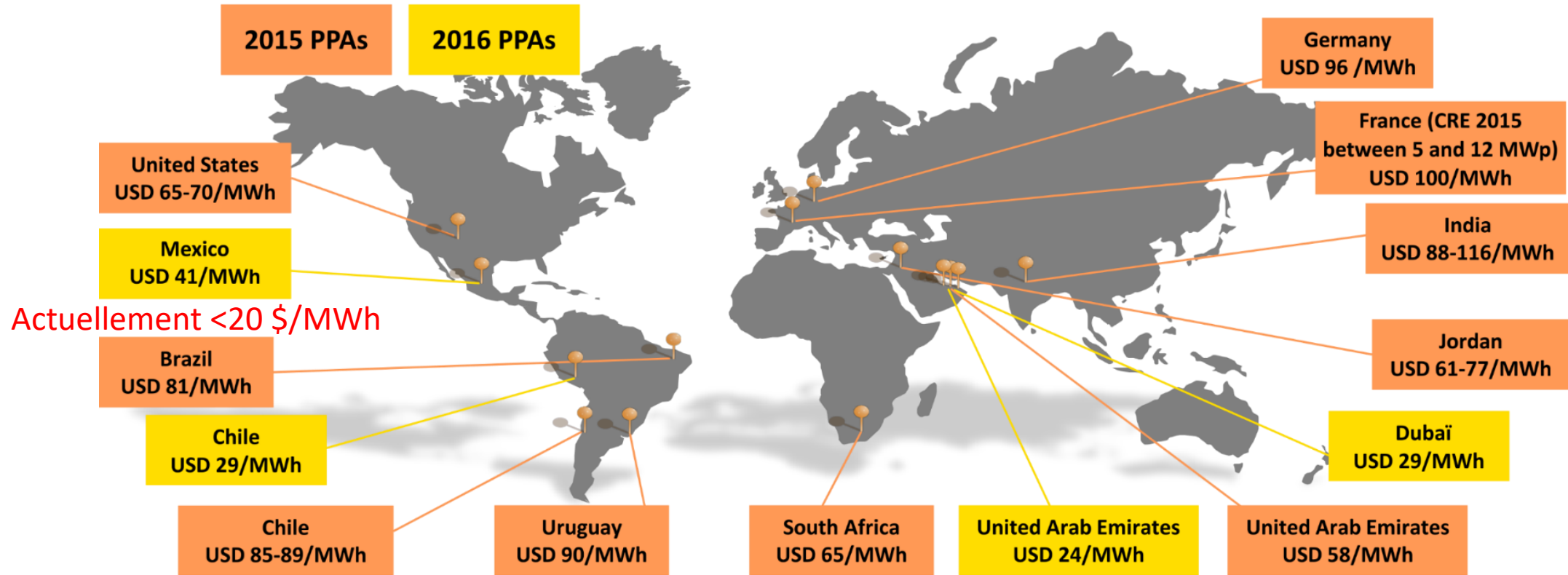


Notes: Orange dots indicate past module prices; purple dots are expectations. The oval dots correspond to the deployment starting in 2025, comparing the 2DS (left end of oval) and 2DS hi-Ren (right end).

Source: Bloomberg New Energy Finance & [pv.energytrend.com](http://pv.energytrend.com)

# Le décollage économique : le coût du kWh PV devient compétitif !

## Recent announced long-term contract prices for new solar electricity



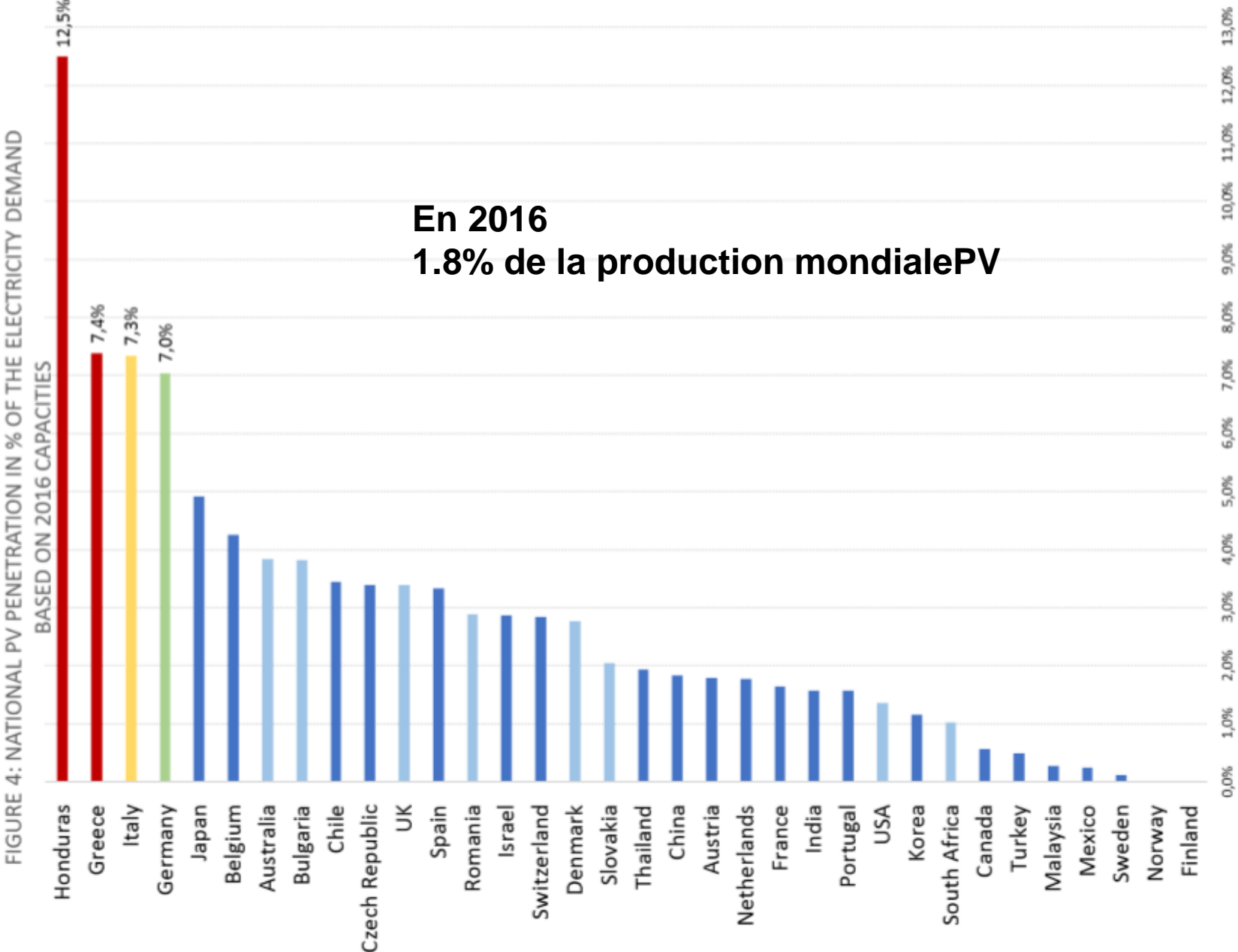
This map is without prejudice to the status or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area

Adapted from IEA Renewable Energy  
Medium Term Market Report 2015

# France 2016 : 63 Euros/MWh























# Une contribution de plus en plus importante au mix électrique dans de nombreux pays



En 2016  
1.8% de la production mondiale PV

TABLE 1: TOP 10 COUNTRIES FOR INSTALLATIONS AND TOTAL INSTALLED CAPACITY IN 2016

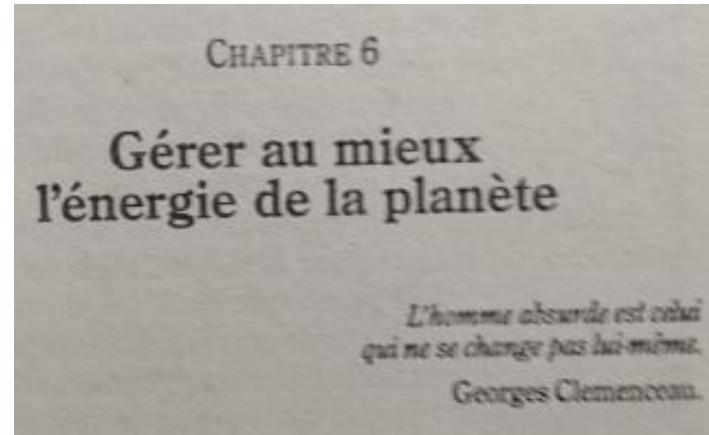
TOP 10 COUNTRIES IN 2016 FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				TOP 10 COUNTRIES IN 2016 FOR CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY			
1		China	34,5 GW	1		China	78,1 GW
2		USA	14,7 GW	2		Japan	42,8 GW
3		Japan	8,6 GW	3		Germany	41,2 GW
4		India	4 GW	4		USA	40,3 GW
5		UK	2 GW	5		Italy	19,3 GW
6		Germany	1,5 GW	6		UK	11,6 GW
7		Korea	0,9 GW	7		India	9 GW
8		Australia	0,8 GW	8		France	7,1 GW
9		Philippines	0,8 GW	9		Australia	5,9 GW
10		Chile	0,7 GW	10		Spain	5,5 GW

13 : France 559 MW

Le photovoltaïque est devenu une réalité économique incontournable ...malgré les freins et les oppositions

# La résistance au changement : L'influence des idées reçues et des parti-pris involontaires ou...volontaires

1995



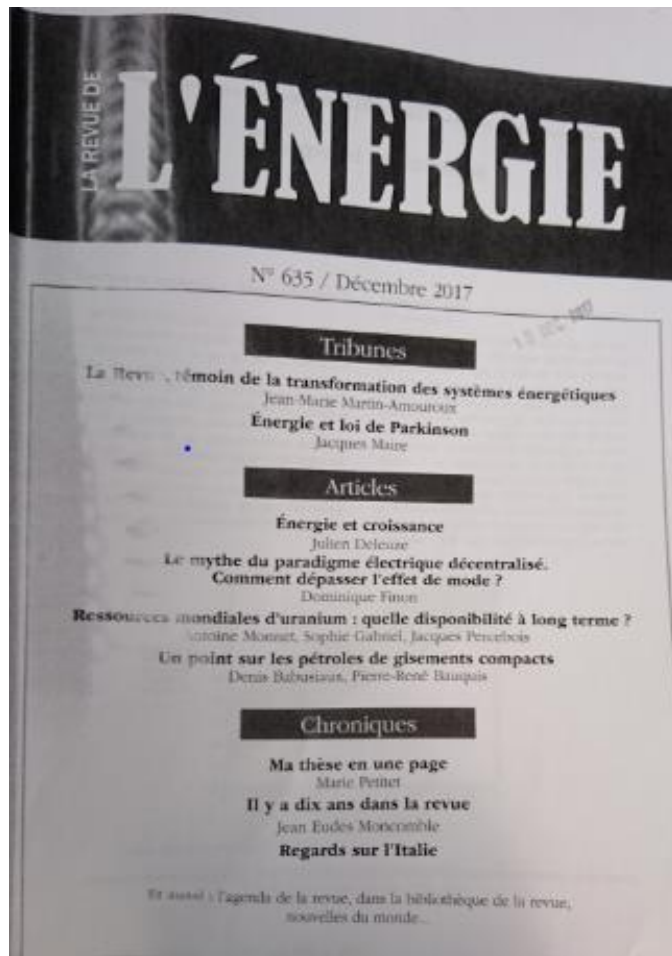
Mais, hélas, malgré les millions de dollars consacrés à la recherche et des milliers d'installations expérimentales, l'énergie solaire n'a pas pu s'imposer massivement comme une énergie populaire, utilisable facilement à un moindre coût. Même en investissant encore des milliards de dollars supplémentaires dans cette recherche, l'énergie solaire resterait, pour la production d'électricité<sup>66</sup>, dans l'état actuel des connaissances et de la technologie, plus chère que l'énergie nucléaire (de l'ordre de dix fois plus, c'est pourquoi l'énergie solaire est pour l'instant cantonnée à des applications très spécifiques lorsque des conditions locales la rendent particulièrement avantageuse :



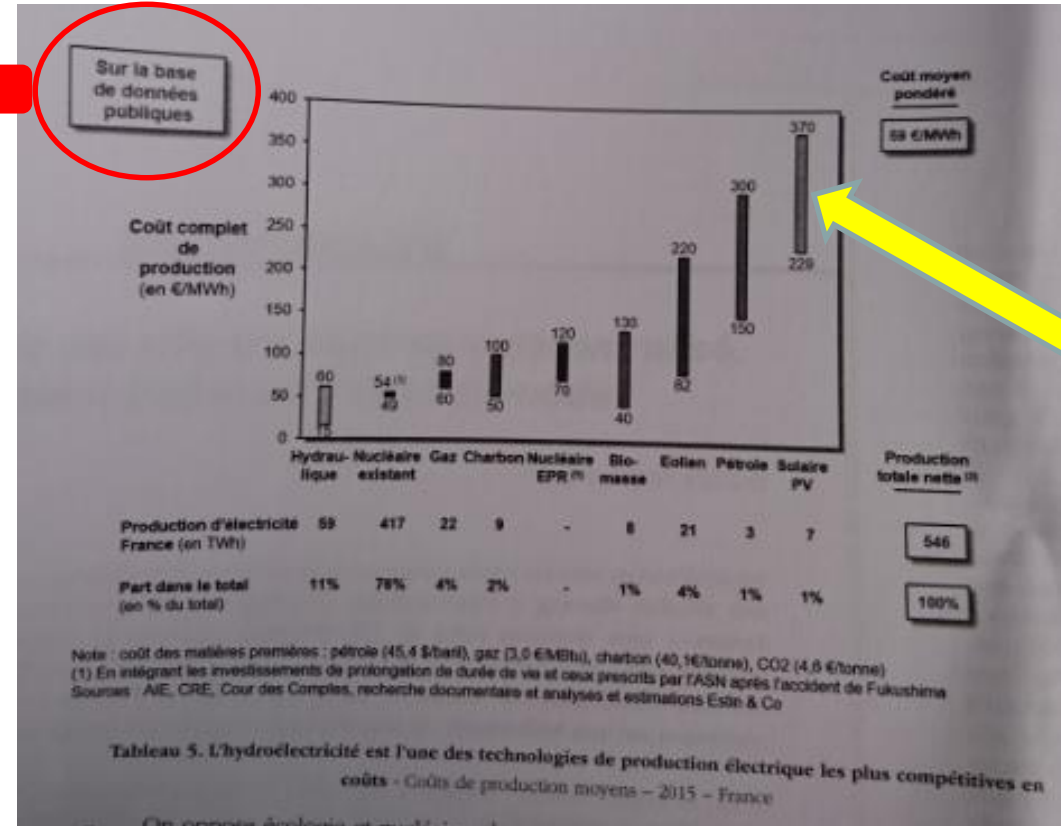
Et de nombreux autres exemples...en 2000, 2005, 2011 (juste après Fukushima), 2014...**et 2018 !**.



2017



Julien Deleuze, Energie et croissance, La revue de l'énergie, 635(2017)13-19



Sébastien Balibar, Energy Transitions after COP 21 and 22, Comptes rendus Physique, 18(2017)479

### 3.3. Intermittent renewable energies: wind power and solar stations

The main problem with these renewable energies is their intermittency. There is of course no sun at night and solar production is reduced as soon as the sun hides. The efficiency of photovoltaic stations depends on their geographical location. In France, the average power production is about 10 times less than their nominal power, which corresponds to their instantaneous power under optimal sunshine. As for windmills, they do not rotate if the wind speed is less than 15 km/h, and they need to be stopped for security if the wind is stronger than 90 km/h, as mentioned above. In the average, their

Dernière phrase: *Espoir!*



« If one invented A method for storing electricity in large quantities the challenge facing us could change completely »

## Le Stockage de l'Electricité : La ressemblance avec le photovoltaïque est frappante

Ce que l'on entend, ce que l'on croit :

L'électricité ne se stocke pas,  
C'est trop cher

Et la réalité

**Nous sommes entourés d'énergie stockée et libérable sous forme électrique :**

1 kg de pétrole = 11,3 kWh d'énergie

1 tonne (1 m<sup>3</sup> d'eau) sur 360 m = 1 kWh

1 kg d'hydrogène = 34 kWh

Mais aussi non seulement le lithium, mais le plomb, le zinc, le cuivre le fer, le sodium, l'aluminium

.Fe  $\leftrightarrow$  Fe<sup>3+</sup> + 3e<sup>-</sup>

Volant d'inertie, ressorts, gaz comprimés....

**Qui peuvent être aussi produites par l'électricité, par des technologies disponibles !**

Pétrole : biomasse issue de la photosynthèse -> production par le photovoltaïque (Solar Fuels)

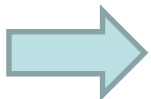
*Energie potentielle : pompage turbinage, STEP*

*Hydrogène : electrolyse de l'eau et stockage sous différentes formes (gaz, liquide, hydrures...)*

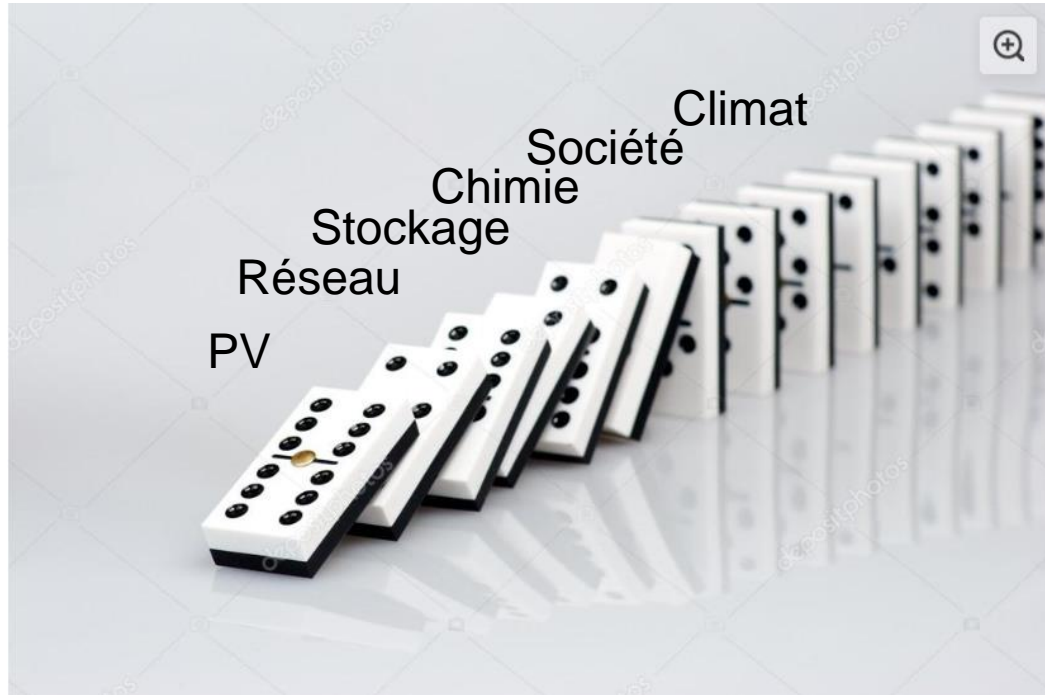
*Batteries : lithium (demain sodium et lithium air), sodium soufre, zinc air, Fe...*

*Super capacité, volants d'inertie....*

**Il ne faut pas « tout » réinventer, il faut partir des moyens existants**



# Photovoltaïque, électromobilité, stockage : de l'effet manivelle à l'effet domino ?





## **Le rôle de l'initiative :**

**Politiques publiques : exemple des tarifs d'achat européens**

**Initiatives citoyennes & locales**

**Initiatives individuelles : exemple d'Elon Musk**

## ENERGY STORAGE

# Did Tesla's Big Australian Battery Kill the Business Case for More?

There might not be much of an ancillary services market left for other projects.

JASON DEIGN | MAY 18, 2018

*The Hornsdale battery is almost doing too good of a job.*

500 MW for 50 Millions Dollars (E. Musk)

Nevertheless, it is true that frequency response is seen as a particularly low-hanging fruit for utility-scale batteries, and, for instance, helped create the business case for most of the early battery plants installed on the PJM Interconnection transmission system in the U.S.

# L'Agence Solaire Internationale



Mars 2018 New Dehli

Novembre 2015 : lancement à la COP 21 (Paris) par la France et l'Inde

« Rendre possible le changement d'échelle dans les pays à fort ensoleillement » (ceinture du soleil)

Juin 2016 : Accord avec la Banque Mondiale → mobiliser 1000 Milliards de dollars d'ici 2030 pour le développement massif de l'énergie solaire (exemple Inde 100 GW de PV en 2022)

Décembre 2017: Statut d'organisation internationale

Mai 2018 :121 pays membres



# Quels sont les objectifs de l'Alliance ?

L'Alliance solaire vise à réduire massivement les coûts de l'énergie solaire afin de rendre possible le « changement d'échelle » dans le déploiement de l'énergie solaire dans les 121 pays à fort ensoleillement situés entre les deux tropiques.

**Les objectifs poursuivis sont donc multiples :**

**réduire massivement les coûts de l'énergie solaire**

**répondre à la forte demande énergétique** dans les pays en développement

contribuer à la **lutte contre le changement climatique**

Moyens: faciliter les infrastructures pour les projets solaires, développer la collaboration en R&D, développement des économies locales dans le solaire

# | 5 programmes identifiés

1. Mettre en place une ingénierie financière visant **le financement à grande échelle** de ces projets ainsi que d'un mécanisme financier de couverture des risques.
2. Déployer des **applications solaires** décentralisées, notamment dans les domaines de **l'irrigation** et de **l'éclairage public**.
3. Développer les **mini-réseaux solaires** visant l'autonomie énergétique des **territoires insulaires et isolés**.
4. Favoriser les **installations solaires de toiture**.
5. Encourager la **mobilité électrique solaire**.

**Vers la généralisation des  
applications utilisant le  
photovoltaïque, la mobilité, le  
stockage...**

## Le développement centralisé : Les grandes fermes photovoltaïques



Ferme solaire Longyangxia Dam, Chine. Crédit : NASA

1- Chine, Qinghai, Février 2017  
Inauguration de la plus grande ferme solaire du monde  
en Chine, **Longyangxia Dam**

27 km<sup>2</sup>

4 millions de panneaux solaires

850 MW

2- Inde, Kamuthi, 648 MW

3- USA, Californie, Topaz, 579 MW

13-France, Cestas, 300 MW (2015)

En projet : Chine, Ningxia, 2 GW

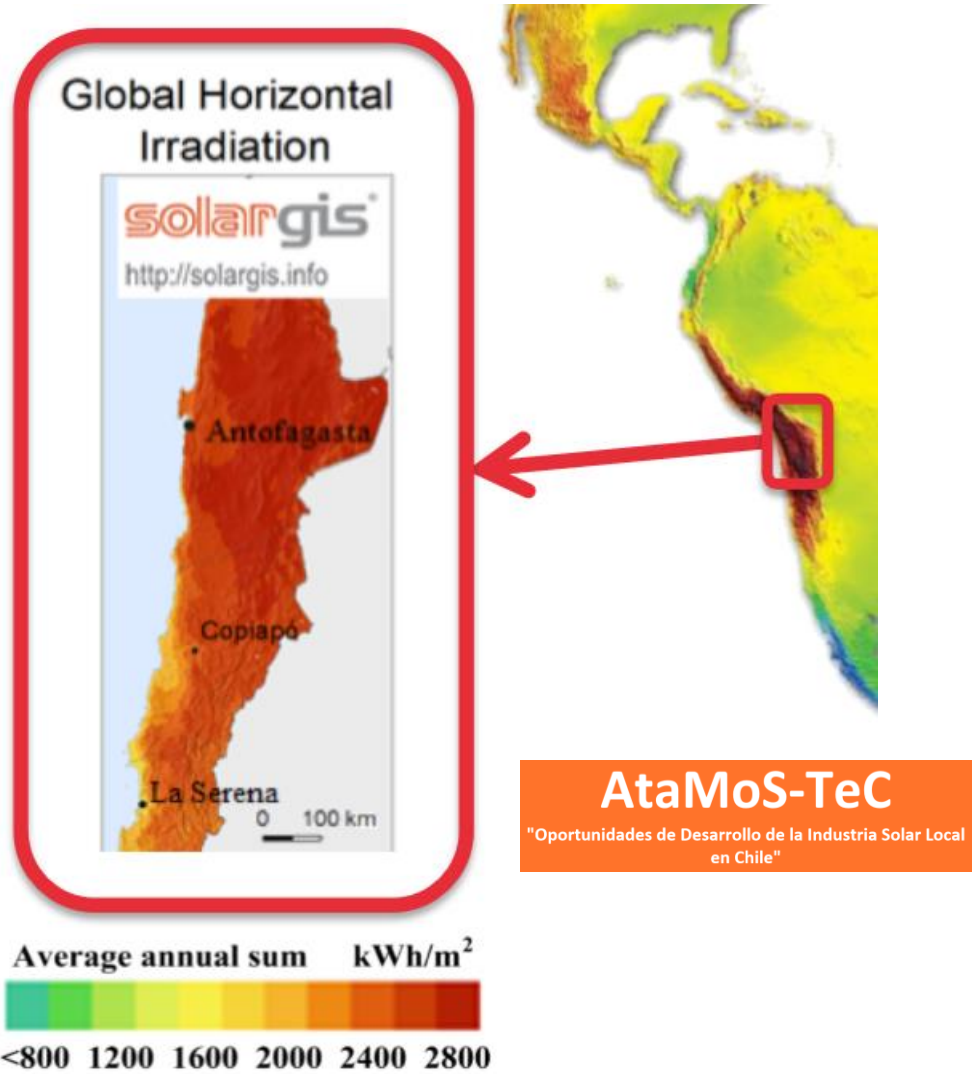




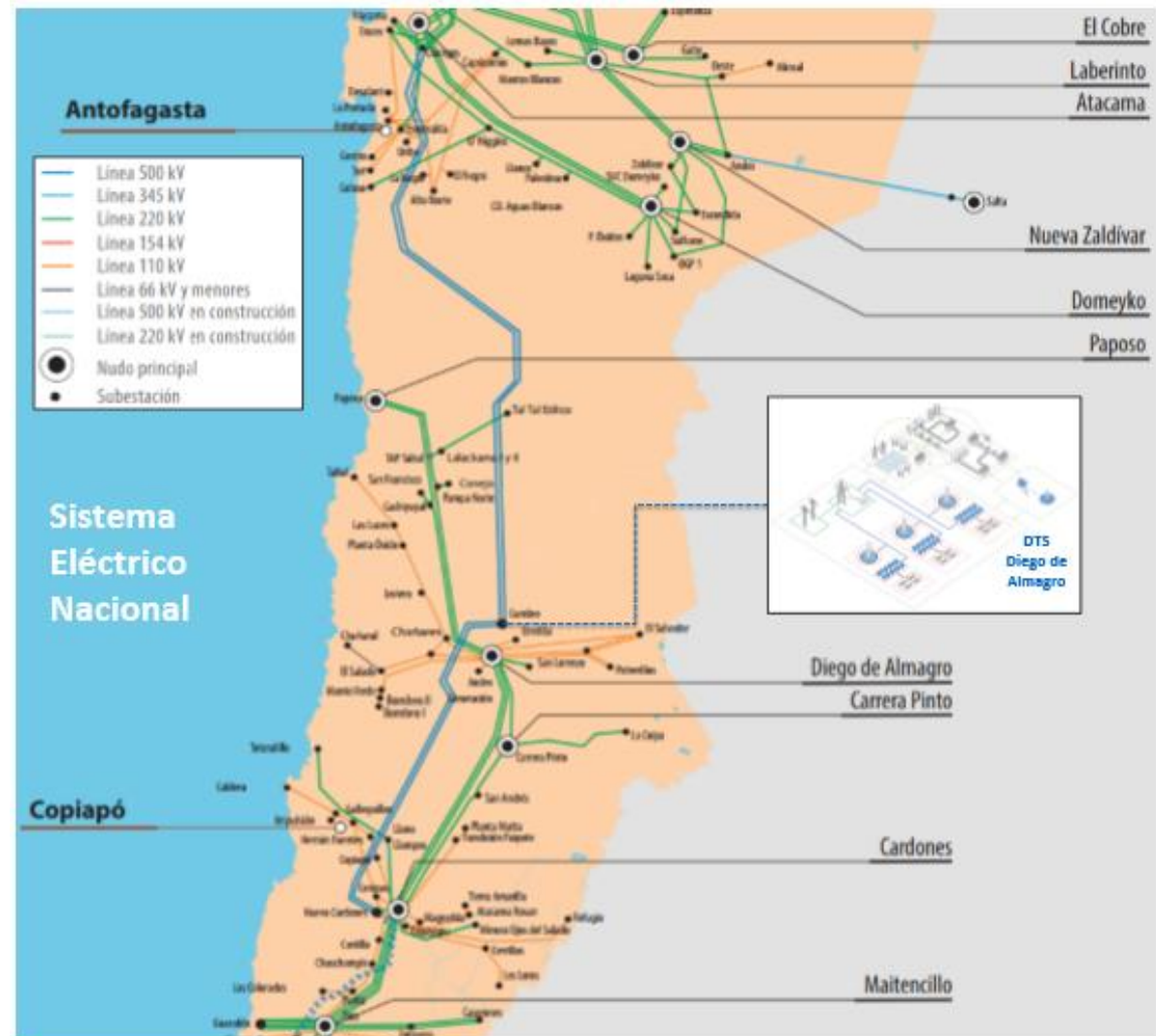
# Mars 2018 : A la découverte du photovoltaïque dans le désert d'Atacama



PROGRAMA  
**ENERGÍA SOLAR**



**AtaMoS-TeC**  
"Oportunidades de Desarrollo de la Industria Solar Local en Chile"



Source : Séminaire sur l'énergie solaire au Chili (PUCV, Valparaiso, 3 mars 2018)



La ferme solaire : Luz del Norte, 141 MW, First Solar, Copiapo  
Production : 401,3 GWh/an – Facteur de capacité 34 %



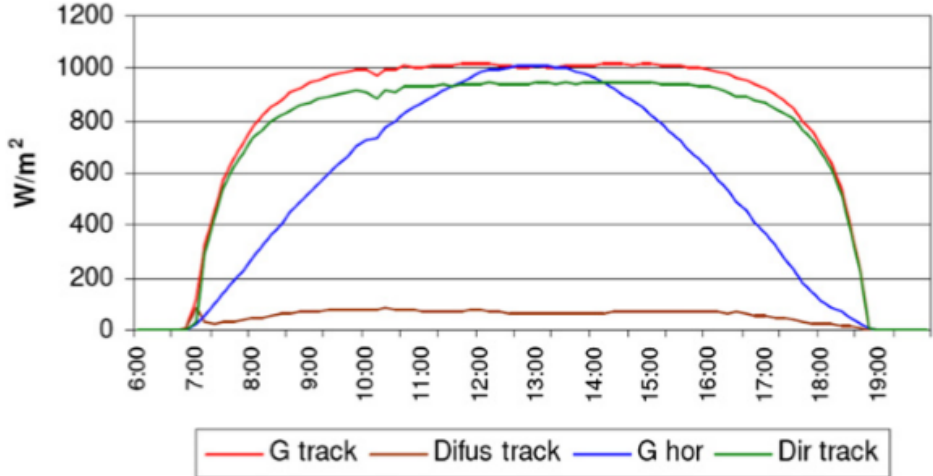
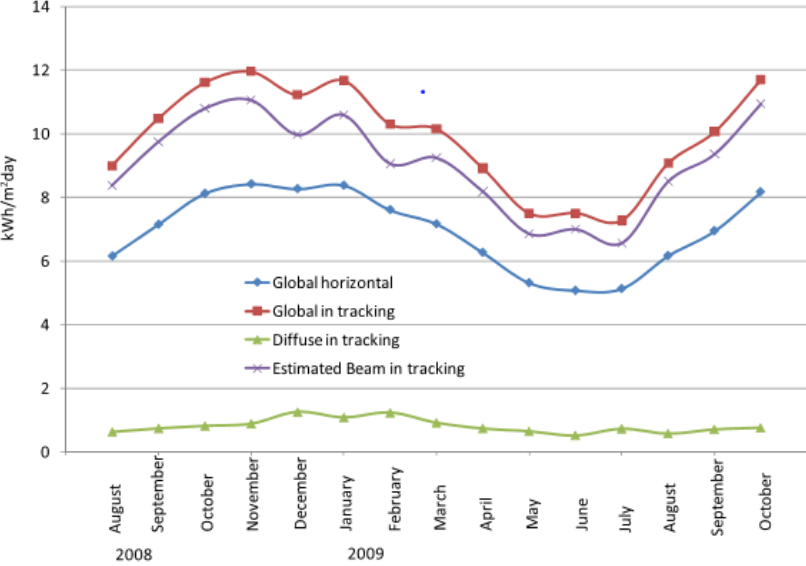




The state of solar energy resource assessment in Chile

Alberto Ortega<sup>a</sup>, Rodrigo Escobar<sup>a,\*</sup>, Sergio Colle<sup>b</sup>, Samuel Luna de Abreu<sup>c</sup>

Renewable Energy 35 (2010) 2514–2524









Source : Séminaire sur l'énergie solaire au Chili (PUCV, Valparaiso, 3 mars 2018)



## 'A SOLAR SAUDI ARABIA'

While Trump promotes coal, Chile and others are turning to cheap sun power

# Le développement décentralisé en milieu urbain et agricole



Mouvement de fond

Lien avec le développement de l'autoconsommation/stockage

Mobilité électrique solaire

Habitat à énergie positive

Nouvelles ressources financières (énergiculteurs)

Développement de modèles d'économie collaborative





# Une multiplication des innovations

## Route Solaire



## Avion solaire



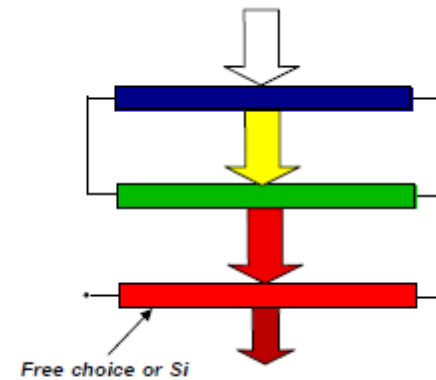
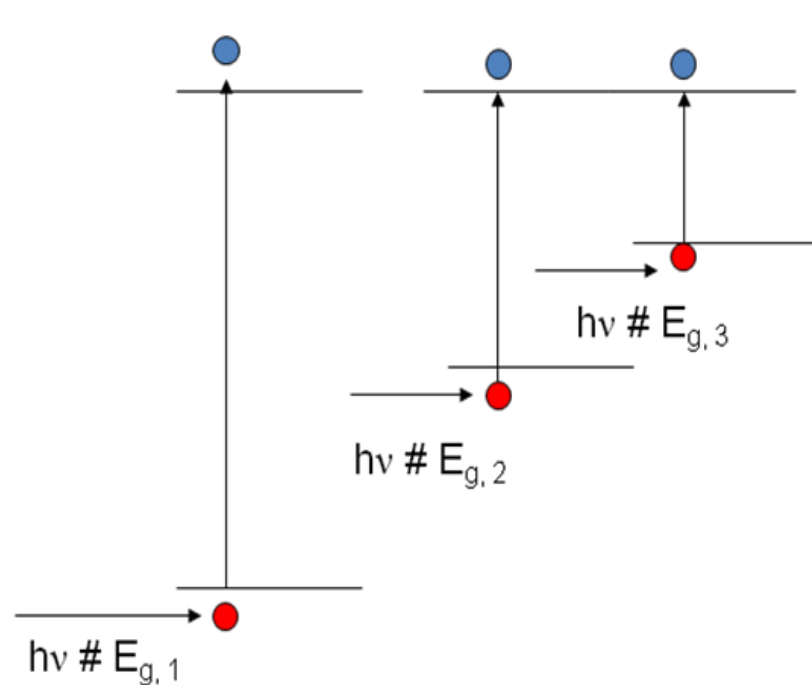
## Photovoltaïque flottant



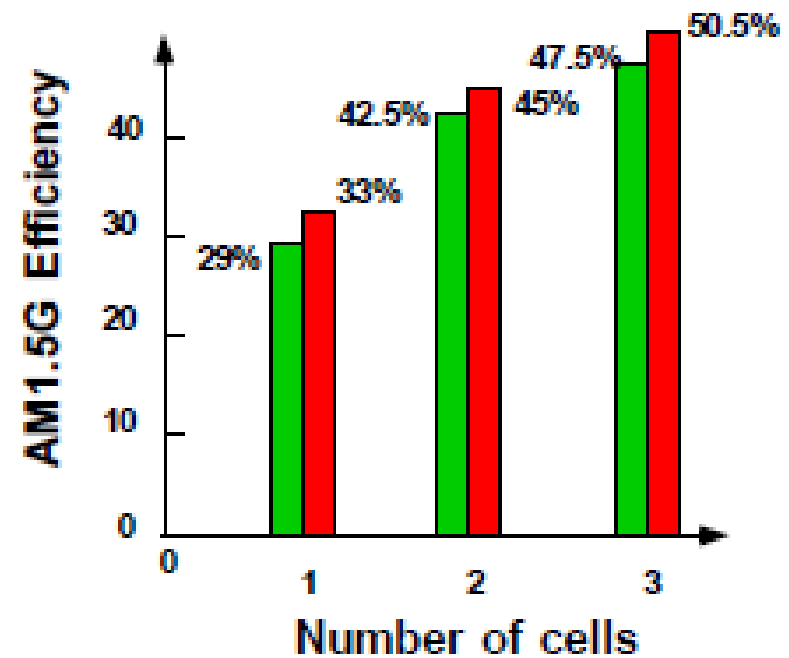
## Photovoltaïque déployable



# Le rôle de la recherche : augmenter les rendements



- Free choice
- Si bottom cell





# The Thirty Cube R&D Roadmap : 30-30-30 for modules

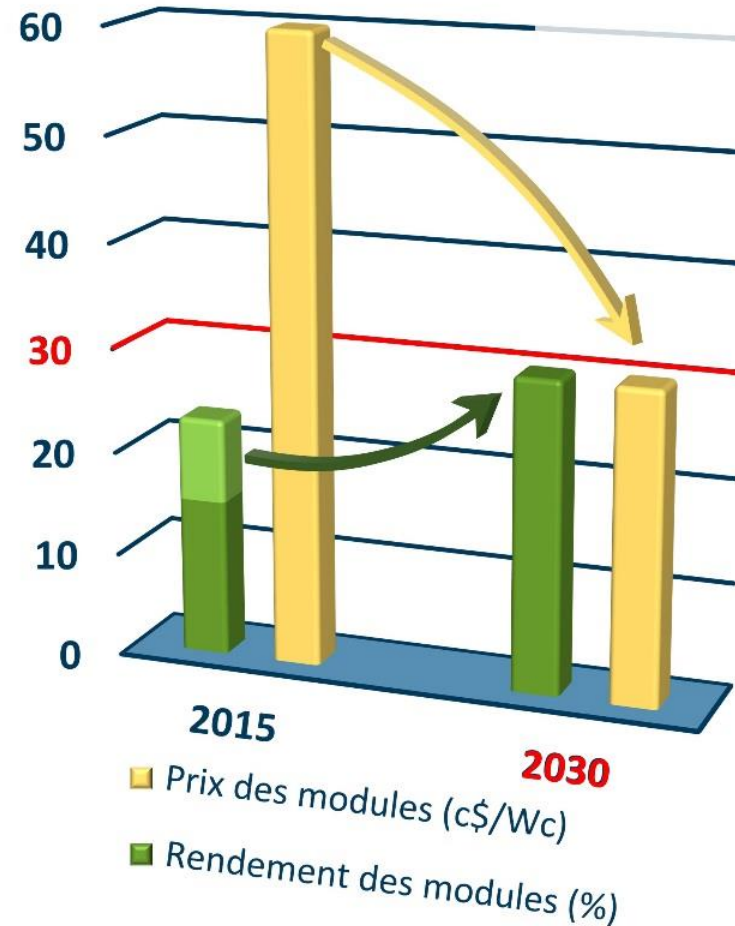
<http://www.ipvf.fr/en/the-303030-initiative-for-the-modules/>

Module efficiency  
**> 30%**



At a price of  
**< 30 c\$/Wc**

for  
**2030**



**PARIS2015**  
CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES  
SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES  
COP21·CMP11

# An international R&D initiative



**PARIS2015**  
CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES  
SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES  
COP21·CMP11

Jean-François MINSTER  
IPVF

Philippe MALBRANCHE  
INES

✓ Andreas BETT  
Fraunhofer ISE

Michael GRAETZEL  
EPFL

Yoshita OKADA  
RCAST, NextPV

Jean-François GUILLEMOLES  
CNRS, NextPV

✓ Marika EDOFF  
Uppsala University

Alex FREUNDLICH  
University of Houston

✓ Christophe BALLIF  
EPFL

Michael POWALLA  
ZSW

Jeff POORTMANS  
IMEC

Wim C. SINKE  
ECN

Ayodha N. TIWARI  
EMPA, EPFL

Martin GREEN  
UNSW



## Conclusion

**Le photovoltaïque a vocation, comme la chlorophylle avec les plantes, à s'adapter à toutes les applications de l'énergie et à s'hybrider avec d'autres fonctionnalités, à toutes les échelles.**

**De la plus petite installation aux grandes fermes solaires, avec le réseau et le stockage intégrés, aussi bien dans les villes, les déserts que sur l'eau, en se fondant dans le paysage.**

**Il ne faut pas opposer les applications les unes aux autres mais les combiner harmonieusement.**

*Coulée Verte, Antony, Mai 2018  
du photovoltaïque Parfaitement intégré au paysage, invisible !*

2017

nature  
energy

PERSPECTIVE

PUBLISHED: 25 AUGUST 2017 | VOLUME: 2 | ARTICLE NUMBER: 17140

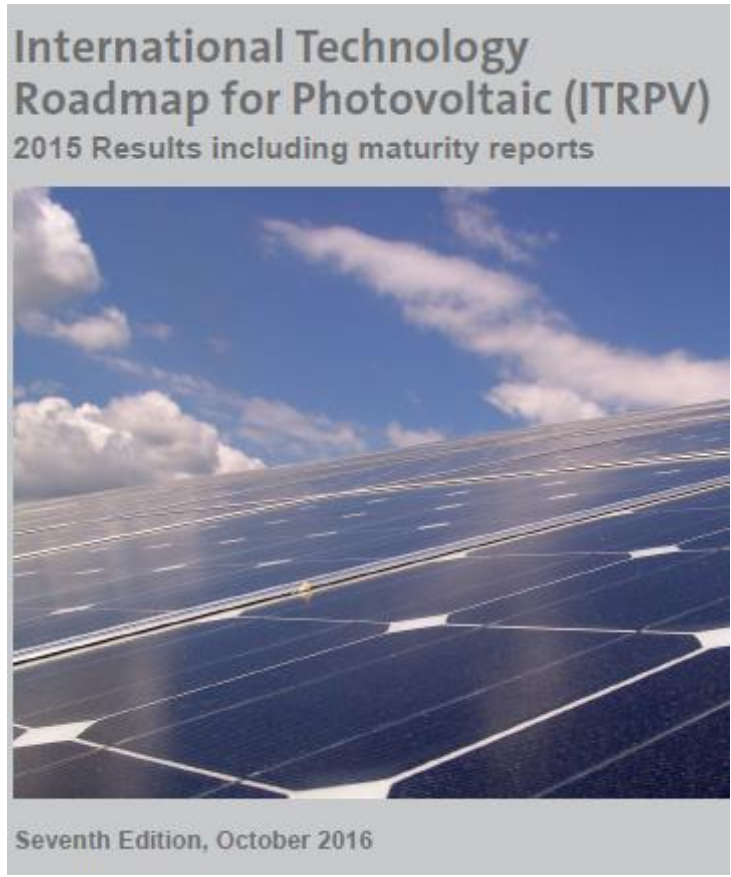
# The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change

Felix Creutzig<sup>1,2\*</sup>, Peter Agoston<sup>1</sup>, Jan Christoph Goldschmidt<sup>3</sup>, Gunnar Luderer<sup>4</sup>, Gregory Nemet<sup>1,5</sup> and Robert C. Pietzcker<sup>4</sup>

The Intergovernmental Panel on Climate Change's fifth assessment report emphasizes the importance of bioenergy and carbon capture and storage for achieving climate goals, but it does not identify solar energy as a strategically important technology option. That is surprising given the strong growth, large resource, and low environmental footprint of photovoltaics (PV). Here we explore how models have consistently underestimated PV deployment and identify the reasons for underlying bias in models. Our analysis reveals that rapid technological learning and technology-specific policy support were crucial to PV deployment in the past, but that future success will depend on adequate financing instruments and the management of system integration.

We propose that with coordinated advances in multiple components of the energy system, PV could supply 30–50% of electricity in competitive markets.





2016

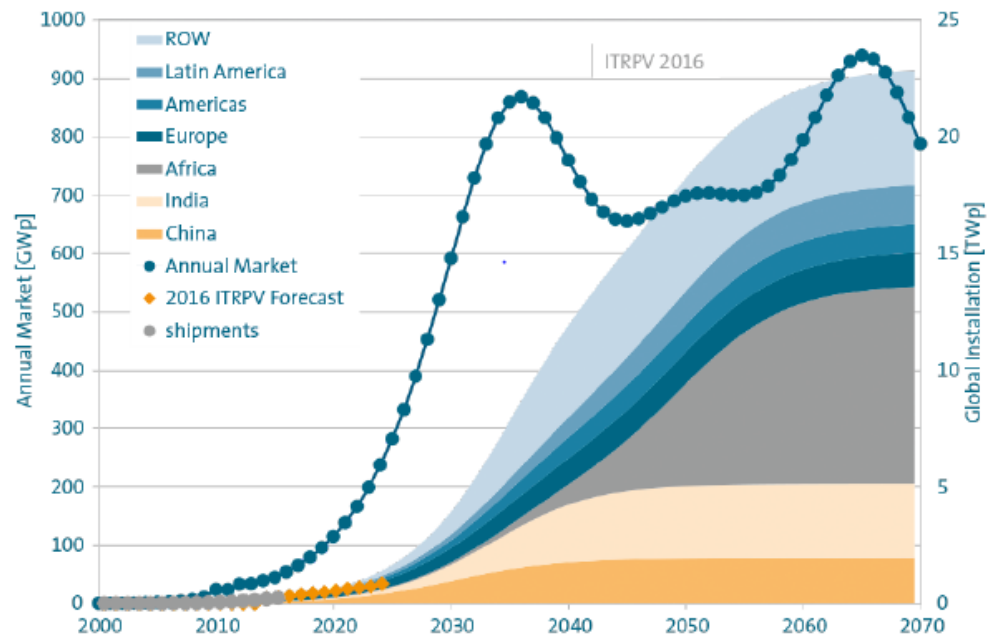
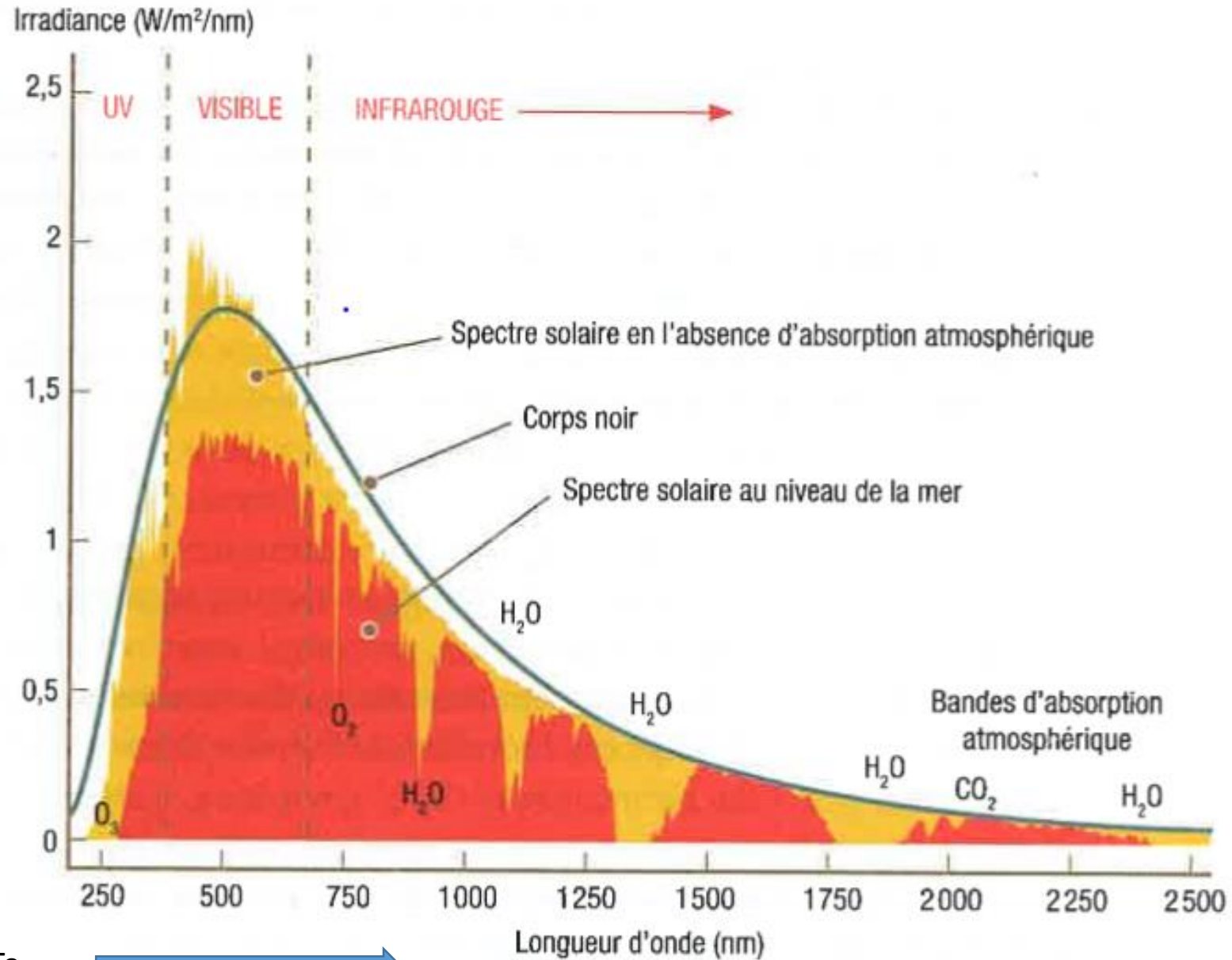


Fig. 48: Cumulative installed module power calculated with a logistic growth approximation for Scenario 2, assuming 23 TWp installed PV module power in 2070 (see Table 2).

Transparents de réserve

# Quand la lumière guide le choix des cellules solaires ....



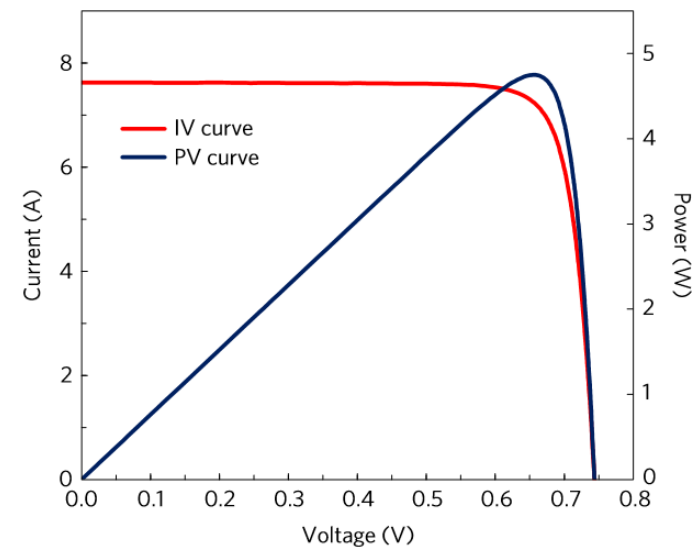
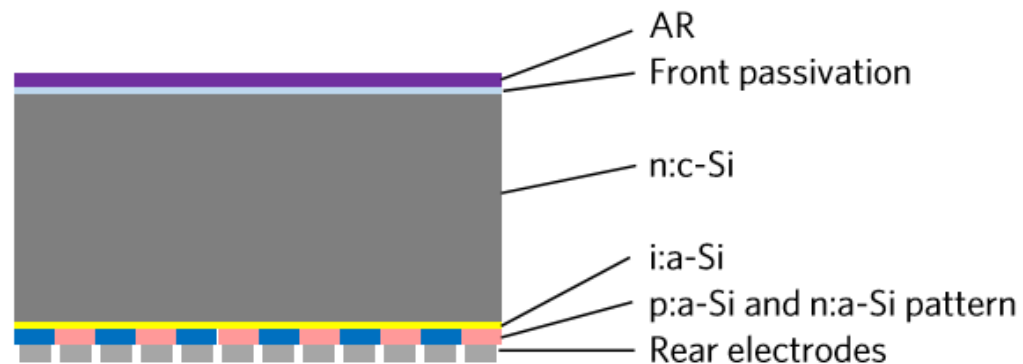
CdTe   
Silicium 



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

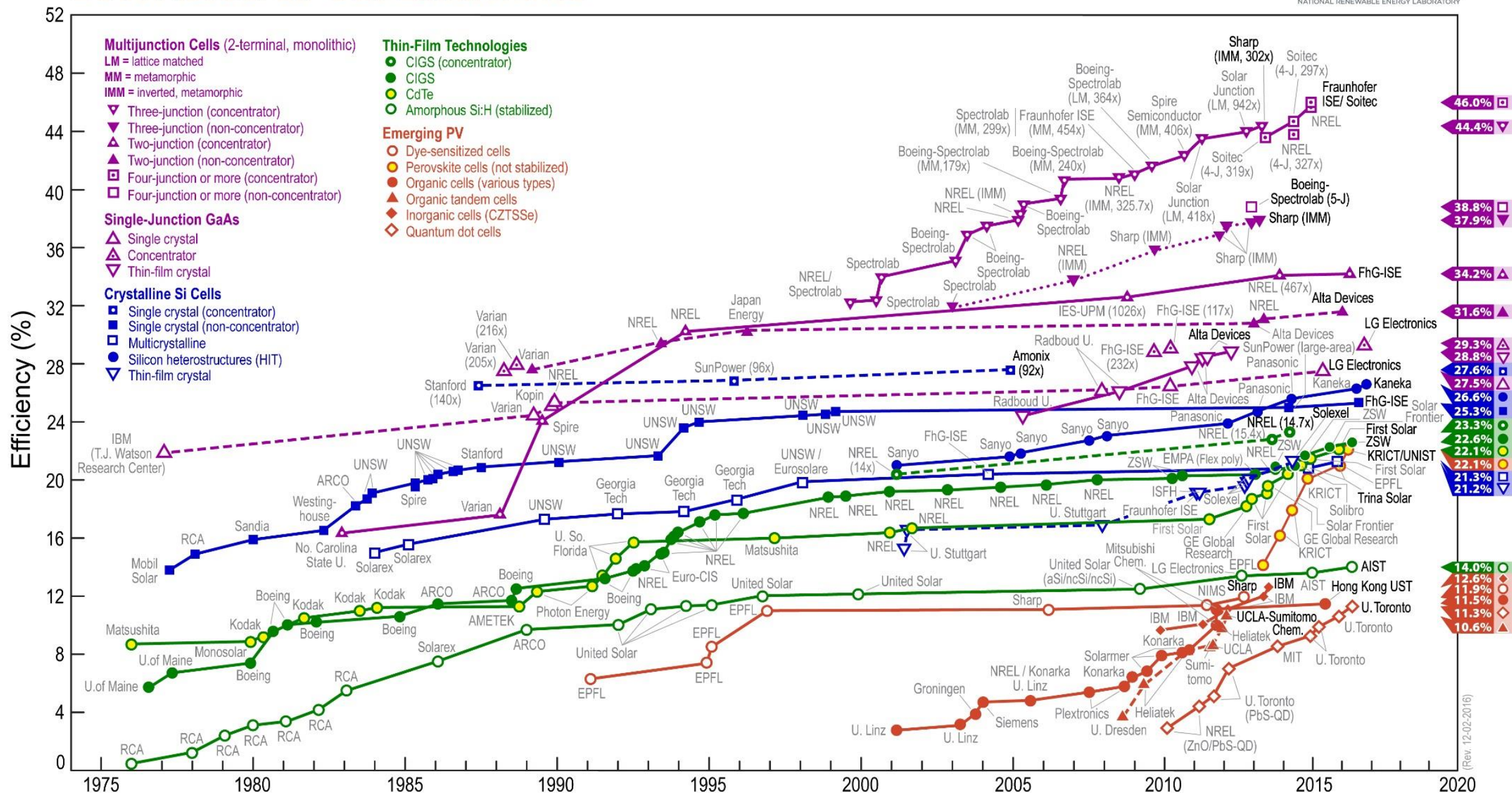
26.6%

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



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

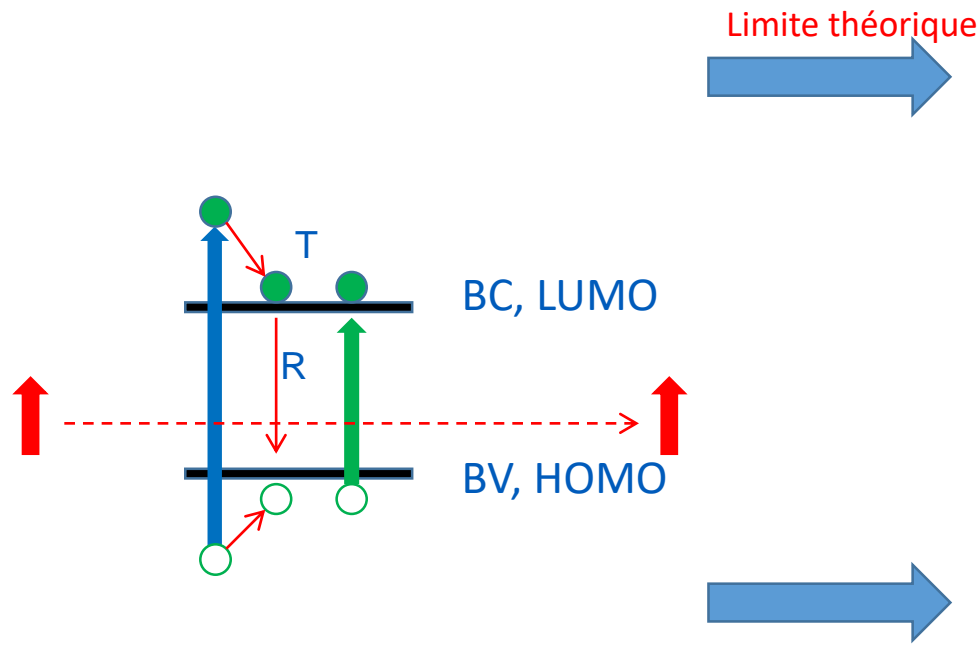
# Best Research-Cell Efficiencies



(Rev. 12-02-2016)

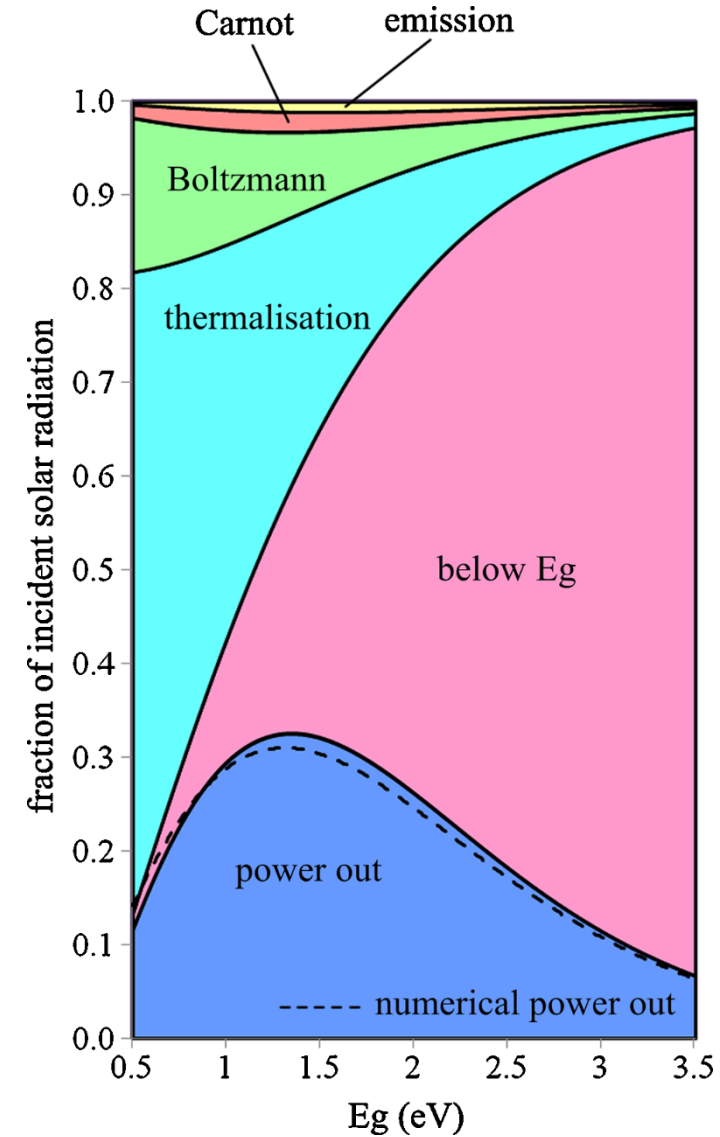
# Rendement théorique de la conversion photovoltaïque

L.C. Hirst et al. – *Progress in Photovoltaics* – 2011; 19:286-293



The conversion efficiency limit  
For a single junction  
Shockley Queisser

T : perte d'énergie par thermalisation  
R : perte d'énergie par recombinaison





# L'agence internationale des énergies renouvelables



- 2002-2005 : gestation (role d'Hermann Scheer)
- Avril 2008 : Conférence préparatoire à Berlin
- Janvier 2009 : Fondation à Bonn
- 2018 : 156 états membres

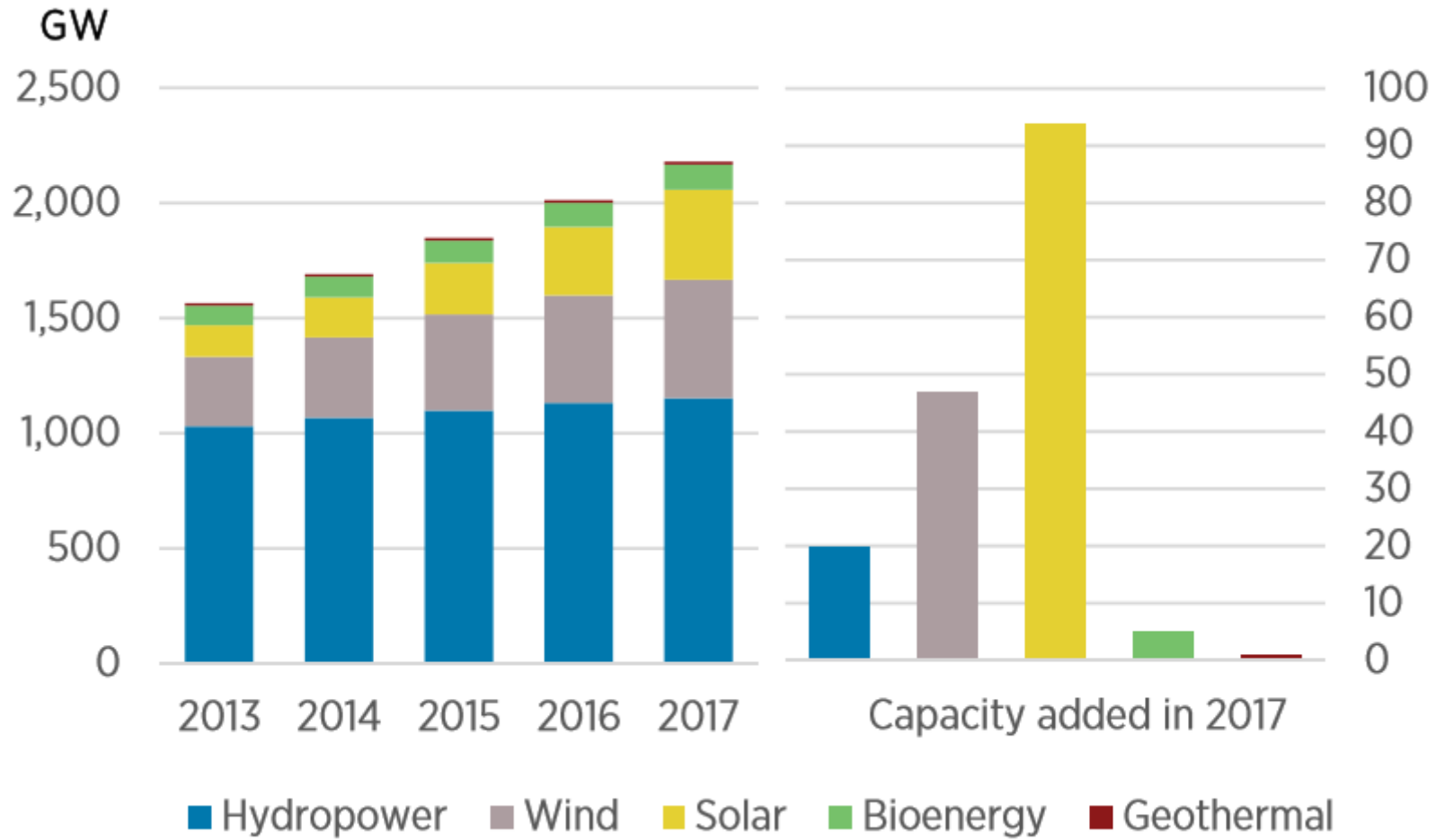
Objectif :

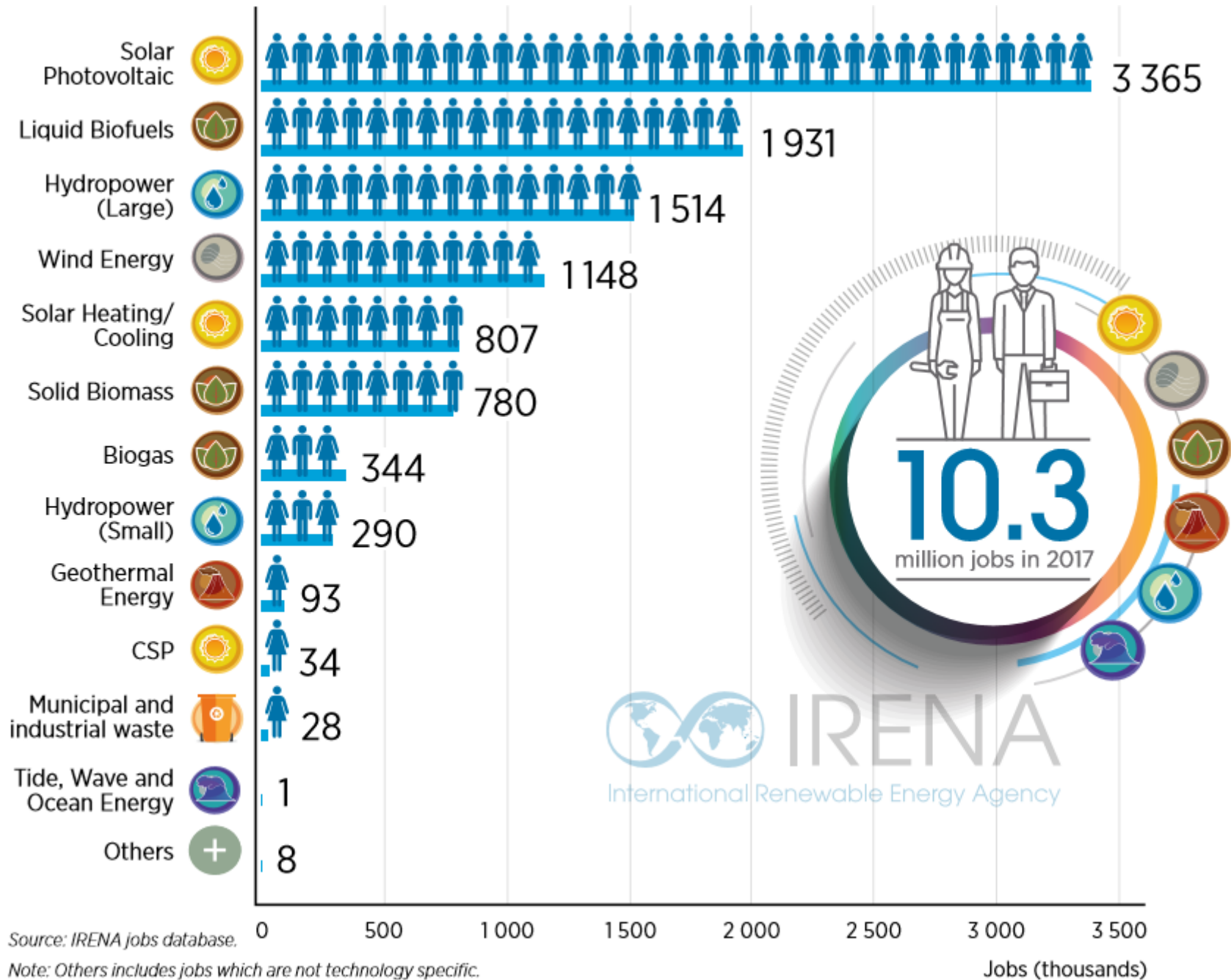
Développement de plateformes pour des collaborations internationales dans le domaine des ENR »

→ Statistiques : déploiement, technologies, coûts, études de cas ...



Source : IRENA



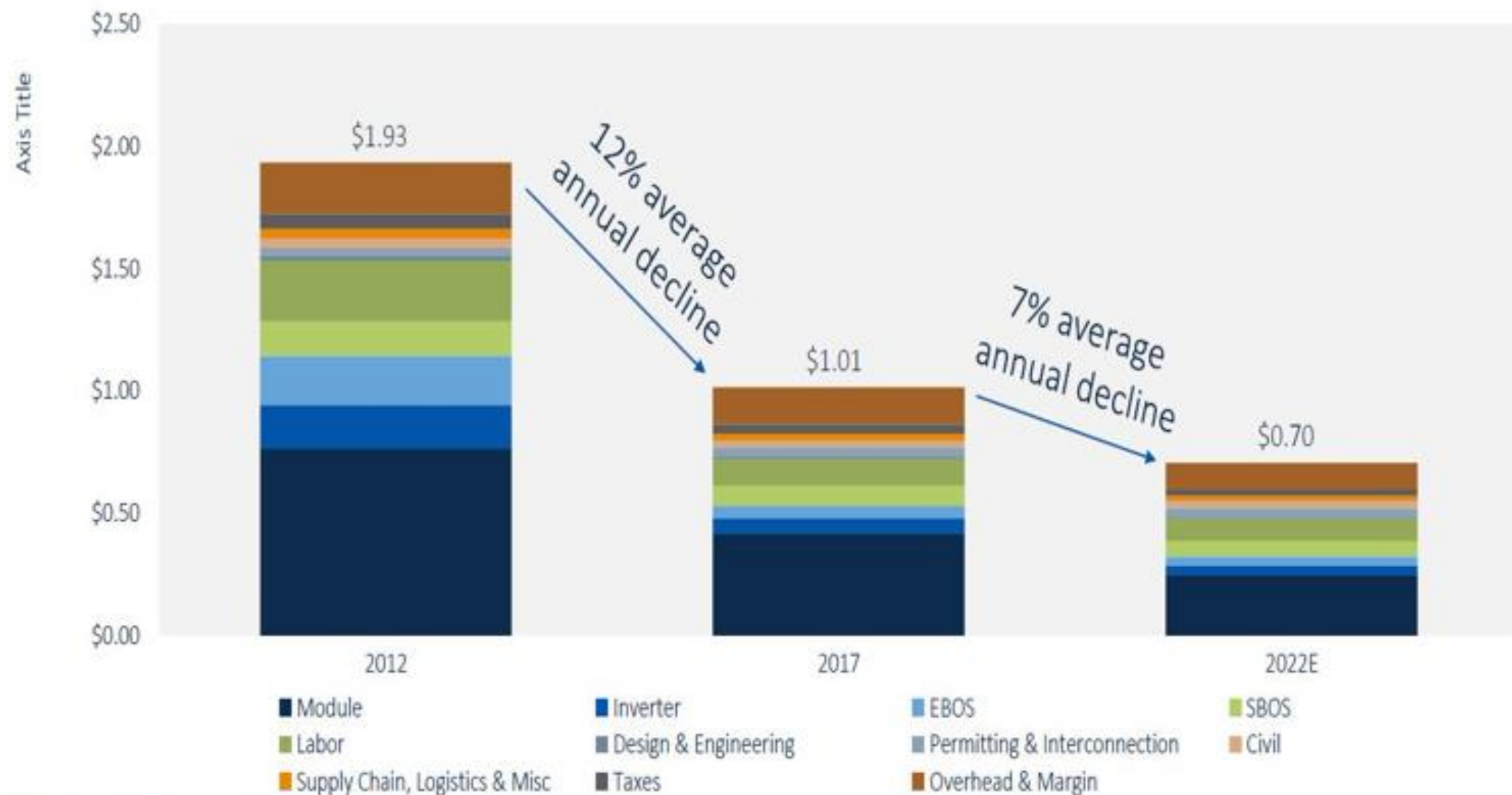


Source: IRENA jobs database.

Note: Others includes jobs which are not technology specific.



## United States Utility-Scale Fixed-Tilt System Pricing



Source: GTM Research U.S. PV Price Brief

# Californie : les panneaux solaires rendus obligatoires sur les nouveaux bâtiments

GABRIEL NEDELEC | Le 12/05 à 11:57 | Mis à jour à 19:42



Cette règle devrait représenter l'équivalent du retrait de la circulation de 115.000 véhicules roulant au carburant fossile. -AFP PHILIPPE HUGUEN

Cette nouvelle règle de construction entrera en vigueur le 1er janvier 2020.

Les Echos