

# Cellules solaires et diodes émettrices de lumière

Claude Weisbuch,  
Fondateur et Directeur scientifique, Genewave  
DR CNRS (emerite, labo PMC, Ecole Polytechnique)  
Professeur, Materials department, UCSB

28 février 2013

*Atelier* CERES-AA-02-S1 : Energies  
Ecole Normale Supérieure  
Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement  
et la Société (CERES)  
*Environmental Research and Teaching Institute (ERTI)*

Quel est le prix de l'électricité ?

## Tarif électricité France pour particuliers TTC février 2013

| Puissance souscrite (kVA) | Réglage disjoncteur (A) | Abonnement annuel TTC (euros) | Heures Pleines TTC pour 1 kWh (euros) | Heures Creuses TTC pour 1 kWh (euros) |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 6                         | 30                      | 95,97                         | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 9                         | 45                      | 115,24                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 12                        | 60                      | 195,30                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 15                        | 75                      | 229,77                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 18                        | 90                      | 262,08                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 24                        | 40                      | 546,20                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 30                        | 50                      | 672,55                        | 0,1391                                | 0,0964                                |
| 36                        | 60                      | 777,63                        | 0,1391                                | 0,0964                                |

## Retail (end-user) energy prices for households.

Two consumption levels are identified. [Research methodology](#).

Price data mentioned may not reflect the latest insights found in the [commercial editions](#).

Reference month: **November 2012**.

Historical price data going back to the year 2000, visit [EU Energy History](#).

**Consumption: 3.5 MWh/year**

| Country    | € per kWh Electricity | Country        | € per kWh Electricity |
|------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Austria    | 0.20103               | Latvia         | 0.13099               |
| Belgium    | 0.23006               | Lithuania      | 0.12730               |
| Bulgaria   | 0.08406               | Luxembourg     | 0.16800               |
| Cyprus     | 0.23274               | Malta          | 0.17144               |
| Czech Rep. | 0.14870               | Netherlands    | 0.21272               |
| Denmark    | 0.30217               | Poland         | 0.14478               |
| Estonia    | 0.10615               | Portugal       | 0.18605               |
| Finland    | 0.15614               | Romania        | 0.10721               |
| France     | 0.14269               | Slovakia       | 0.17265               |
| Germany    | 0.25983               | Slovenia       | 0.15399               |
| Greece     | 0.13294               | Spain          | 0.19488               |
| Hungary    | 0.16157               | Sweden         | 0.20092               |
| Ireland    | 0.20659               | United Kingdom | 0.15470               |
| Italy      | 0.21707               |                |                       |

### Notes:

- Consumption band is  $\pm 25\%$
- Amount is in euro (€) per kiloWatt-hour (kWh).
- Price data for non-eurozone countries are in euro. The average exchange rate valid for the referenced month is applied.
- Prices include: market price; transmission through main and local networks; administrative charges and all taxes.

# Différence entre énergie et microélectronique

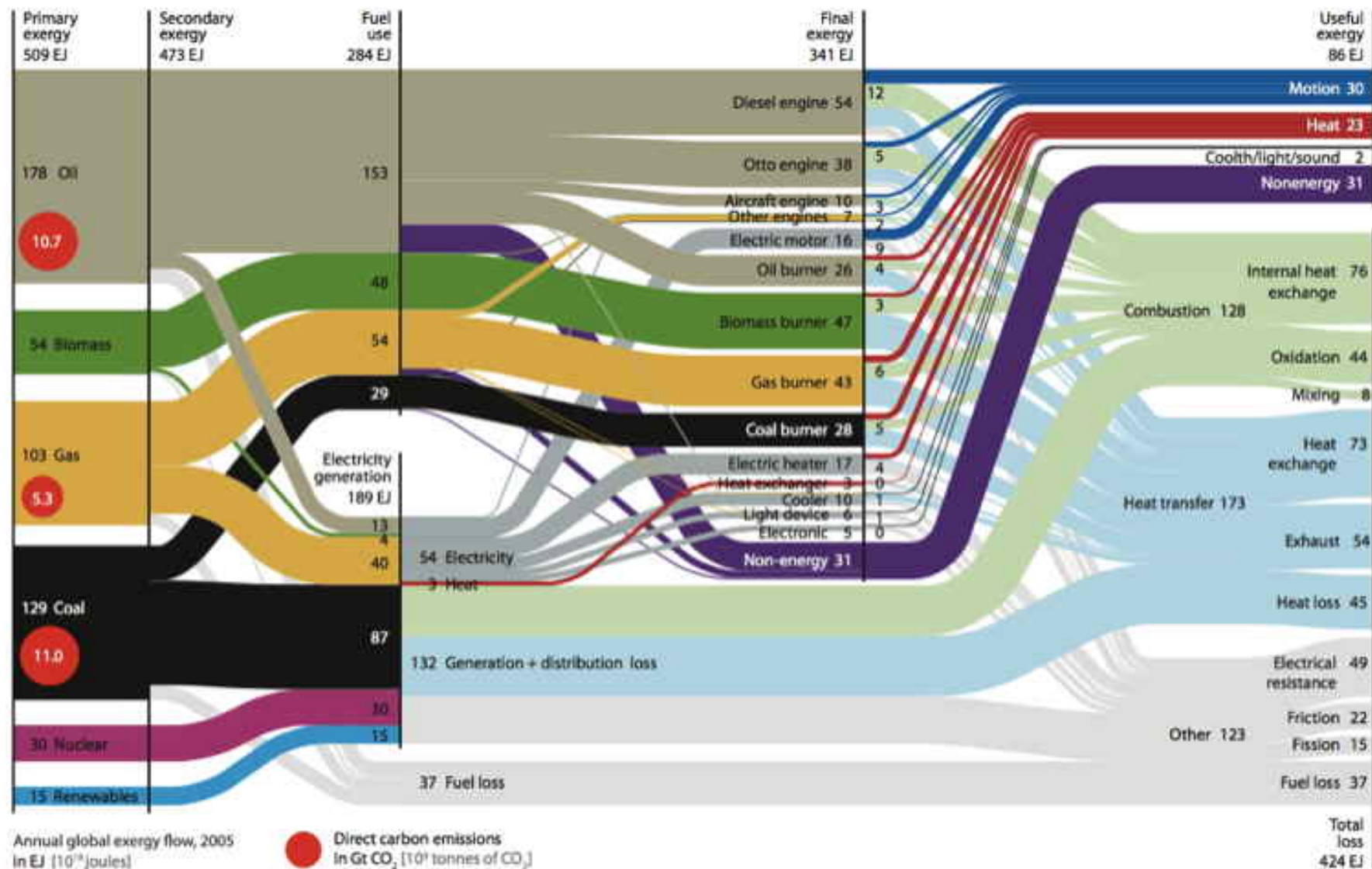
Pourquoi le prix des voitures, des produits courants, de l'énergie n'ont ils pas baissé comme ceux de l'informatique?

On sait numériser, stocker, manipuler, communiquer très efficacement l'information représentée par des paquets d'électrons ou de photons  
10 000 électrons par "bit" élémentaire. Un transistor, même petit, peut manipuler cela.  
1 livre = 50 000 000 bits en moyenne  
Il y a 20 000 000 de livres, soit  $10^{15}$  bits nécessitant  $10^{19}$  électrons, 1 Ampère en 1 s!  
Une fibre optique moderne transmet  $10^{13}$  bits par seconde.  
Il faut donc 100 s pour transmettre TOUS les livres!

La diminution des coûts et le progrès des performances en microélectronique sont dus à la miniaturisation: on est passés de 1000 transistors par  $\text{cm}^2$  pour les premiers circuits intégrés à 100 milliards. Le coût par  $\text{cm}^2$  a peu changé.  
Il n'y a pas de miniaturisation possible en énergie: ce qui compte c'est la densité d'énergie, qui ne change pas, au contraire de la densité de transistors des circuits intégrés.  
Si on utilisait les principes et les outils de la microélectronique, on ferait peut être des voitures beaucoup moins chères, mais on ne rentrerait pas dedans ....

# Les flux d'énergie, de la production à l'utilisation finale (en exajoules, $10^{18}$ J)

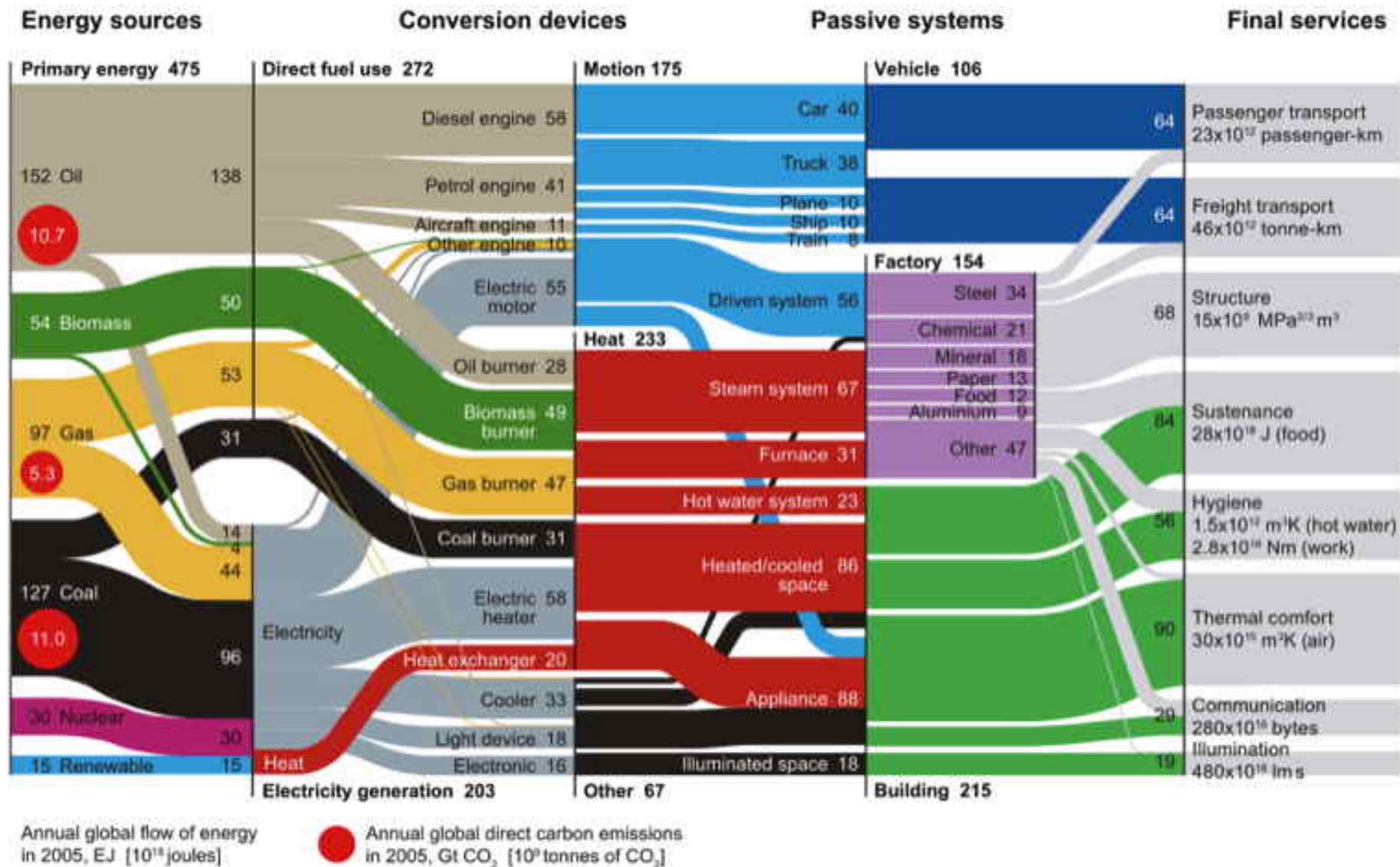
Noter la faiblesse de l'énergie "utile" (86EJ) par rapport à l'énergie primaire (509EJ)



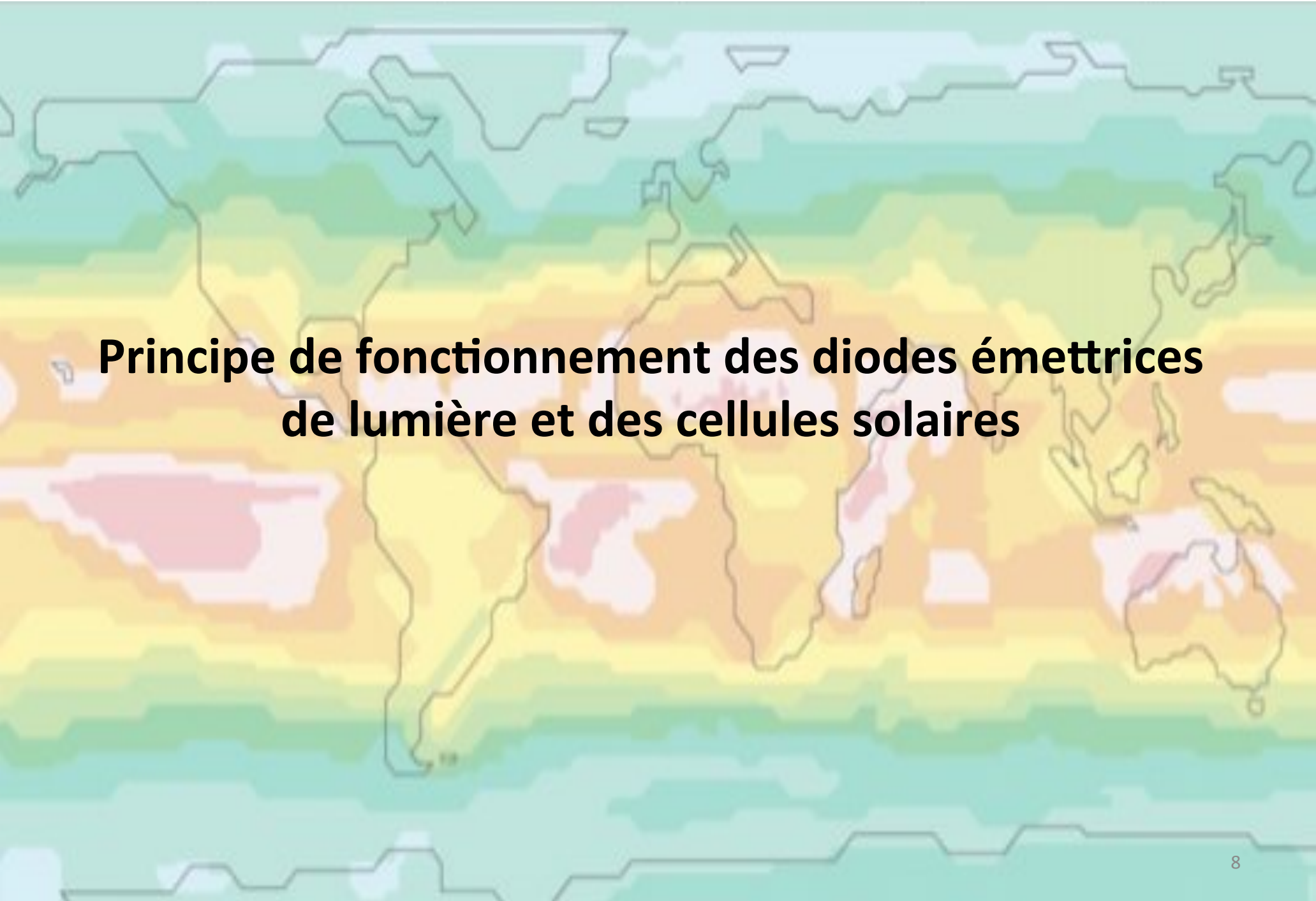
**Conversion efficiency:** the annual global flow of exergy is traced from primary sources (left) to useful exergy (top-right), focusing on the efficiency of conversion devices along the flowpath, and the engineering loss mechanisms (bottom-right).



# Flux d'énergie en regard des utilisations



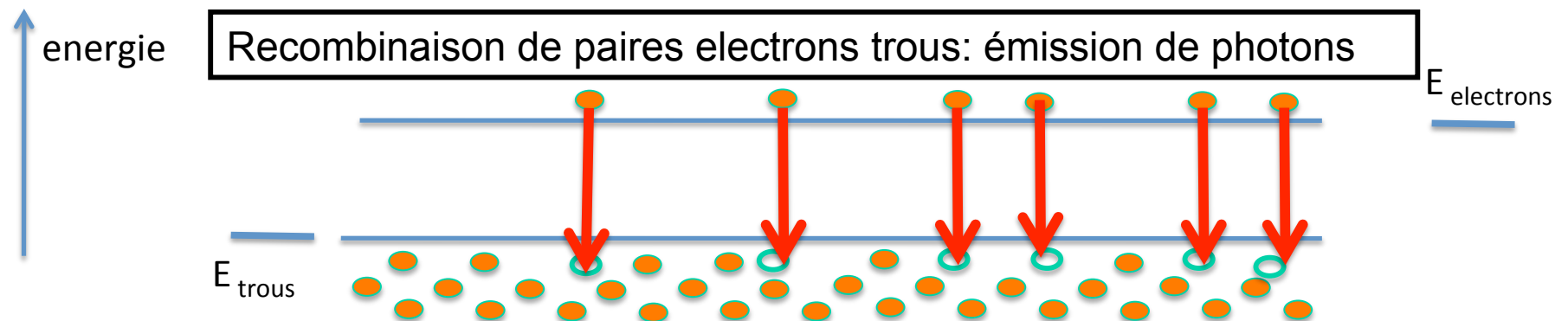
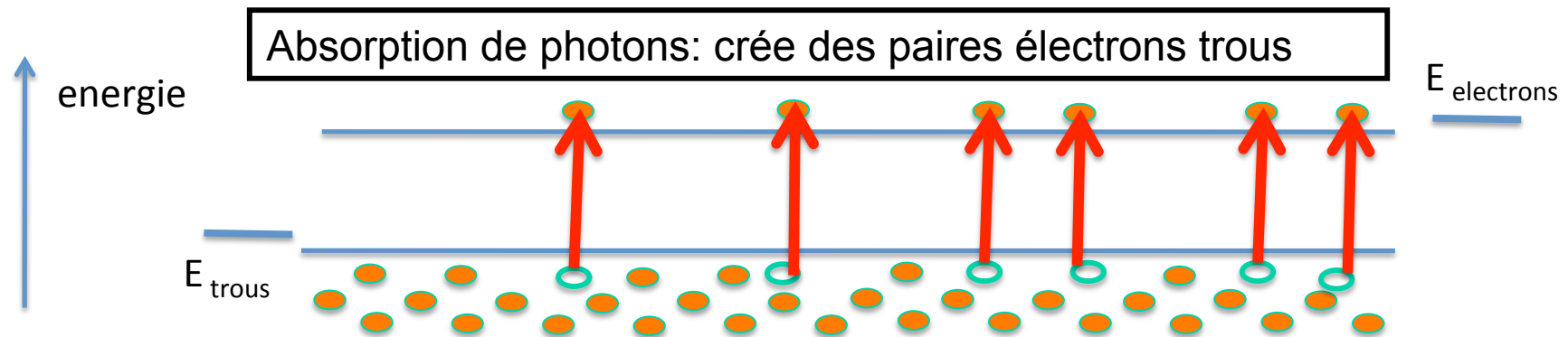
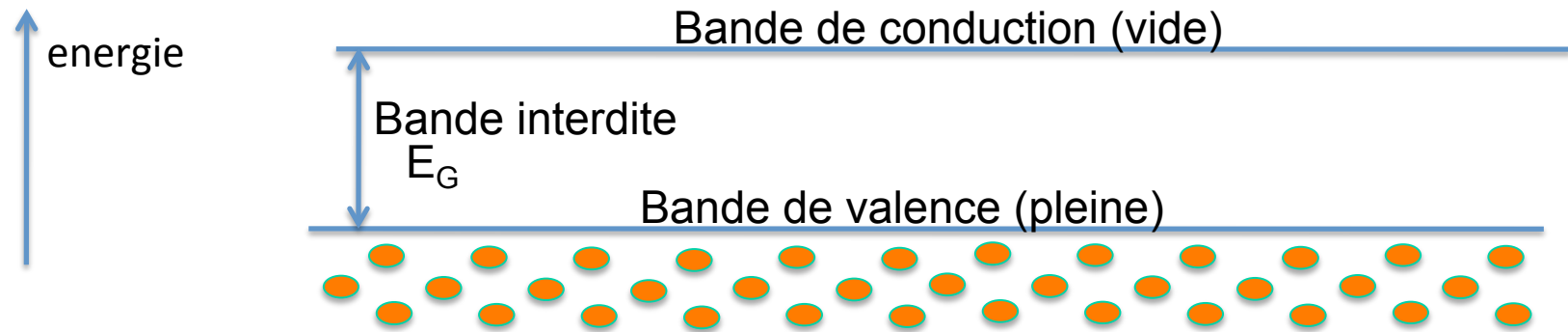
Voir <http://www.lcmp.eng.cam.ac.uk/wp-content/uploads/100110-LCMP-web.pdf> et autres ressources sur le site

A world map with a color-coded heatmap representing solar irradiance. The colors range from light blue (low irradiance) to yellow and orange (high irradiance), with the highest values concentrated in the tropical regions between the equator and the Tropic of Cancer. The map includes black outlines for the continents.

## **Principe de fonctionnement des diodes émettrices de lumière et des cellules solaires**



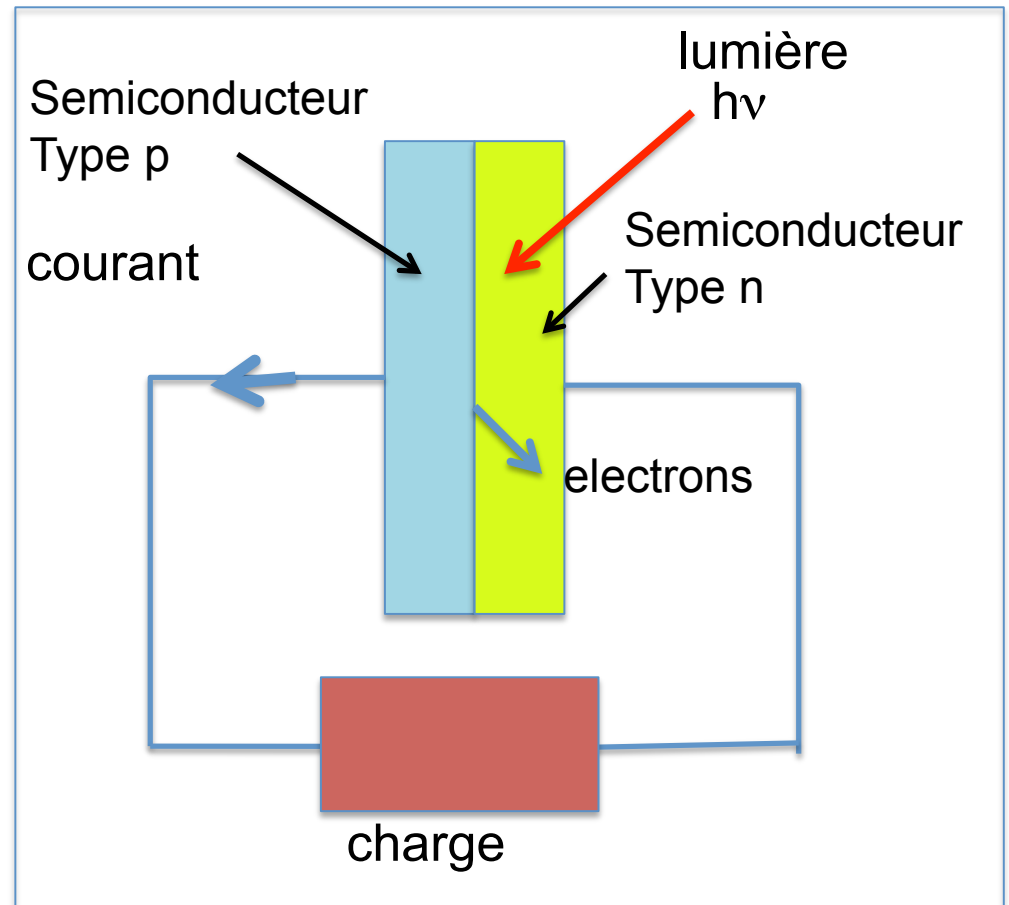
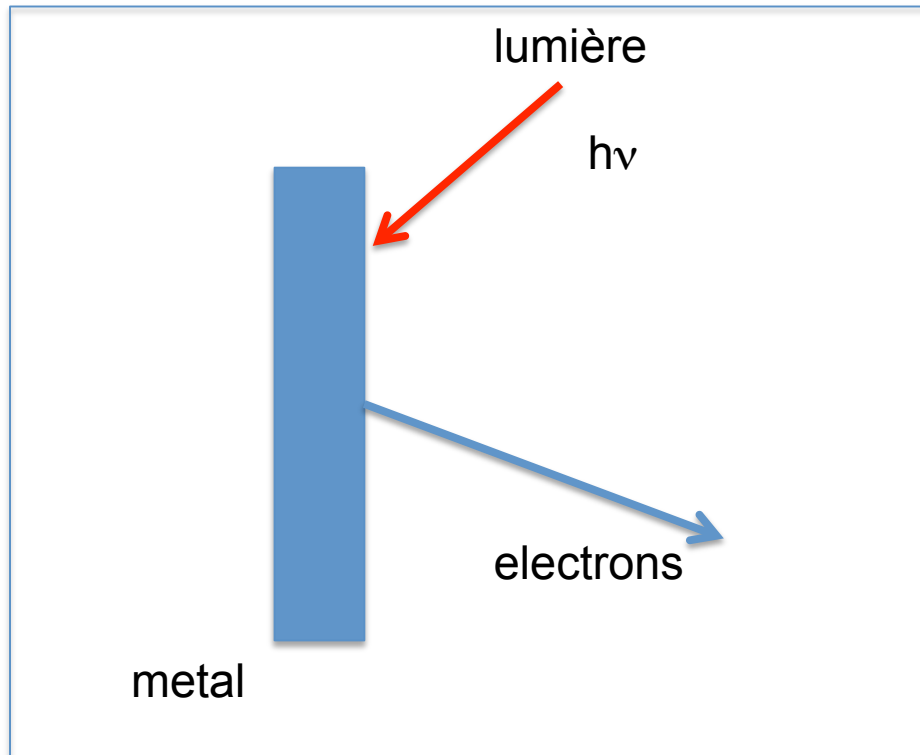
# Propriétés intrinsèques des semiconducteurs: absorption et émission de lumière



La cellule solaire a un fonctionnement proche d'une cellule photoélectrique, les électrons sont générés dans la matière au lieu d'être émis dans le vide

## Cellule solaire

### Effet photoélectrique

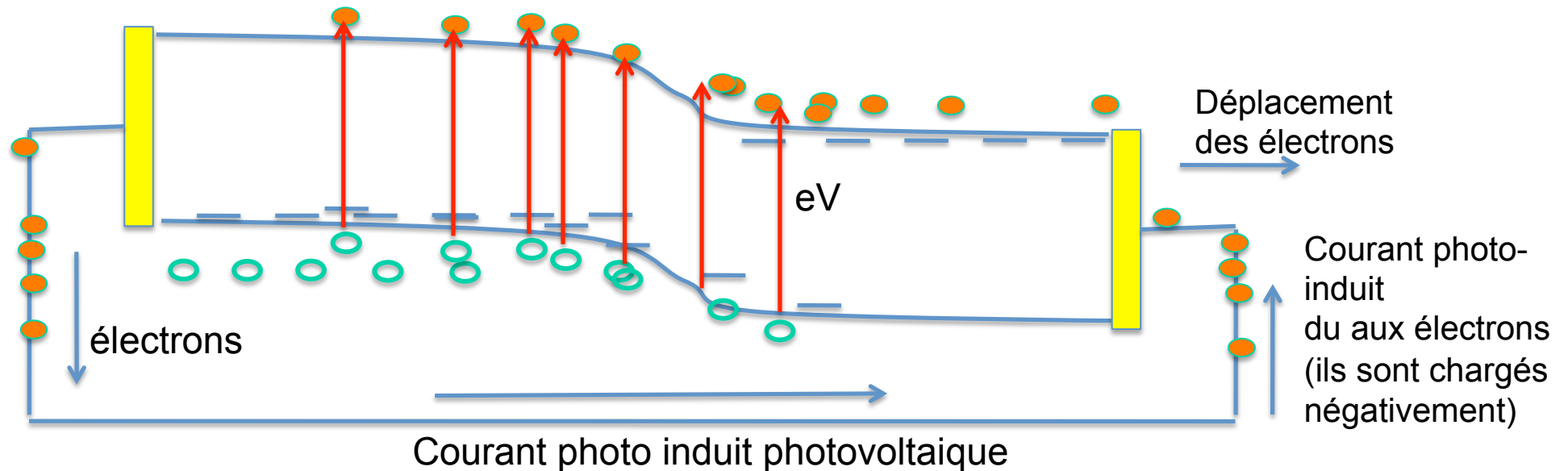


Le courant doit passer dans un sens =>  
Il faut donc une asymétrie de la structure

# Principe de fonctionnement des cellules solaires

Effet photovoltaïque: on génère du courant dans un semiconducteur sous illumination

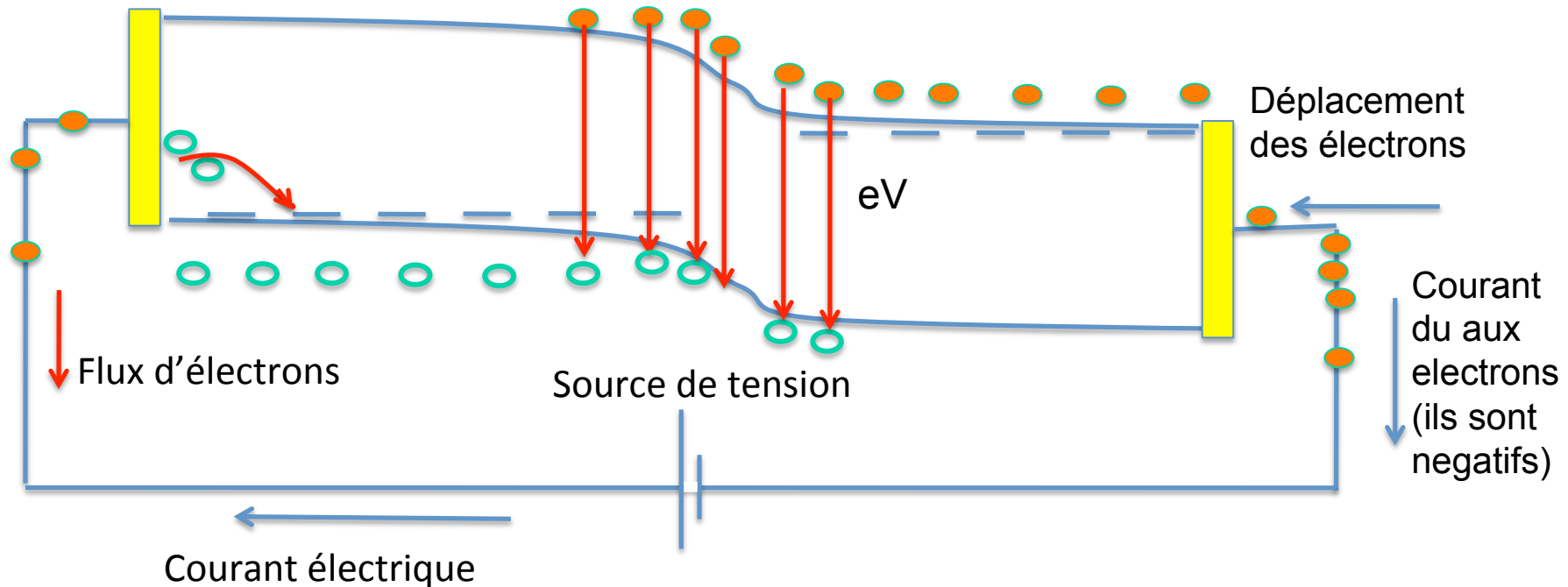
Les charges  $+$ (trous) et  $-$  (électrons) du **courant photo induit** diminuent la différence de charges entre les parties n et p créé par le transfert dans la jonction p-n au repos. Il apparaît une différence de potentiel (on "dope" les deux cotés des la cellule avec des atomes d'impuretés (donneurs ou accepteurs) créant localement des électrons ou de trous. C'est cette asymétrie qui va créer un courant sous irradiation: si le matériau était symétrique, il ne saurait y avoir une direction privilégiée pour les charges.



La tension, la ddp (le potentiel électrique aux borne de la cellule photovoltaïque)) est approximativement l'énergie de la bande interdite divisée par la charge (eV étant l'énergie acquise par un électron transféré de la bande de valence à la bande de conduction et inversement l'énergie émise sous forme de photon par un électron retombant dans un trou).

# Principe de fonctionnement des DELs

Les charges +(trous) et – (électrons) sont injectées entre les parties n et p d'une jonction où elles se recombinent en cédant leur énergie sous forme de photons dont l'énergie est celle de la bande interdite caractéristique du semiconducteur.



L'énergie des photons émis est à peu près l'énergie de la bande interdite

# Pourquoi parler ensembles des cellules solaires et diodes émettrices de lumière?

Deux manières différentes de diminuer l'empreinte carbone

- en diminuant la consommation pour un usage gourmand en électricité, l'éclairage
- en produisant de l'électricité par conversion de l'énergie solaire

Elles ont un socle commun de technologies, étant toutes deux à base de semiconducteurs

Elles répondent au **problème du coût** (retour sur investissement) très différemment, à partir de la **très grande différence de densité d'énergie** dans les deux types de composants

Rappel sur le message central de l'analyse de David MacKay dans son livre

**Sustainable Energy – without the hot air** disponible gratuitement à

<http://www.withouthotair.com> ou en Français [http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha\\_20111001\\_lowres.pdf](http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha_20111001_lowres.pdf)

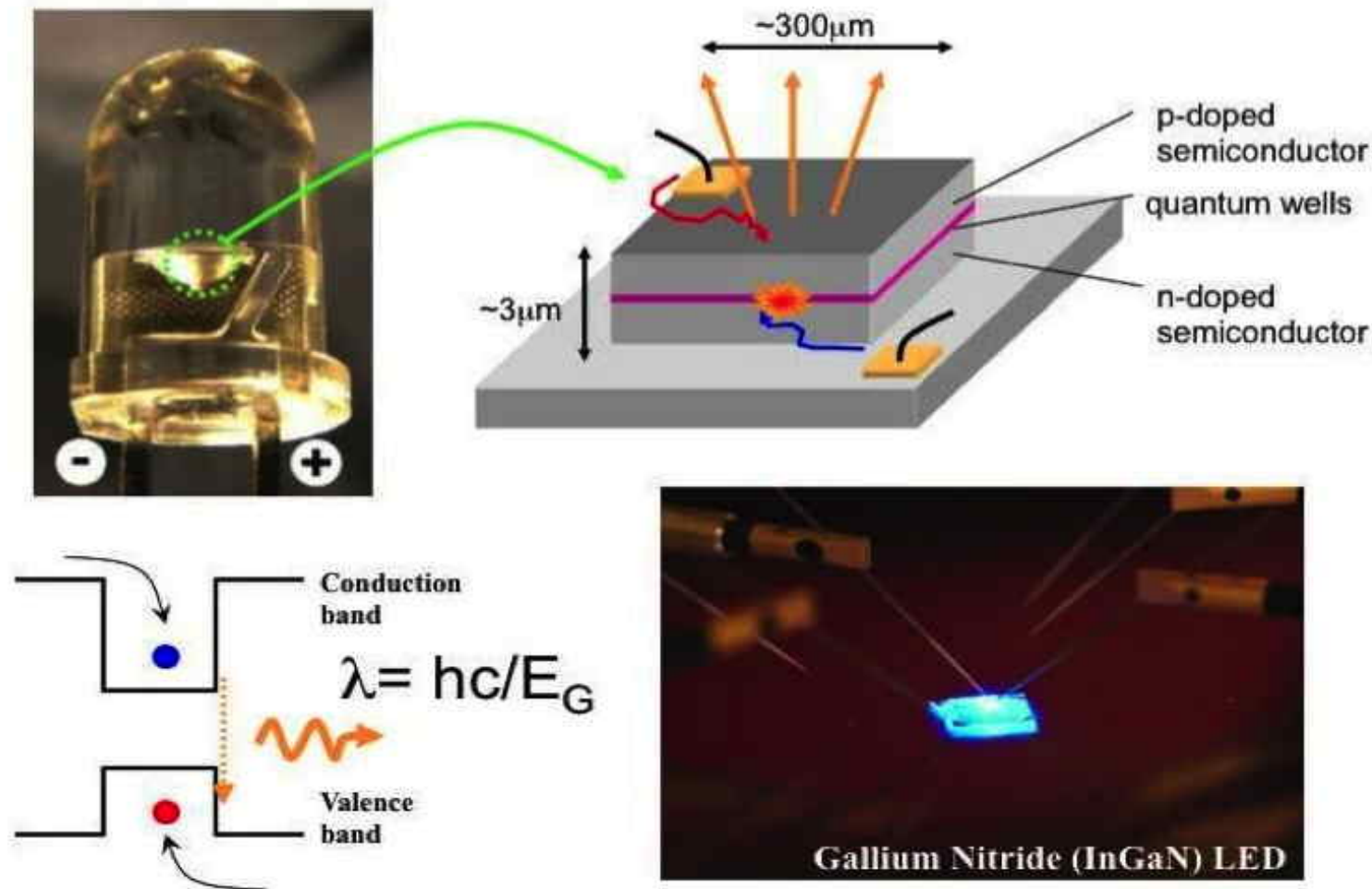
Les énergies renouvelables sont à faible densité, donc nécessitent de grandes surfaces, ce qui implique un coût important. Ceci est bien mis en évidence par la comparaison de l'efficacité des investissements en DELs ou en photovoltaïque à partir du même matériau, le nitrure de gallium.



A satellite image of the Earth at night, showing the continents of North America, South America, Europe, Africa, Asia, and Australia. The landmasses are covered with a dense network of yellow and white lights, representing city lights and urban areas. The oceans are dark blue. The text "Diodes émettrices de lumière" is overlaid in the center of the image.

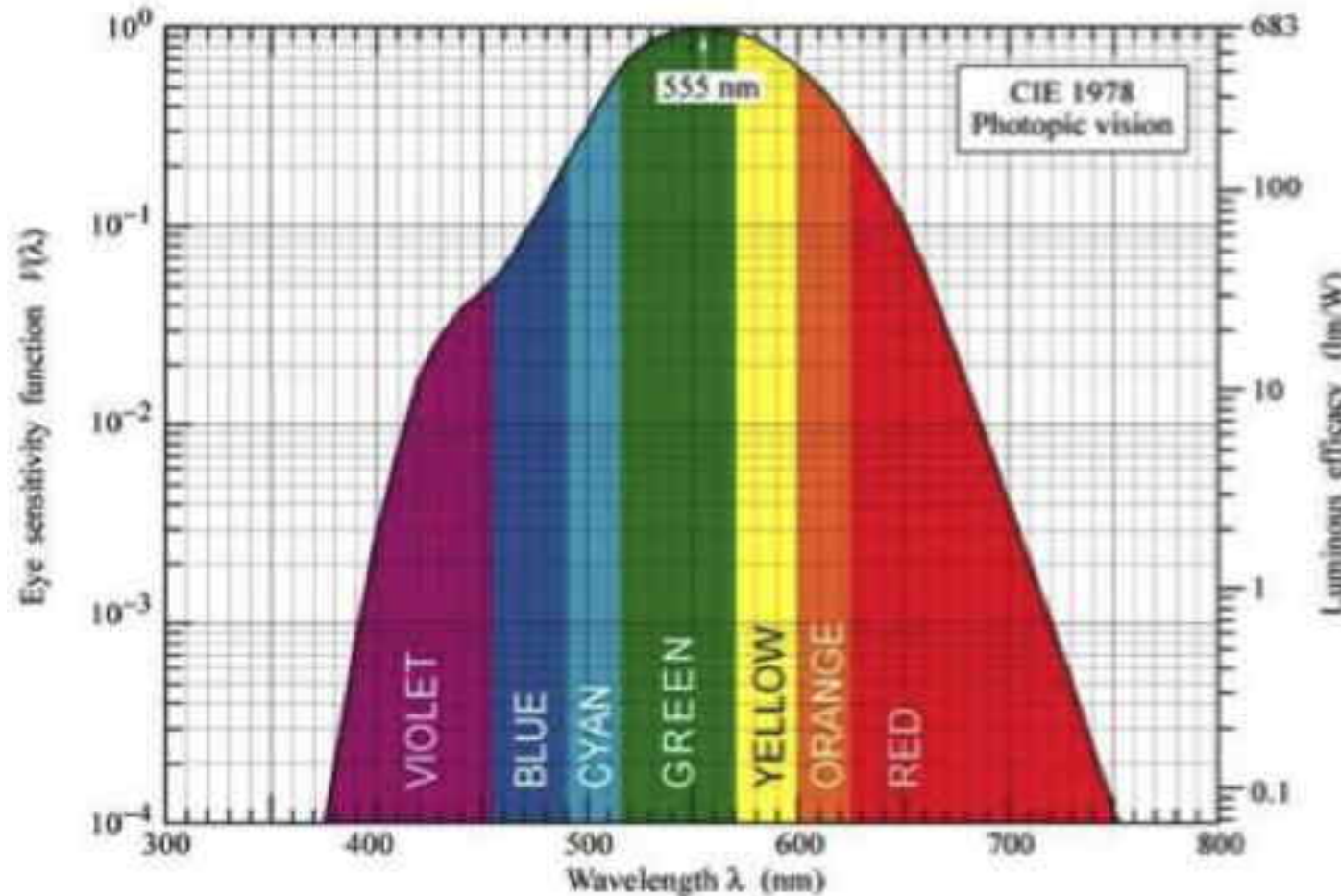
# Diodes émettrices de lumière

# Diodes émettrices de lumières DELs



On injecte des charges dans un morceau de semiconducteur, une "jonction" p-n. En fait, pour améliorer le rendement de conversion électrique-optique, les charges sont injectées dans un ou plusieurs "puits quantiques" (quantum wells), couches ultrafines de semiconducteurs dont la bande interdite des électrons est plus faible que celle du matériau environnant. Les électrons sont alors confinés dans ces couches menant à une meilleure efficacité d'émission.

# L'efficacité lumineuse d'un rayonnement: les lumens per watt: la réponse spectrale de l'oeil



Vision diurne par les  
cones de la rétine  
La réponse scotopique

Au maximum:  
683lm/W @555nm

Fig. 16.7. Eye sensitivity function,  $V(\lambda)$ , (left ordinate) and luminous efficacy, measured in lumens per Watt of optical power (right ordinate).  $V(\lambda)$  is greatest at 555 nm. Also given is a polynomial approximation for  $V(\lambda)$  (after 1978 CIE data).

Voir l'excellent slideshow sur les DELs de Fred Schubert à  
[www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting.../LED-slide-show.pdf](http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting.../LED-slide-show.pdf)

# Définition des unités d'éclairage

- Les unités d'éclairage expriment l'intensité perçue par l'oeil
- L'unité de puissance lumineuse est le lumen (lm)\*
- Une source verte au maximum de sensibilité de l'oeil délivre 683 lumen par watt d'énergie
- Pour décrire l'efficacité des lampes d'éclairage, on utilise les LUMENS / WATT (puissance lumineuse de la lampe/ énergie électrique fournie)
- Un paramètre important: le rendu des couleurs (CRI, color rendering index: 100 parfait)
- Des points de référence:
  - Lampes à incandescence: 15 lm/W, CRI proche de 100
  - Lampes fluorescentes compactes: 50 à 60 lm/W, CRI 70-85
  - lampes à DELs: aujourd'hui 80lm/W, demain (3 à 5 ans) 150 à 200lm/W, CRI 70-95

\* Le candela (cd) est une unité de flux lumineux:  $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/stéradian}$

L'efficacité lumineuse d'une source pour l'éclairage:  
les lumens per watt pour un spectre de source donné

**objectif**

**200lm/W**

**50%**

**400lm/W**

Efficacité  
lumineuse d'une  
source  
[lm/W]

Efficacité  
radiative  
EQExterne

Efficacité  
lumineuse de  
l'émission  
[lm/W]

$$\frac{\text{Flux lumineux [lm]}}{\text{Puissance électrique [W]}}$$

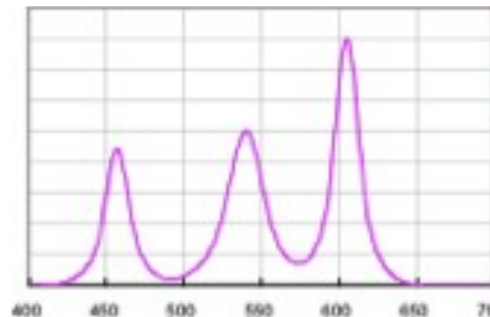
$$\frac{\text{Puissance optique [W]}}{\text{Puissance électrique [W]}}$$

$$\frac{\text{Flux lumineux [lm]}}{\text{Puissance optique [W]}}$$

Efficacité interne x  
efficacité d'extraction

Efficacité lumineuse de la  
source

Efficacité lumineuse de l'émission  
**maximum** pour lumière  $\approx$  blanche [lm/W]  
**411 lm/W**



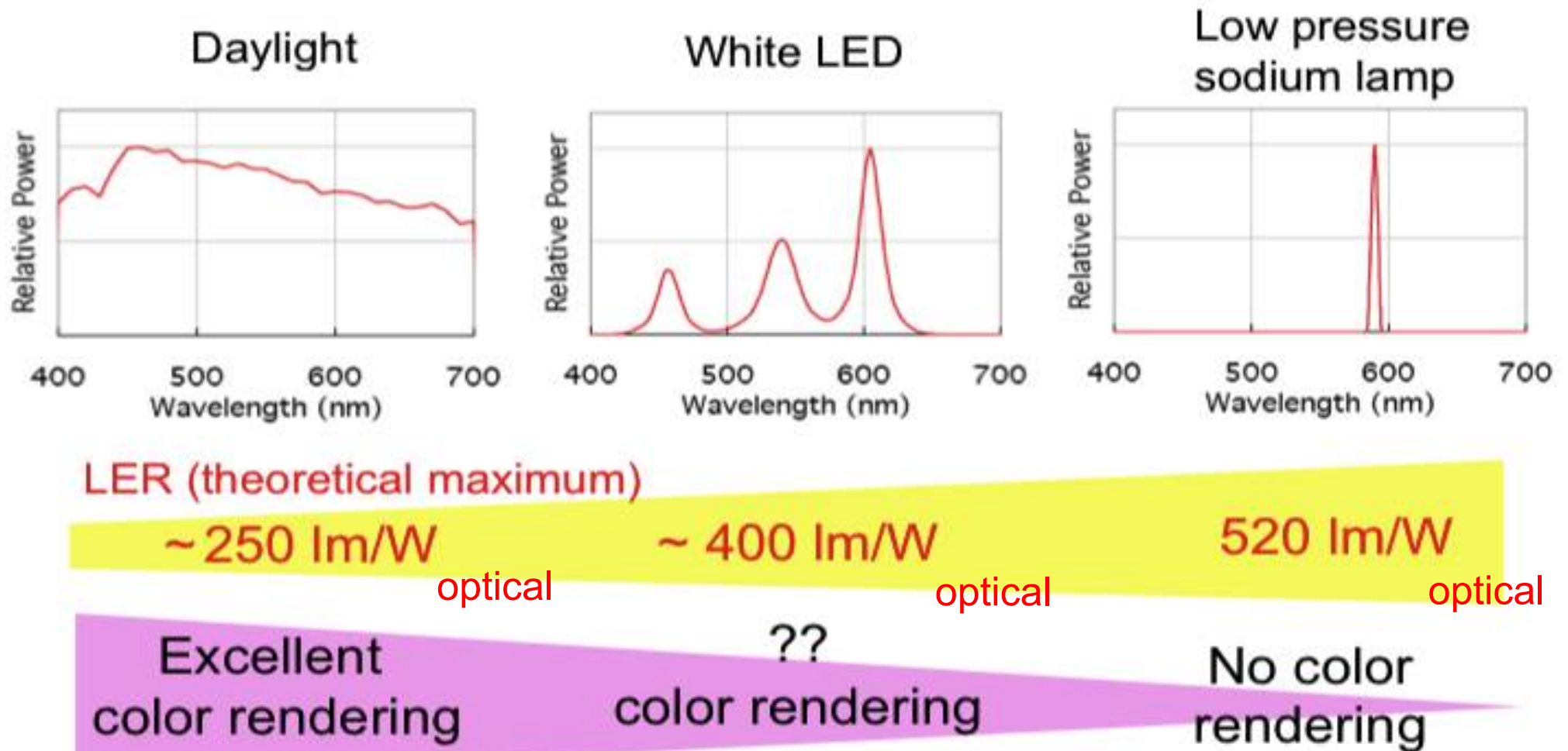
Efficacité maximum d'une  
source ayant une efficacité  
radiative de 100%

Déterminée par le spectre  
seul de la source

Une lampe à sodium a une très bonne efficacité radiative, une très bonne efficacité lumineuse, mais un très mauvais rendu des couleurs



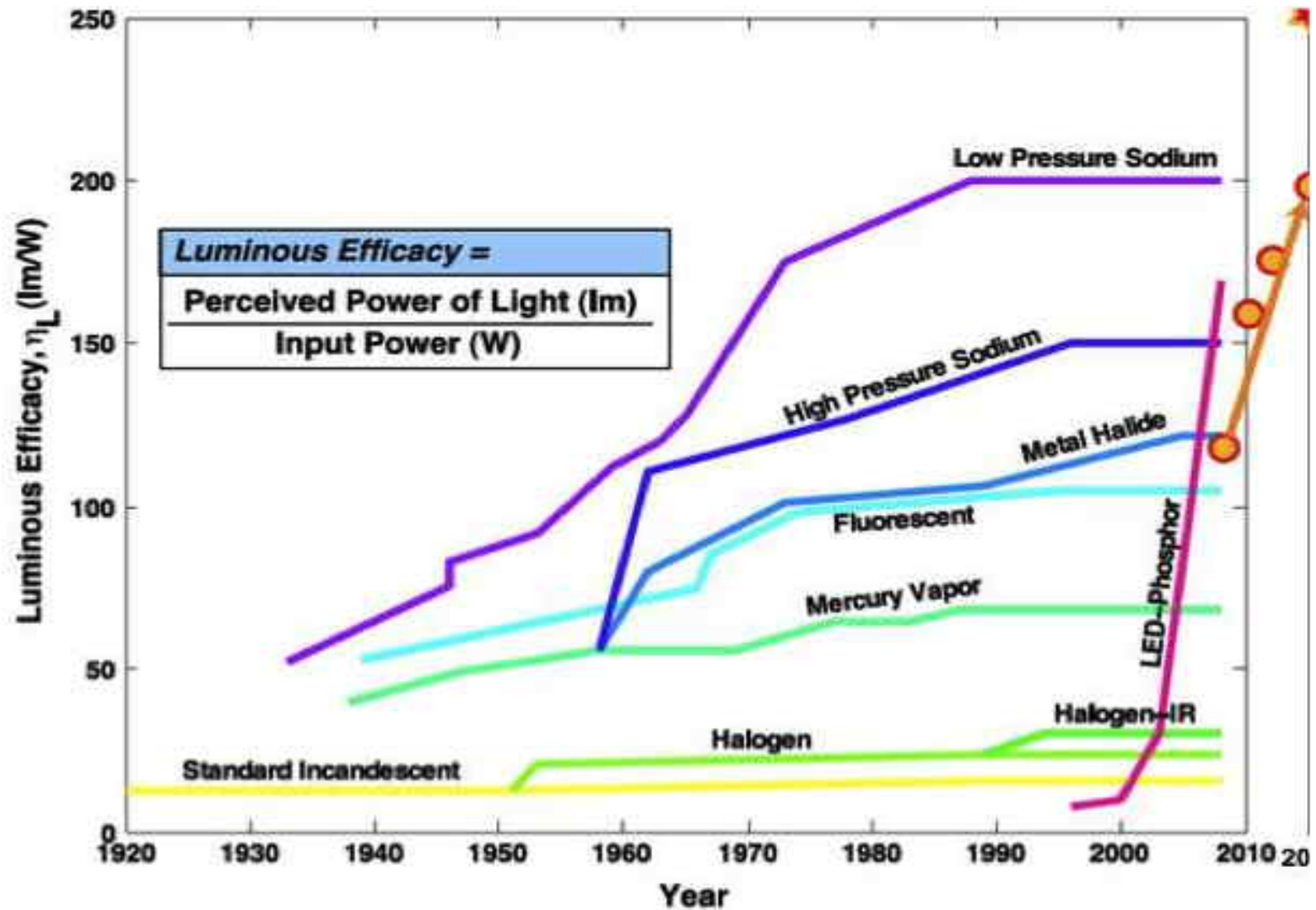
L'efficacité lumineuse d'une source pour l'éclairage (lm/W) depend de la qualité du rendu de couleur (color rendering)



*Luminous efficacy of radiation depends on wavelength blend  
Generally, warm light and high color rendering index (CRI) less efficient*



# Comparaison des différentes sources de lumière



## Chiffres sur l'éclairage

- L'éclairage consomme ~7.5% de l'énergie domestique, de 15 à 22% de toute l'électricité
- Une lampe incandescente dure 1000 – 2000 heures (2 à 3 ans) and coûte ~< 1 €
- Une lampe incandescente de 75 Watt coûte environ ~5 € de consommation d'électricité par an @~0.10 € par kWh (1,8h/jour) (657hx75Wx0.1)
- Les lampes fluorescentes compactes donnent une puissance lumineuse comparable à un coût moindre (même nombre de lumens @ 20 W que les incandescentes à 100W)
- Le coût d'achat plus élevé (2 à 4 €) des lampes fluorescentes compactes peut être remboursé sur leur longévité (durée 10 000 h, paraît-il !), et surtout leur faible consommation qui à elle seule rembourse le surcoût en 1 an(- 3,5-4€)
- Les lampes à diodes electro lumineuses (DELs) durent encore plus longtemps (50,000 heures pour les DELs blanches)

## Prix d'achat et consommation d'énergie en éclairage des DELs

- Le prix des lampes à DELs vont de ~ 10 € à plus de 100 €, suivant le type et la puissance de sortie
  - La puissance consommée est de 1 Watt à 15 Watts
  - Pour une DEL de 10 W (de rendement 100 lm/W), équivalente à une lampe de 75W délivrant 1000 lm, la consommation électrique annuelle est de  $657\text{h} \times 10\text{W} = 6,57 \text{ kWh}$ , soit un coût de 0,657 € et l'économie de 4,3€/an\* ( $657 \times 75\text{W} \times 0,1 = 4,927\text{€} - 0,657$ )
  - Sur 10 ans, on économise 5 lampes (5€) et 43 € d'électricité. Il faut que le prix soit inférieur à 48 € pour être amorti en 10ans.\*\*
- Noter la grande sensibilité aux données du calcul: on a pris des hypothèse basses pour l'utilisation **(1,8h/J)**, , une électricité à seulement 0,1 €/kWh TTC
- \* \* une utilisation de 3h/J augmente le coût d'achat et d'utilisation des lampes à incandescence à 82 € sur 10 ans). L'électricité à 23c (Allemagne) augmente le coût d'incandescence à 201 € pour 3h/jour.

# Réchauffement climatique /économies d'énergie par lesDELS



- >l'éclairage consomme 18-22% toute l'électricité
- >si une lampe à DELs de 150 lm/Watt était développée et adoptée, aux Etats Unis seuls:
  - on supprimerait le besoin de 133 centrales!\*
  - on éliminerait l'émission de 258 million de tonnes de Carbone\*

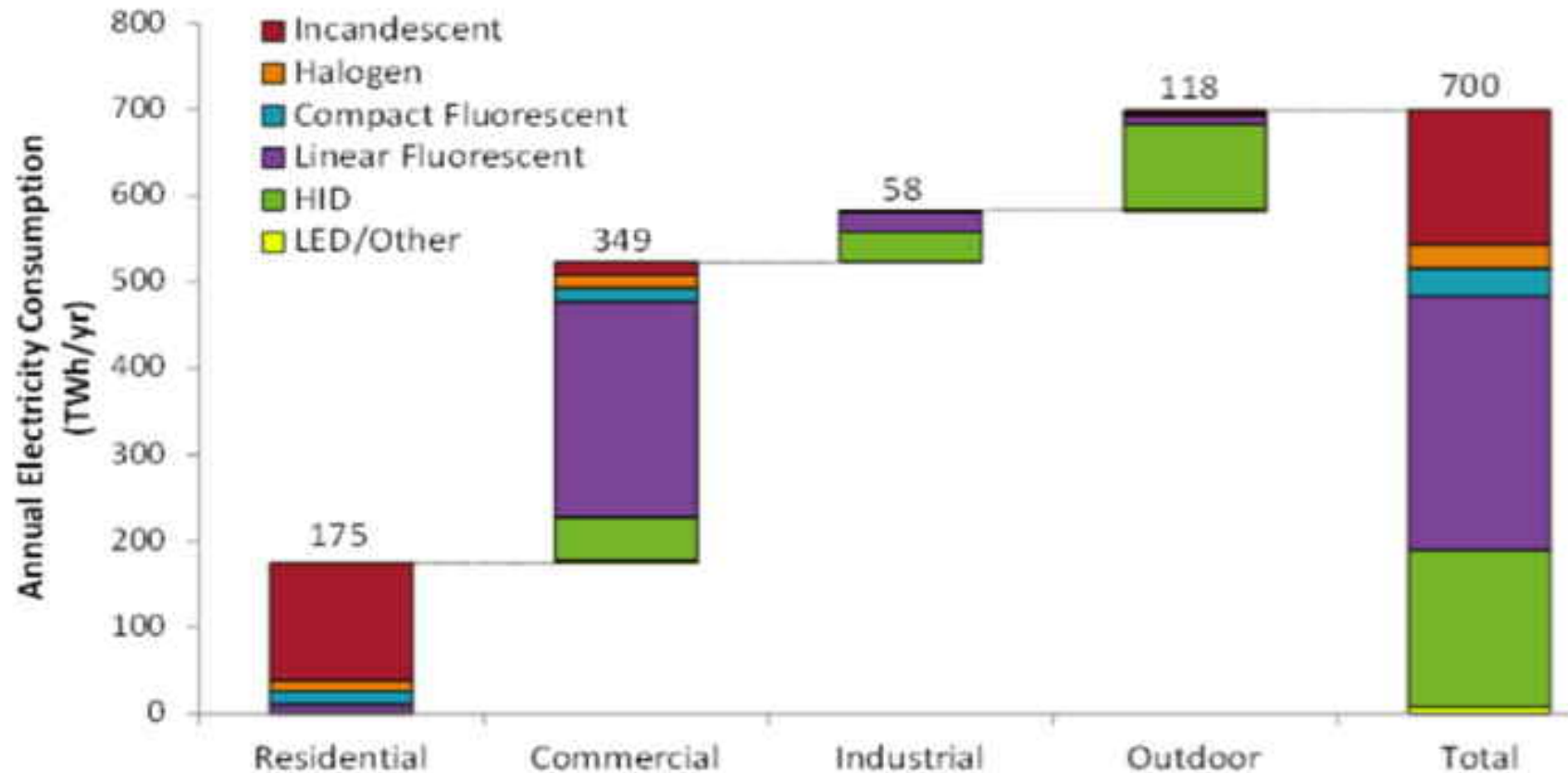
\* "The Promise of Solid State Lighting" OIDA Report , 2001, [http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/oida\\_led-oled\\_rpt.pdf](http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/oida_led-oled_rpt.pdf)

\* "Energy Savings Potential of SSL" [http://www.eere.energy.gov/buildings/info/documents/pdfs/ssl\\_final\\_report3.pdf](http://www.eere.energy.gov/buildings/info/documents/pdfs/ssl_final_report3.pdf)

Les DELs: Un impact potentiel important, si on remplace toutes les sources lumineuses, y compris les lampes basse consommation qui produisent l'essentiel des lumens

Le cas des USA

Rappel: 10 TWh = 1 centrale 1 3 GW



US energy consumption per sector according to lamp type. In terms of lumens produced, the share of fluorescent and HID lamps is still greater due to their high efficiency

From the US DOE, 2012 Solid-State Lighting Research and Development Multi Year Program Plan<sup>1</sup>

Voir à [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_mypp2012\\_web.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2012_web.pdf)



## Japanese conversion to LED lights would slash energy usage



| <b>LEDs Magazine<br/>June 2011</b>            | <b>Number of<br/>lights</b> | <b>Annual energy<br/>consumption<br/>(billion kWh)<br/>Incandescent &amp;<br/>fluorescent</b> | <b>Annual energy<br/>consumption<br/>(billion kWh)<br/>LEDs only</b> | <b>Savings<br/>(billion kWh)</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Households</b>                             | 870 million                 | 38.2                                                                                          | 14.1                                                                 | 24.1                             |
| <b>Offices &amp;<br/>commercial buildings</b> | 580 million                 | 89.1                                                                                          | 34.6                                                                 | 54.5                             |
| <b>Manufacturing<br/>sector</b>               | 160 million                 | 23.3                                                                                          | 9.7                                                                  | 13.6                             |
| <b>Total</b>                                  | 1.6 billion                 | 150.6                                                                                         | 58.4                                                                 | 92.2                             |

If all incandescent and fluos are replaced, cost is \$ 194 billions. Replacing all the incandescent lights with LED lamps is more feasible, since this would have an initial cost of 850 billion yen (\$10.5 billion), but would save 27.3 billion kWh annually, worth the output of four nuclear reactors, according to the institute of energy economics (Japan).

Voir à <http://ledsmagazine.com/news/8/6/24>

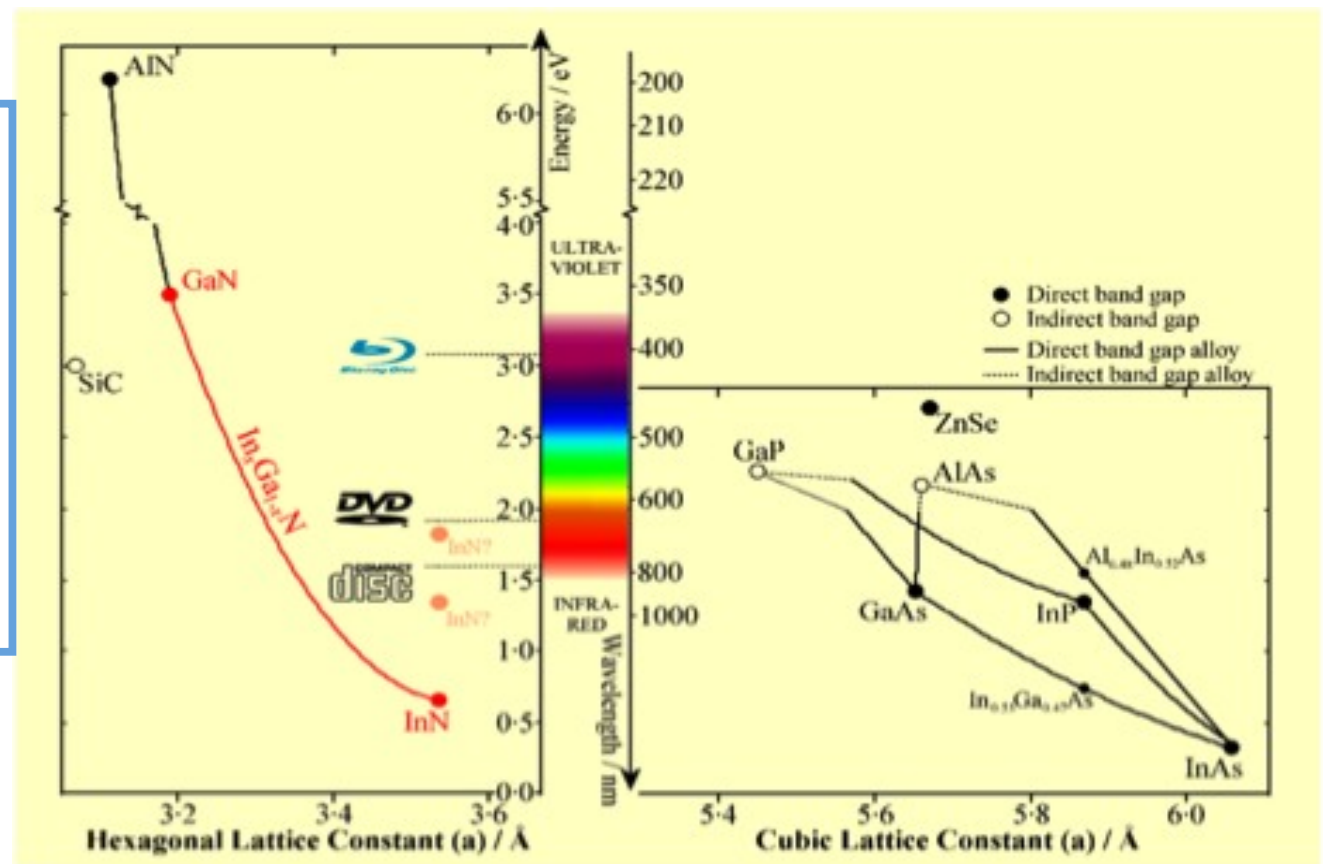
700 million lamps@ 60 W  $\approx$  42 GW; 2hours/day=720 hr/year ----> 30 TWh  
1 plant @ 1 GW x 8000 h/year= 8 TWh ----> 27 TWh= 3.4 plants  
700 million lamps@ 15\$/lamp = 10.5 \$ B



# Les matériaux semiconducteurs pour les DELs

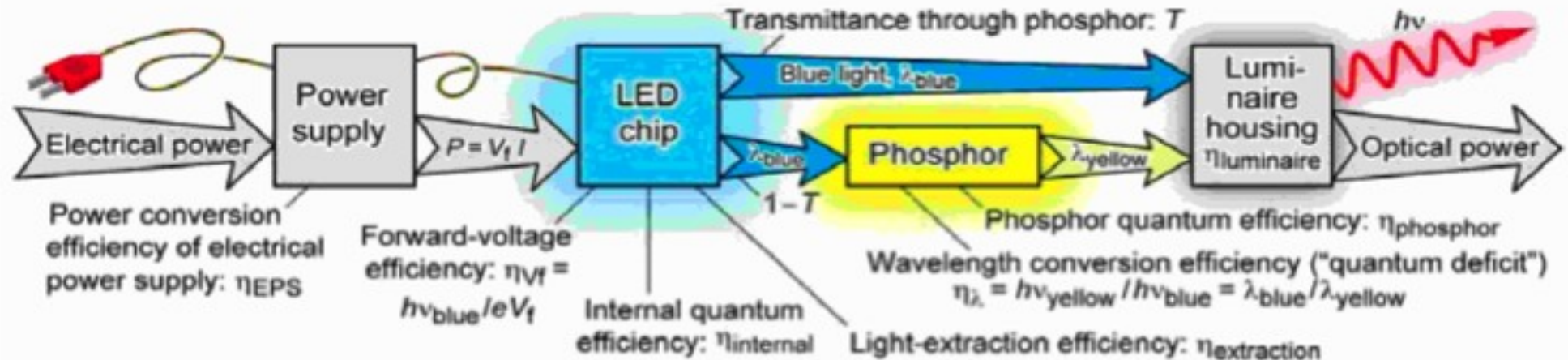
Variations de la bande interdite et de la maille cristalline en fonction de la composition des principaux alliages semiconducteurs utilisés dans les DELs.

A première vue, les alliages InGaN couvrent tout le spectre, mais ce au prix d'une variation de la maille cristalline de plus de 10% qui rend en fait la croissance de matériau de bonne qualité seulement possible pour une fraction des compositions, entre 0 et 20% d'indium.



- Le système d'alliages à base de (Al,Ga)InP couvre du rouge (~650 nm) au jaune (~580 nm)
- Le système d'alliages à base de (In,Ga)N couvre du proche UV (~ 380 nm) au vert (~550 nm)

# L'efficacité de la conversion électrique/lumière de nombreuses composantes



Kim and Schubert, *Opt. Express* 16, 21835 (2008)

## La mesure de la performance de conversion

**Efficacité à la prise**/Wall plug Efficiency (WPE) =  $P_{\text{optical out}} / P_{\text{electrical in}}$

**Efficacité quantique externe** /external quantum efficiency (EQE) = flux of photons sortant/ flux de paires électrons-trous entrantes

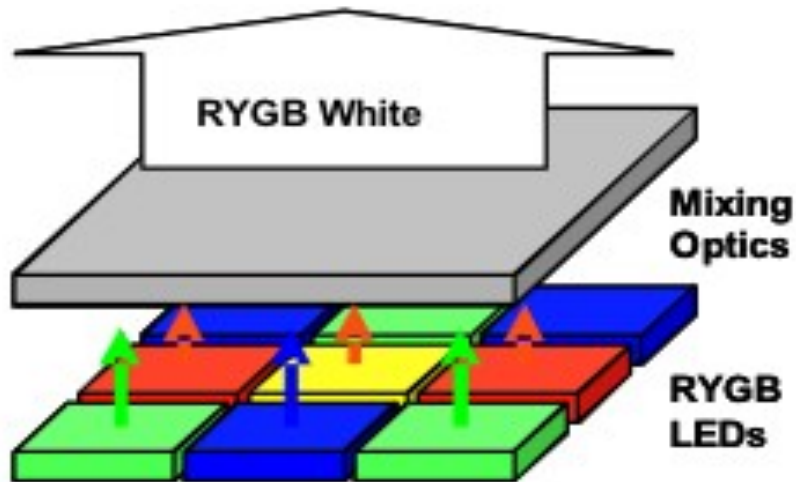
**Efficacité quantique interne** /internal quantum efficiency (IQE) = flux of photons générés dans la DEL/ flux de paires électrons-trous entrantes

**Efficacité d'extraction** = flux of photons générés dans la DEL/flux of photons sortant

EQE = Efficacité quantique interne x efficacité d'extraction =  $\eta_{IQE} * \eta_{\text{extraction}}$

WPE =  $\eta_{\text{électrique}}$  x EQE;  $\eta_{\text{électrique}}$ : rendement électrique: puissance des paires electron-trou/ $P_{\text{électrique in}}$ ; pertes dues à effet Joule par pertes résistives en particulier

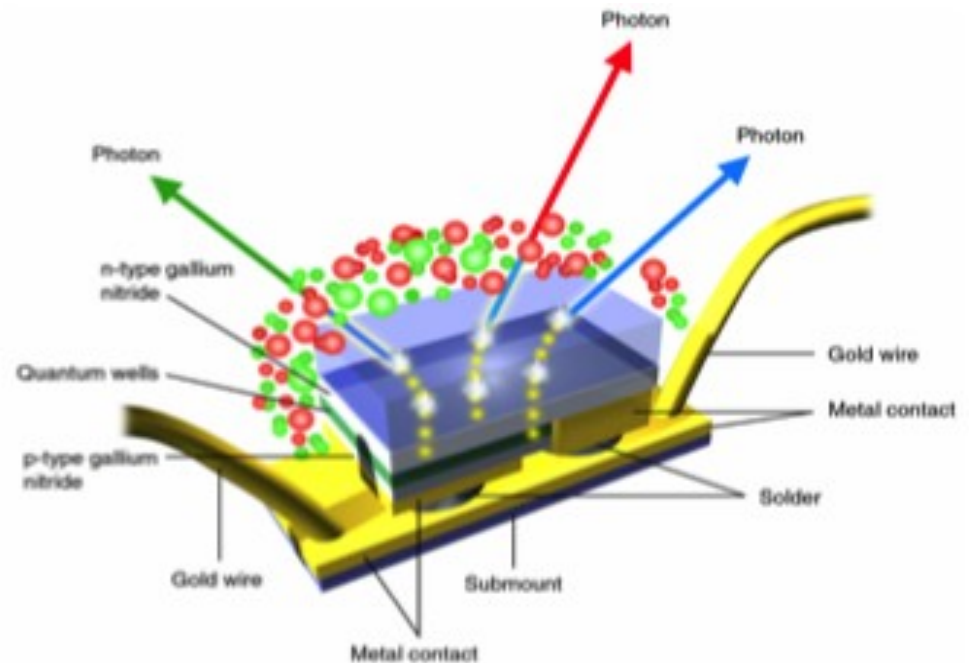
# Les deux approches pour réaliser une source blanche



- Mélange de sources primaires
- Nécessite 3 à 4 DELs: bleue, verte, jaune, rouge
  - Permet d'ajuster la couleur
  - Nécessite un contrôle de la couleur
  - Nécessite une optique pour mélanger les couleurs

## Diode bleue avec phosphore(s)\* de conversion

- Désavantage: on perd le changement d'énergie par photon (le "Stoke's shift")
- Avantage: mélange de couleurs fait à priori

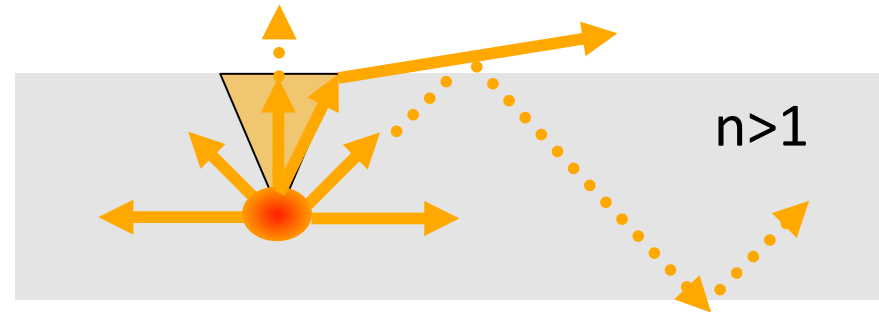


# Les différents facteurs de la performances des DELs

- progrès des DELs  
en même temps
  - progrès en efficacité interne (conversion des électrons-trous en photons à l'intérieur du matériau) ,
  - progrès en efficacité d' injection électrique,
  - progrès en efficacité d'extraction des photons vers l'extérieur.
- Aujourd'hui
  - efficacité d' injection électrique  $\geq 90\%$
  - efficacité interne: 92% (blue, @pic, **green 40%, amber 20%**)
  - efficacité d'extraction des photons  $\geq 80\%$

# Discussion: comment faire sortir les photons du matériau?

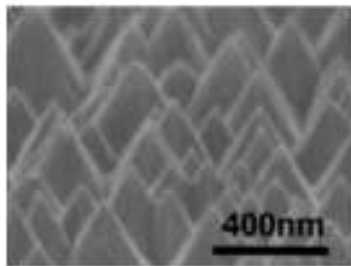
Le problème de l'extraction de lumière: elle a tendance à être confinée dans un matériau d'indice de refraction plus élevé que l'extérieur par reflexion interne totale



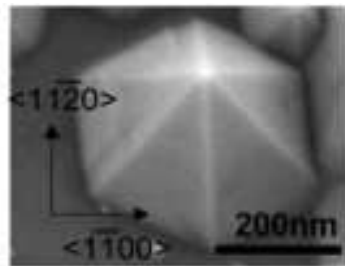
- DELs monochromatiques
  - Solutions basées sur l'optique geometrique: la direction de propagation de la lumière est changée à chaque incidence sur l'interface DEL-air
  - Solutions basées sur l'optique ondulatoire: on utilise la diffraction par un cristal photonique (modulation périodique de l'indice de réfraction)
- DELs à lumière blanche par conversion par phosphore: même problème d'extraction de la lumière convertie par les phosphores
  - les solutions sont basées sur la diffusion de la lumière par le matériau inhomogène du phosphore (grains, cavités...).



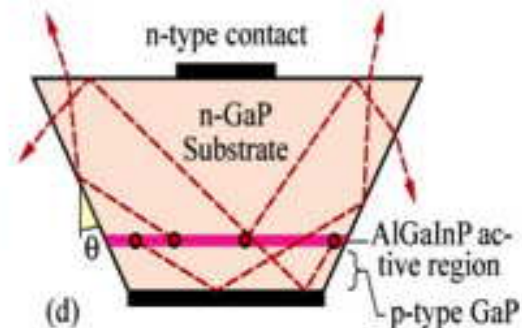
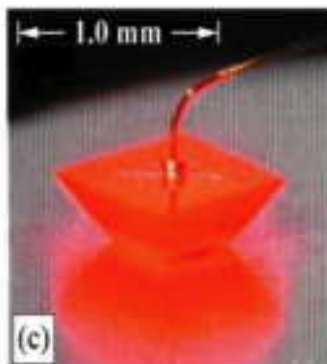
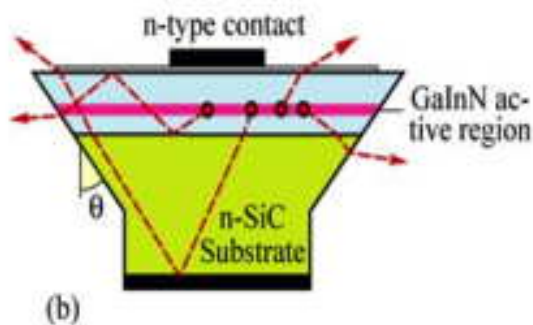
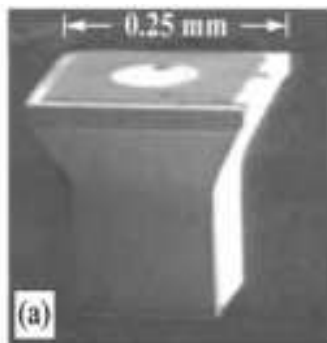
# DELs: solutions basées sur l'optique geometrique



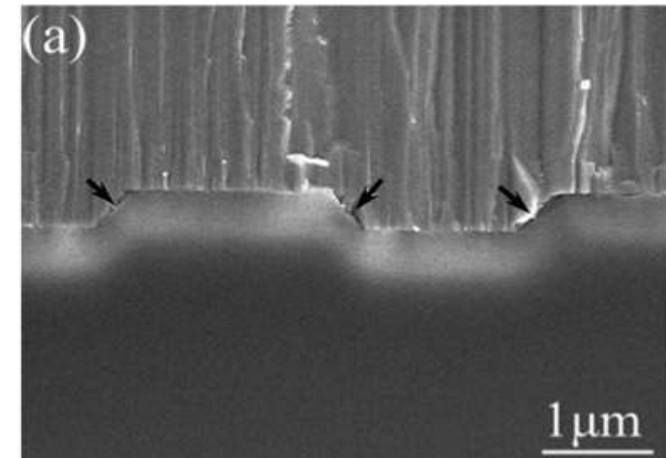
Surface rugueuse



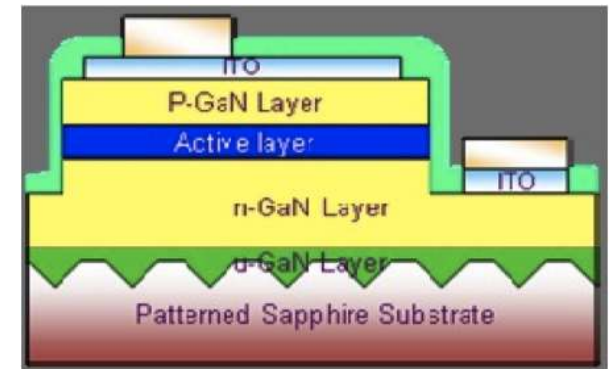
Substrate formé



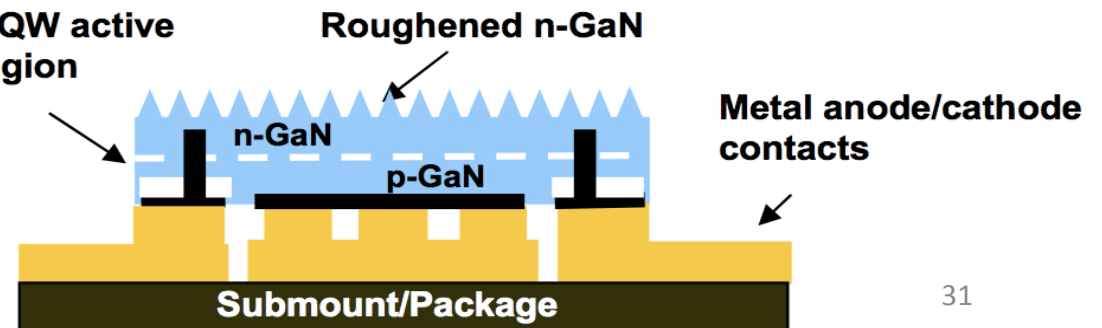
Substrate  
"patterné"



Couche mince à  
surface rugueuse



MQW active  
region





# Comparaison des DELs aux autres sources de lumière

## LED vs. Other Light Sources

|                        | Incandescent                                                                      | Halogen                                                                            | Fluorescent                                                                         | Metal Halide                                                                        | White LED                                                                           |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |  |  |  |  |  |
| <b>Efficacy (lm/W)</b> | 7 - 20                                                                            | 15 - 20                                                                            | 50 - 100                                                                            | 80 - 110                                                                            | 70 - 110                                                                            |
| <b>Life time (hrs)</b> | 750 – 2,000                                                                       | 2,000 – 4,000                                                                      | 9,000 – 20,000                                                                      | 5,000 – 20,000                                                                      | 50,000+                                                                             |
| <b>CCT (K)</b>         | 2,500 – 3,000                                                                     | 2,800 – 3,150                                                                      | 2,700 – 7,500                                                                       | 4,000                                                                               | 2,700 – 10,000                                                                      |
| <b>CRI</b>             | ≥ 95                                                                              | 100                                                                                | 70 - 85                                                                             | 70                                                                                  | 70 - 85                                                                             |

# Efficiency énergétique

analyse énergétique au cours de la vie:  
Coût énergétique de la fabrication

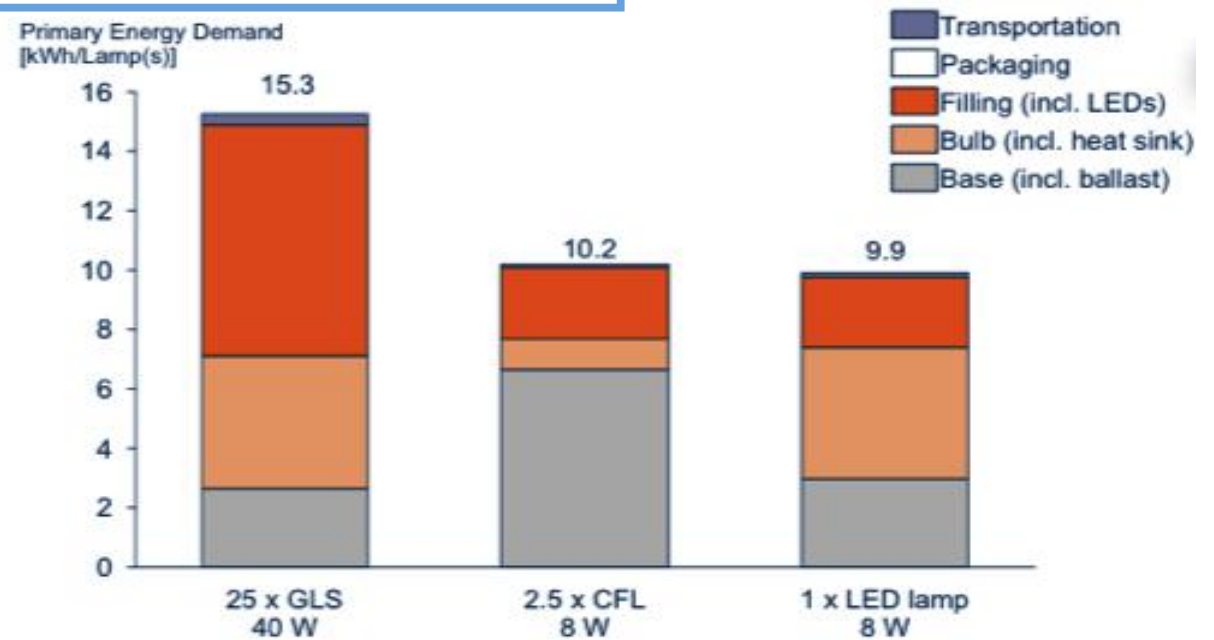


Fig. 8 Primary Energy Demand for manufacturing of all three lamps  
(Transportation displayed separately)



Figure 2: Type of lamps compared in the Life Cycle Assessment: a 40 W incandescent lamp, a compact fluorescent DULUX Superstar and a Parathom LED lamp  
output between 345 to 420 lm

# Coût énergétique au cours de la vie des produits

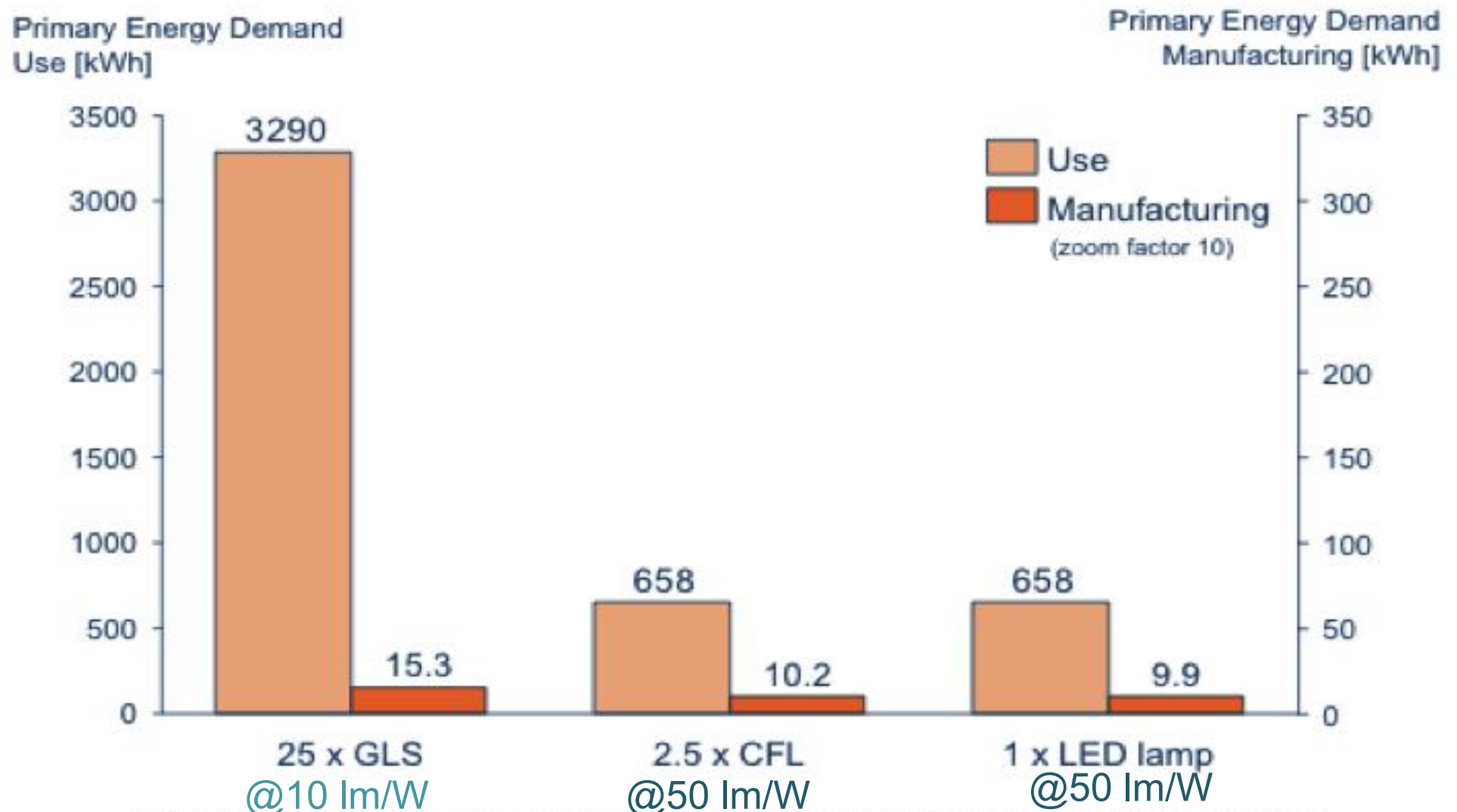


Fig. 9 Primary Energy Demand for manufacturing and use of all three lamps

Valeur de l'énergie économisée: 2600kWh@10c= 260 €!

# Coup d'oeil dans le futur: Productivité des usines à DELs

machine de production  
MOCVD Aixtron  
À la fois 42 substrats 2"  
1 lot  $\approx 42 \times 20 \text{ cm}^2 \approx 800 \text{ cm}^2$



Puissance injectée, toute la surface du lot étant convertie en DELs  
 $\approx 8 \cdot 10^2 \times 125^1 \text{ A/cm}^2 \times 3 \text{ V} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ W}$   
 $\approx 10^5 \text{ W}$  de lumière blanche/lot @33% efficacité lumineuse<sup>2</sup>  
 $\approx 5 \cdot 10^5 \text{ W}$  de puissance économisée par les lampes d'un lot  
**(remplacent lampes avec une efficacité  $\times 3$ <sup>2</sup>)**

**Soit une très grande usine : 100 machines qui font chacune 1000 lots/an<sup>3</sup>**

$3 \cdot 10^5 \text{ W} \times 10\,000 - 3 \cdot 10^{10} \text{ W} = 3 \cdot 10^7 \text{ kW}$  économisés

**Si utilisation 3hrs/jour<sup>4</sup>/365 days  $\Rightarrow 3 \cdot 10^{10} \text{ kWh}$  économisés**

1 centrale à 1 GW :  $10^6 \text{ kW} \times 8000 \text{ h/an}$  produit  $\approx 8 \cdot 10^9 \text{ kWh}$

**La production annuelle de DELs économise l'énergie produite par 4 nouvelles centrales électriques!**

Valeur of l'énergie économisée:  $4 \cdot 10^{10} \text{ kWh} = 2 \cdot 10^9 \text{ €}$  @ 5 c  
DELs produites ? :  $10^8 \text{ cm}^2 = 10^{10} \text{ DELs}$  @  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ <sup>5</sup>

## Commentaires

<sup>1</sup> on pourra sans doute faire mieux en conservant une bonne efficacité

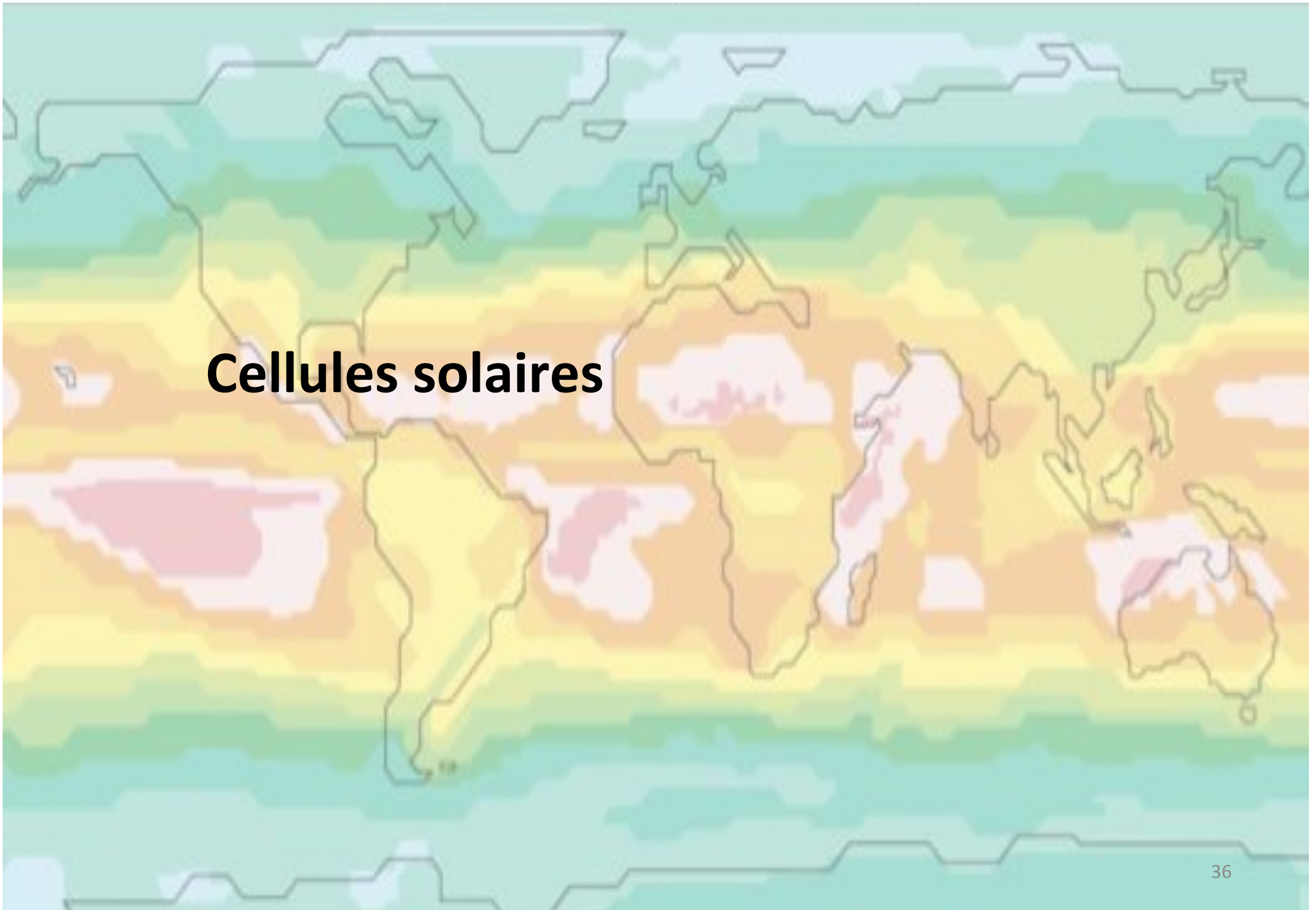
<sup>2</sup> on pourra sans doute faire mieux que ces 75lm/W

<sup>3</sup> 3 lot par jour: on pourra sans doute faire mieux

<sup>4</sup> 3 hrs/jour d'utilisation: un peu élevé pour particuliers, court pour commercial

<sup>5</sup> i.e. 10 milliards par grande usine- aujourd'hui la production de DELs est de l'ordre de 60-80 milliards, mais augmente très rapidement

# Cellules solaires





# Les énergies renouvelables sont diffuses, peu concentrées

David MacKay

Sustainable Energy – without the hot air

| PUISSANCE PAR UNITÉ DE<br>SURFACE DE TERRES OU D'EAU |                           |
|------------------------------------------------------|---------------------------|
| Éolien                                               | 2 W/m <sup>2</sup>        |
| Éolien offshore                                      | 3 W/m <sup>2</sup>        |
| Bassins marémoteurs                                  | 3 W/m <sup>2</sup>        |
| Courants de marées                                   | 6 W/m <sup>2</sup>        |
| Photovoltaïque                                       | 5–20 W/m <sup>2</sup>     |
| Plantes                                              | 0,5 W/m <sup>2</sup>      |
| Eau de pluie<br>(montagnes)                          | 0,24 W/m <sup>2</sup>     |
| Hydroélectricité                                     | 11 W/m <sup>2</sup>       |
| Cheminées solaires                                   | 0,1 W/m <sup>2</sup>      |
| <b>Solaire à concentration<br/>(déserts)</b>         | <b>15 W/m<sup>2</sup></b> |

Solaire PV:

Pour une cellule à 20% de rendement  
et 1000h d'ensoleillement effectif/an

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2 &= 200\text{W} @ 20\% \times \mathbf{1000h} \\ &\times \mathbf{0.5} \text{ (occupation au sol)} \\ &= 100\text{kWh/m}^2 @ 8700h = 11 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

On retrouve la valeur de McKay



# cellules solaires

*le principe*

Quelques chiffres de base

*Le prix du kWh photovoltaïque*: il est grandement fonction de l'ensoleillement

*Questions sur les cellules solaires*: rendement, prix et évolutions possibles

*L'écologie des cellules solaires*

# Photovoltaïque

Génération d'électricité par conversion DIRECTE d'énergie lumineuse en courant électrique

Trois conditions:

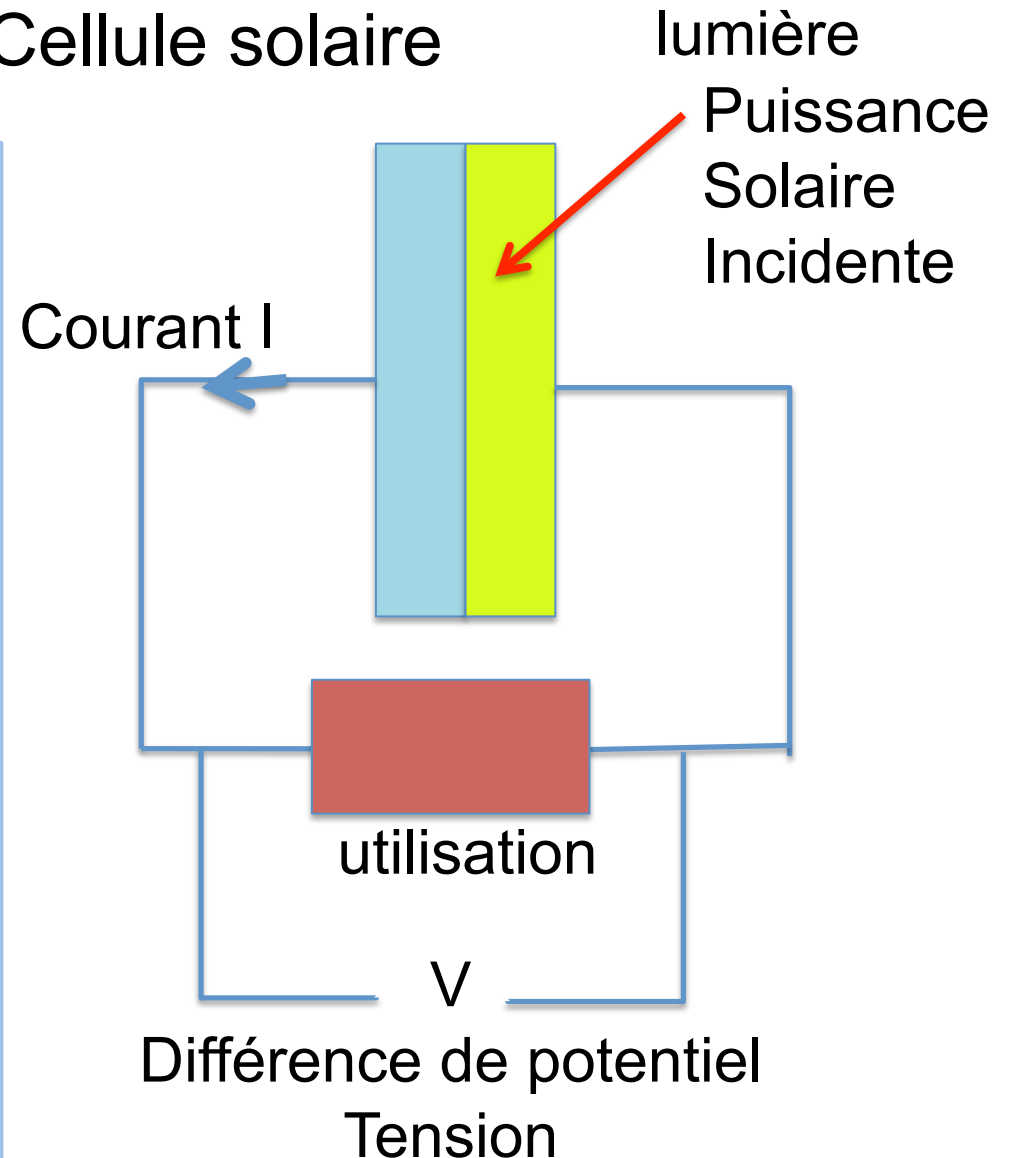
- La lumière est absorbée et transformée en énergie de porteurs de charges électriques, les électrons, dans un solide
- une barrière de potentiel existe à proximité du lieu de création des charges pour causer une séparation des charges
- les charges séparées peuvent se déplacer facilement vers les connections de sortie

- Un paramètre essentiel:

## **le rendement de conversion**

C'est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance du rayonnement solaire incident.

## Cellule solaire



Puissance générée:  $P = V \times I$

# Photovoltaïque

## Quelques chiffres de base

Puissance crête du Soleil à midi en incidence normale  $\approx 1 \text{ kW/m}^2$   
 Si le rendement est de 10% (assez classique),  
 on récupère une puissance électrique crête de  $100 \text{ W/m}^2$

### Deux facteurs de variation

#### Latitude

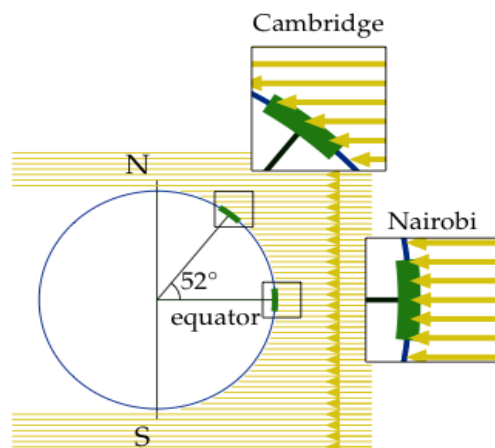


Figure 6.1. Sunlight hitting the earth at midday on a spring or autumn day. The density of sunlight per unit land area in Cambridge (latitude  $52^\circ$ ) is about 60% of that at the equator.

#### saison

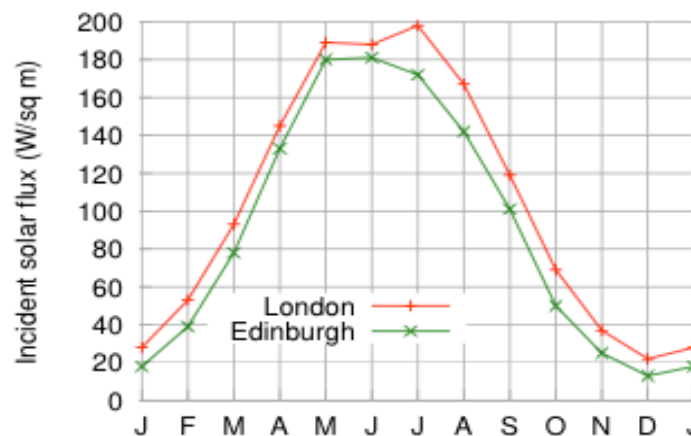
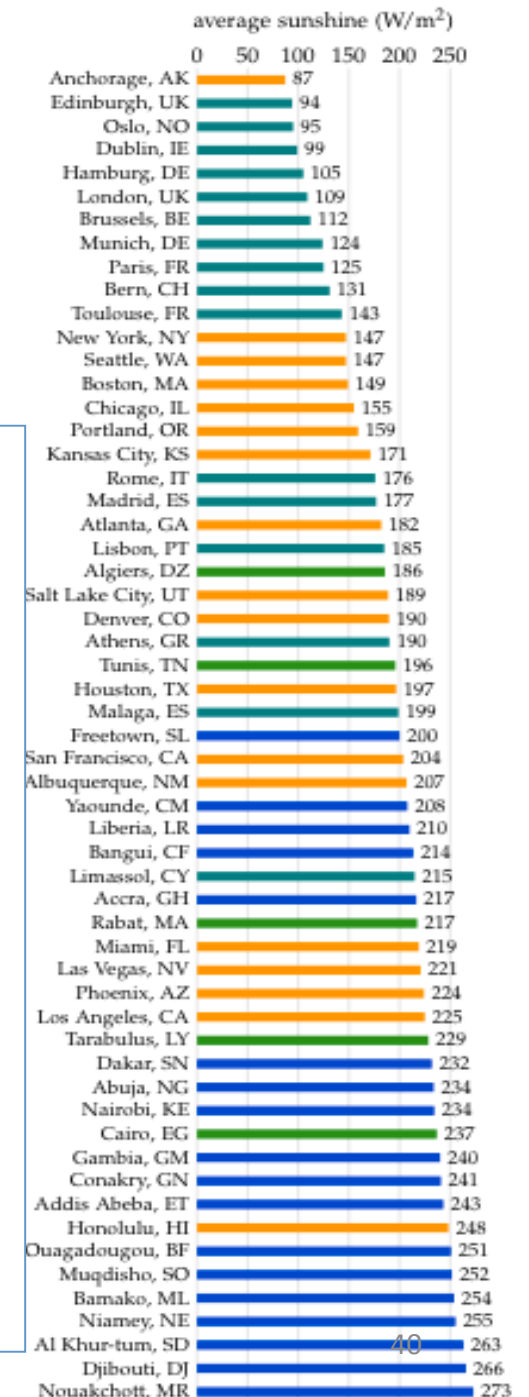


Figure 6.2. Average solar intensity in London and Edinburgh as a function of time of year. The average intensity, per unit land area, is  $100 \text{ W/m}^2$ .



Figures tirées de McKay, pp. 38 et 46

# Photovoltaïque

Quelques chiffres de base

Puissance crête du Soleil à midi (au zénith) en incidence normale  $\approx 1 \text{ kW/m}^2$

Si le rendement est de 10% (assez classique),  
on récupère  $100 \text{ W/m}^2$  **crête**

Le flux n'est pas constant dans la journée, sur l'année, et varie avec la position géographique (nuit + temps couvert + latitude)

**L'ensoleillement moyenné** sur l'année est de 10 à 25% de la puissance crête, c'est à dire que sur les 8760 heures de l'année ( $24 \times 365$ ) la puissance crête est délivrée pendant 876 à 2190 heures.

Le panneau de  $1 \text{ m}^2$  a une puissance **moyenne** de 10 à  $25 \text{ W/m}^2$

Une cellule solaire de 1 W, c'est à dire produisant 1W sous illumination crête du Soleil à midi, produit sur l'année entre 0,876 et 2,190 kWh, pour simplifier 1 à 2 kWh .

Pour un module de  $1 \text{ m}^2$  à 10 % de rendement, on récupère de 100 à 200 kWh par an.

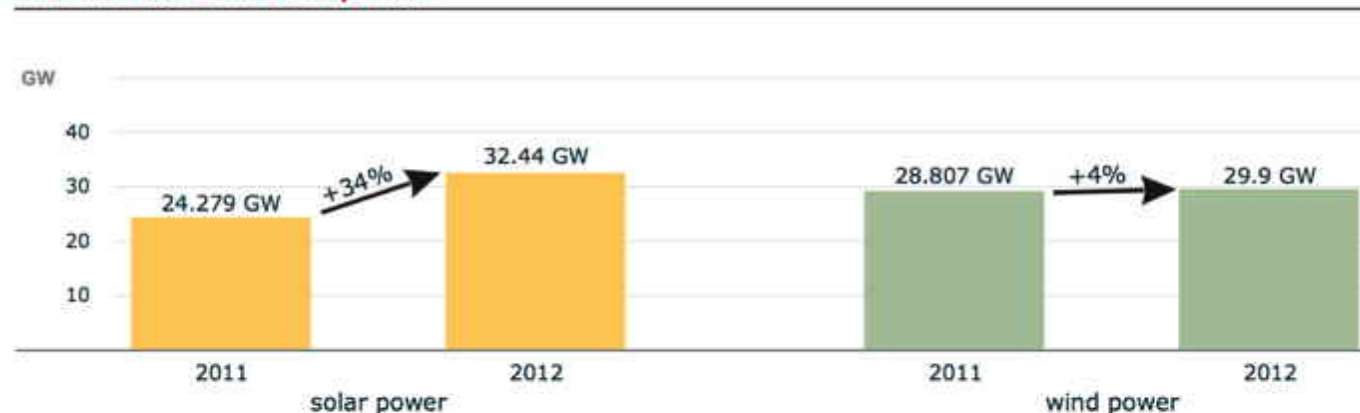
# Production solaire et éolien Allemagne 2011 et 2012

Le solaire a produit 27.9 TWh en 2012, soit 5% des 560 TWh d'électricité totale.

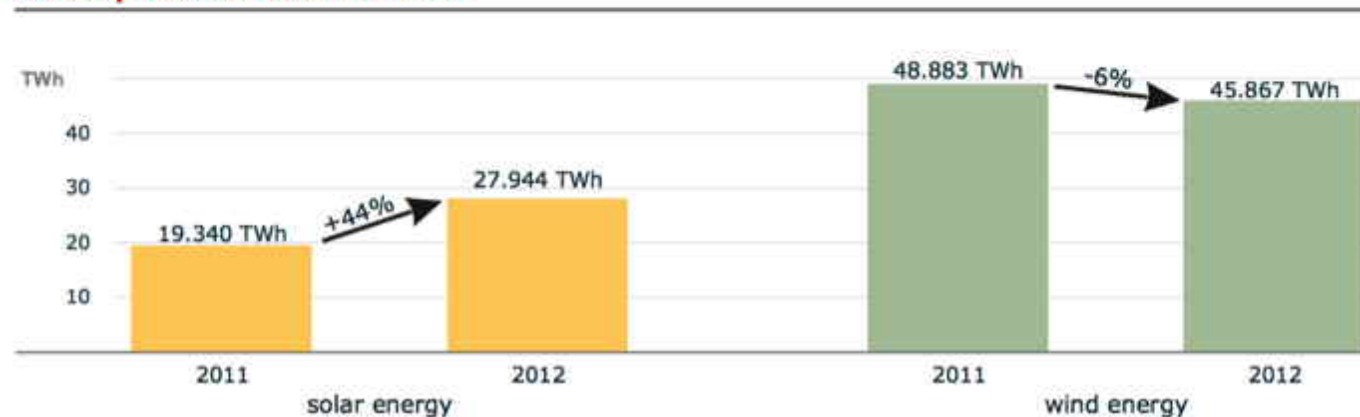
L'éolien a produit 45.9 TWh en 2012 soit 8.2% de l'électricité totale.

Divisant la production par la puissance, on trouve que le solaire a produit à la puissance crête pendant environ 900h, et l'éolien 1500h (sur  $365 \times 24 = 8760$  h/an)

**Installed solar and wind power**



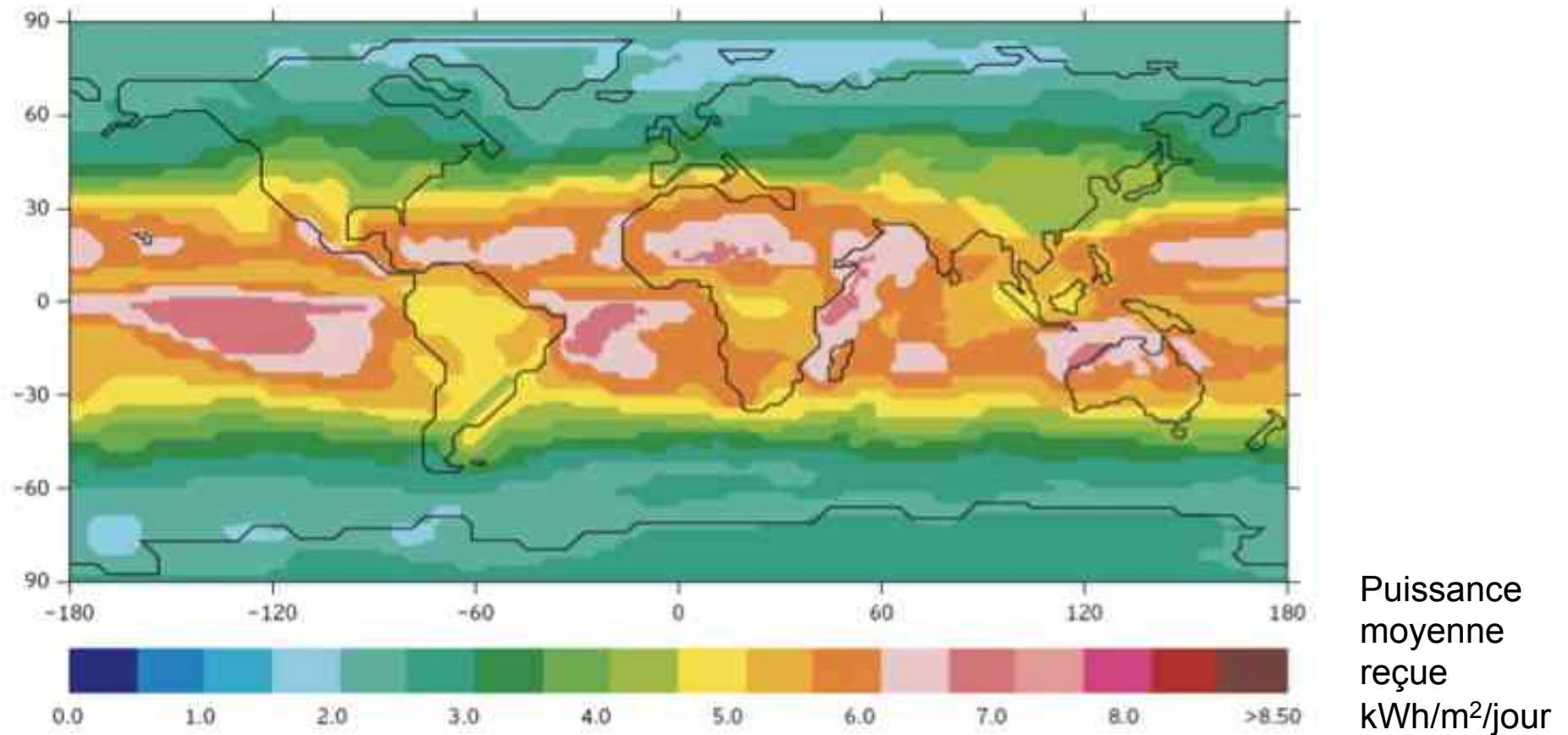
**Annual production solar und wind**



Graph: B. Burger, Fraunhofer ISE; data: Bundesnetzagentur

<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2012.pdf>

# Ensoleillement moyen sur l'année



(NASA/SSE 2005)

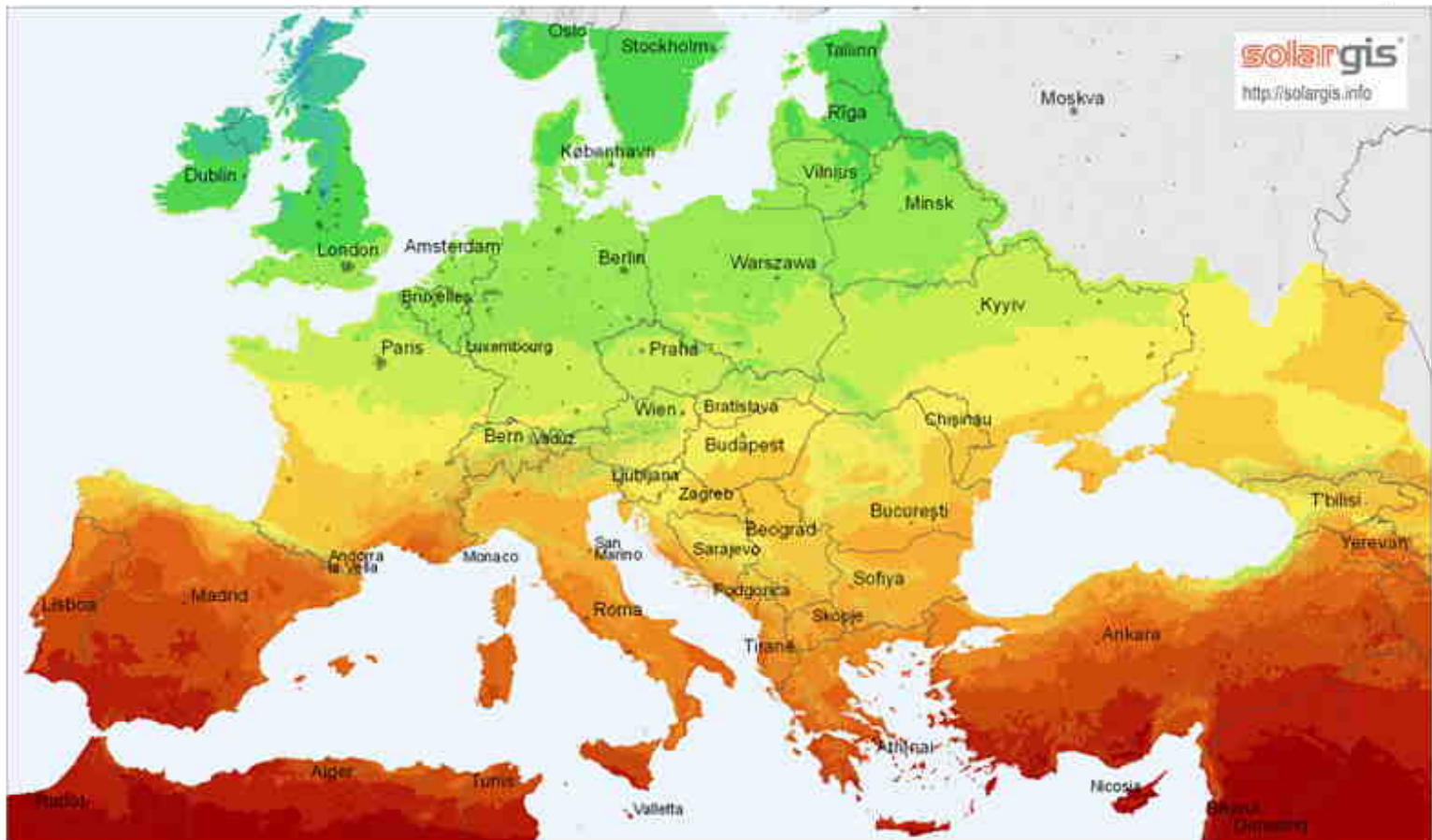
- Une insolation de 6 kWh/m²/jour bien placée (orange foncé, pas en Europe) se traduit par 2190 heures de production crête d'électricité, soit pour un module de 1 m² à 10% de rendement (100W crête) 219kWh. Si on divise par 8760, soit 25 W/m². En Europe, plutôt 10-12 25 W/m²



# Grandes disparités d'ensoleillement en Europe

Global horizontal irradiation

Europe



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)



< 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 > kWh/m<sup>2</sup>/an

kWh/m<sup>2</sup>/an

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

1500 kWh/m<sup>2</sup>/an  
17% de la puissance  
solaire crête en  
Moyenne

Résultats 2012 en  
Allemagne, toutes  
installations:  
10%

# Photovoltaïque

Puissance crête du Soleil à midi (au zénith) en incidence normale  $\approx 1 \text{ kW/m}^2$

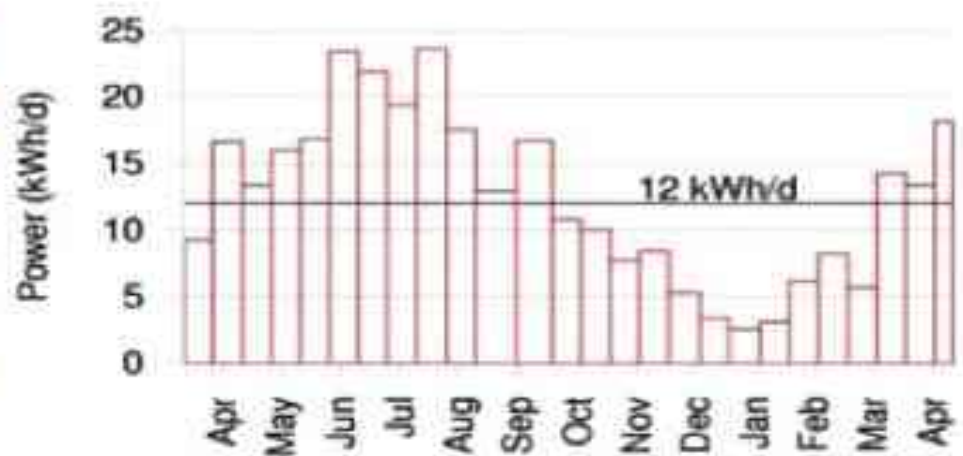
## C'est beaucoup

En 1h, l'énergie solaire reçue sur terre égale toute la consommation énergétique annuelle.

Ressource quasi-illimitée

Puissance totale consommée: 15TW- elle est reçue sur  $15 \cdot 10^9 \text{ m}^2$  soit  $400 \times 400 \text{ km}^2$

Et c'est peu



Data and photo by Jonathan Kimmitt

Le photovoltaïque peut-il être la source majeure d'électricité en Grande Bretagne?

MacKay fait l'hypothèse que l'on couvre TOUS les toits des maisons orientés **au sud**

$10 \text{ m}^2/\text{personne} \approx 870 \text{ kWh/an/personne}$  (à plat)  $\approx 4\text{-}5 \text{ kWh/jour/personne}$  (toit incliné)

**Pourquoi le rendement des cellules solaires plafonne t-il?**

# Rappel sur le fonctionnement des cellules solaires

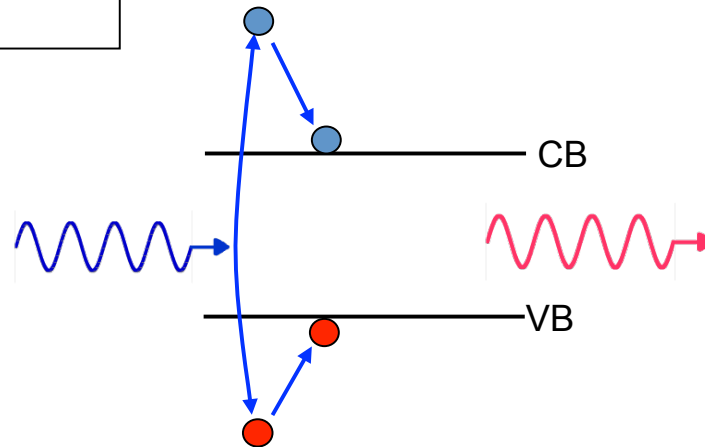
la **tension** obtenue aux bornes électriques de la cellule est déterminée par la différence d'énergie des électrons entre les cotés p et n. C'est une **grandeur intrinsèque du semi-conducteur, sa bande interdite ou band gap**.

- un semi-conducteur n'absorbe que la lumière dont l'énergie lumineuse (l'énergie du quantum de rayonnement, le photon) est supérieure à l'énergie nécessaire pour transférer un électron à travers la bande interdite. **Seuls les photons d'énergie supérieure à la bande interdite sont efficaces pour créer du courant**. L'énergie que l'on récupère par électron est celle de la bande interdite, quelle que soit l'énergie du photon utilisé pour exciter l'électron.
- **le courant** (un **flux d'électrons** dans un circuit connecté à la cellule solaire) est en première approximation **égal au flux de photons solaires** d'énergie supérieure à la bande interdite.

# Les **deux** sources intrinsèques de déperdition d'énergie dans les cellules solaires

Le spectre solaire comprend des photons de toutes énergies

Si un photon de grande énergie est absorbé, il crée des électrons et des trous de grande énergie cinétique. L'énergie en excès des électrons et trous est perdue par relaxation de l'excès d'énergie vers les extremas des bandes d'énergie pour les électrons et les trous

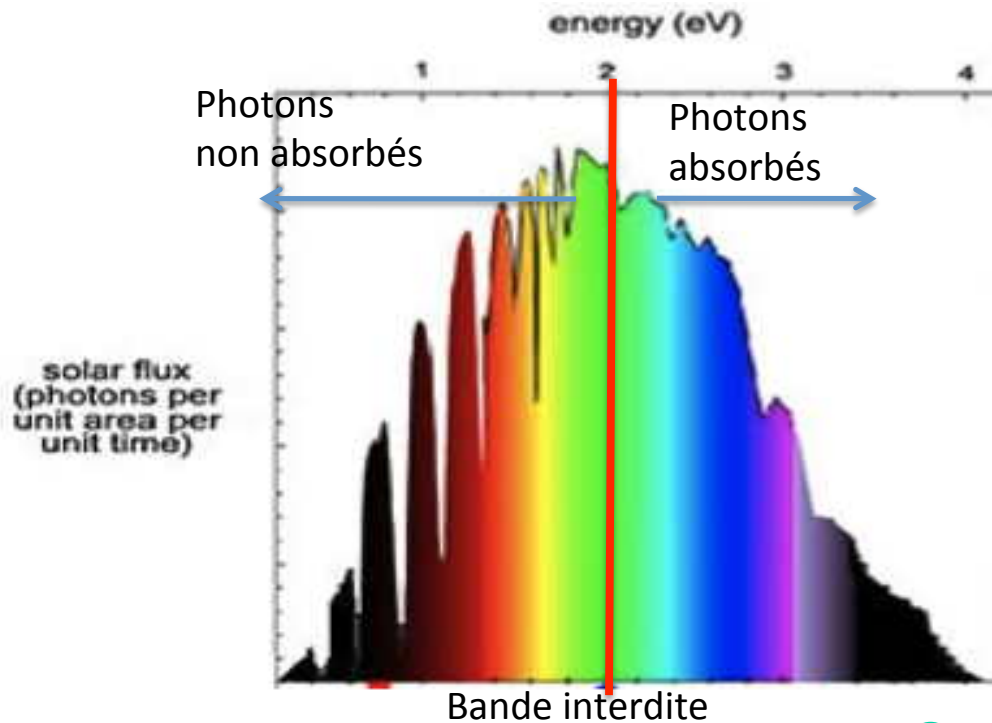


Les photons d'énergie en dessous du band gap ne sont pas absorbés, traversent la cellule solaire et sont perdus.

1. Seule la partie du spectre solaire d'énergie supérieure à la bande interdite est utile.
2. Toute l'énergie des photons supérieure à celle de la bande interdite est perdue (en fait nuisible car elle contribue à l'échauffement de la cellule).



# La limite de 30% pour une cellule à un semiconducteur, dite à jonction unique

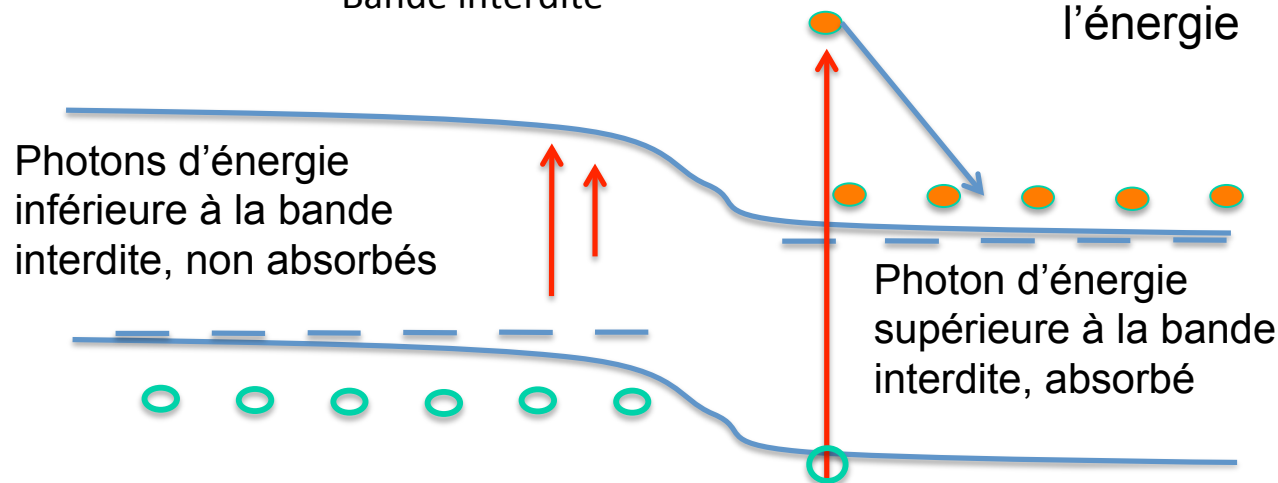


Choix du semiconducteur:

*Si on choisit une bande Interdite faible*

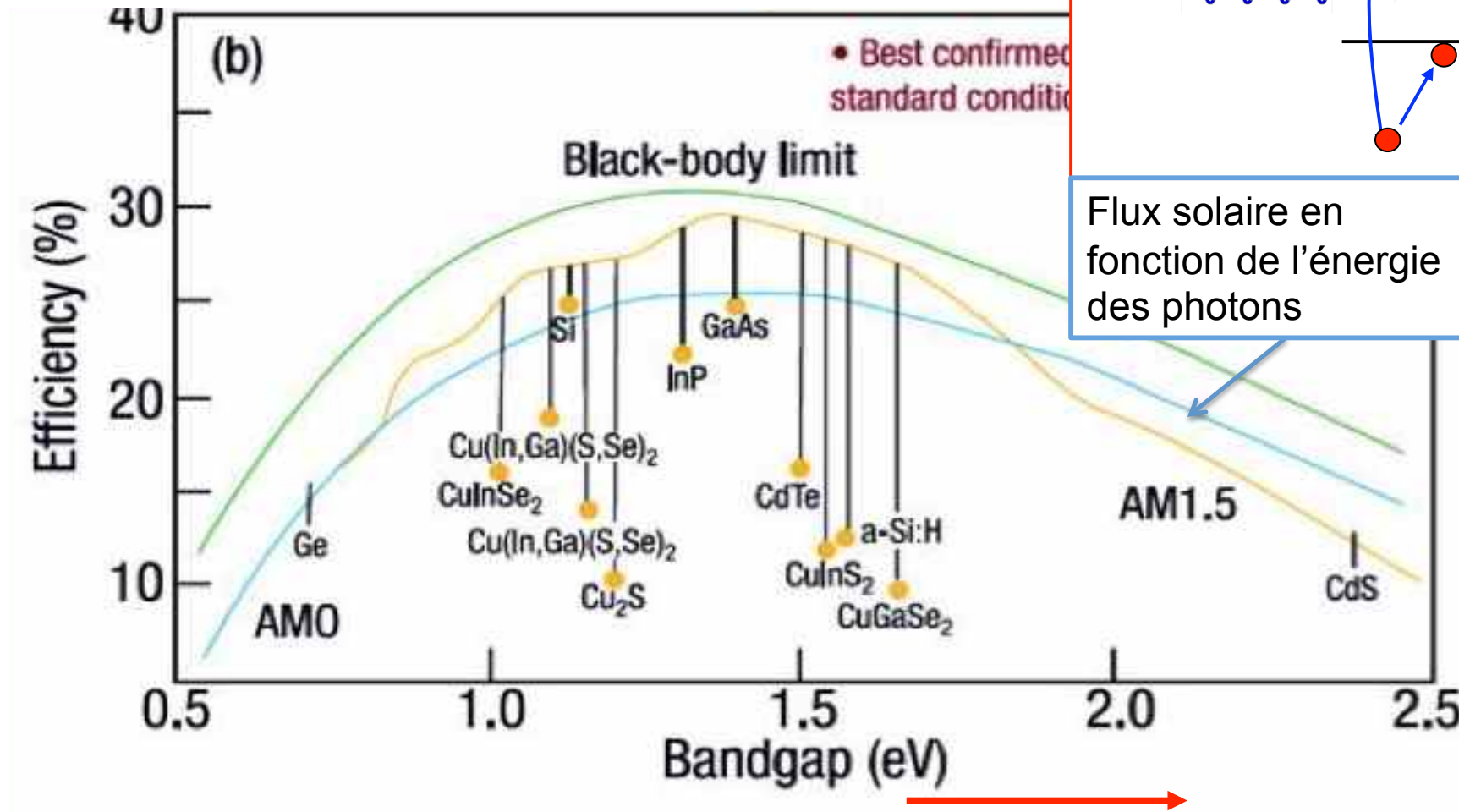
- On absorbe une grande part du spectre solaire dont les photons ont une énergie plus grande que le gap => le courant augmente
- Par contre la tension diminue- plus d'énergie est dissipée par les électrons énergétiques qui "tombent" en bas de leur bande.

-Optimum: au max 30% de l'énergie





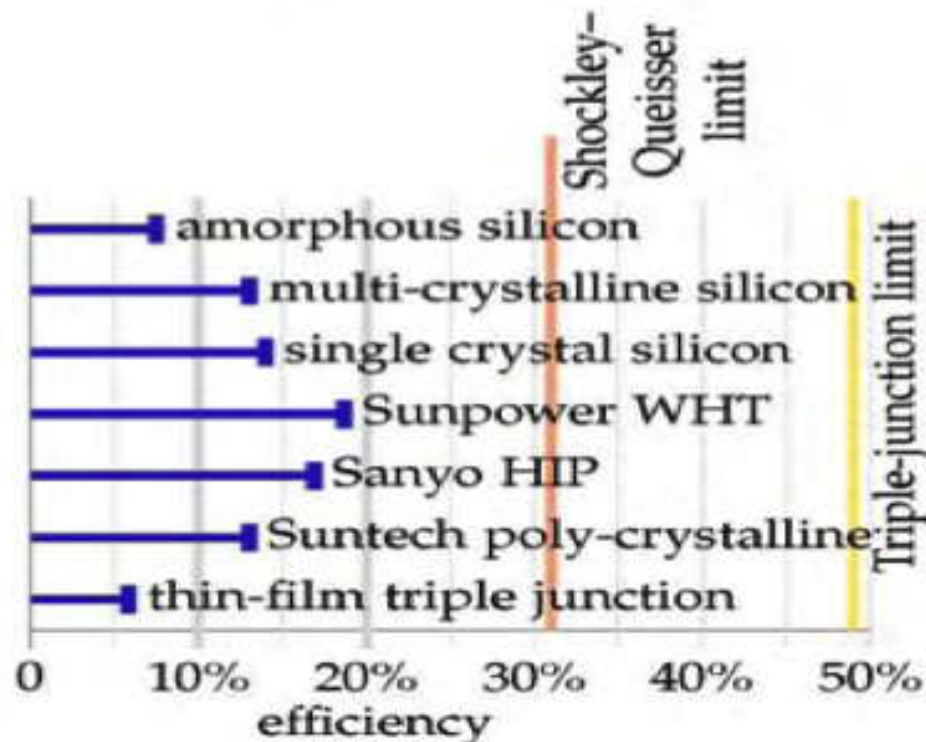
# Limite au rendement



V augmente (comme le bandgap) mais le courant I diminue comme le flux de photons d'énergie supérieure au bandgap. L'optimum est pour un bandgap de 1.4eV

la **limite** d'environ 30% n'est donc pas vraiment due au semiconducteur utilisé. Cette limite physique pour une cellule solaire à une seule jonction est de 32%. En fait, le rendement est souvent très inférieur, à cause de pertes en tension et en courant, spécifiques du matériau utilisé, de sa pureté et de sa mise en oeuvre. Dans le schéma ci-dessous, on voit que le silicium a un rendement de 20% dans sa forme cristalline (Sunpower, en vend aujourd'hui à 22 %), et de 10 % au maximum sous sa forme amorphe

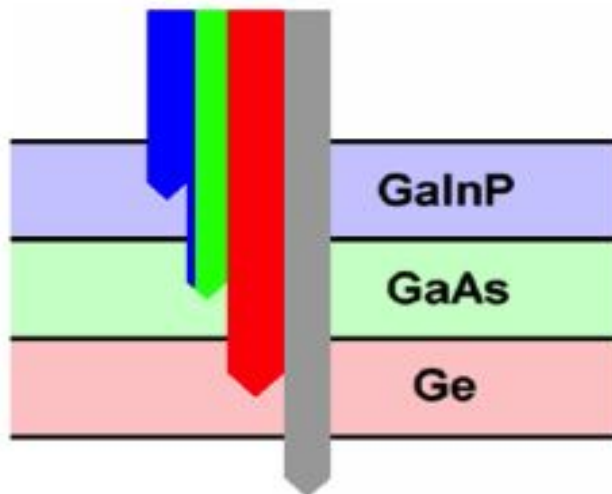
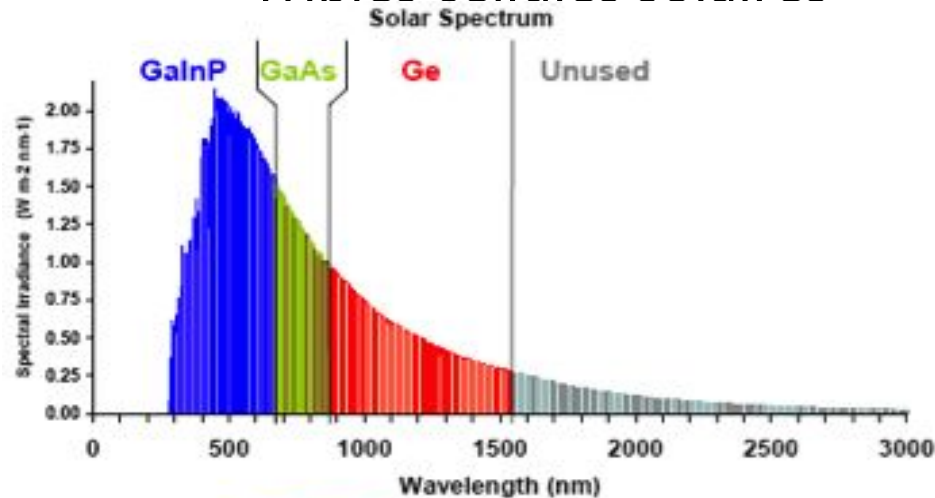
## PV efficiencies



**Pour obtenir aller au delà de 30%, les cellules à jonction multiple, avec concentration**

Solution: empiler des cellules solaires qui vont chacune traiter des tranches de spectres solaires avec une tension quasi optimum pour chaque tranche du spectre: les photons de faible énergie, non absorbés par une couche, vont être absorbés par une couche suivante.

### Triples cellules solaires



Bandgap 1.7-1.9 eV

Bandgap 1.3-1.4 eV

Bandgap 0.67 eV

### Record du monde: 42.3%

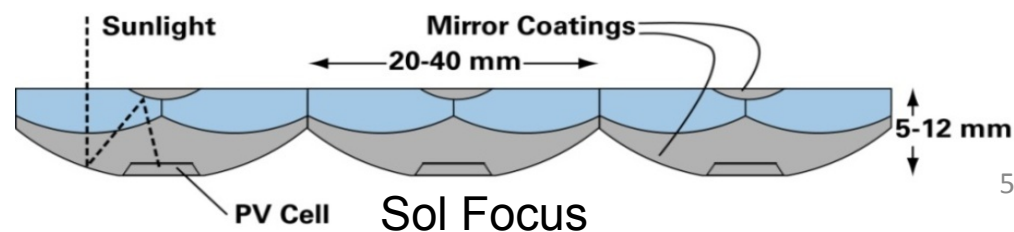
- - Les cellules sont en série: le même courant passe dans toutes les cellules
- - Le courant est limité par la cellule qui produit le moins de courant sous éclairement solaire.
- - Les tensions des cellules empilées s'additionnent.
- - La cellule de plus grand gap voit la lumière en premier car elle laisse passer la lumière de plus faible énergie.

# Les systèmes à concentration

Comme les cellules à haut rendement sont très chères, on ne peut les faire fonctionner simplement sous éclairage direct. On concentre le flux solaire en focalisant l'image du soleil sur la cellule, d'un facteur 100 à 1000. La surface de cellule solaire, donc son coût, par unité de flux solaire, est divisée par 100 à 1000. Le facteur de coût dominant devient le système de concentration et de suivi du soleil. Comme on perd l'éclairage solaire indirect (le "bleu du ciel, environ 30% du flux solaire), le rendement effectif devient  $42\% \times 70\% = 29,4\%$ . La carte solaire d'ensoleillement direct est un peu différente de celle de l'ensoleillement total prenant en compte la lumière indirecte non focalisable.

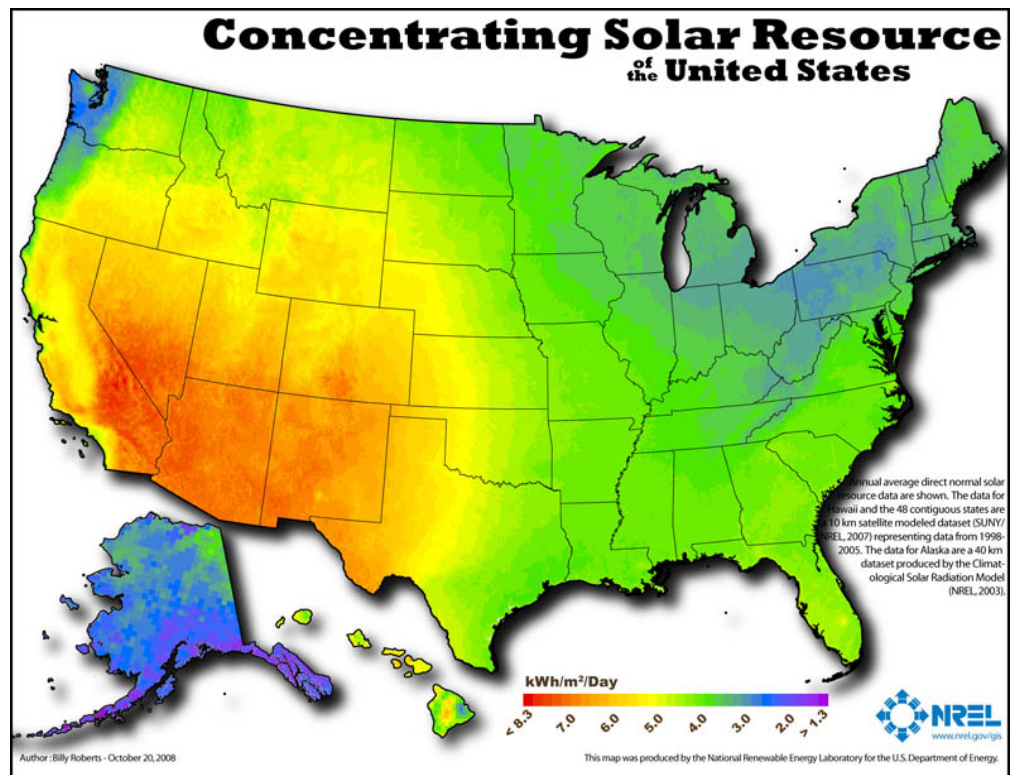
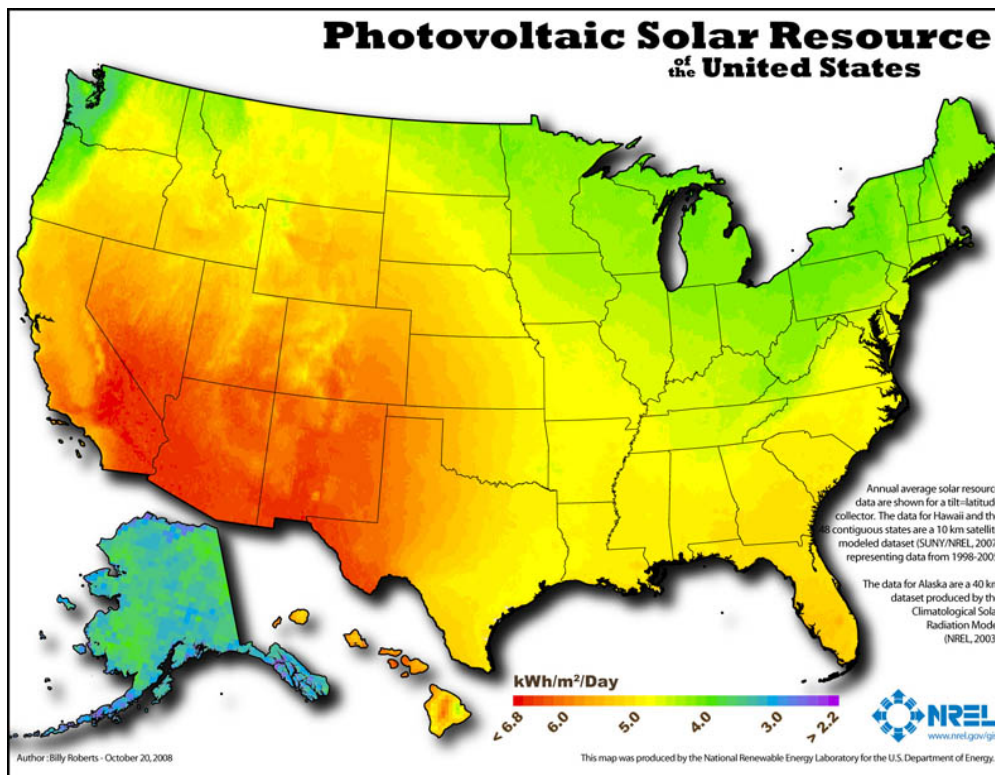


Dish Shape





L'énergie solaire utilisée par les centrales photovoltaïques à concentration, comme pour les centrales solaires thermiques à concentration (Concentrating Solar Power, CSP) est celle de l'ensoleillement direct, celui reçu normalement aux rayons du soleil. Comme la direction du soleil change dans la journée, cette surface doit suivre la direction du soleil. Les deux cartes ci-dessous montrent la différence de ressource sur l'année

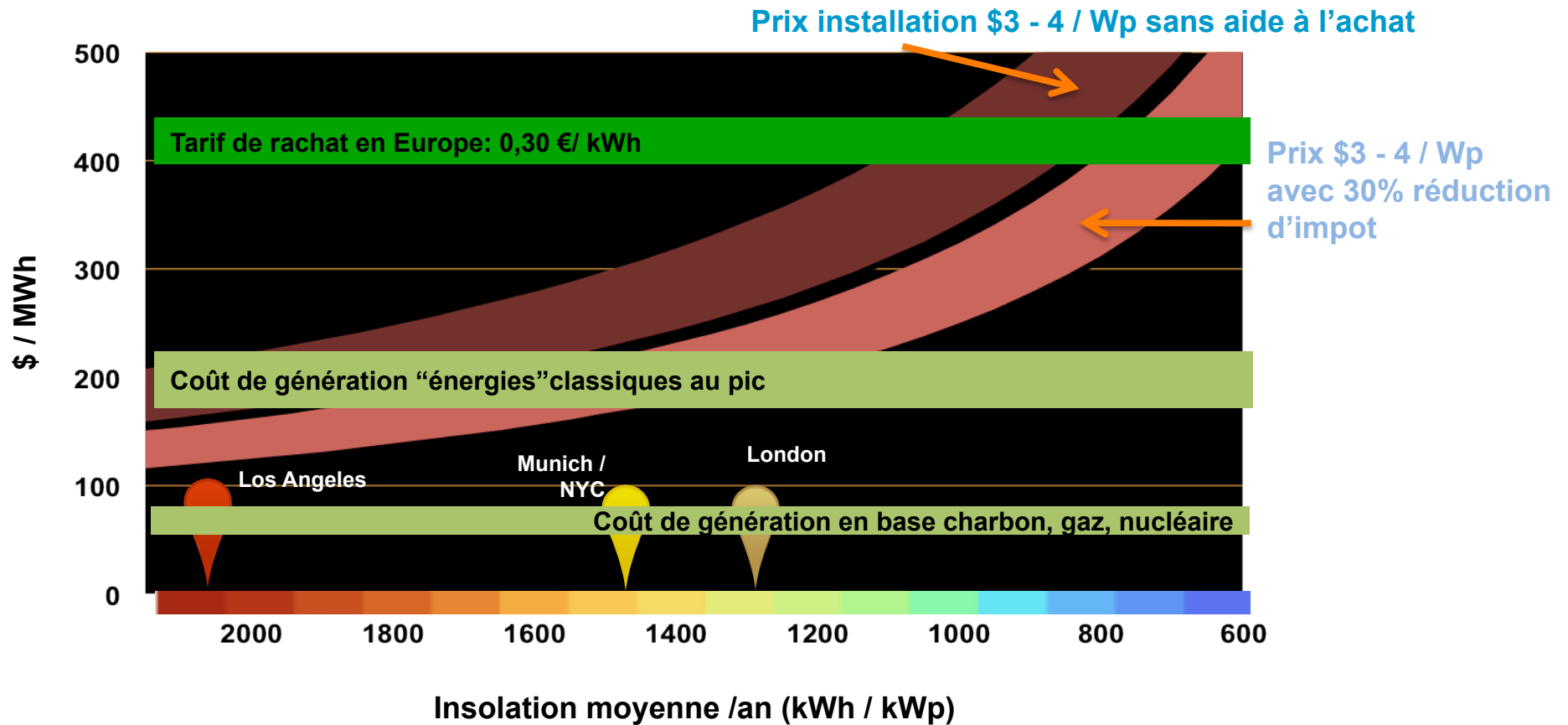




## Le prix du kWh photovoltaïque

# Effet des prix d'achat et/ou aides à l'investissement

Le prix de production dépend de l'investissement (\$/Wp) et de l'ensoleillement)



Peak Generation Costs: Heat Rate 14; Running between 2-6hrs/day. Sizing reflects 30% of peak load generation.  
Solar excludes Mfg Tax Credit. Feed-in Tariff avg across Europe

# Photovoltaïque

Le coût indicatif, **en France, pour 1200h an en moyenne.**

**Si les panneaux** coûtent 2 € /W crête et leur installation avec les composants de raccordement autant (objectifs difficiles aujourd'hui), on a investi 4000 € pour 1kWp pour une production de 1200 kWh/an.

Elle est **rachetée par EDF** environ 408 € (34 centimes/kWh pour janvier-mars 2013) pour une installation intégrée dans le toit de modules produits en Europe.

Elle est **revendue par EDF** 10 c € /kWh en tarif jour, soit 120 €, La différence étant payée par le consommateur sous forme de "Contribution au Service Public d'Electricité (CSPE)"

*La rentabilité pour le producteur dépend de beaucoup de paramètres, en dehors du prix de rachat. Voir le simulateur*

[http://ines.solaire.free.fr/pvreseau\\_1.php](http://ines.solaire.free.fr/pvreseau_1.php)

# Simulations de rentabilité de panneaux solaires à Paris ou à Nîmes

[http://ines.solaire.free.fr/pvreseau\\_1.php](http://ines.solaire.free.fr/pvreseau_1.php)

Données d'entrée: coût complet 4 /W crête, 20% de subvention à l'achat, 75 ou 90% de rendement de connexion, 2 ou 4 % sur le taux de l'argent, ...tout cela aboutit à un facteur 2 sur le coût par kWh.

Choix de la ville : Nîmes : Prendre en compte un masque : non :

Inclinaison du plan : 30° : Orientation du plan : Sud : Albédo du sol : 0.2 :

Puissance crête de l'installation PV (technologie : Poly-Si.(12%) ) : 1.000 kW , (8.3 m² )

Investissement initial de l'installation PV (total ou par W crête ) : 4.00 €/W

Taux de subvention à l'investissement initial : 20 %

Rendement de conversion électrique module PV vers réseau : 90% :

Coût de la maintenance annuelle en % de l'investissement initial : 1.0% :

Tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque : 0.34 €/kWh

Taux d'inflation sur le tarif d'achat : 0.0% :

Taux d'actualisation de l'argent : 2% : Durée de vie de l'installation : 20 ans :

Cliquez ici pour valider votre choix et lancer les calculs

Calcul de la production électrique, moyenne par jour ou cumulée : COMPARAISON :

|              | jan | fév | mars | avr | mai | juin | juil | août | sep | oct | nov | déc | année |
|--------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| IGP (kWh/m²) | 84  | 103 | 144  | 169 | 178 | 203  | 232  | 195  | 162 | 118 | 88  | 66  | 1742  |
| Prod (kWh)   | 76  | 93  | 130  | 152 | 160 | 183  | 208  | 175  | 146 | 106 | 79  | 59  | 1568  |

Ou entrer une valeur de prod : non, oui en kWh, oui en kWh/kWc

Calculs économiques (par la méthode TEC de B.Chabot/ADEME)

|                                                                             |        |              |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|
| Productivité électrique annuelle par kiloWatt de puissance crête :          | 1567.9 | kWh/kWc.an   |
| Recette annuelle (CF ou Cash flow) :                                        | 533.08 | € par an     |
| Temps de Retour Brut (TRB) :                                                | 6      | an(s)        |
| Prix de revient du kWh photovoltaïque (CGA) :                               | 0.15   | €/kWh        |
| Marge sur le prix de vente (MPV) :                                          | 55.78  | %            |
| Temps de Retour Actualisé (TRA) :                                           | 7      | an(s)        |
| Taux de Rentabilité Interne (TRI) :                                         | 14.4   | %            |
| Gain ou Valeur Actuelle Nette (VAN) en fin d'exercice :                     | 4862.5 | €            |
| Taux d'enrichissement du capital (TEC) :                                    | 1.52   | (sans unité) |
| Taux de subventions à l'investissement initial pour une rentabilité nulle : | -101.6 | %            |

**CalSol** INES Education - Logiciel CALSOL - Photovoltaïque réseau  
Estimation de la production PV injectée dans le réseau

Choix de la ville : Paris le Bourget : Prendre en compte un masque : non :

Inclinaison du plan : 30° : Orientation du plan : Sud : Albédo du sol : 0.2 :

Puissance crête de l'installation PV (technologie : Poly-Si.(12%) ) : 1.000 kW , (8.3 m² )

Investissement initial de l'installation PV (total ou par W crête ) : 4.00 €/W

Taux de subvention à l'investissement initial : 20 %

Rendement de conversion électrique module PV vers réseau : 75% :

Coût de la maintenance annuelle en % de l'investissement initial : 1.0% :

Tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque : 0.34 €/kWh

Taux d'inflation sur le tarif d'achat : 0.0% :

Taux d'actualisation de l'argent : 4% : Durée de vie de l'installation : 20 ans :

Cliquez ici pour valider votre choix et lancer les calculs

Calcul de la production électrique, moyenne par jour ou cumulée : COMPARAISON :

|              | jan | fév | mars | avr | mai | juin | juil | août | sep | oct | nov | déc | année |
|--------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| IGP (kWh/m²) | 37  | 54  | 107  | 126 | 155 | 163  | 162  | 143  | 116 | 78  | 39  | 32  | 1212  |
| Prod (kWh)   | 28  | 41  | 81   | 94  | 117 | 122  | 122  | 107  | 87  | 58  | 30  | 24  | 909   |

Ou entrer une valeur de prod : non, oui en kWh, oui en kWh/kWc

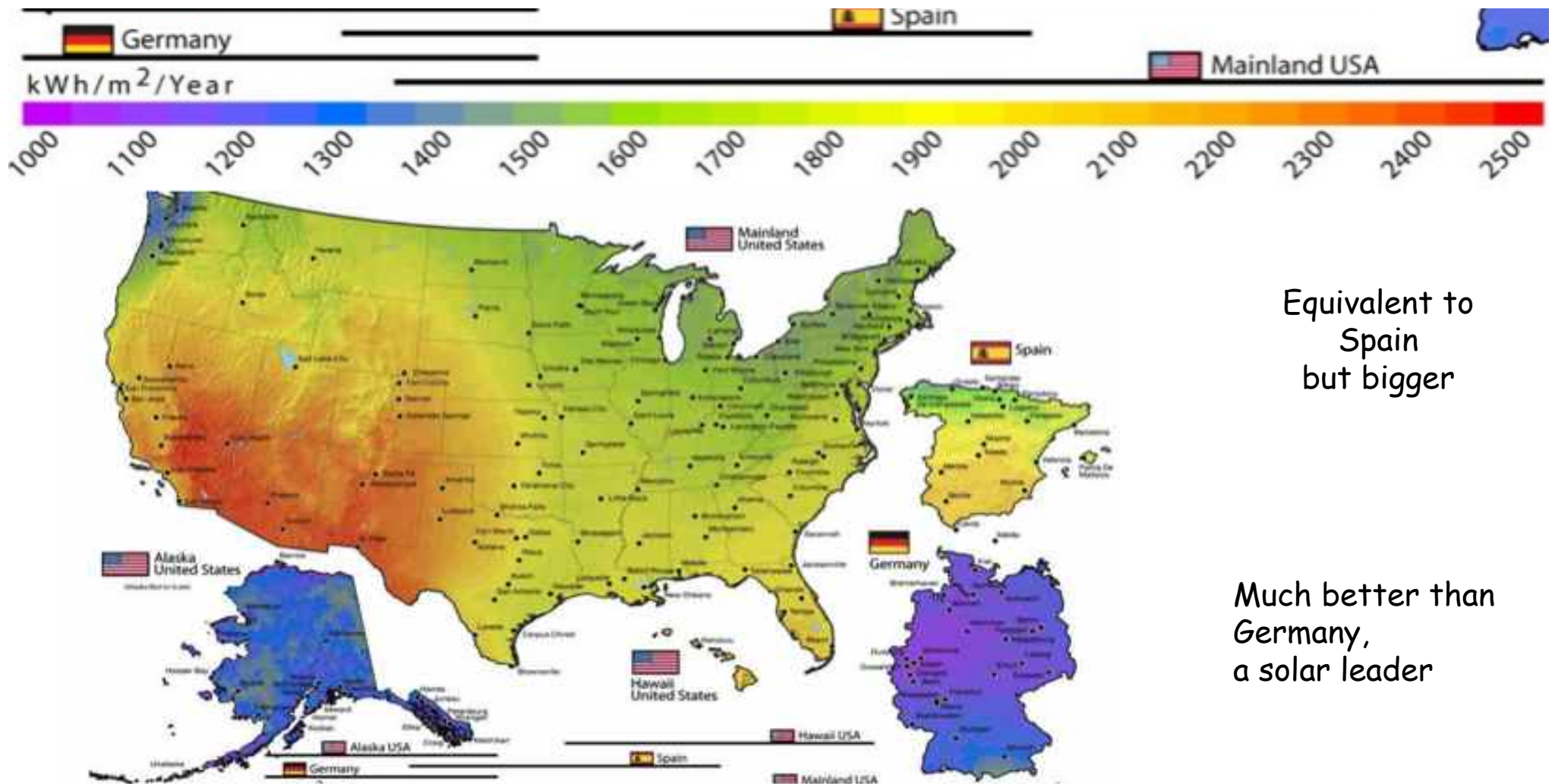
Calculs économiques (par la méthode TEC de B.Chabot/ADEME)

|                                                                             |        |              |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|
| Productivité électrique annuelle par kiloWatt de puissance crête :          | 909.4  | kWh/kWc.an   |
| Recette annuelle (CF ou Cash flow) :                                        | 309.18 | € par an     |
| Temps de Retour Brut (TRB) :                                                | 10.3   | an(s)        |
| Prix de revient du kWh photovoltaïque (CGA) :                               | 0.303  | €/kWh        |
| Marge sur le prix de vente (MPV) :                                          | 10.91  | %            |
| Temps de Retour Actualisé (TRA) :                                           | 16.5   | an(s)        |
| Taux de Rentabilité Interne (TRI) :                                         | 5.7    | %            |
| Gain ou Valeur Actuelle Nette (VAN) en fin d'exercice :                     | 458.2  | €            |
| Taux d'enrichissement du capital (TEC) :                                    | 0.143  | (sans unité) |
| Taux de subventions à l'investissement initial pour une rentabilité nulle : | 8.5    | %            |

Les chiffres peuvent être très différents ailleurs



# Les Etats Unis ont une ressource solaire exceptionnelle



Equivalent to  
Spain  
but bigger

Much better than  
Germany,  
a solar leader

Solar Technologies Market Report EERE 2008

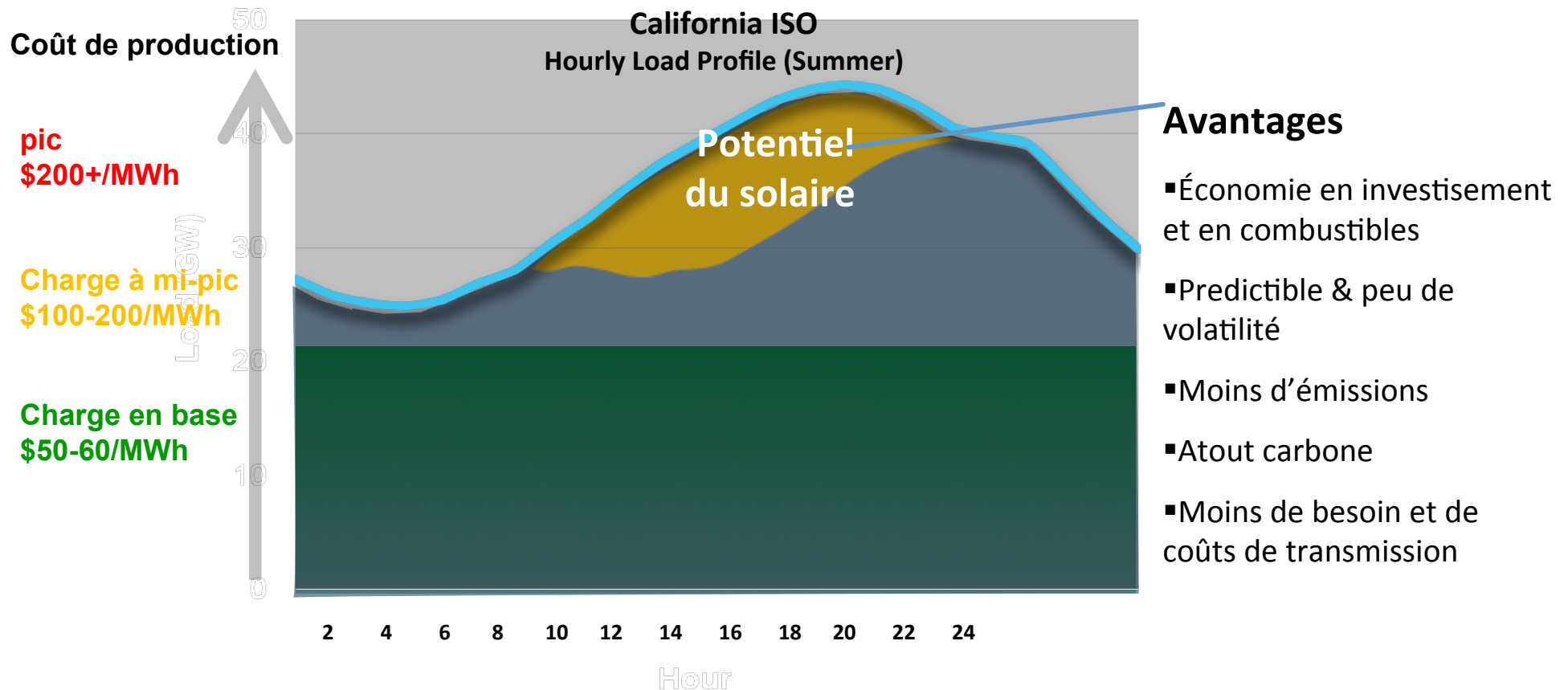
Solar insolation large and varies by only ~ factor of 2 over US  
+ Larger land area than most countries

George Crabtree, *Physics of Sustainable Energy*, Berkeley CA, March 5-6, 2011

# Besoins typiques l'été en Californie

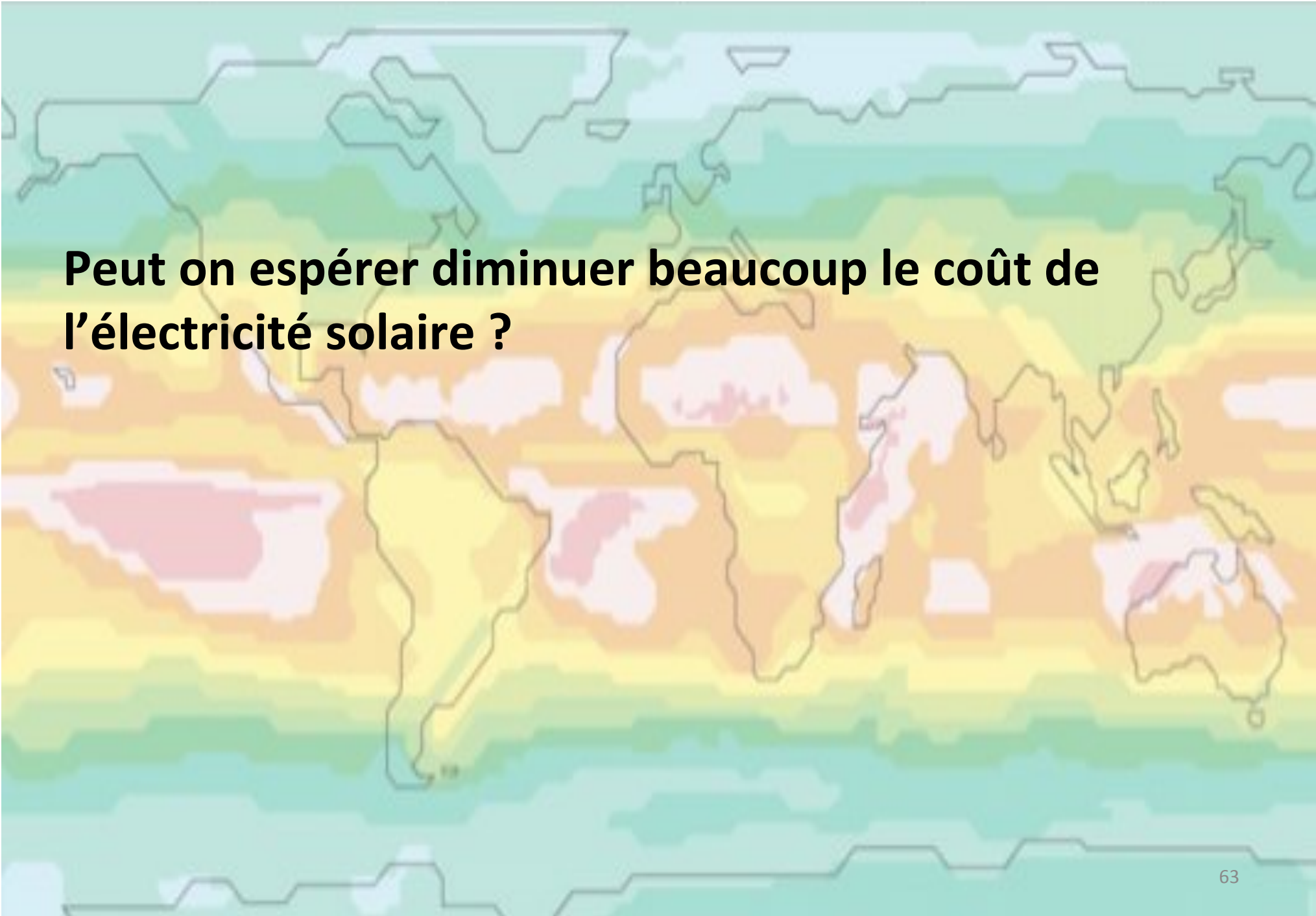
pas de problème d'intermittance, on produit lors du besoin

Le solaire peut fournir > 30% des besoins en génération pic



Source: Load - CAISO, System load Aug 14, 2008  
Assumption: Solar - Solar generation: 15GWp (DC), 18% utilization

On produit l'électricité solaire quand elle vaut plus de US\$ 20 cents le kWh, à un endroit où il y a beaucoup de soleil...<sup>62</sup>

A world map with a heatmap overlay representing solar irradiance. The colors range from dark blue (low irradiance) to dark red (high irradiance). High irradiance areas (red/orange) are concentrated in the tropics, particularly in Africa, South America, and Australia. Lower irradiance areas (blue/green) are found in the high northern and southern latitudes. The map includes black outlines for the continents.

**Peut on espérer diminuer beaucoup le coût de l'électricité solaire ?**

# Composantes du coût du photovoltaïque



+



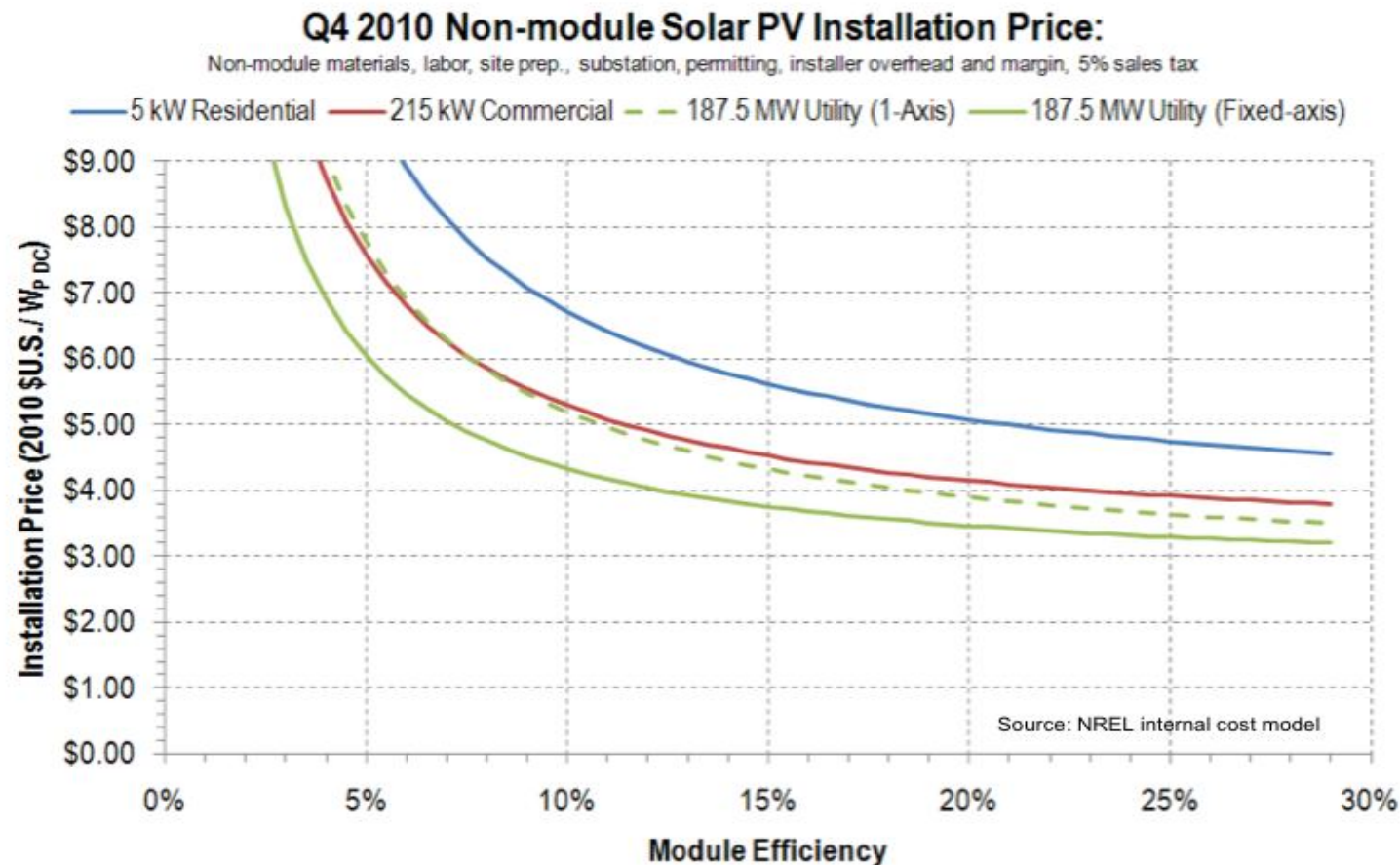
- coûts des matériaux
- Coûts de fabrication
- Rendement du module

- Diminue avec rendement des cellules  
( pour un rendement plus élevé, on utilise moins de surface)
- Taille du module
- Main d'oeuvre
- Coût du site

$$= \frac{\text{Coût / m}^2}{\text{Watt / m}^2}$$



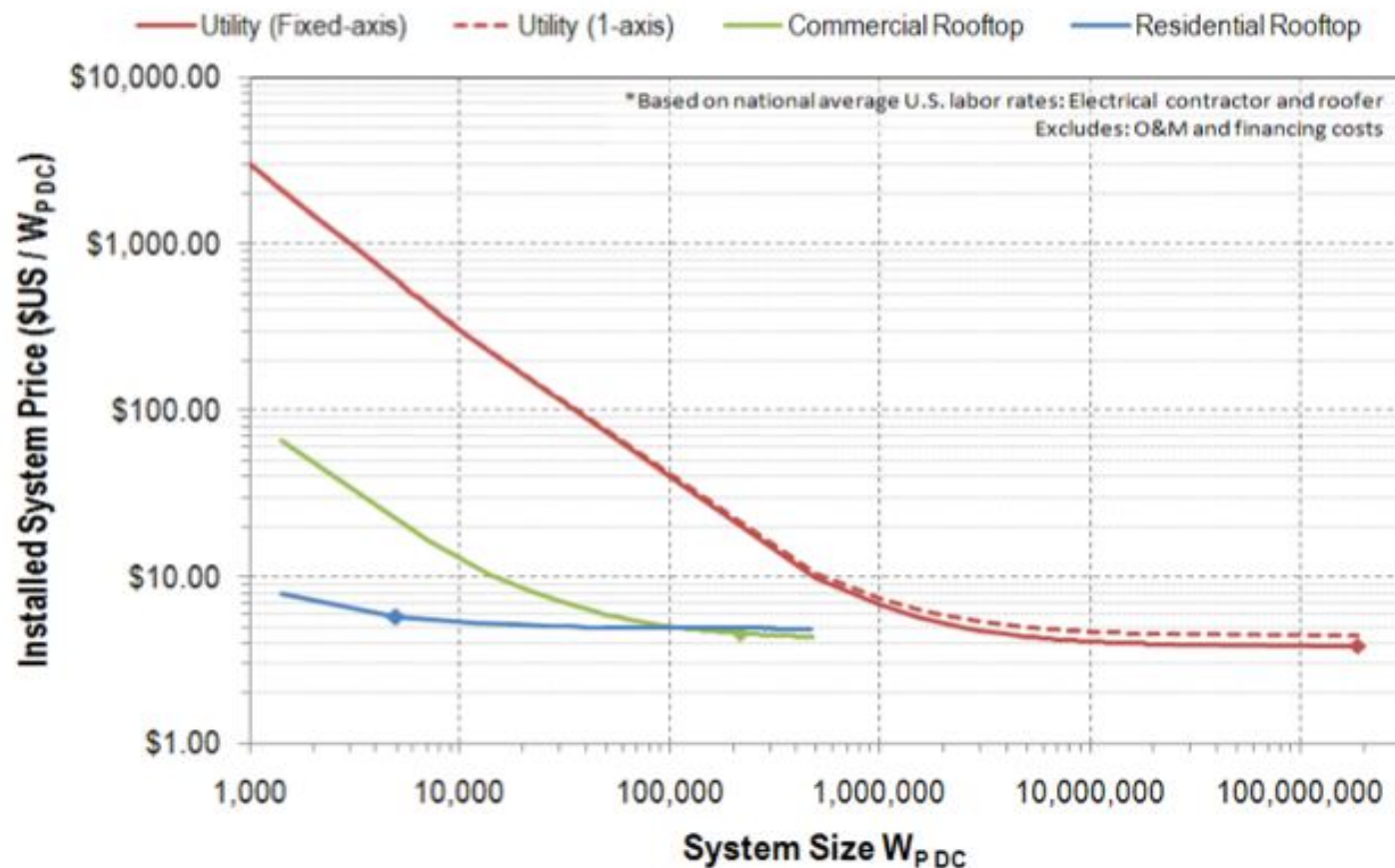
# L'impact du rendement de la cellule sur le coût installé



- \$0.05–\$0.10/W<sub>DC</sub> /1% (absolute)

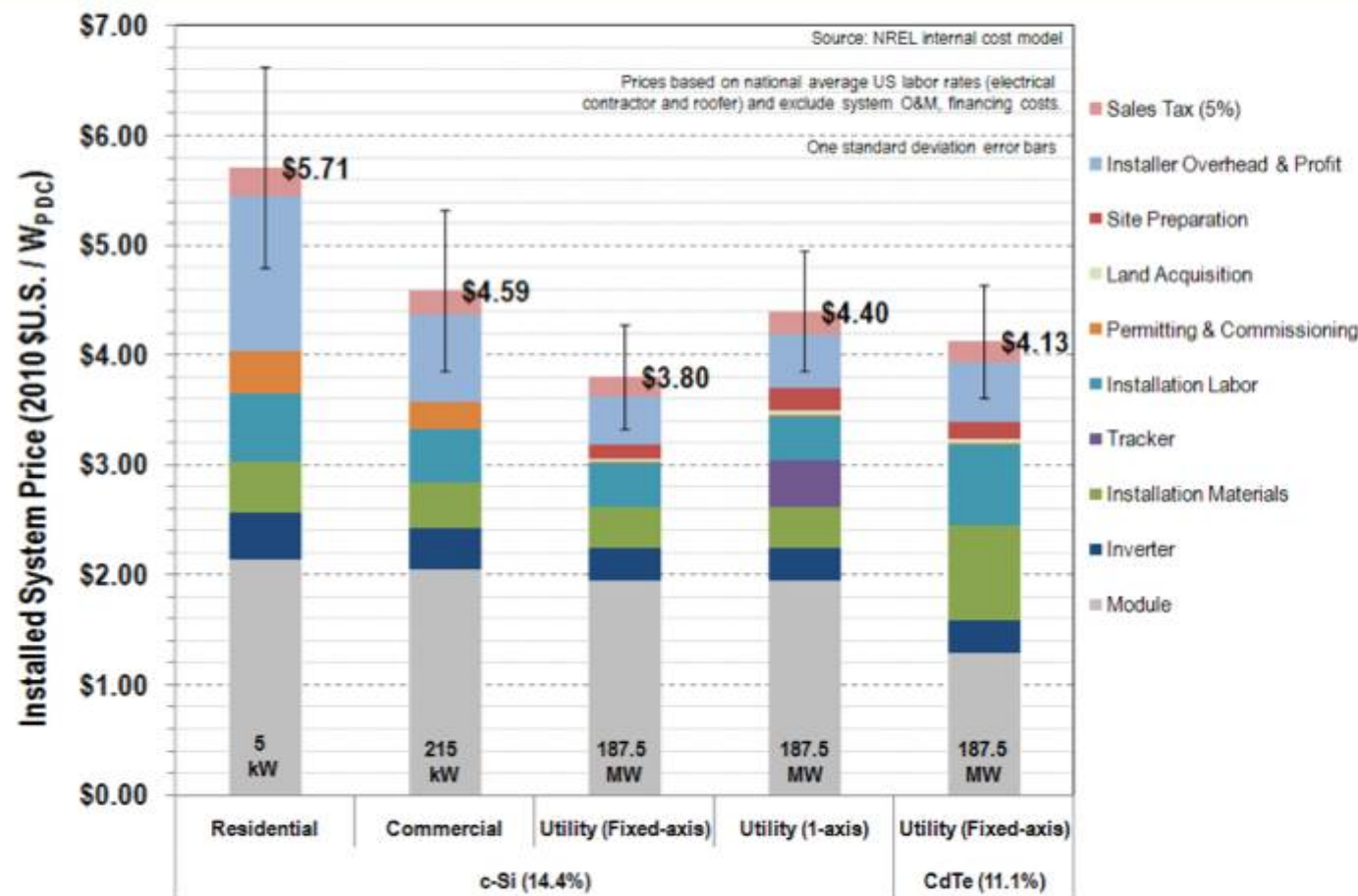


# Economie d'échelle suivant type et taille de l'installation



Trend towards larger system sizes and building block system designs  
Utility-scale benefits nearly fully realized at 20  $MW_{DC}$

# NREL System Price Model: Q4 2010 Results



Composantes  
du coût

- Markup on all materials (module, inverter, and BoS) included in "Installer Overhead & Profit"  
Residential \$0.89/W<sub>DC</sub>, commercial \$0.55/W<sub>DC</sub>, and utility (fixed-axis) \$0.31/W<sub>DC</sub>
- Reflects inventory costs (interest during construction) and contingency

# **Diminuer le coût des cellules solaires/modules**

## **Changer de semiconducteur?**

**Les différents semiconducteurs utilisés dans les cellules solaires**

*Classique: le Silicium “massif”, mono cristallin ou poly cristallin*

*Les filières en couches minces*

**Le silicium amorphe, L'arseniure de gallium, Le CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium), le Tellurure de cadmium**

**Avantages: utilisent moins de matériau**

*Les filières en matériaux organiques*

**Les semiconducteurs en polymères organiques, les cellules en matériaux hybrides (polymères, petites molécules)**

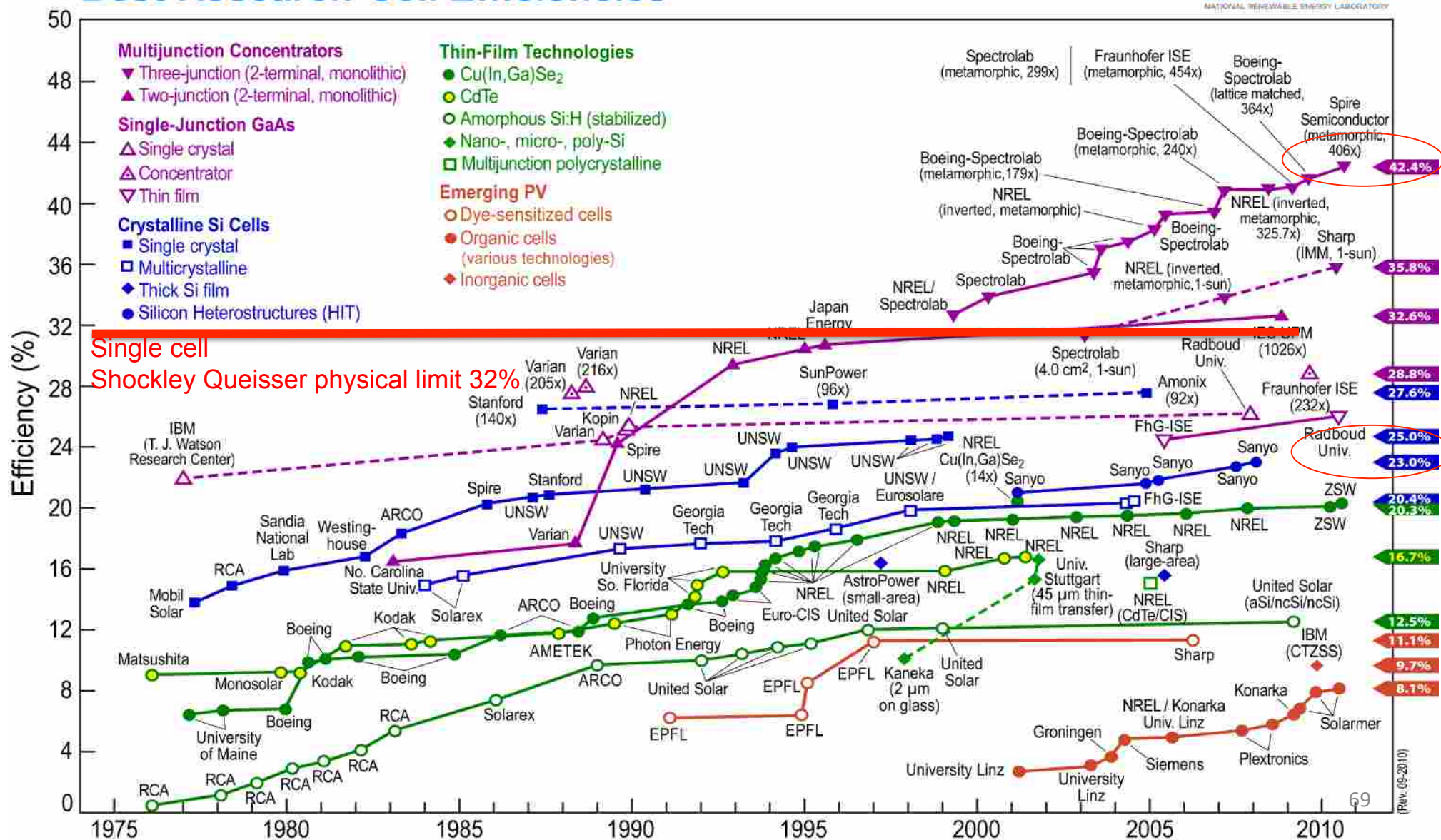
**Avantages: utilisent des matériaux peu chers, en principe**

Ceci permet d'évoluer vers des modes de fabrication moins chers mais le rendement est le plus souvent moins bon qu'avec le silicium massif

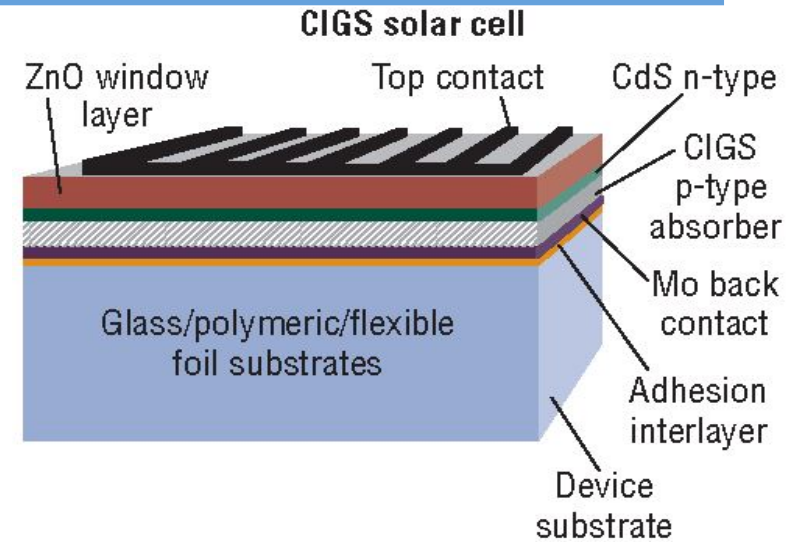
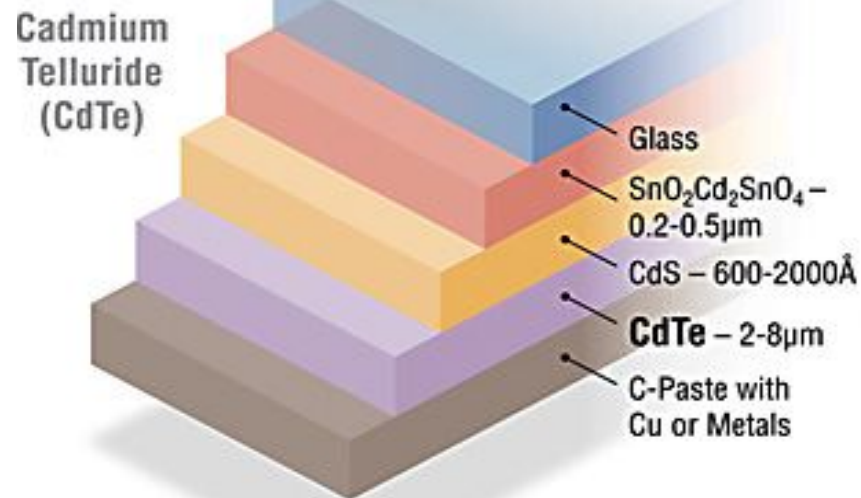
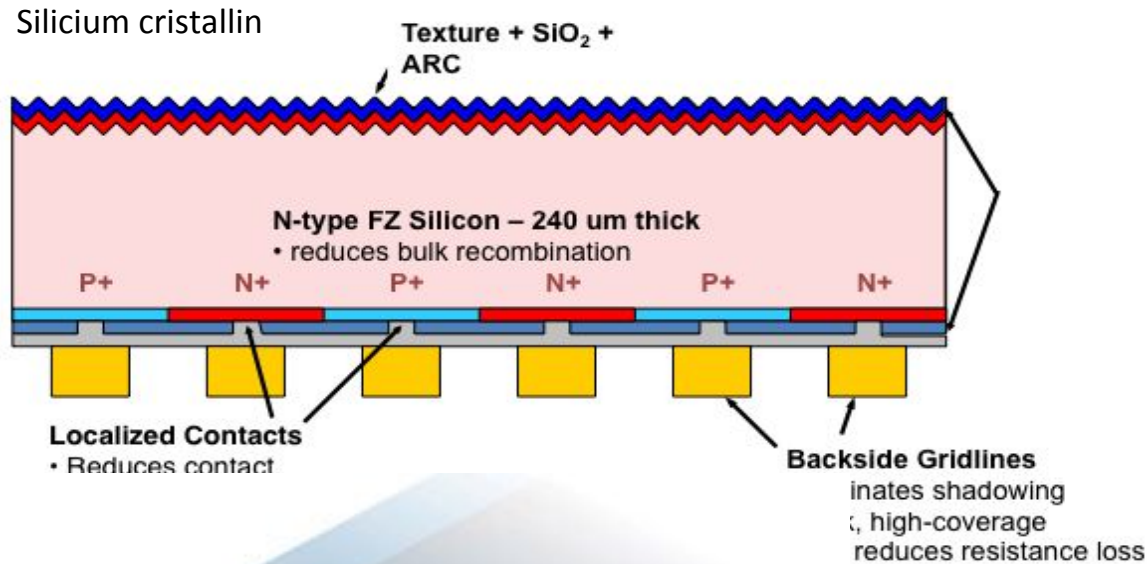


# Efficacité vs temps pour les différentes technologies

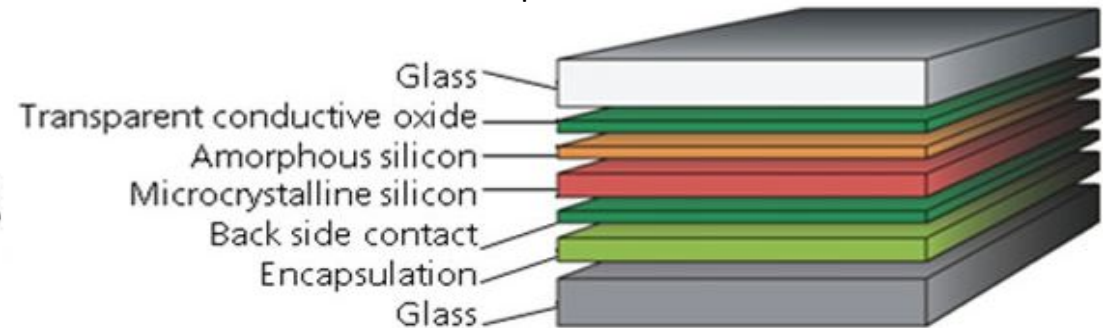
## Best Research-Cell Efficiencies



Les structures des cellules solaires sont toutes complexes. Celles à couches minces nécessitent un substrat et une encapsulation (verre, métal ou plastique) qui peuvent dominer le coût final

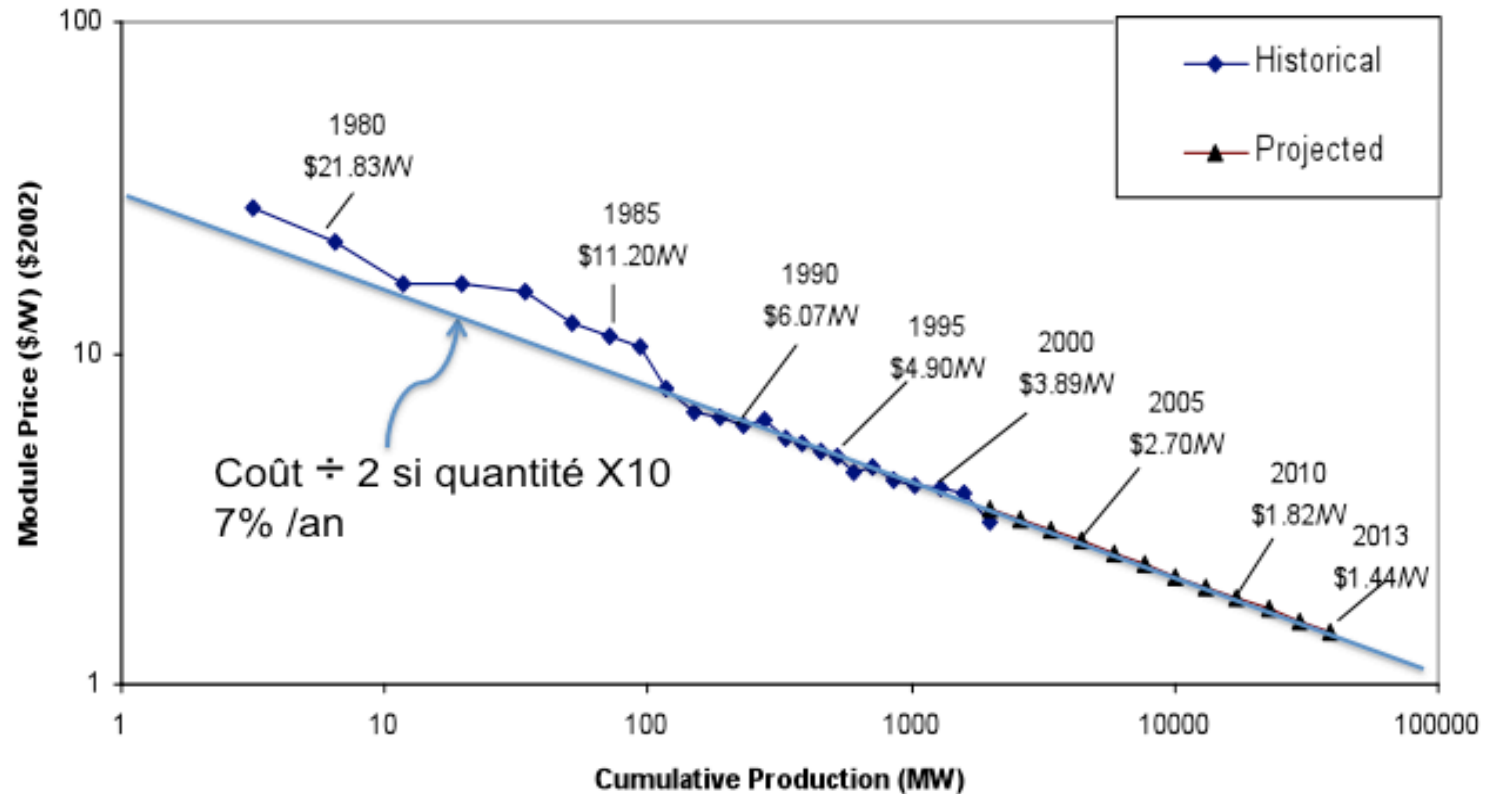


Silicium amorphe en couche mince





Peut on espérer une réduction drastique du coût des cellules solaires (il resterait encore le coût d'installation, qui diminue beaucoup moins vite)



Les coûts diminuent avec la quantité produite, d'un facteur 2 pour une augmentation de production de 10

Il y a une limite due au coût des matières premières et de l'énergie utilisées (cf. les voitures sont à prix constants aujourd'hui).

# Un objectif très ambitieux: le système installé à 1\$/W

Implique:

- Rendement  $\geq 25\%$  pour diminuer surface
- Fabrication en continu sur rouleau (pas sur verre)
- équipements électriques (convertisseurs courant continu/alternatif, raccordement réseau) ayant une durée de vie  $\gg 10$  ans
- nouveaux concepts de montage des installations à bas coût

25% et 0.5\$/W impliquent 125 \$/m<sup>2</sup>. Pour une telle surface de matériaux à très grande sophistication, il n'est pas du tout clair comment y arriver.

Prix du KWh

- suppose fort ensoleillement (26 à 28%) pour augmenter production par watt-crête

## Installed System Price (\$/W)

|                   | 2010    | 2016    | \$1/Watt |
|-------------------|---------|---------|----------|
| Module            | \$ 1.70 | \$ 1.05 | \$ 0.50  |
| BOS/Installation  | \$ 1.48 | \$ 0.97 | \$ 0.40  |
| Power Electronics | \$ 0.22 | \$ 0.18 | \$ 0.10  |
|                   | \$ 3.40 | \$ 2.20 | \$ 1.00  |

## Cost of Energy (\$/kwh)

|                   | 2010     | 2016     | \$1/Watt |
|-------------------|----------|----------|----------|
| Module            | \$ 0.063 | \$ 0.037 | \$ 0.018 |
| BOS/Installation  | \$ 0.055 | \$ 0.034 | \$ 0.014 |
| Power Electronics | \$ 0.008 | \$ 0.006 | \$ 0.004 |
| O&M               | \$ 0.013 | \$ 0.009 | \$ 0.003 |
|                   | \$ 0.139 | \$ 0.086 | \$ 0.038 |

Table 1: Potential utility scale system cost breakdown to reach \$1/watt (note capacity factors assumed are 26% in 2010 and 28% in 2016)

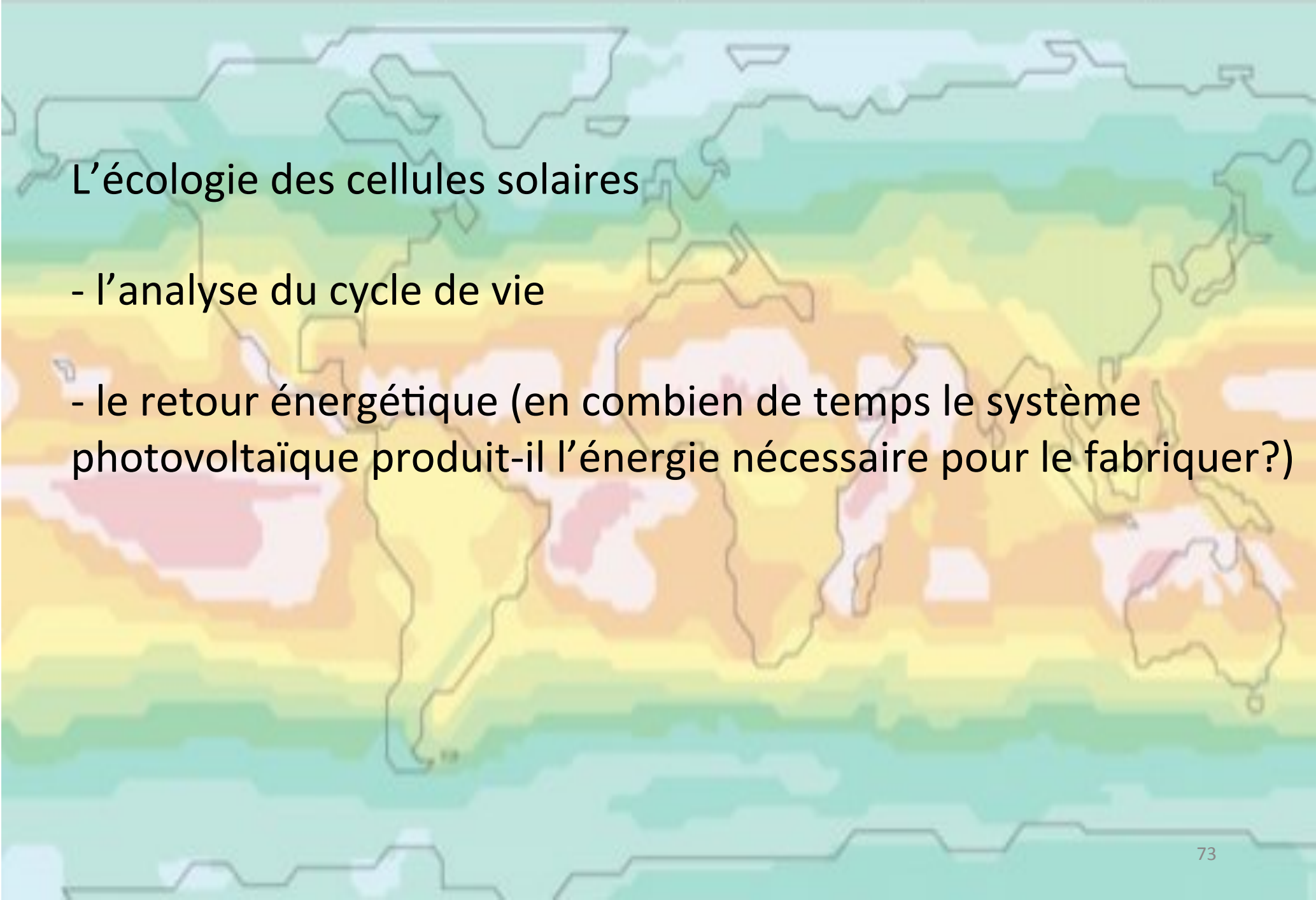
[http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw\\_white\\_paper.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw_white_paper.pdf)

[www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw\\_chu.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw_chu.pdf)

[http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw\\_lushetsky.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw_lushetsky.pdf)

Voir aussi Why Are Residential PV Prices in Germany So Much Lower Than in the United States?

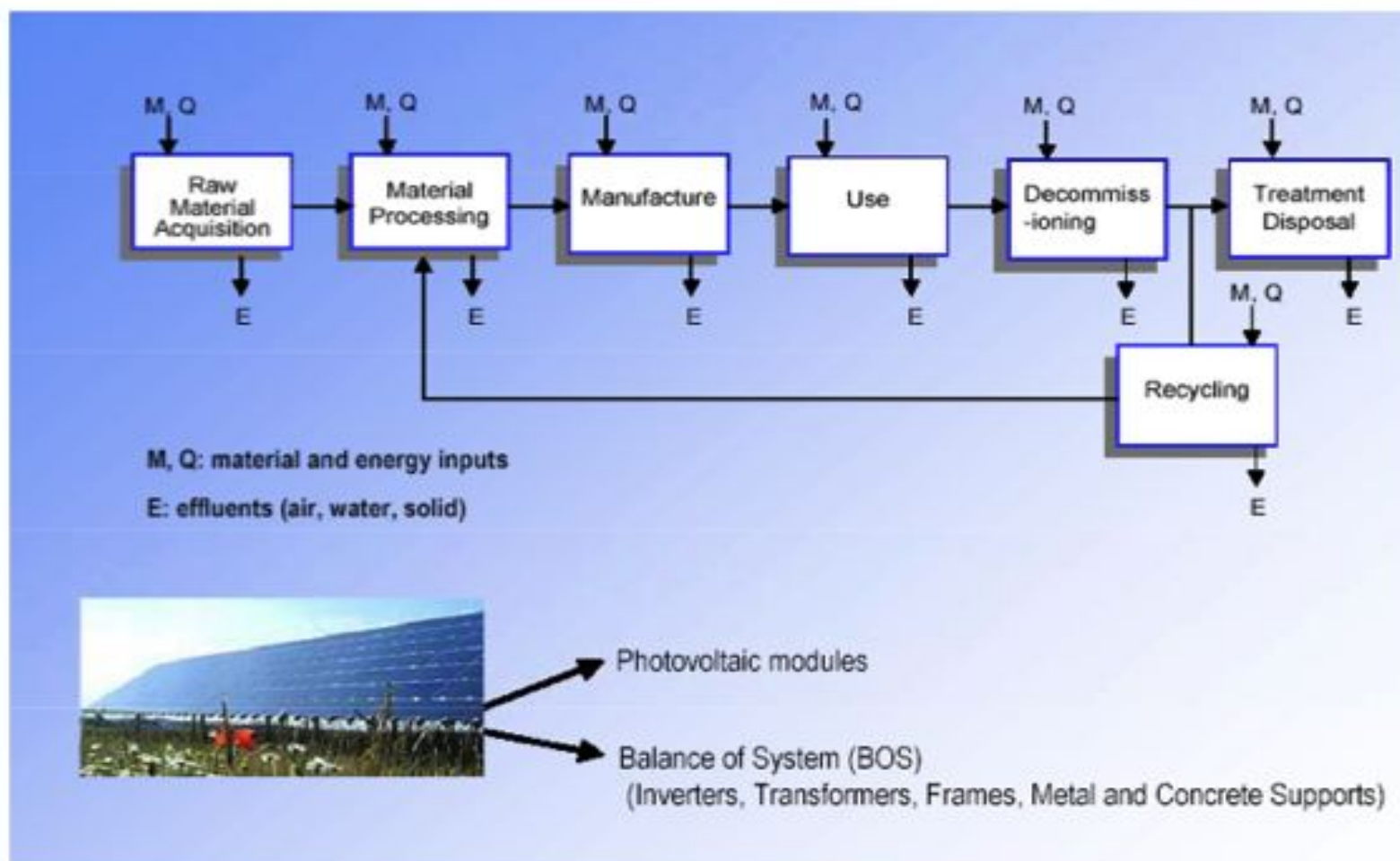
<http://emp.lbl.gov/sites/all/files/german-us-pv-price-ppt.pdf>

A world map with a color gradient background. The colors range from light green in the northern and southern latitudes to yellow and orange in the tropical regions, with some pinkish-red areas in the tropics. The map shows the outlines of continents and major water bodies.

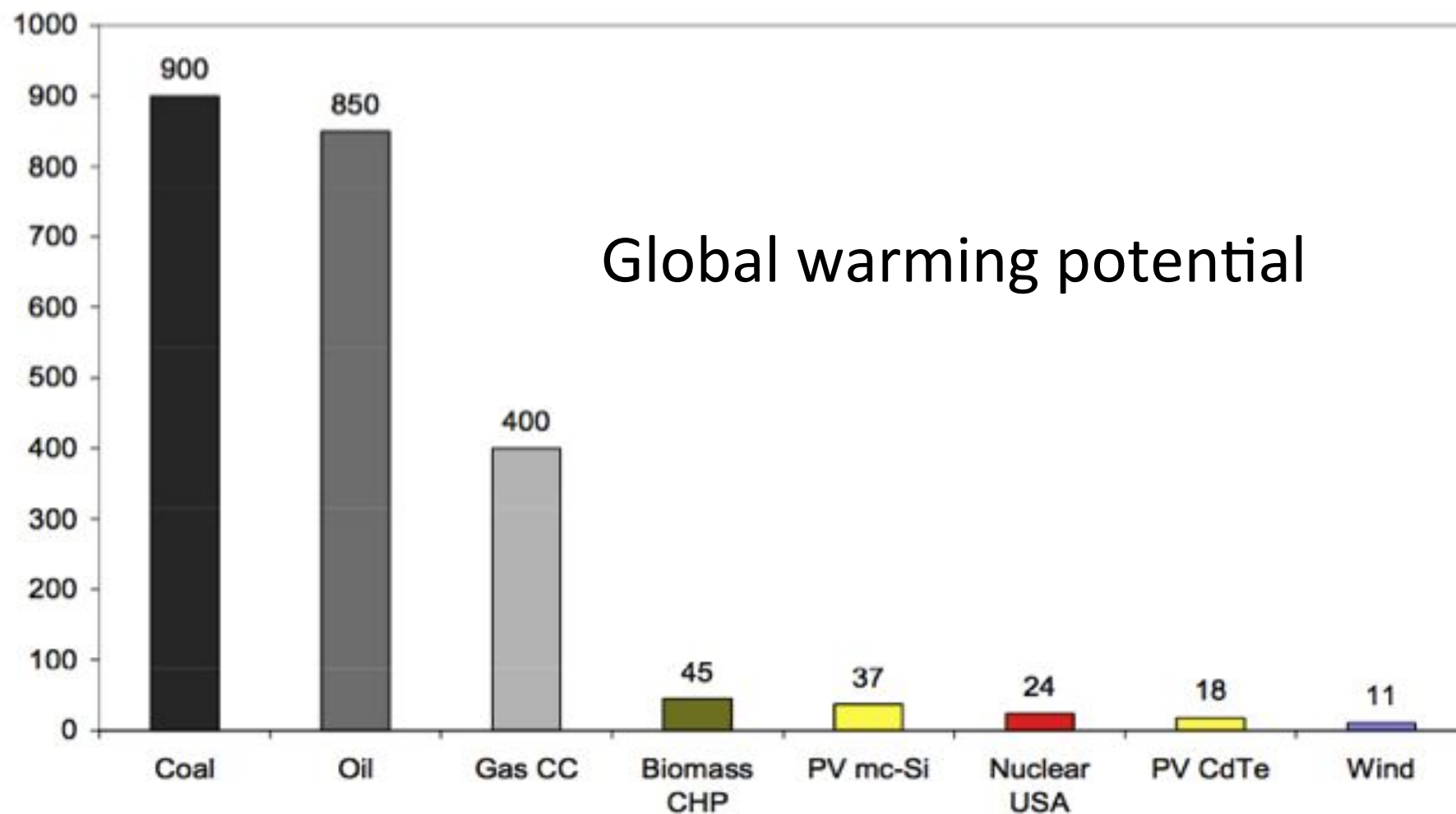
## L'écologie des cellules solaires

- l'analyse du cycle de vie
- le retour énergétique (en combien de temps le système photovoltaïque produit-il l'énergie nécessaire pour le fabriquer?)

# The Life Cycle of PV



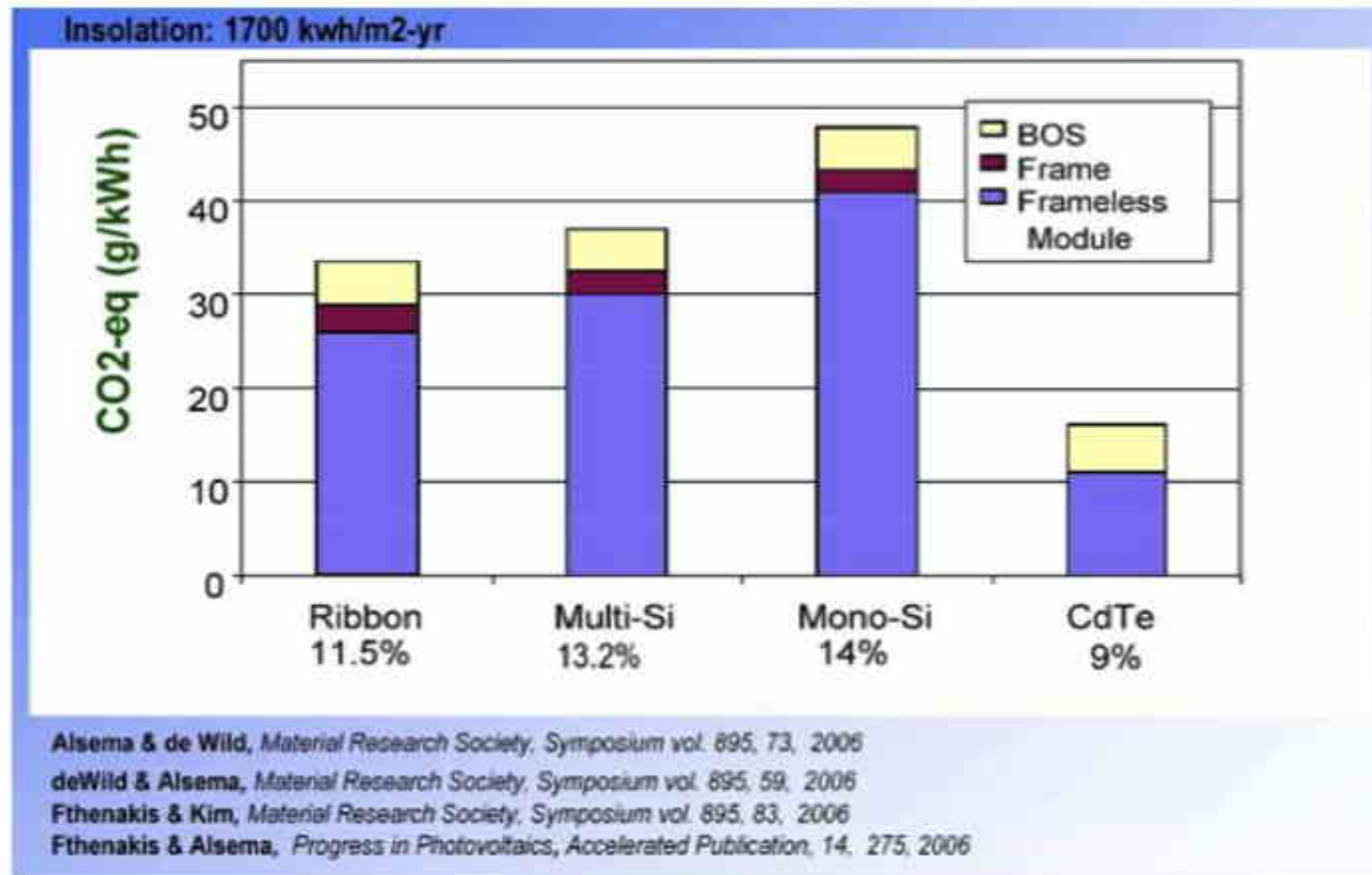
# Empreinte CO2 des différentes sources d'énergie



Sources: ExternE project, 2003; Kim and Dale, 2005; Fthenakis and Kim, 2006; Fthenakis and Alsema, 2006; Fthenakis and Kim, in press.



# Empreinte CO2 des différentes cellules solaires



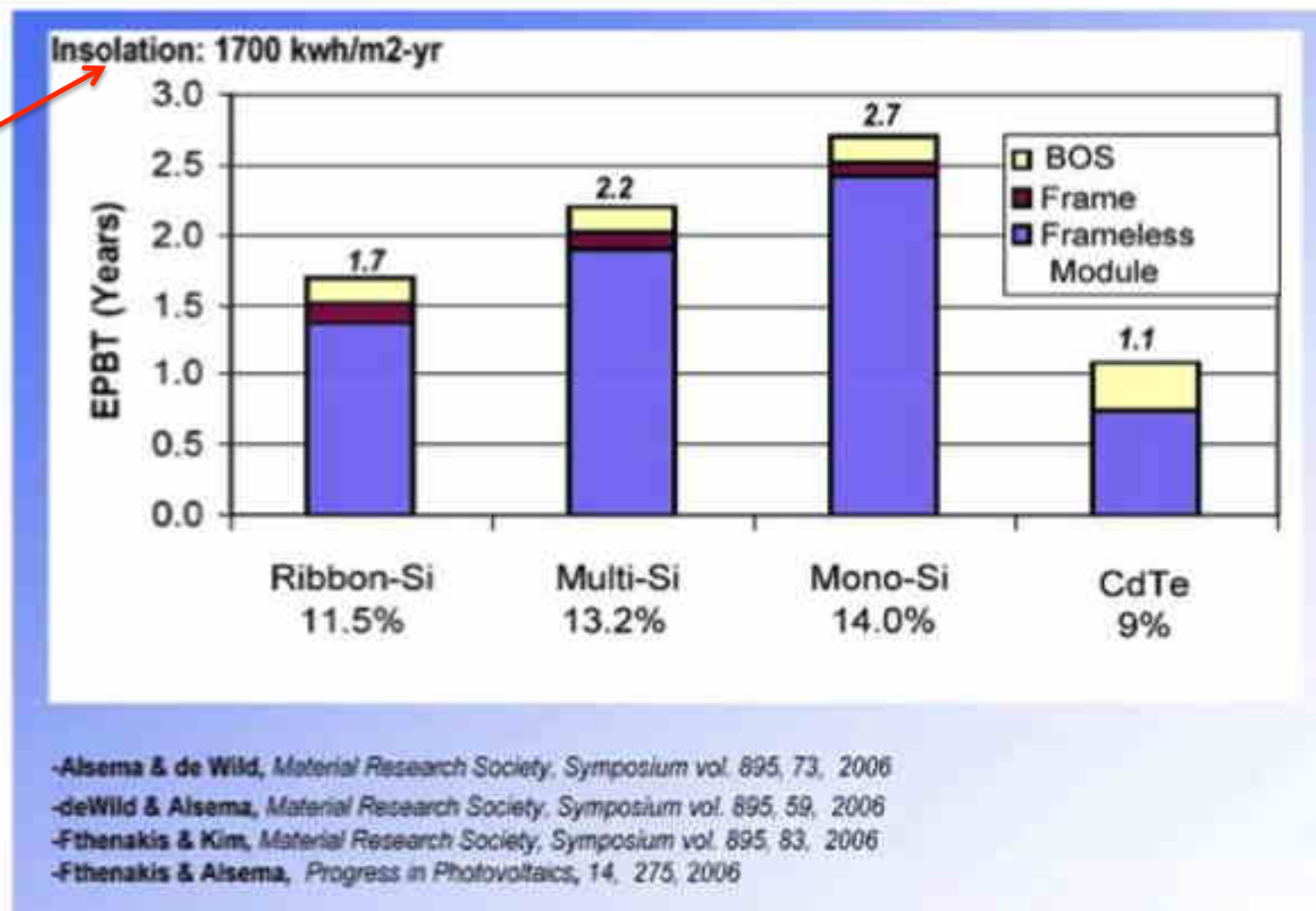
Autres questions:

- La disponibilité des matériaux
- le recyclage en fin de vie

## Temps de retour de l'énergie utilisée pour produire les cellules

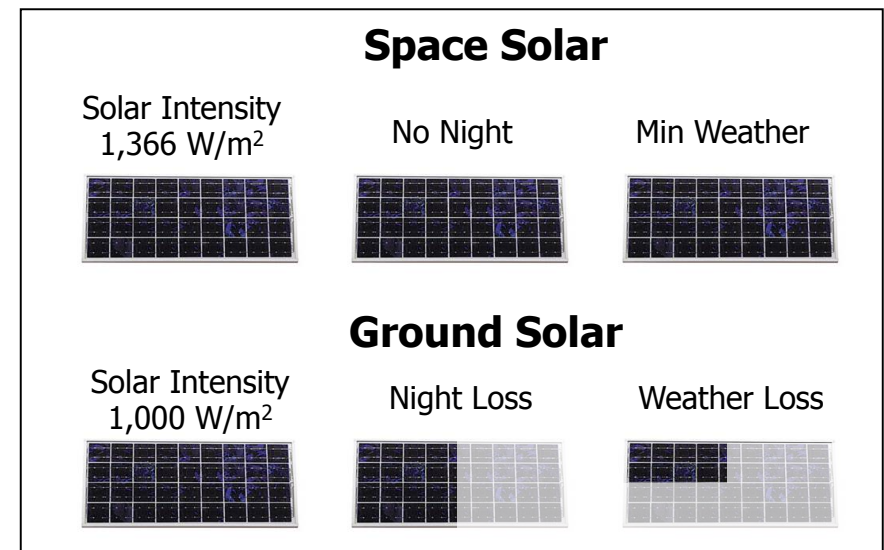
### Energy Pay-Back Time

Ca serait  
nettement moins  
bon à 900h/an.

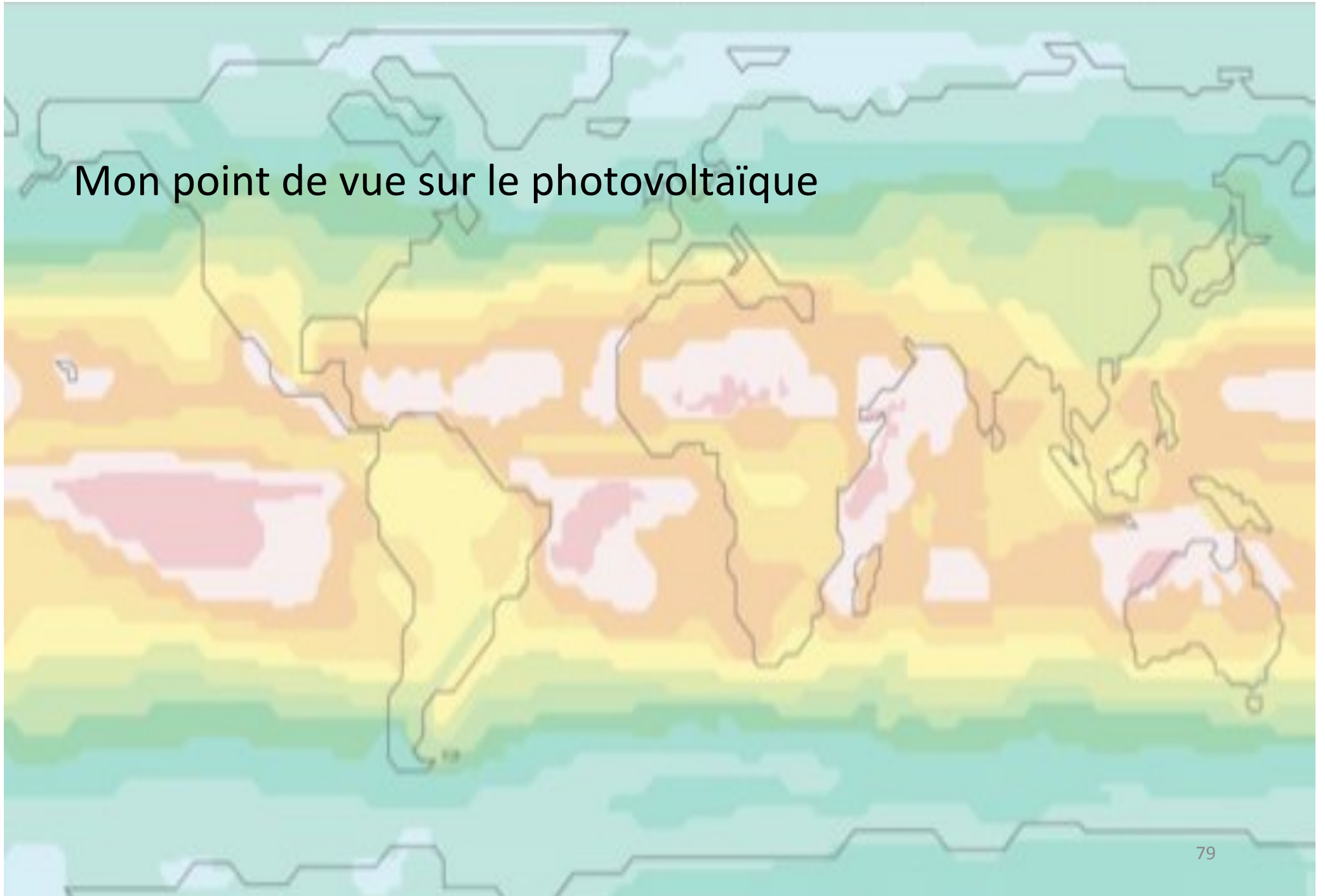


# Le satellite solaire producteur d'électricité ?

- **L'énergie** solaire est capturée dans l'espace par un grand système de cellules et transmis sur terre par un faisceau de rayonnement micro ondes ou laser vers un récepteur où il est reconverti en électricité
- L'énergie solaire capturée dans l'espace ne connaît ni la nuit, ni les nuages. Fonctionnant en continu, le gain (dans l'espace) est de 8760 heures/nombre d'heures moyennes d'ensoleillement/an sur la terre, soit 4 à 6 par rapport à un emplacement raisonnable sur terre.
- Les conversions en rayonnement dans l'espace et sur terre ont au mieux un rendement total de 40%.
- Le gain à l'opération dans l'espace, ramené sur terre, n'est plus que de 2,5 à 3,5
- L'emprise au sol est de l'ordre de la surface en l'air puisque la densité de rayonnement ne saurait être élevée sur la surface irradiée par le satellite
- est-il raisonnable de penser que les coûts sur terre et dans l'espace, lancement et entretien sur 30 ans au moins, peut être inférieur d'un facteur 4 à ce qu'il est sur terre?



Mon point de vue sur le photovoltaïque



## Production et utilisation locale

### Zones rurales et/ou isolées

## **DONT PAYS EN DEVELOPPEMENT**

- - Basses puissances: quelques Watts à 1kW
- - Problèmes techniques RESOLUS
- - La meilleure (sinon la seule) solution pour les zones isolées

**CONSENSUS GENERAL**  
**C'est la bonne solution**

## Production **décentralisée** d'électricité dans

### **LES PAYS INDUSTRIALISES**

## **A FORT ENSOLEILLEMENT**

- effacement de la consommation de pointe
- Remplacement long terme des centrales conventionnelles (si solution pour stockage et smart grid longue distance)

**POSSIBLE**

## Production **centralisée** d'électricité dans

### **LES PAYS INDUSTRIALISES**

- Centrales de 1000 MW
- Remplacement long terme des centrales conventionnelles

**SUJET POLEMIQUE !**

**(Utopie ou réalité ?)**

**Voir la situation allemande ci-après**



Pour avoir une vue sur la situation en France  
Voir le rapport Charpin

[http://www.cgiet.org/documents/  
2010\\_07\\_31\\_1\\_Rapport\\_Regulation\\_et\\_developpement\\_filiere\\_photovoltaique\\_en\\_france.pdf](http://www.cgiet.org/documents/2010_07_31_1_Rapport_Regulation_et_developpement_filiere_photovoltaique_en_france.pdf)

# Impact dans les pays en voie de développement: LED + Solaire

**Light Up The World Foundation**



See [www.lutw.org](http://www.lutw.org)



[www.lutw.org](http://www.lutw.org)

- Kerosene lighting and firewood are used by 1/3 of the world; they cause countless fires and are very inefficient (0.03 lm/watt).

- The average villager spends 10-25% of their annual income on kerosene.

- LED Lighting costs much less on an annual basis and payback period is just 6 months.

- LED Lighting allows education at night and increases safety for the Third World.

*"In the few months we have had the White LED lamps the improvement in the children's academic performance has been absolutely remarkable"*

**Headmaster, Mubarak Village, Pakistan June 2004**



*If we seriously wish to make efficient use of resources to diminish CO<sub>2</sub> emission, best way is photovoltaics +LED lighting to replace kerosen lighting, not PV electricity generation in Europe!*

## ***Solid State Lighting for the Developing World - The Only Solution***

Rodolfo Peon, Ganesh Doluweera, Inna Platonova, Dave Irvine-Halliday, Gregor Irvine-Halliday

Light Up The World Foundation  
Dept. of Electrical & Computer Engineering,  
Schulich School of Engineering  
University of Calgary  
2500 University Drive N.W., Calgary, AB, Canada T2N 1N4

Proc. SPIE 5941, Fifth International Conference  
on Solid State Lighting, 59410N (2005)

www.lutw.org

35 lm/W

60 lm/W

| Parameter                             | Incandescent    | Compact Fluorescent | Luxeon K2 WLED | Kerosene Wick Lamp |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Lamp Consumption †                    | 25 W            | 7 W                 | 1 W            | 0.05 L/h           |
| Lamp Cost (USD)                       | \$ 1            | \$ 3                | \$ 10          | \$ 1               |
| Lamp Luminous Output (lm)             | 250             | 250                 | 60             | 10                 |
| Lamp Lifetime (hours)                 | 1 000           | 6 000               | + 50 000       | 5 000              |
| <b>Lamp Lifetime Lumen-hours / \$</b> | <b>250 000</b>  | <b>500 000</b>      | <b>300 000</b> | <b>50 000</b>      |
| <b>Lifetime Cost of Lamps</b>         | <b>\$ 50</b>    | <b>\$ 25</b>        | <b>\$1 0</b>   | <b>\$ 10</b>       |
| <b>Lifetime Energy Consumption</b>    | <b>1250 kWh</b> | <b>350 kWh</b>      | <b>50 kWh</b>  | <b>2500 L</b>      |
| Lifetime Energy Costs ‡               | \$ 1250         | \$ 350              | \$ 50          | \$ 1250            |
| Total System Operating Cost           | \$ 1300         | \$ 375              | \$ 60          | \$ 1260            |
| <b>System Lumen-hours / \$</b>        | <b>9 615</b>    | <b>33 333</b>       | <b>50 000</b>  | <b>396.82</b>      |
| Total System Cost per Lumen           | \$ 5.2 / lm     | \$ 1.5 / lm         | \$ 1 / lm      | \$ 126 / lm        |
| Lumens per Dollar                     | 0.2 lm / \$     | 0.66 lm / \$        | 1 lm / \$      | 0.008 lm / \$      |

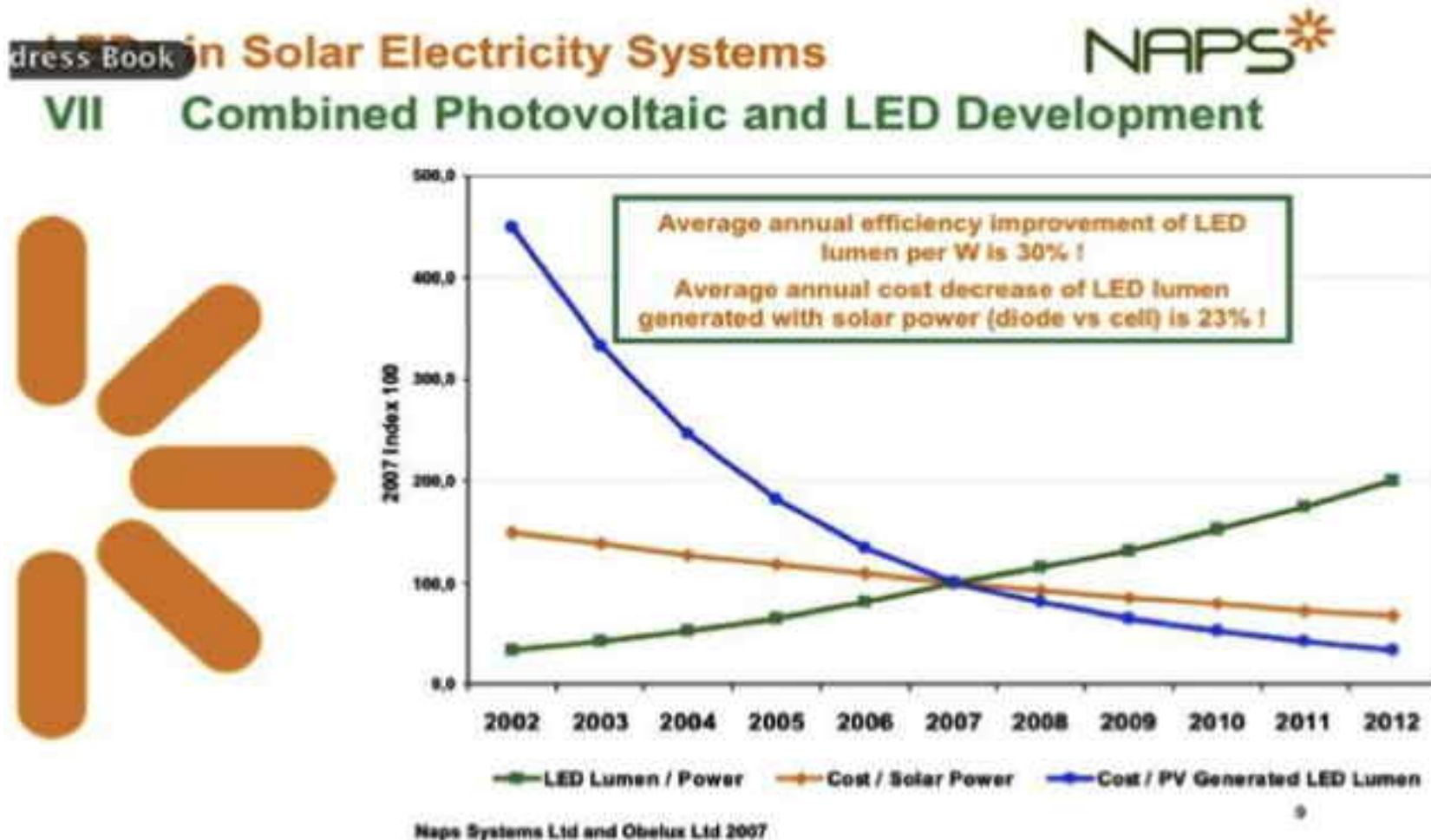
10lm/W

Assumes 1\$/kWh solar PV+storage

**Table 3:** Cost comparison between different light sources suitable for grid-independent lighting after 50 000 hours of operation

# Impact dans les pays en voie de développement

## Cellules solaires+ DELs



# Un dilemme: PV ou DEL?

## L'impact de la densité d'énergie

Je dispose de GaN de bonne qualité

Vaut-il mieux faire des cellules solaires (production d'électricité) ou des diodes émettrices de lumière?

1 m<sup>2</sup> de GaN

PV supposons 30% => génère **300W** pendant 3h par jour à la puissance crête\*

DEL: puissance injectée=  $3V \times 100A/cm^2 \times 10\,000cm^2 = \mathbf{3MW}$ , pendant 3h par jour

Puissance économisée: au moins autant (remplace plutôt des sources 3 à 30 fois moins efficaces)

Même en concentrant 1000 fois le soleil, un facteur 10 de différence!

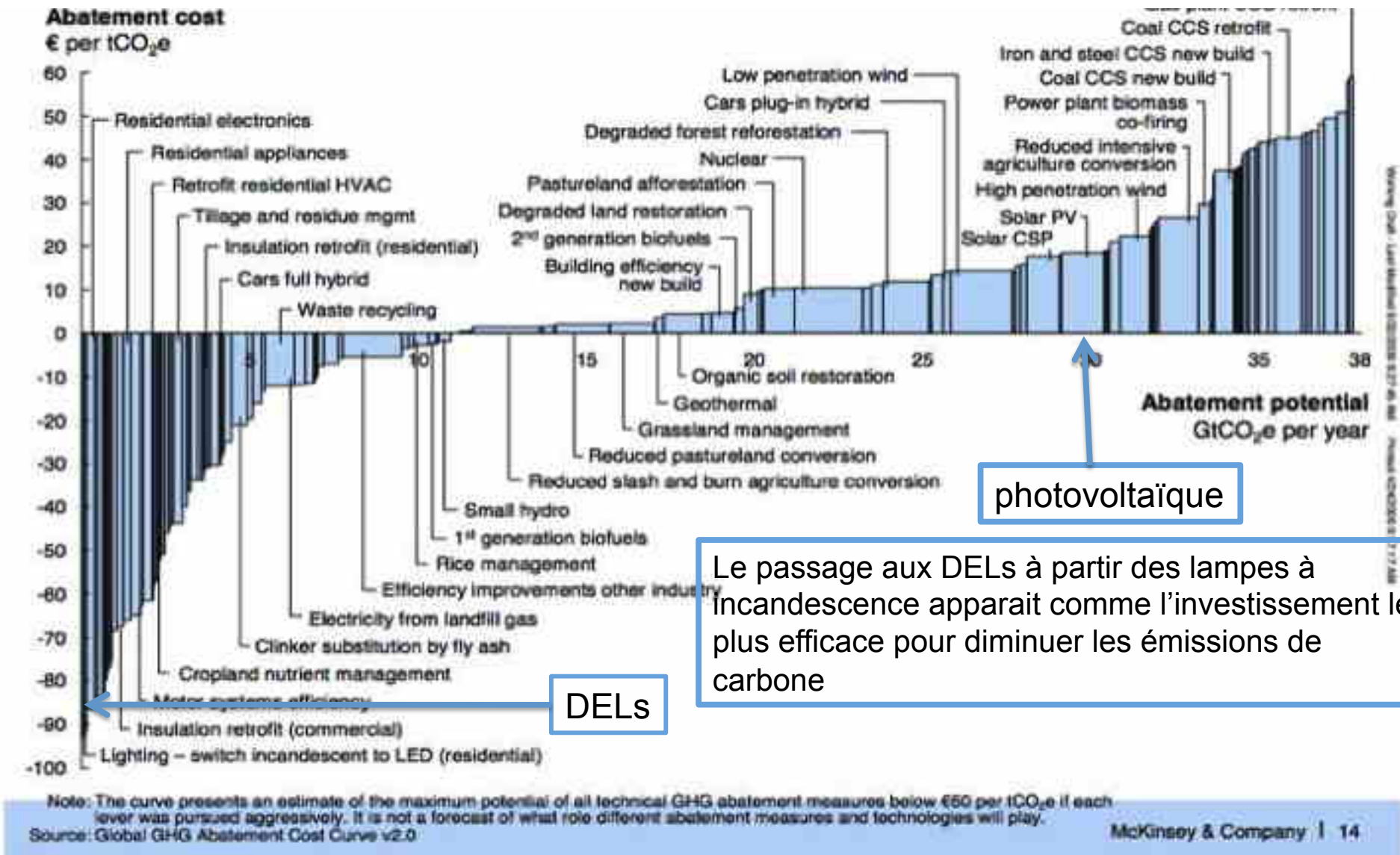
Il vaut mieux, pour l'instant, faire des DELs avec le GaN

Ceci est bien évidemment dû à la grande densité de courant dans la DEL (100A/cm<sup>2</sup> injectés) au lieu de 10A/cm<sup>2</sup> à concentration 1000 ( $1000 \times 1kW/m^2 = 100W/cm^2$  @30% =  $30W/cm^2 = 10A/cm^2$  sous 3V)

L'énergie solaire est peu dense



## Efficacité des investissements en vue de la diminution des émissions de carbone (les investissements les plus efficaces sont à gauche)



## En guise de bilan

### Photovoltaïque

Cellules peuvent encore gagner 10 à 15% de rendement (passer de 20 à 35%).

Diminution de coût: arriver à US \$ 1 par Wcrête installé

Débat: concentrer ou pas?

Génération d'électricité

*En production de crête*

Déjà rentable là où il y a beaucoup de soleil et/ou où l'électricité est chère

*En production de base*

Peut être intéressant là où il y a du soleil, mais nécessite stockage, à court terme (1 à quelques jours), et capacité à fournir électricité de remplacement en cas de longue période sans ensoleillement)

### Diodes émettrices de lumière

Techniquement au point, mais réduction de coût très importantes possibles par augmentation de la densité de courant.

Très rentables mais sommes nous prêts à payer une lampe 10 fois plus cher (15-30 €), sachant qu'elle remboursera en électricité économisée 50 kWh/an (5€/an), donc qu'elle sera remboursée en 6 ans seulement ?

Gardera t-on la même lampe 25 ans? (Sa durée de vie estimée!)

Comme le prix des DELs décroît de 30% / an, préférons nous attendre?

(Pas au Japon car pénurie d'électricité)

## Addendum: Actualité des prix de l'électricité en pays développé

Les prix de l'électricité sont actuellement, et sans doute pour un certain temps, très bas

Cela est du,

aux USA: A l'irruption du gaz de schistes, qui a déprimé le prix du gaz et du charbon, sans doute durablement. Du coup, le prix de l'électricité chute aussi, ce qui va fortement impacter le développement des énergies renouvelables

En Europe, le prix du gaz reste très élevé (d'un facteur 3 à 4) car le plus souvent indexé sur le prix du pétrole (le gaz américain est interdit d'exportation aujourd'hui, comme le pétrole US).

Par contre le prix du charbon a diminué d'un facteur 3 depuis son pic

Le recours aux énergies renouvelables non carbonées (hors hydroélectricité) n'est plus rentable que par un fort renchérissement de l'électricité carbonée, la taxe carbone. Celle-ci n'existe pas au niveau mondial. Les chances d'y parvenir dans un avenir proche sont quasi nulles (?).

Il existe en Europe des droits à émission. Si on est en dessous ou au dessus, on peut échanger ces droits monétairement. Mais il y a une forte dégradation du prix des droits, aujourd'hui à 6-7.5 €/tCO<sub>2</sub>, voire 2,8 €/tCO<sub>2</sub> en janvier 2013, au lieu de 30 €/tCO<sub>2</sub> en 2008.

Quelle surcoût pour l'énergie? Cela dépend des émissions par source d'énergie:

charbon = 800 to 1050g/kWh [ $\Rightarrow$  incidence = 0.7cent/kWh@7 €/tCO<sub>2</sub>]. Gaz naturel (combined cycle) = 430 g/kWh; Nucleaire = 6 g/kWh; Hydroelectrique = 4 g/kWh ; bois = 1500 (sans replanter); PV = 60 to 150 g/kWh; Eolien= 3 to 22 g/kWh.

Le surcout n'est que de 0.7cent/kWh pour le charbon, pas de quoi compenser son faible cout.

## Differents couts de l'electricite

|                                                               |                                                                          |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                               | Incidence source fossile :<br>80% sur prix final                         |
| Impact prix Gaz US \$4 pour 1,000 cubic feet<br>Europe \$8-12 | <b>1.2 \$ cent/kWh</b><br><b>3.6-4.8 \$ cent/kWh</b>                     |
| Impact prix Charbon Europe @ \$85 par tonne                   | <b>1.26ct/kWh</b>                                                        |
| Impact prix Pétrole @ \$ 100 le baril                         | <b>6 \$ cent/kWh</b>                                                     |
| Nucléaire                                                     | Environ <b>5 € cent/kWh</b><br>l'investissement est<br>80% du cout final |
| Solaire avec <b>seulement prix module 1W= 1\$ = 20kWh/an</b>  | <b>5 \$ cent/kWh</b>                                                     |
| Prix spot en Europe                                           | De <b>négatif à 1,2 €/kWh</b><br>moyenne <b>5.5 cent/kWh</b>             |
| Prix Baseline 2014 en Europe (proposé en février 2013)        | <b>4.4 € cent/kWh</b>                                                    |

Eléments de calcul:

1 cubic meter of commercial quality **natural gas** is around 39 [megajoules](#) ( $\approx 10.8$  [kWh](#))

[1 m<sup>3</sup> is 36 cubic feet; = 36 000 BTU = 36 MJ = 10 kWh CQFD]

**In the US**, january 2013 @\$4 per 1,000 cubic feet (28 m<sup>3</sup>) [In 2007: \$7 ]

\$4 = 280 kWh = > 1 kWh = => **1.2 cent \$ cent/kWh.**

=> **in Europe**, gas price from Russia x3 ou 4= **3.6-4.8 \$ cent/kWh.**

1 liter **gasoline** = 10 kWh

100\$/barrel = 160l => 1l = 60cents => **6 \$ cent/kWh**

jan 2013 **European spot coal** import prices are trading around \$85 per tonne (divided by 2 in 1 year) (Reuters)

Coal : 24 [megajoules](#) per kilogram (approximately 6.7 [kWhs](#) per kg)

1 tonne => 6700 kWh = \$85 => **1.26 \$ ct/kWh**

Other source: Reuters Gas benchmark British spot prices are trading around 66 pence (\$1.10) per therm (p/th) (1th = 100,000 BTU = 100 MJ = 30 kWh).

=> 30 kWh = \$1.1 => 1 kWh = 3.4 \$ cent/kWh

The **British thermal unit** (symbol **Btu** or sometimes **BTU**) is a traditional unit of [energy](#) equal to about 1055 [joules](#). It is the amount of energy needed to heat one pound of water by one degree Fahrenheit.

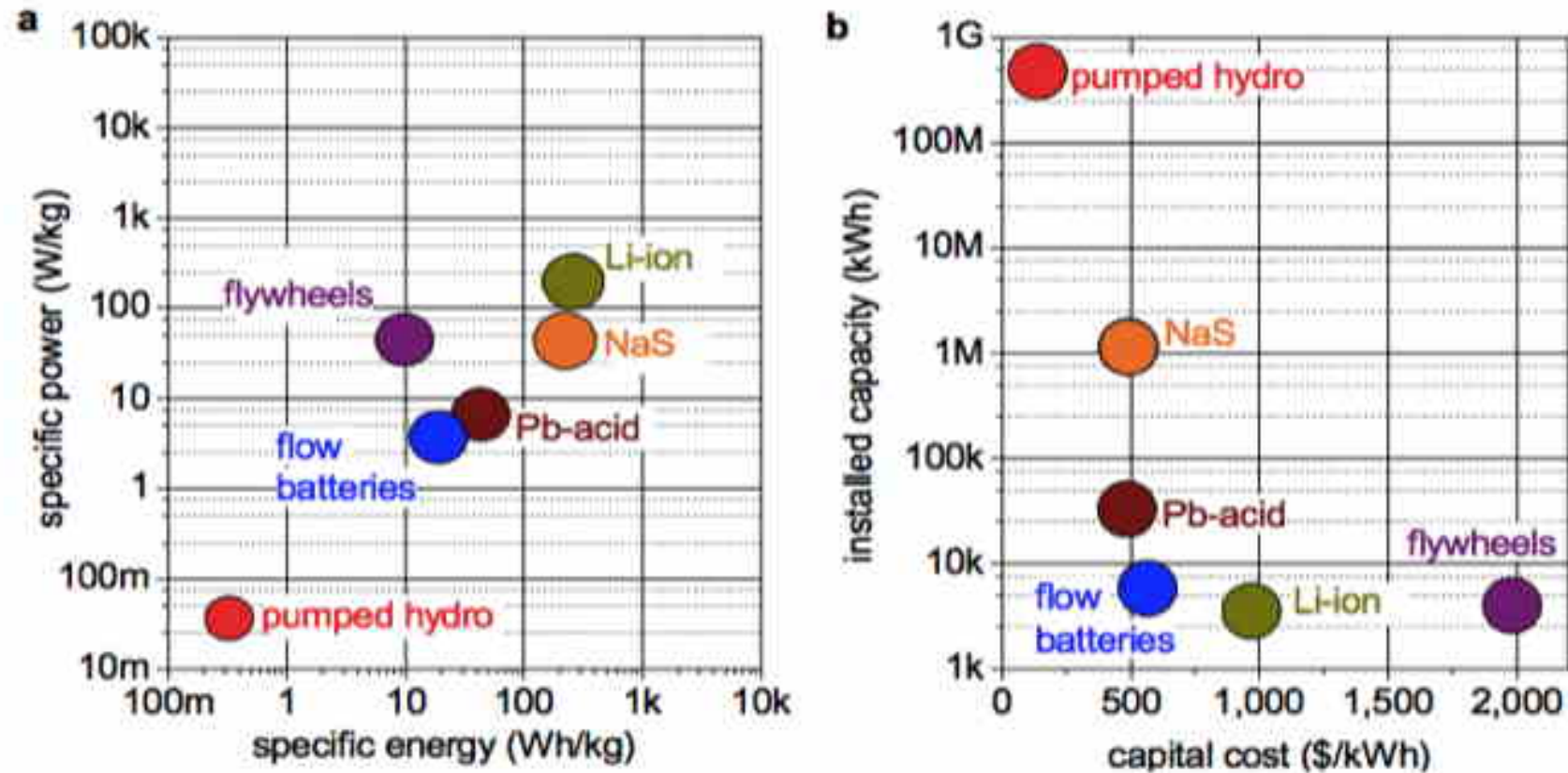


## Le problème des énergies renouvelables – solaire et éolien

### L'intermittence- pas un petit problème –voir illustrations sur les slides suivantes

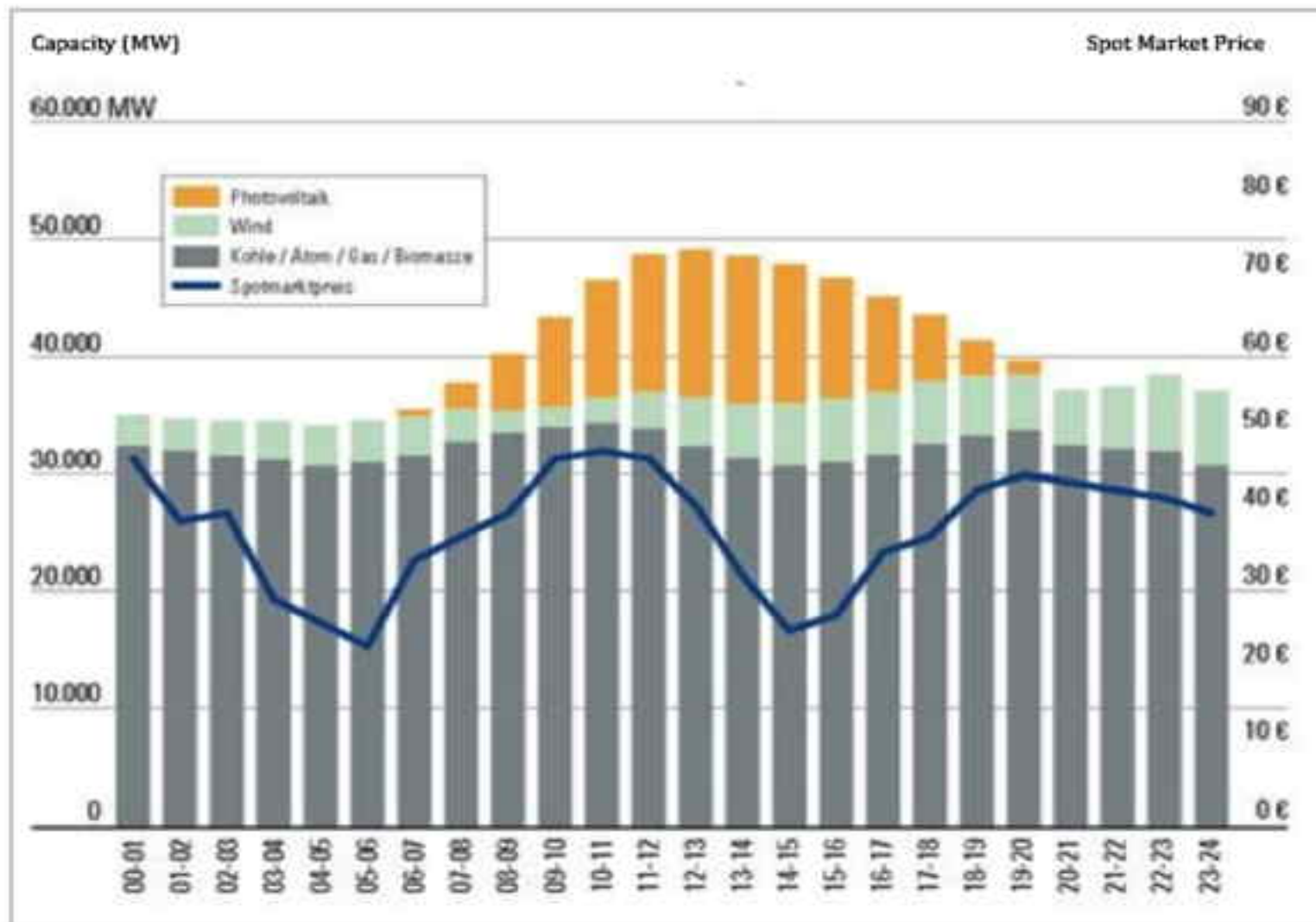
- si consomme sur place en temps réel, très bien, mais en Europe le prix est bien supérieur au réseau (attention: pas vrai en pointe en Californie, et dans les pays du sud, etc...)
- 
- les énergies renouvelables sont parfois complémentaires (solaire le jour, éolien la nuit)
- mais elles ne sont pas toujours en phase avec puissance appelée sur le réseau
- l'interconnexion ne résout que partiellement le problème:
  - la ligne Fr-RFA a été saturée 35% du temps (sans doute le maximum) en 2012 avec 1100 inversions de sens
  - la construction d'une ligne prend 10 à 20 ans (autorisations...), coûte des milliards, et est utilisée de manière de plus en plus intermittente
  - aujourd'hui, le reste de l'Europe peut absorber en bonne partie la surproduction allemande. Mais si la production augmente dans tous les pays, comme des conditions atmosphériques similaires peuvent se retrouver dans les pays d'Europe de l'Ouest, il y a surproduction partout et plus d'échanges possibles.
- le stockage est cher
  - éventuellement, si beaucoup de véhicules électriques, possibilité de capacité « gratuite » limitée cependant:
    - 1 million de véhicules ayant chacun une batterie de 25kWh = 25Gwh seulement
  - le stockage par pompage de l'eau dans les barrages réversibles est rentable pour des installations existantes, mais peut être très problématique pour des installations nouvelles fonctionnant de manière très intermittentes.
- quand en Allemagne il y a à la fois éolien et solaire importants, la manière la plus économique de délester le réseau est aujourd'hui de vendre à perte sur le marché spot!
- cela participe de la faiblesse du marché de l'électricité, du à la fois au faible coût de production de l'électricité carbonée et à la « surproduction » passagère en éolien et solaire, à la fois sur le marché spot et le marché à terme.

## Why don't we have a lot of energy storage?



Ne pas oublier que les batteries ont un nombre de cycles limité 1000-10000

Production d'électricité un jour de Mai 2012, avec le prix spot de l'électricité ce jour là



From The Future of Electricity Markets

By Toby D. Couture, IFOK GmbH and Dr. David Jacobs, RenewableEnergyWorld.com

## Is It More Valuable to Store or Destroy Electricity Surpluses?

Yangfang Zhou, Alan Scheller-Wolf, Nicola Secomandi  
Carnegie Mellon University, 5000 Forbes Ave, Pittsburgh

“A typical strategy for dealing with commodity surpluses is to store them for future sale; in particular, this is true of electricity. However, because electricity prices can be negative, there exists another potential strategy: To buy and dispose of electricity surpluses at negative prices. It is not clear whether the storage strategy or the disposal strategy is more valuable for a merchant who trades electricity in a market. We investigate this question by modeling the problem of managing an electricity storage facility when prices can be negative: By varying the efficiency of the storage facility, our model encompasses both the case when electricity surpluses are stored and the case when they are destroyed. We establish the optimal policy structure of our model, and show that it subsumes the known optimal commodity storage policy structure when commodity prices are strictly positive. Then, using our optimal policy structure, we compare the storage and disposal strategies based on an existing electricity price model calibrated to historical electricity prices. We find that the disposal strategy is even more valuable for a merchant than the storage strategy.”

# Electricity Grid In-feed from Renewable Sources: A Risk for Pumped-Storage Hydro Plants?

Marcus Hildmann, Andreas Ulbig, Goran Andersson  
*ETH Zurich Power Systems Laboratory*

2011 International Conference on the European Energy Market May 2011 • Zagreb, Croatia

## V. CONCLUSION

In this paper we analyzed the influence of the increasing electricity in-feed of wind and PV generation on the EPEX spot prices of the German-Austrian price zone. The data analysis strongly suggests that **RES in-feed, notably from PV installations, significantly depresses the electricity spot price's intra-day shape around noon**. The spot price peak/off-peak spread  $\zeta$  is significantly reduced. This effect in turn significantly diminishes the net arbitrage potential  $\Delta_{\text{net}}$ , i.e. the theoretic deterministic peak/off-peak spread minus the cost from inherent energy losses that occur when using pumped-storage hydro plants. For a hydro-pumped storage unit with a storage cycle efficiency if  $\eta = 80\%$ , a net arbitrage potential  $\Delta_{\text{net}}$  of currently only 3–4€/MWh can be achieved. Would this trend continue, then **spot price arbitrage strategies of pump-storage units would eventually become non-profitable**.

EPEX: Germany's electricity spot market is part of the European Power Exchange (EPEX)

RES: Renewable energy sources (RES)

From [http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/EEM11\\_Hildmann\\_et\\_al.pdf](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/EEM11_Hildmann_et_al.pdf)



## **Renewables Driving Electricity Prices below \$0 Some Afternoons (& Cutting into Baseload Power Plants' Market Share)**

April 15, 2012 Nicholas Brown

**CleanTechnica**

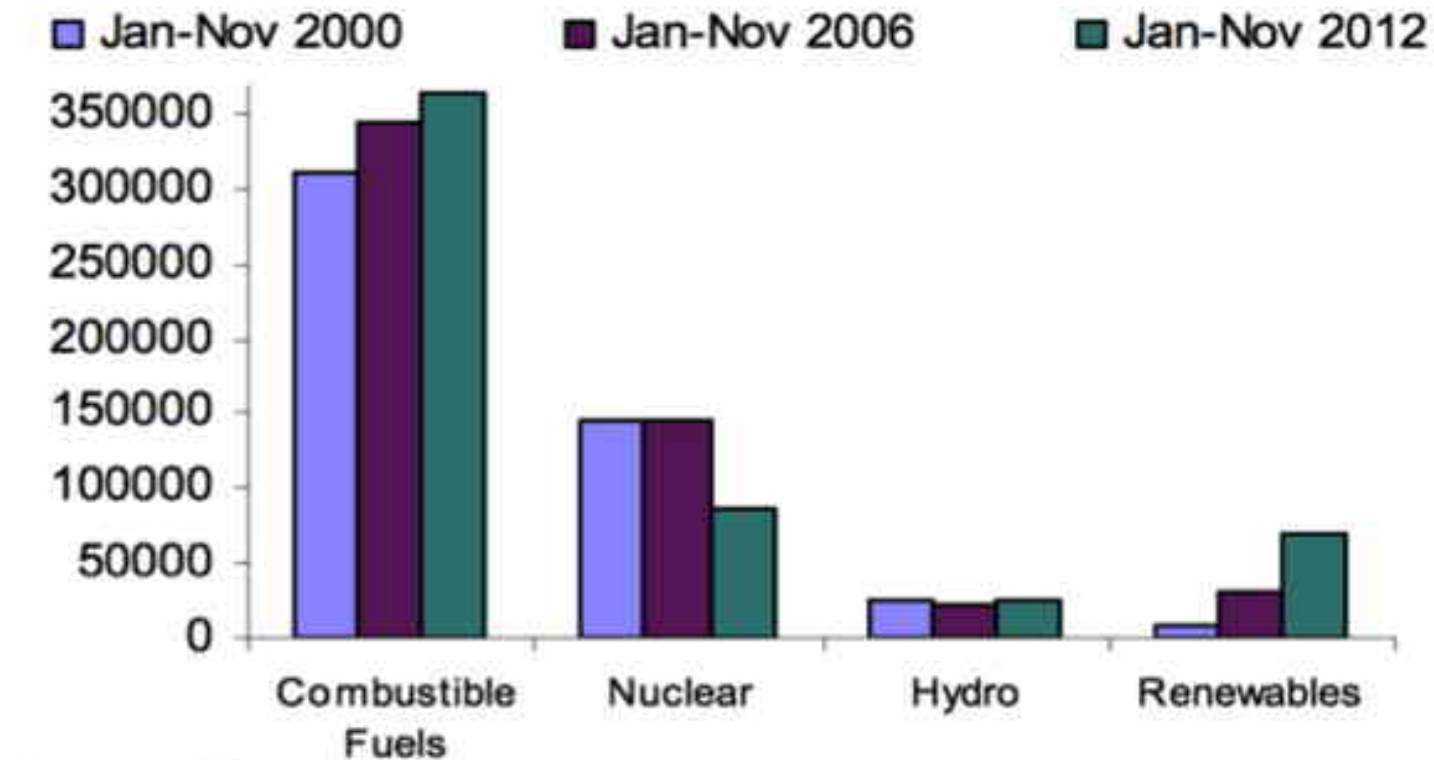
Renewable sources of energy such as solar and wind have been outstripping the electricity supply of traditional baseload (coal, nuclear, and some natural gas) power plants during daytime, especially afternoons, in some renewable-leading countries of late. One reason for this is: electricity demand tends to increase during the sunniest (the hottest) hours, and solar power plants generate more electricity when it is sunnier, which is right on cue.

Not perfectly, but solar power production tends to follow electricity demand. This is especially true in the warmer temperatures, since air conditioners (which consume a lot of electricity) are turned up to compensate for the hot afternoon weather.

Importantly, as solar power plants outstrip the power production of baseload power plants, electricity is sold for a lower price than baseload power on the spot market. On April 1 of this year, not even that hot of a day, the price of electricity on the European Electricity Index (ELIX) actually dropped to -0.01.

From  
<http://cleantechnica.com/2012/04/15/renewables-driving-electricity-prices-to-negative-some-afternoons-cutting-into-baseload-power-plants-market-share/>

## Germany - Electricity production by source (GWh)



Sources : IEA

Avec en moyenne 1kg CO<sub>2</sub> pour un kWh en électricité fossile, les émissions sont de 350millions de tonnes

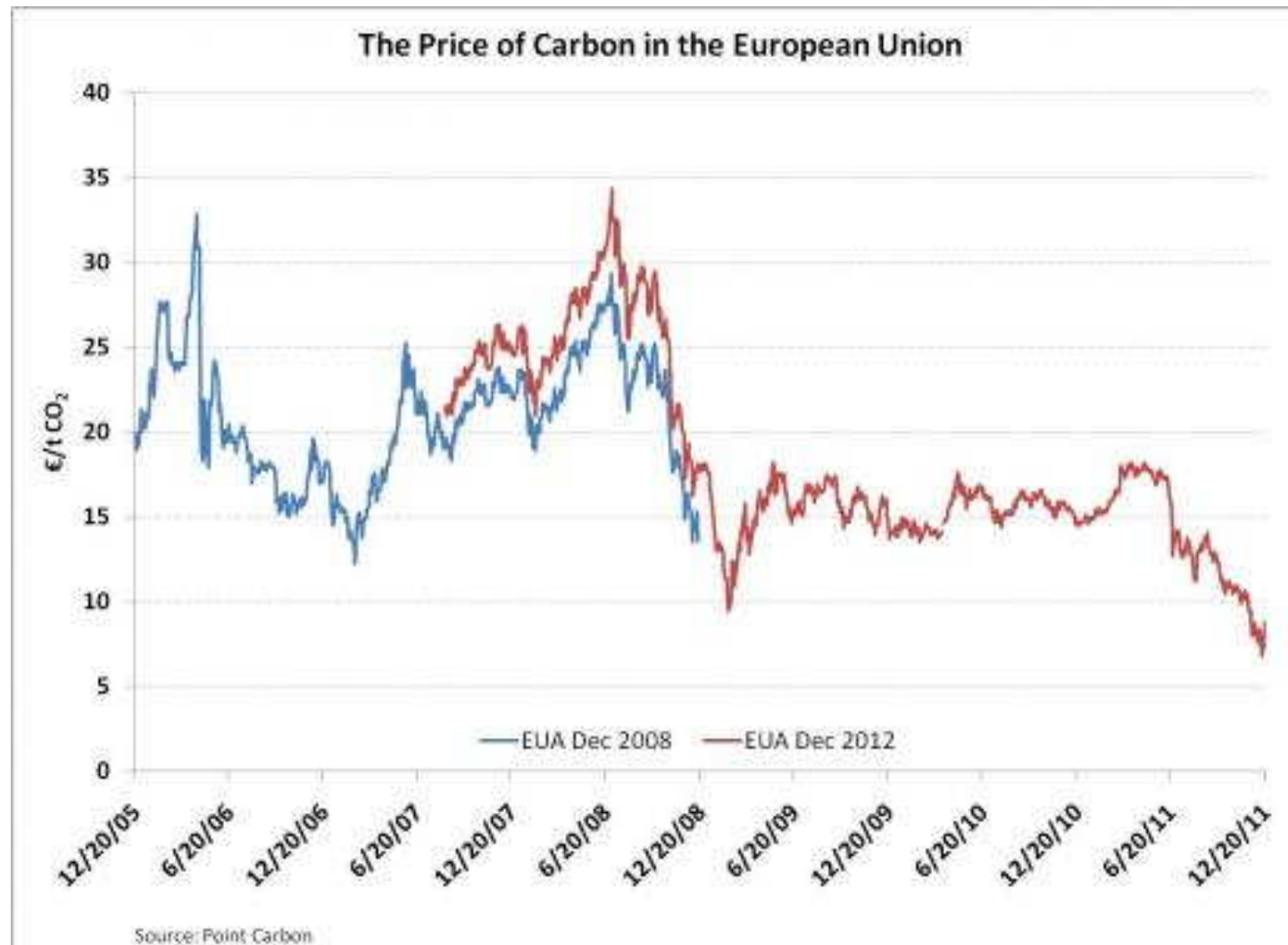
*Nic Brown José Rojas*

Germany's renewable problem

Natixis ECONOMIC RESEARCH N° 183 25 February 2013

From <http://cib.natixis.com/flushdoc.aspx?id=68637>

## Evolution des prix des droits d'émission de CO<sub>2</sub> en Europe



| Germany - Subsidies under 2012 Renewable Energy Act (EUR cts/kWh) |                                                                                                                                                                                    |         |        |        |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|--------|
| Energy Type:                                                      | Capacity:                                                                                                                                                                          |         |        |        |
| Solar                                                             | <30 kW                                                                                                                                                                             | <100 kW | <1MW   | >1MW   |
| Subsidy                                                           | 24,43                                                                                                                                                                              | 23,23   | 21,98  | 18,33  |
| Biomass                                                           | <150 kW                                                                                                                                                                            | <500 kW | <5MW   | <20 MW |
| Subsidy                                                           | 14,3                                                                                                                                                                               | 12,3    | 11     | 6      |
| Landfill gas                                                      | <500kW                                                                                                                                                                             | <5 MW   |        |        |
| Subsidy                                                           | 8,6                                                                                                                                                                                | 5,89    |        |        |
| Sewage gas                                                        | <500kW                                                                                                                                                                             | <5 MW   |        |        |
| Subsidy                                                           | 6,79                                                                                                                                                                               | 5,89    |        |        |
| Mine gas                                                          | <1MW                                                                                                                                                                               | <5 MW   | > 5 MW |        |
| Subsidy                                                           | 6,84                                                                                                                                                                               | 4,93    | 3,98   |        |
| Onshore wind                                                      | Initial fee for the first 5Y: 8,93. Basic fee of 4,87 ct/kWh<br>Bonuses: 0,48cts System service; 0,50 cts Repowering<br>Degression: 1,5% p.a when commissioned after 2012          |         |        |        |
| Offshore wind                                                     | Initial fee for the first 15Y of operation: 15ct/kWh<br>If commissioned before 2018 initial fee of 19cts/kWh for 8 Y<br>Basic tariff: 3,5 cts/kWh<br>Degression: 7% p.a after 2018 |         |        |        |

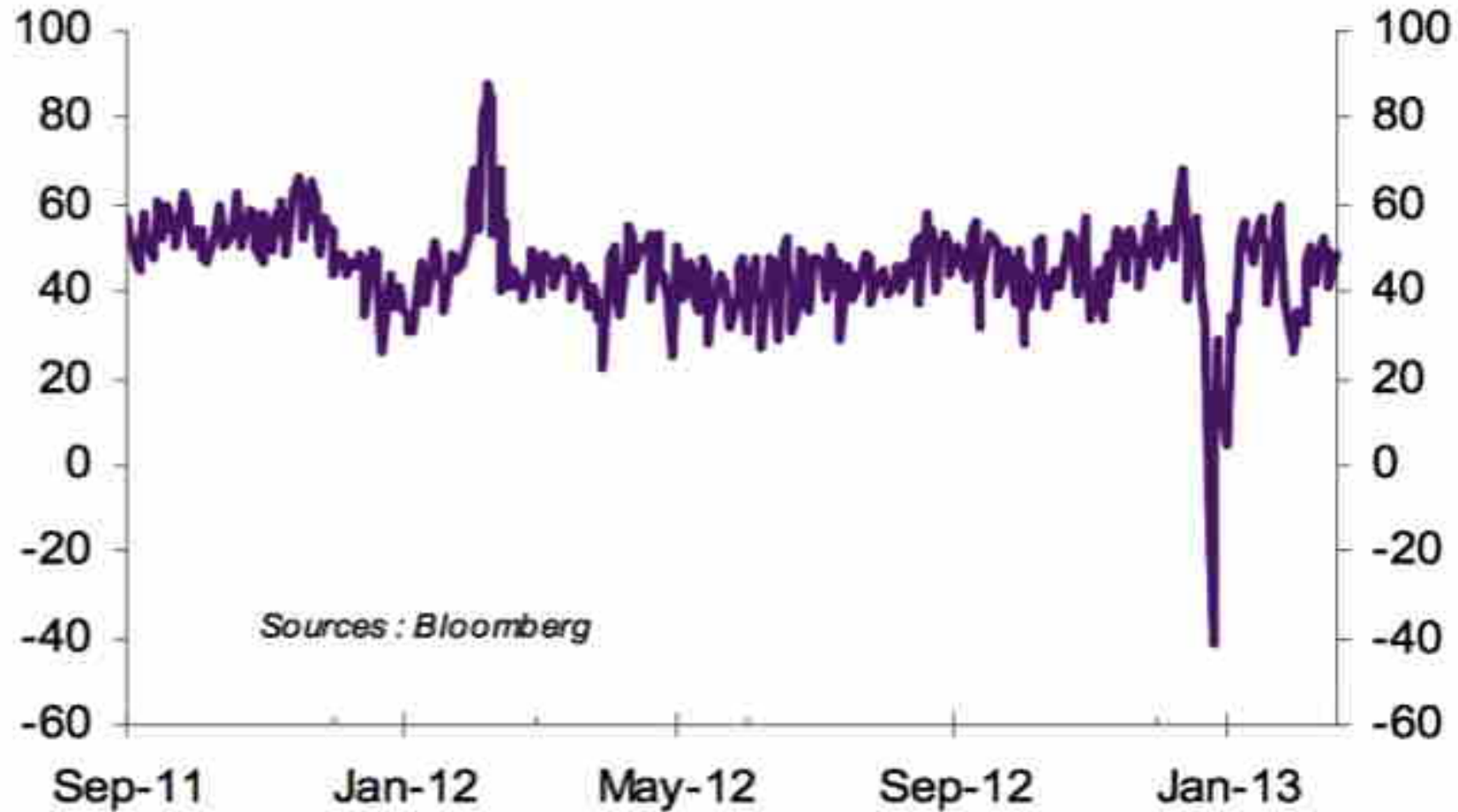
*Source: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety*

Nic Brown José Rojas

Germany's renewable problem

Natixis ECONOMIC RESEARCH N° 183 25 February 2013

## Day ahead baseload electricity spot price (EUR/MWh)



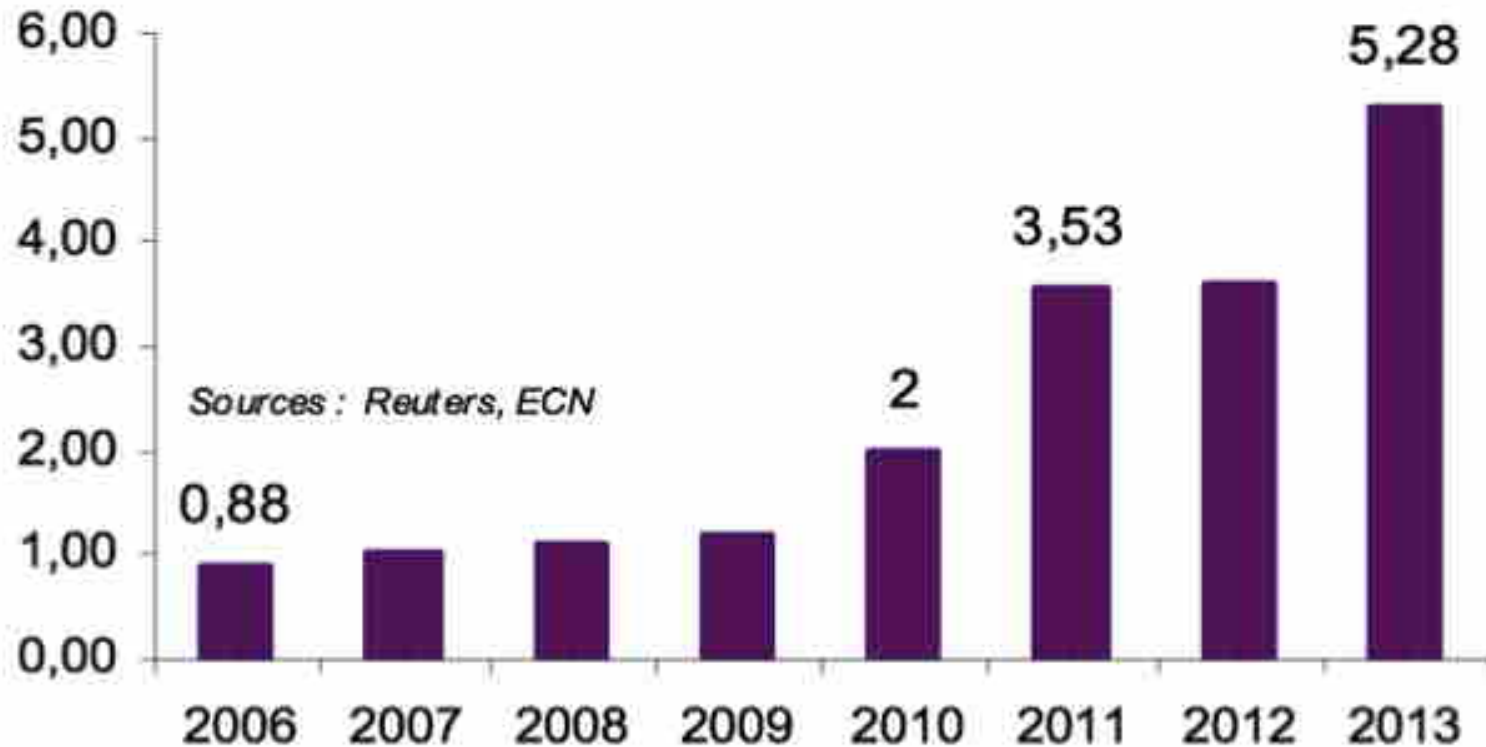
Nic Brown José Rojas

Germany's renewable problem

Natixis ECONOMIC RESEARCH N° 183 25 February 2013



### German electricity surcharge (EUR c/kWh)



In contrast, **1,550 German industrial firms are currently exempt from paying the surcharge in order to preserve the country's competitiveness**; the combined value of this exemption is expected to reach €4.3bn in 2013. The surcharge paid by consumers has increased strongly in recent years, passing from 0.88ct/kWh in 2006 to 5.28ct/kWh in 2013.

*Nic Brown José Rojas*

Germany's renewable problem

Natixis ECONOMIC RESEARCH N° 183 25 February 2013

---

# FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE

Electricity production from solar and wind in Germany in 2012

---



Prof. Dr. Bruno Burger

Fraunhofer Institute for  
Solar Energy Systems ISE

Freiburg, Germany

February 08, 2013

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

---

<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2012.pdf>

## •Facts to the electricity production from Solar and Wind in Germany 2012

- Due to the strong growth of the renewables in 2012, an export surplus of 22 TWh was achieved.
- Wind turbines produced 45.9 TWh in 2012 (48.9 TWh in 2011).  
Their production decreased by 6% compared to 2011.  
Wind energy produced 8.2% of the gross electricity generation.
- Photovoltaic (PV) plants produced 27.9 TWh in 2012 (19.3 TWh in 2011). √ The production increased by 44% compared to 2011.  
Solar energy produced 5.0% of the gross electricity generation.
- Hydro power produced 18.1 TWh in 2012. The share of the gross electricity generation was 3.0%.

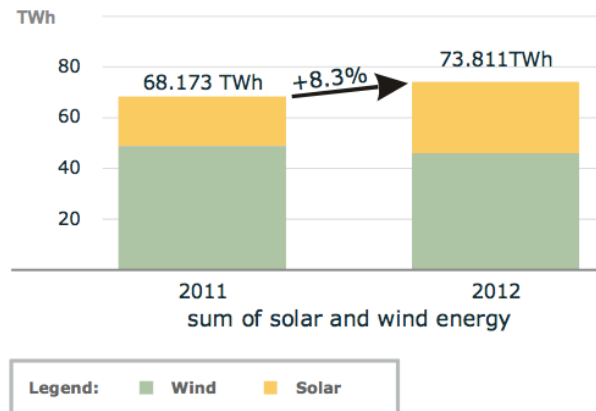
From Electricity production from solar and wind in Germany in 2012

<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2012.pdf>

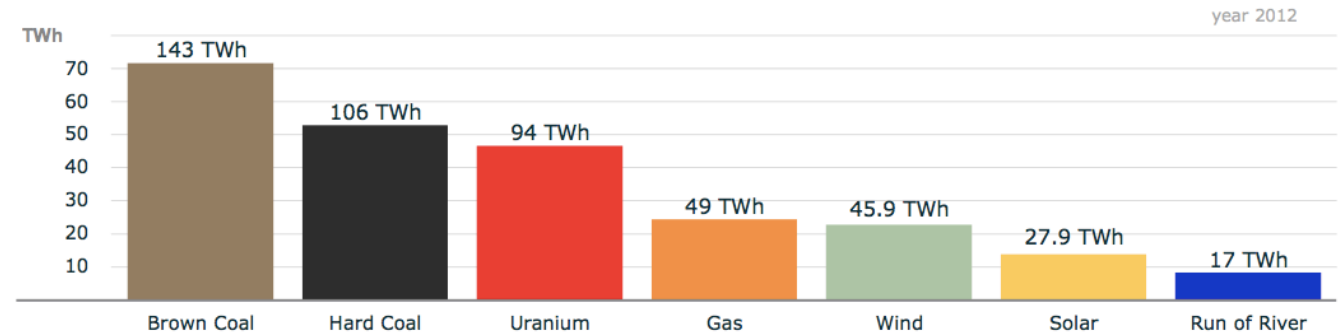
# Shares in net electricity production in 2012

## Production solar and wind

Annual sum of solar und wind production



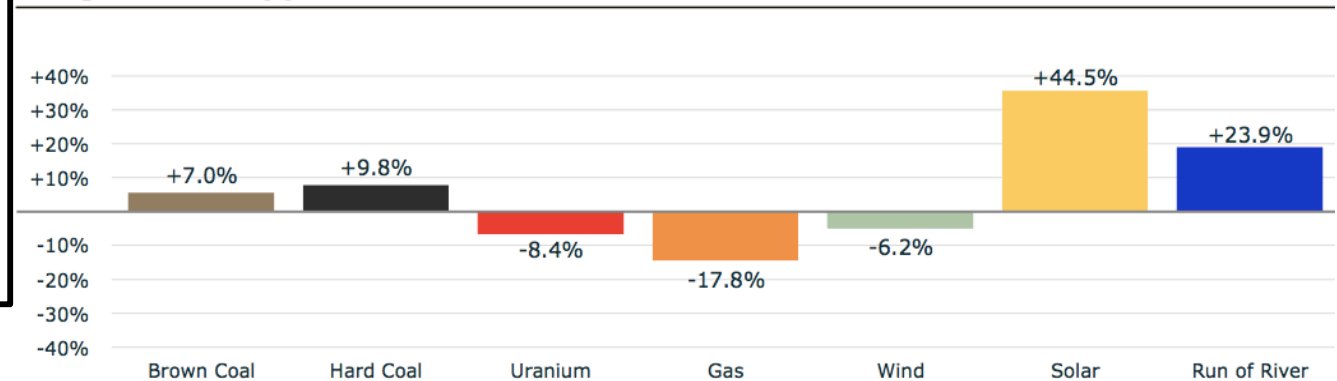
Net electricity production in 2012



## Changes in net electricity production, 2012 versus 2011

La production allemande d'électricité en 2012/2011:  
 + 11,5 TWh de fossile avec CO<sub>2</sub>, + 9 TWh de renouvelable (dont + 3,3 TWh hydro)

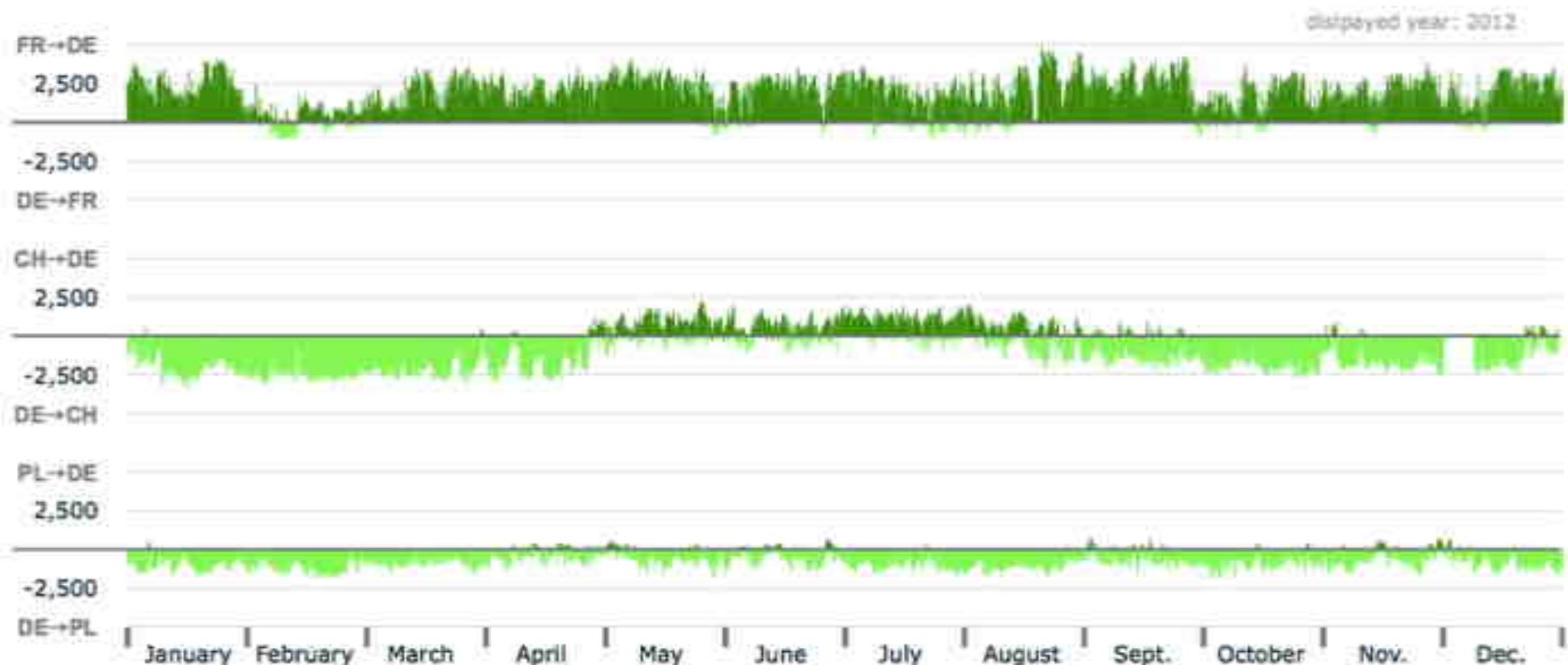
Change in electricity production: 2012 versus 2011



<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2012.pdf>

# France, Switzerland and Poland

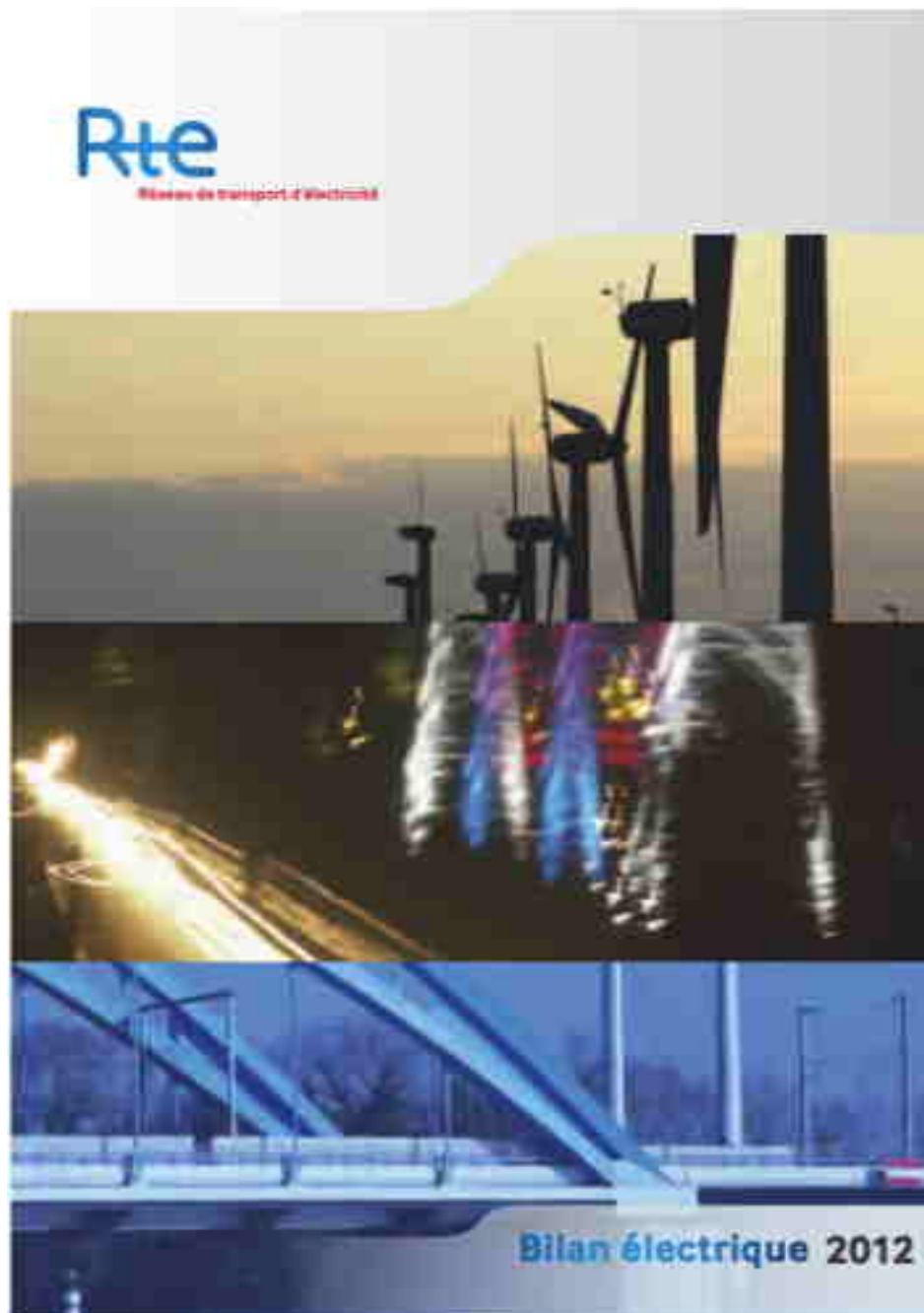
## Import und Export



Legend: ■ Export ■ Import

Graph: B. Burger, Fraunhofer ISE; data: Entso-e

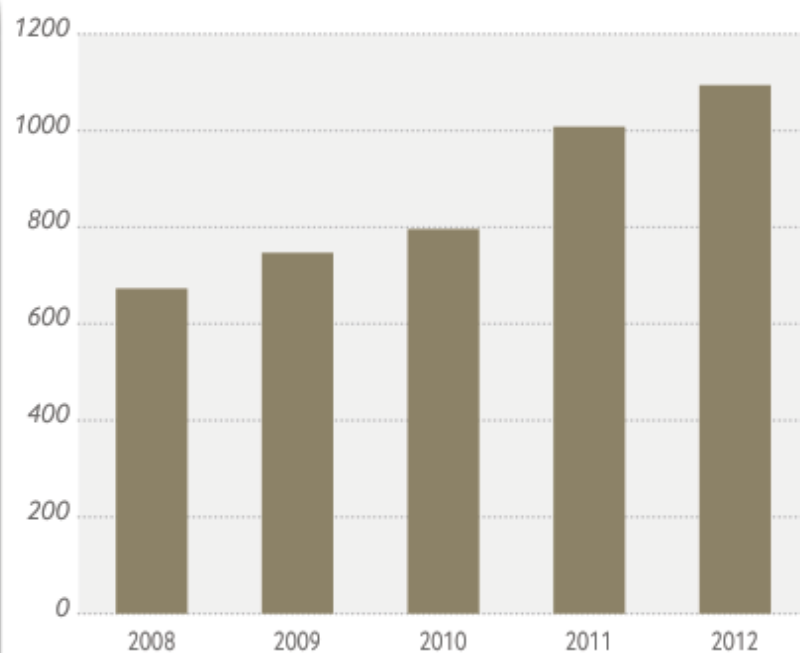




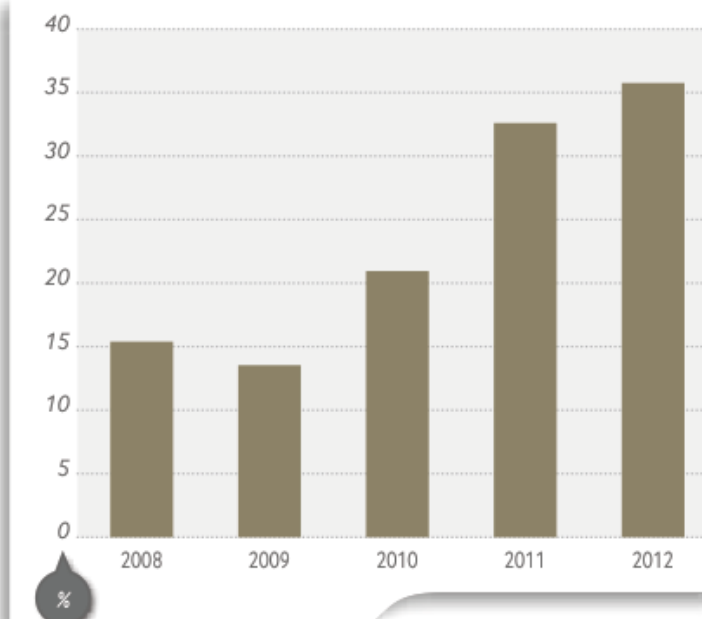
Document de base  
Chiffres de l'électricité en France 2012

| Bilan énergétique France                   | 2012 (TWh)   | 2011 (TWh)   | Variation<br>2012/2011 | Part dans la<br>production<br>2012 | Emissions<br>de CO <sub>2</sub> 2012<br>(millions de<br>tonnes) |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Production nette</b>                    | <b>541,4</b> | <b>543,0</b> | <b>-0,3%</b>           | <b>100%</b>                        | <b>29,5</b>                                                     |
| Nucléaire                                  | 404,9        | 421,1        | -3,8%                  | 74,8%                              | 0,0                                                             |
| Thermique à combustible<br>fossile         | 47,9         | 51,5         | -7,0%                  | 8,8%                               | 26,4                                                            |
| <i>dont charbon</i>                        | 18,1         | 13,4         | 35,1%                  | 3,3%                               | 17,4                                                            |
| <i>fioul</i>                               | 6,6          | 7,6          | -13,2%                 | 1,2%                               | 2,3                                                             |
| <i>gaz</i>                                 | 23,2         | 30,5         | -23,7%                 | 4,3%                               | 6,7                                                             |
| Hydraulique                                | 63,8         | 50,3         | 26,8%                  | 11,8%                              | 0,0                                                             |
| Eolien                                     | 14,9         | 12,1         | 23,1%                  | 2,8%                               | 0,0                                                             |
| Photovoltaïque                             | 4,0          | 2,4          | 66,7%                  | 0,7%                               | 0,0                                                             |
| Autres sources<br>d'énergies renouvelables | 5,9          | 5,6          | 5,4%                   | 1,1%                               | 3,1                                                             |

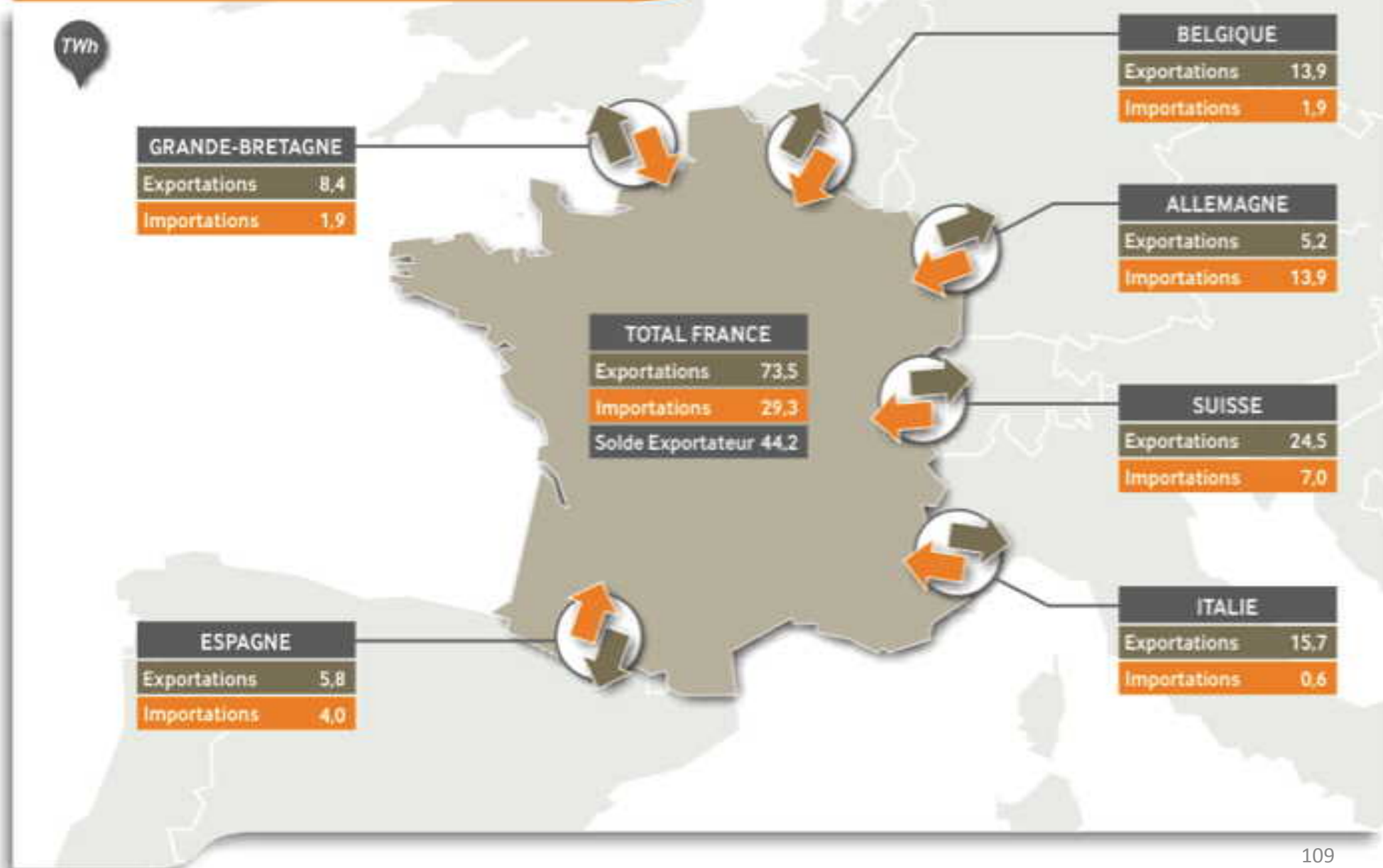
### **Nombre de changements de sens des flux France/Allemagne**



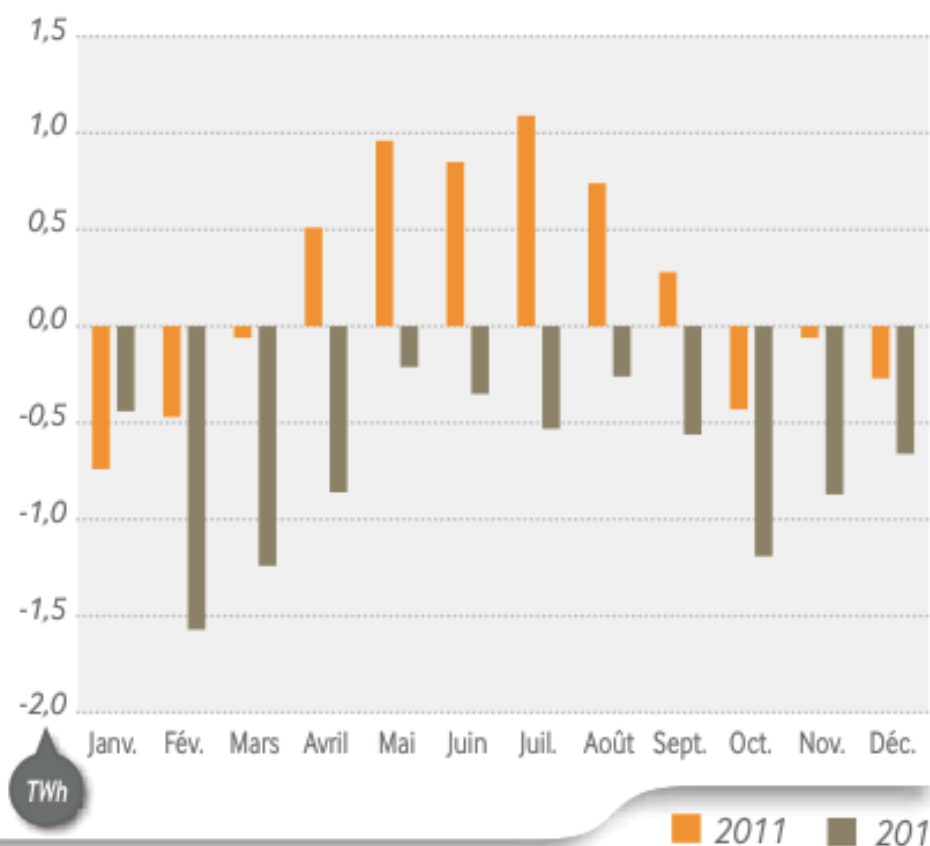
### **Pourcentage d'heures pour lesquelles l'interconnexion France/Allemagne est saturée**



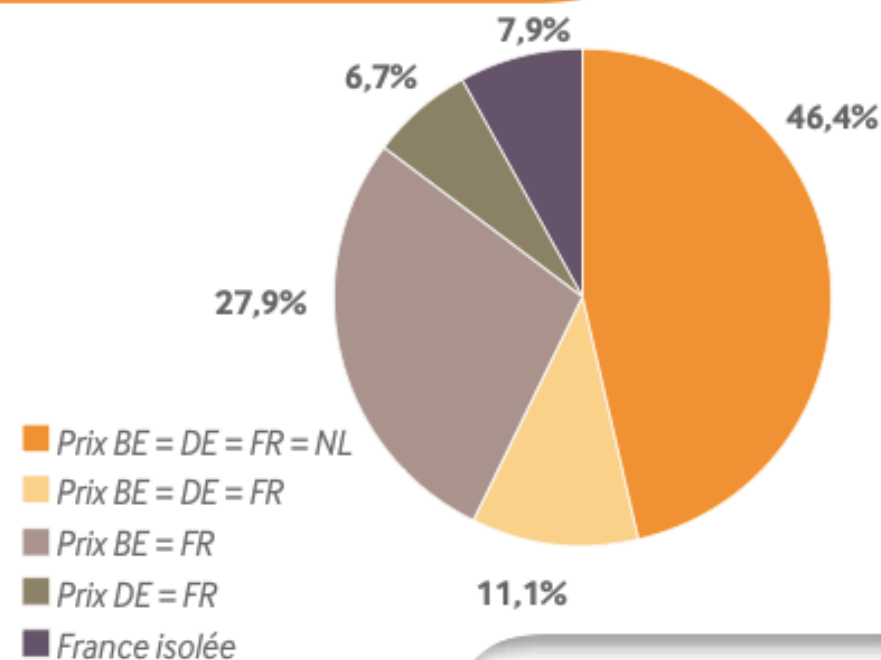
## Échanges contractuels transfrontaliers en 2012



## Solde exportateur des échanges mensuels avec l'Allemagne



## Convergence des prix de la zone CWE



Les prix se sont alors effondrés et ont même été négatifs durant 33 heures en Allemagne et 5 heures en France. Le prix minimal de l'électricité en France a été enregistré durant cette période le 25 décembre entre 7h et 8h à -50 €/MWh.



## La production française totale diminue légèrement

La production totale sur le territoire national diminue de 0,3% par rapport à celle de l'année précédente et s'établit à 541,4 TWh. La répartition en 2012 de la production entre les différentes filières se distingue nettement de celle de 2011.

| Bilan énergétique France                | 2012 (TWh)   | 2011 (TWh)   | Variation 2012/2011 | Part dans la production 2012 | Emissions de CO <sub>2</sub> 2012 (millions de tonnes) |
|-----------------------------------------|--------------|--------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Production nette</b>                 | <b>541,4</b> | <b>543,0</b> | <b>-0,3%</b>        | <b>100%</b>                  | <b>29,5</b>                                            |
| Nucléaire                               | 404,9        | 421,1        | -3,8%               | 74,8%                        | 0,0                                                    |
| Thermique à combustible fossile         | 47,9         | 51,5         | -7,0%               | 8,8%                         | 26,4                                                   |
| <i>dont charbon</i>                     | 18,1         | 13,4         | 35,1%               | 3,3%                         | 17,4                                                   |
| <i>fioul</i>                            | 6,6          | 7,6          | -13,2%              | 1,2%                         | 2,3                                                    |
| <i>gaz</i>                              | 23,2         | 30,5         | -23,7%              | 4,3%                         | 6,7                                                    |
| Hydraulique                             | 63,8         | 50,3         | 26,8%               | 11,8%                        | 0,0                                                    |
| Eolien                                  | 14,9         | 12,1         | 23,1%               | 2,8%                         | 0,0                                                    |
| Photovoltaïque                          | 4,0          | 2,4          | 66,7%               | 0,7%                         | 0,0                                                    |
| Autres sources d'énergies renouvelables | 5,9          | 5,6          | 5,4%                | 1,1%                         | 3,1                                                    |