

# 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

17 novembre 2011

*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*

# 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>

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.

# All renewables are diffuse

## POWER PER UNIT LAND AREA

Wind	2.5 W/m <sup>2</sup>
Plants	0.5 W/m <sup>2</sup>
Solar PV panels	5–20 W/m <sup>2</sup>
Tidal pools	3 W/m <sup>2</sup>
Tidal stream	8 W/m <sup>2</sup>
Rain-water (highlands)	0.24 W/m <sup>2</sup>
Concentrating solar power (desert)	15–20 W/m <sup>2</sup>



Nant-y-Moch by Dave Newbould  
[www.origins-photography.co.uk](http://www.origins-photography.co.uk)



● To make a difference, renewable facilities have to be country-sized

David MacKay

**Sustainable Energy – without the hot air**

# cellules solaires

*le principe*

Quelques chiffres de base

*Le prix du kWh photovoltaïque*: grandement fonction de l'ensoleillement et de l'heure de consommation pic

*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 connexions de sortie

-Un paramètre essentiel:

**le rendement de conversion**

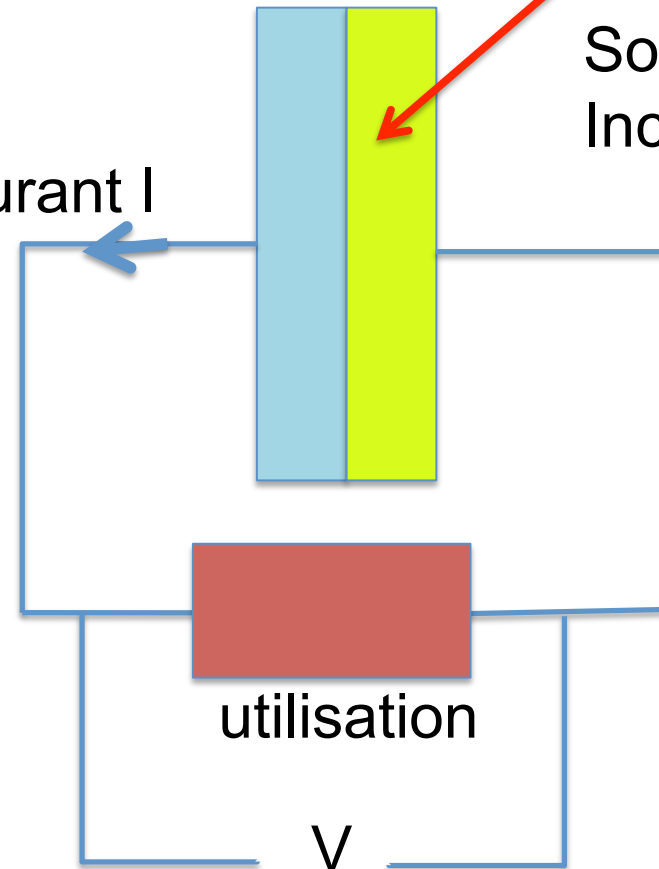
C'est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance du rayonnement solaire incident.

## Cellule solaire

lumière

Puissance  
Solaire  
Incidente

Courant I



Différence de potentiel  
Tension

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 de  $100 \text{ W/m}^2$

### Deux facteurs de variation

#### Latitude

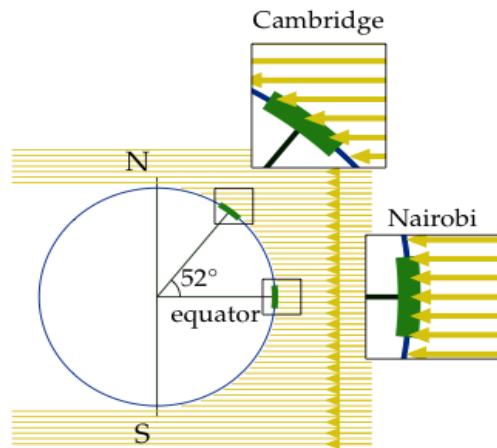


Figure 6.1. Sunlight hitting the earth at midday on a spring or autumn day. The density of sunlight per unit land area in Cambridge (latitude  $52^\circ$ ) is about 60% of that at the equator.

#### saison

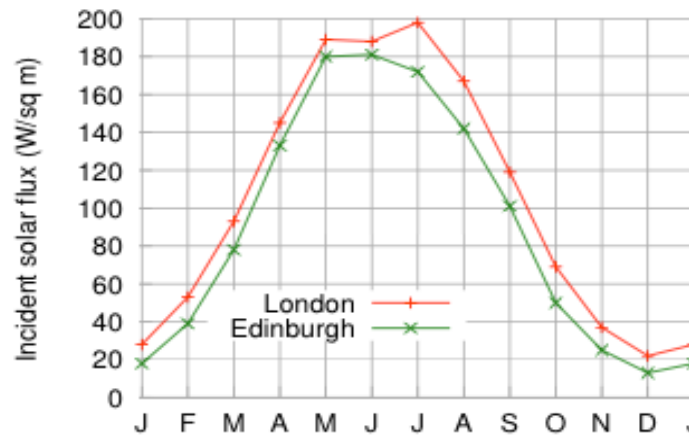
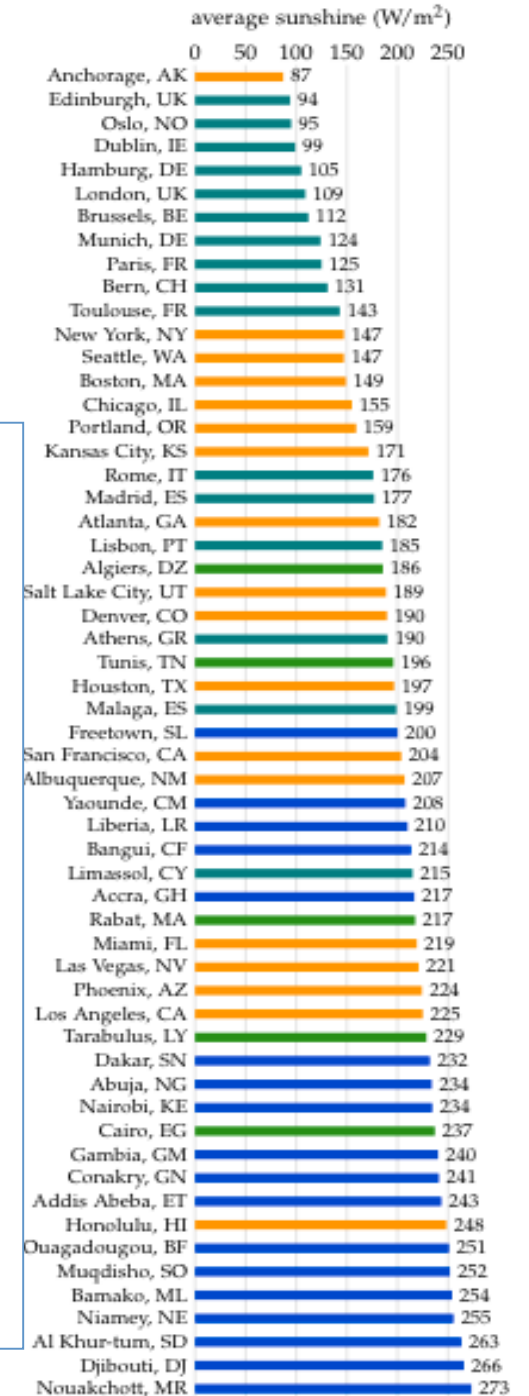


Figure 6.2. Average solar intensity in London and Edinburgh as a function of time of year. The average intensity, per unit land area, is  $100 \text{ W/m}^2$ .



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)

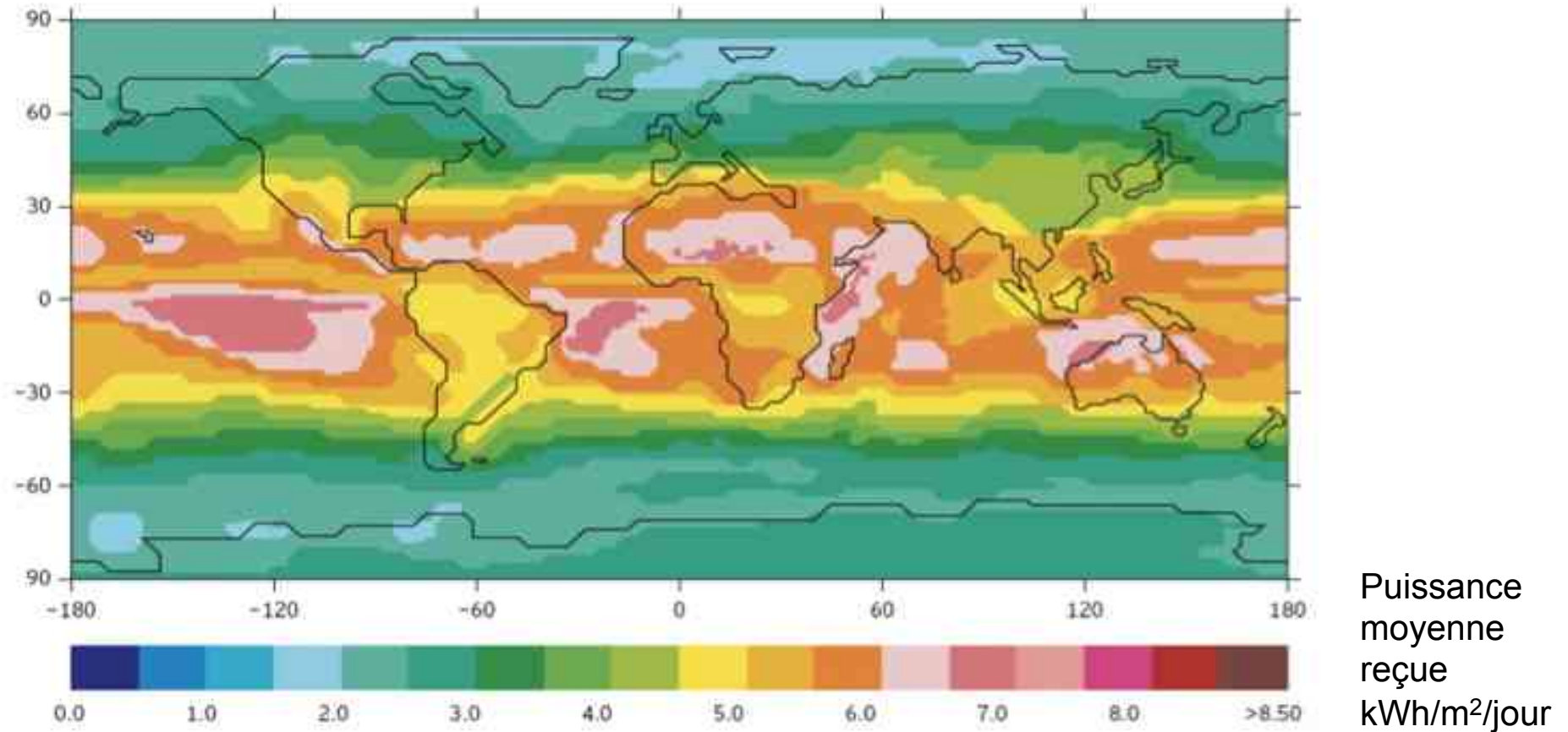
**L'ensoleillement moyenné** sur l'année est de 10 à 25% de la puissance crête, c'est à dire que sur les 8760 heures de l'année (24x365) la puissance crête est délivrée pendant 876 à 2190 heures.

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.

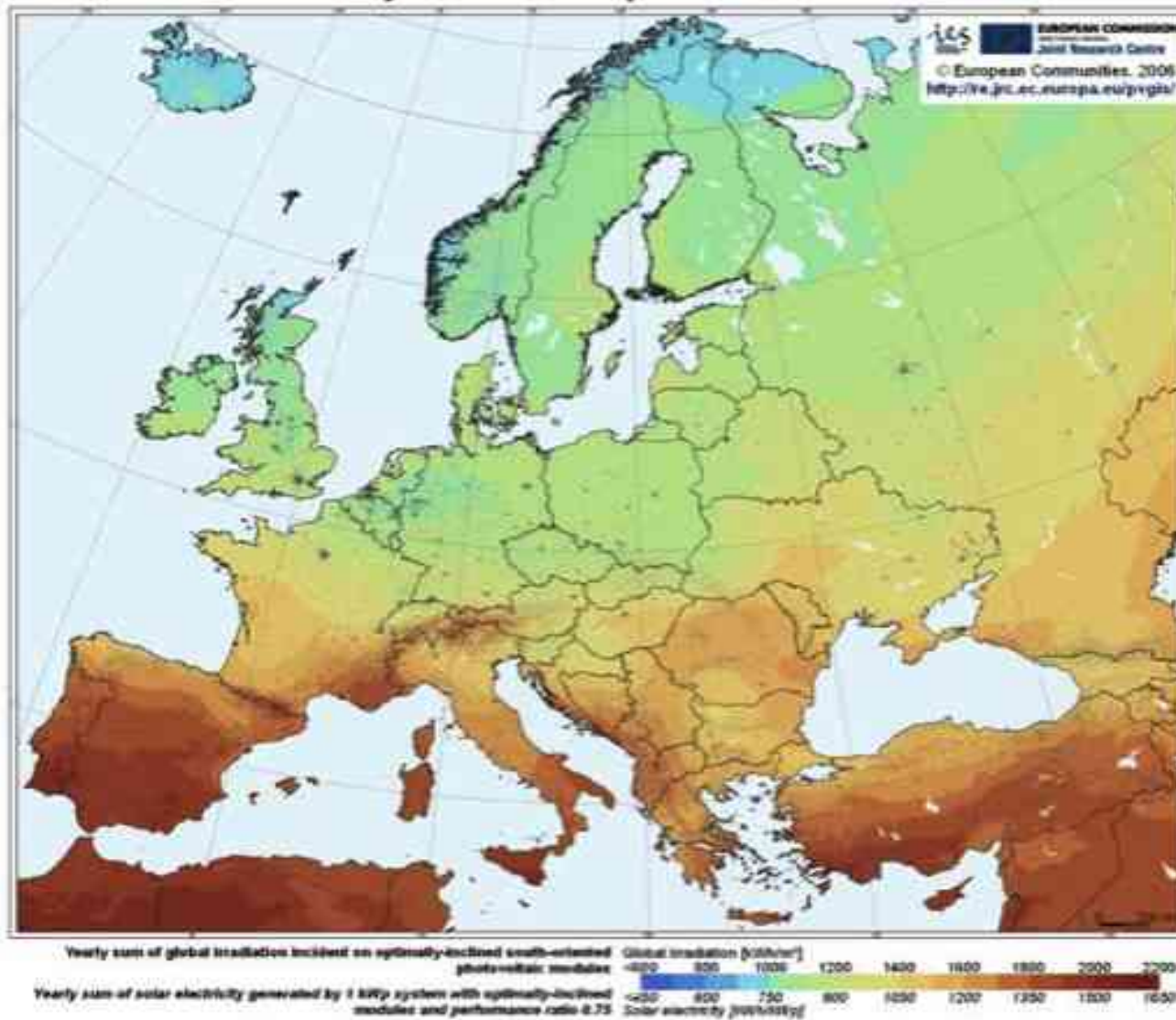
# Ensoleillement moyen sur l'année



(NASA/SSE 2005)

- Une insolation de 6 kWh/m<sup>2</sup>/jour (orange foncé) se traduit par 2190 heures de production crête d'électricité, soit pour un module de 1 m<sup>2</sup> à 10% de rendement (100W crête) 219kWh.

## Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



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

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

## Photovoltaïque

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

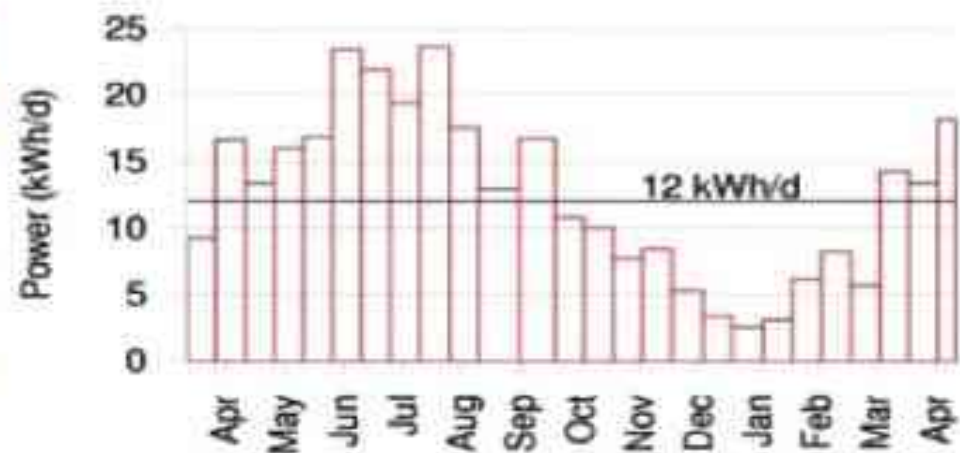
### C'est beaucoup

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 (



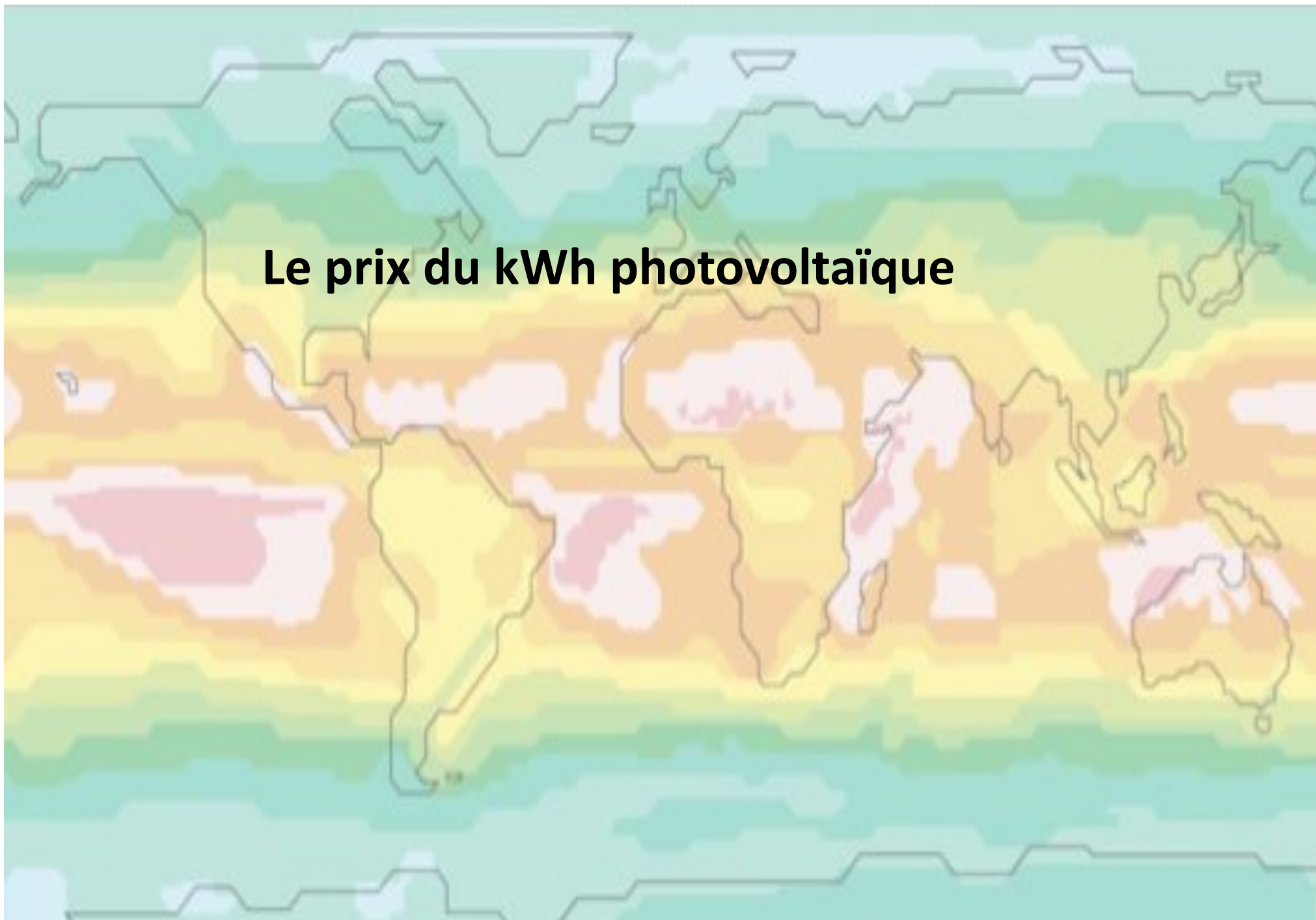
Data and photo by Jonathan Kimmitt

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**

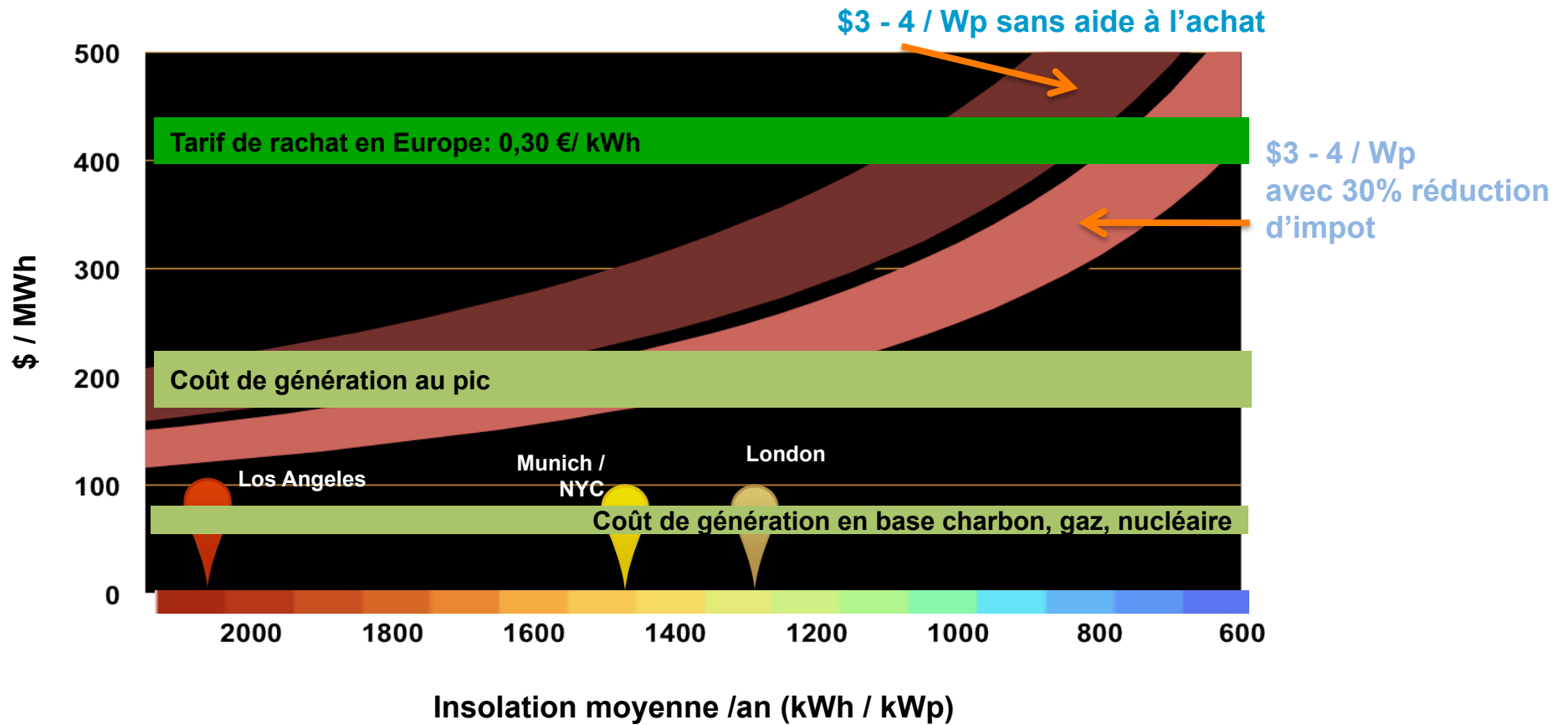
$10 \text{ m}^2/\text{personne} \approx 870 \text{ kWh}/\text{an}/\text{personne}$  (à plat)  $\approx 4\text{-}5 \text{ kWh}/\text{jour}/\text{personne}$  (toit incliné)

## Le prix du kWh photovoltaïque



# Effet des prix de rachat 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 cout indicatif, **en France, 1500kWh/m<sup>2</sup>/an en moyenne.**

**Si 1m<sup>2</sup>** à 10 % coûte 2 € /W crête et son installation autant, on a investi pour 10 m<sup>2</sup> (1kWp) 4000 € pour une production (1500 kWh/an) **revendue par EDF** 10 c€ /kWh en tarif jour, soit 150 €, mais qui est aujourd'hui **rachetée par EDF** environ 600 € (40centimes/kWh) pour une installation sur toit. La différence est payée par le consommateur sous forme de "Contribution au Service Public d'Electricité (CSPE)"

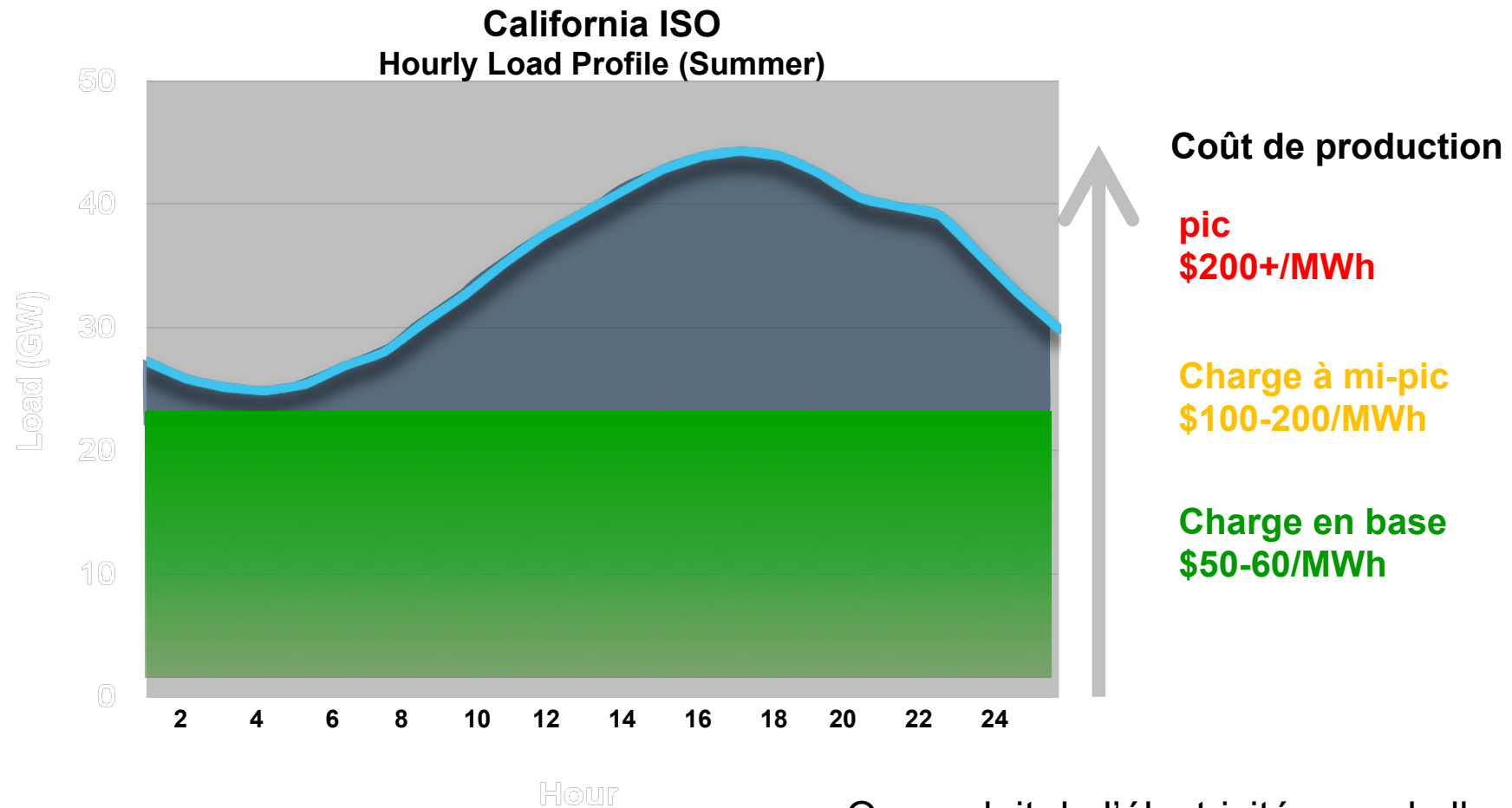
*Conclusion: rentable si on revend à EDF, pas si on consomme soi-même au lieu de vendre à EDF.*

### *Attention:*

*Cette conclusion peut changer fortement suivant le coût du module, le prix d'installation, l'utilisation (cf. Infra coût de l'électricité en heure de pointe en Californie ), ou si l'on est dans un endroit fortement ensoleillé sans réseau (Afrique).*

Ca peut être rentable, et pas de problème d'intermittance, on produit lors du besoin

### Le coût de génération augmente avec la charge du réseau

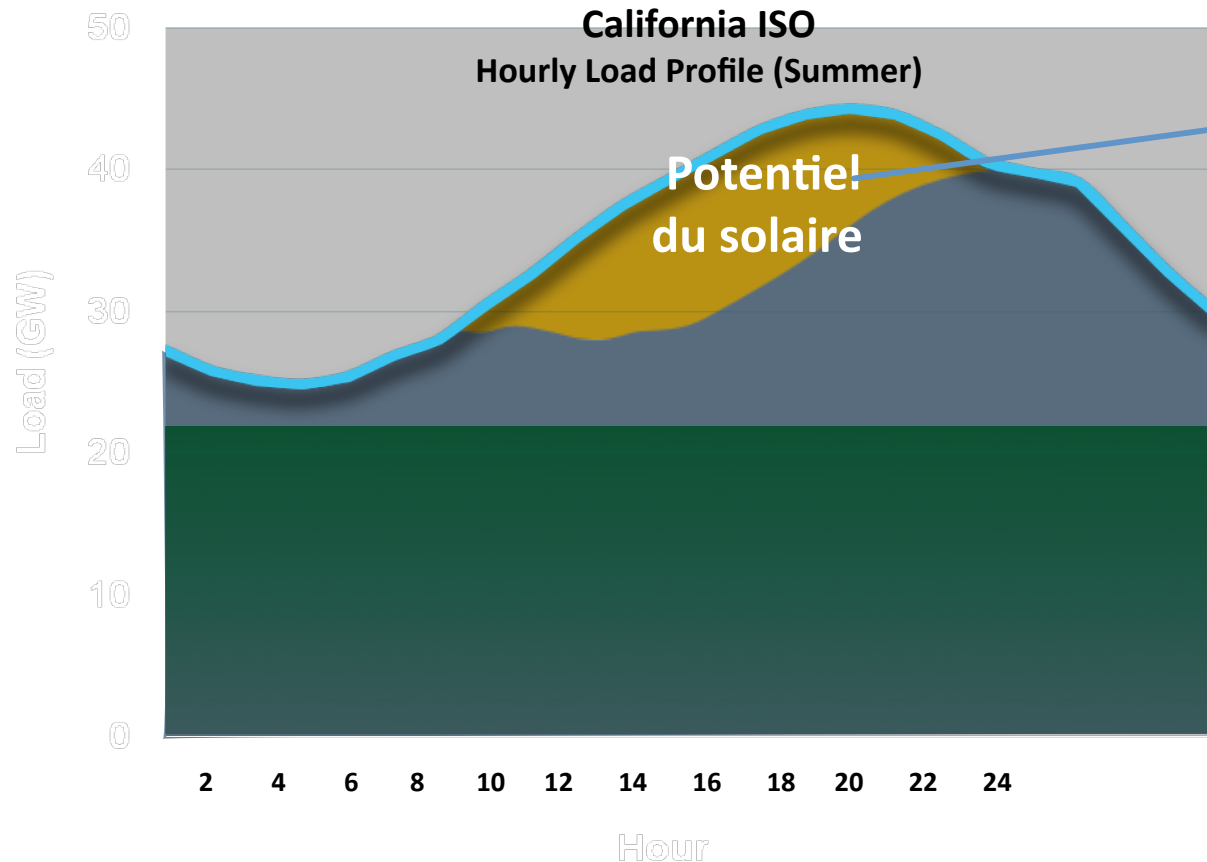


Source: Load - CAISO, System load Aug 14, 2008  
Assumption: Solar - Solar generation: 15GWp (DC), 18% utilization

On produit de l'électricité quand elle vaut plus de US\$ 20 cents le kWh

# Besoins typiques l'été

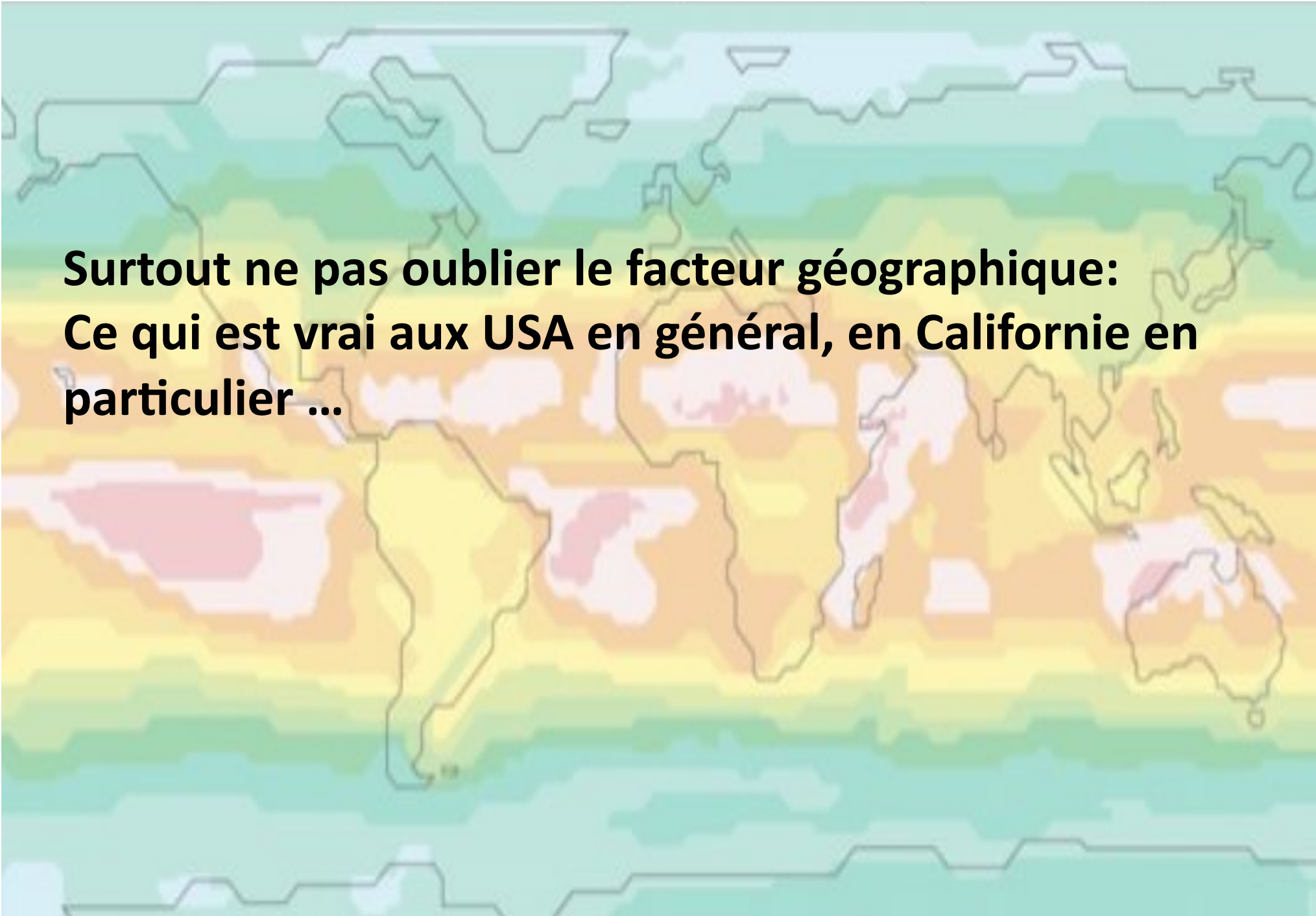
Le solaire peut fournir > 30% des besoins en génération pic



## Avantages

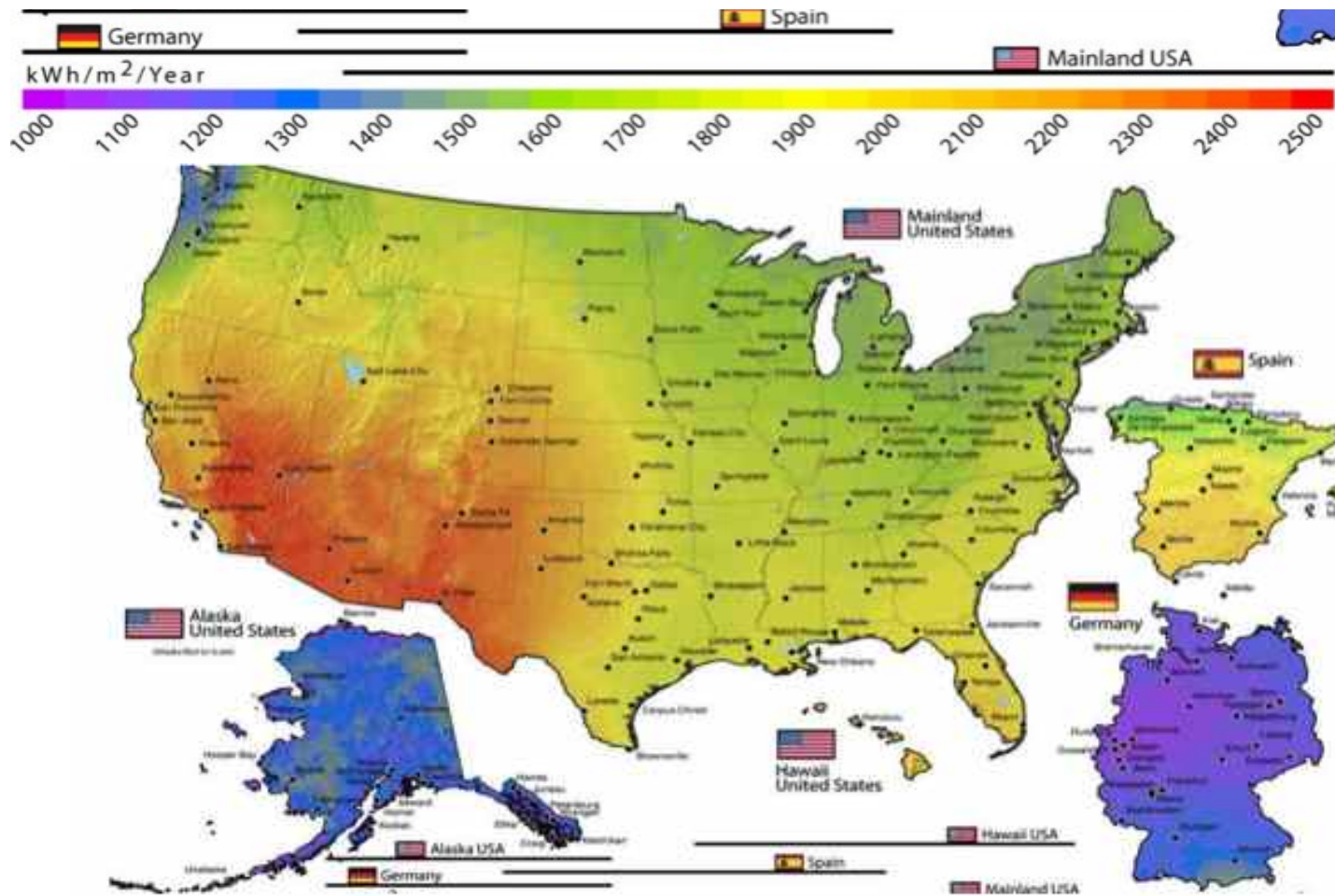
- Économie en investissement et en combustibles
- Predictible & peu de volatilité
- Moins d'émissions
- Atout carbone
- Moins de besoin et de coûts de transmission

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

A world map with a color gradient overlay. The colors range from light green at the poles to bright yellow and orange in the mid-latitudes, and finally to red in the tropics. The map shows the outlines of continents and oceans. The text is overlaid on the left side of the map.

**Surtout ne pas oublier le facteur géographique:  
Ce qui est vrai aux USA en général, en Californie en  
particulier ...**

# US Has Unusual Solar Resources



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

A world map with a color gradient from light green at the poles to yellow and orange in the tropics, and light blue in the oceans. The map shows the outlines of continents and is used as a background for the text.

Surtout ne pas oublier le facteur géographique:

Ce qui est vrai aux USA en général, en Californie en particulier (forte insolation, production lors de la pointe de consommation le jour en été, sur place)...!

- Ne l'est pas ailleurs (pointe le matin 7-9h et le soir 18-20h en hiver)

- L'est encore moins si l'on produit un fort pourcentage d'électricité en base; il faut alors prévoir du stockage

Hydrogène

Batteries

Barrages, air comprimé, ...

Problème non résolu!

Une solution miracle: le satellite de puissance solaire (SPS) ??

# Quelques questions sur les cellules solaires

A world map with a color gradient representing solar radiation intensity. The colors range from light blue (low intensity) in the polar regions to bright yellow and orange (high intensity) in the tropical regions. The map is overlaid with a grid of latitude and longitude lines.

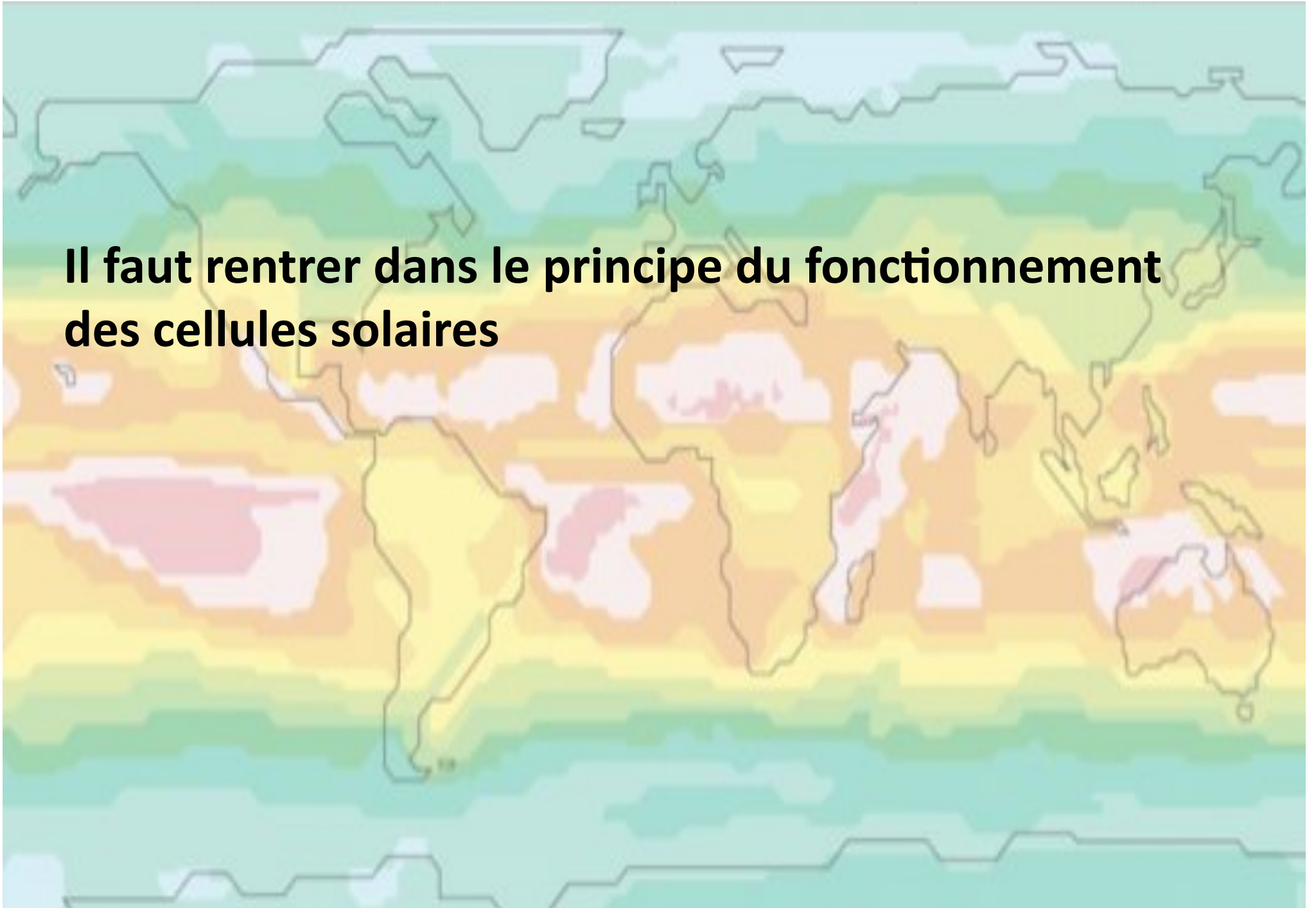
Pourquoi le rendement de conversion de l'énergie solaire est-il limité à 20% ?

Pourquoi les cellules solaires restent elles chères?

Quelles sont les voies de diminution du coût?

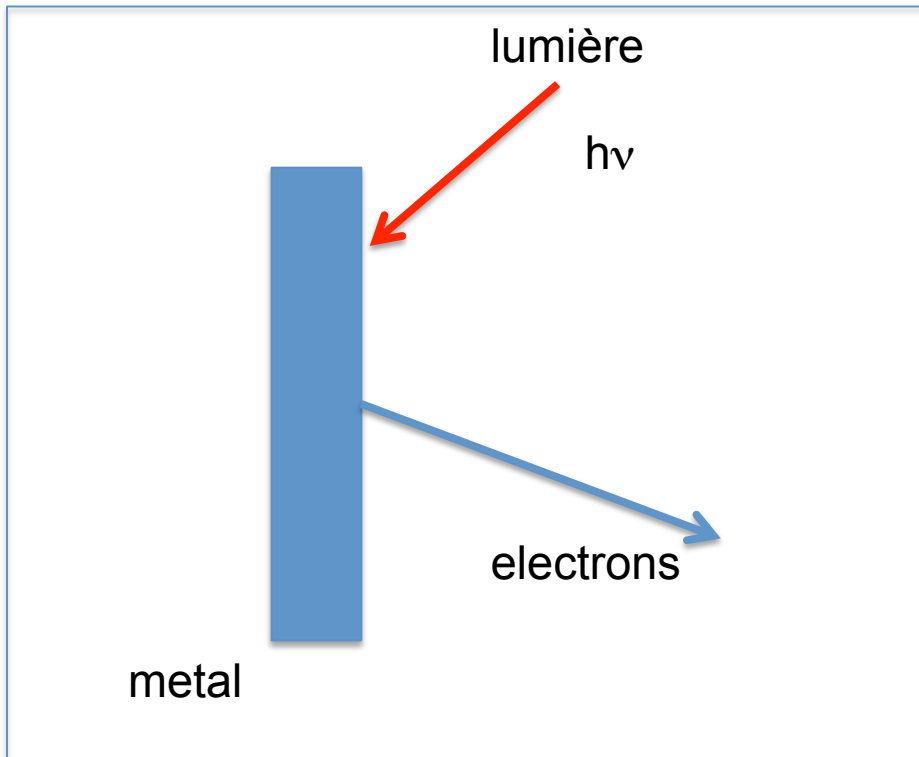
Réponse simple à presque toutes les questions Les énergies renouvelables sont à faible densité, donc nécessitent de grandes surfaces, ce qui implique un cout important

**Il faut rentrer dans le principe du fonctionnement  
des cellules solaires**

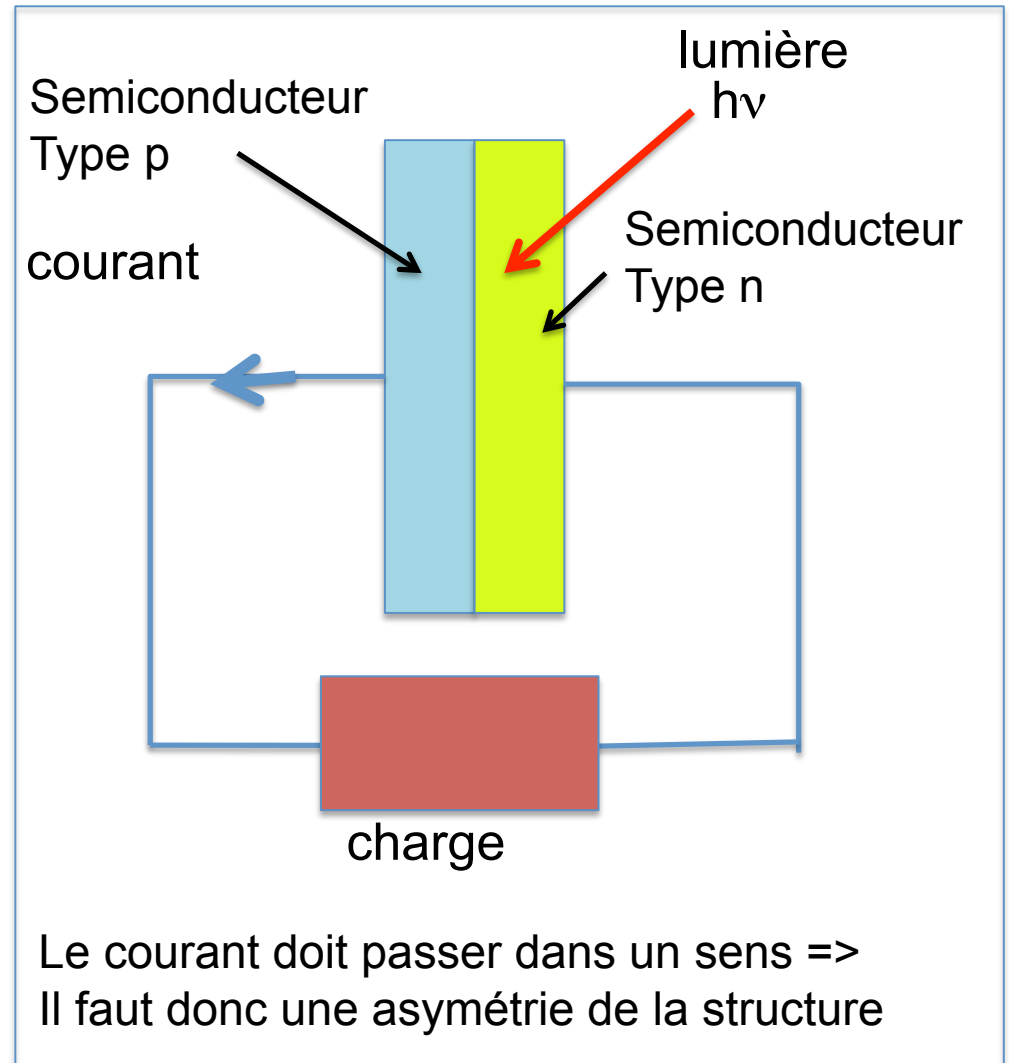


La cellule solaire a un fonctionnement proche d'une cellule photoélectrique, les électrons sont générés dans la matière au lieu d'être émis dans le vide

### Effet photoélectrique



### Cellule solaire



## Fonctionnement des cellules solaires

Pour le physicien/technologue qui sommeille en vous, les quelques slides en annexe expliquent l'origine de l'asymétrie, la tension et le courant que l'on obtient quand on expose une cellule solaire à un rayonnement incident

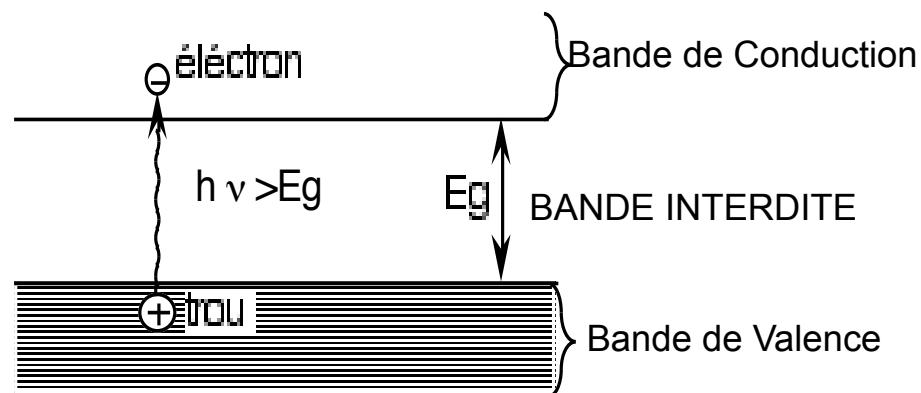
**Pour ceux qui veulent seulement le résultat, les points essentiels:**

- Les cellules solaires sont faites de matériaux **semi-conducteurs**
- l'asymétrie est provoquée par l'inclusion d'impuretés chimiques de « signe » opposé des deux côtés de la cellule, créant une **jonction** p-n (p pour positif, n pour négatif). Sous éclairage, un courant électrique est photo induit qui passe du côté n au côté p (correspondant à des **électrons chargés négativement** qui passent du côté p au côté n).
- la **tension** obtenue aux bornes électriques de la cellule est déterminée par la différence d'énergie des électrons entre les côtés 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** d'énergie supérieure à la bande interdite.

Quelle tension obtient-on dans une cellule solaire?

Les cellules solaires sont constituées de jonctions p-n en matériaux semiconducteurs.

Chaque semiconducteur a une bande d'énergie "interdite" (aussi appelée bandgap ou gap) caractéristique du semiconducteur.



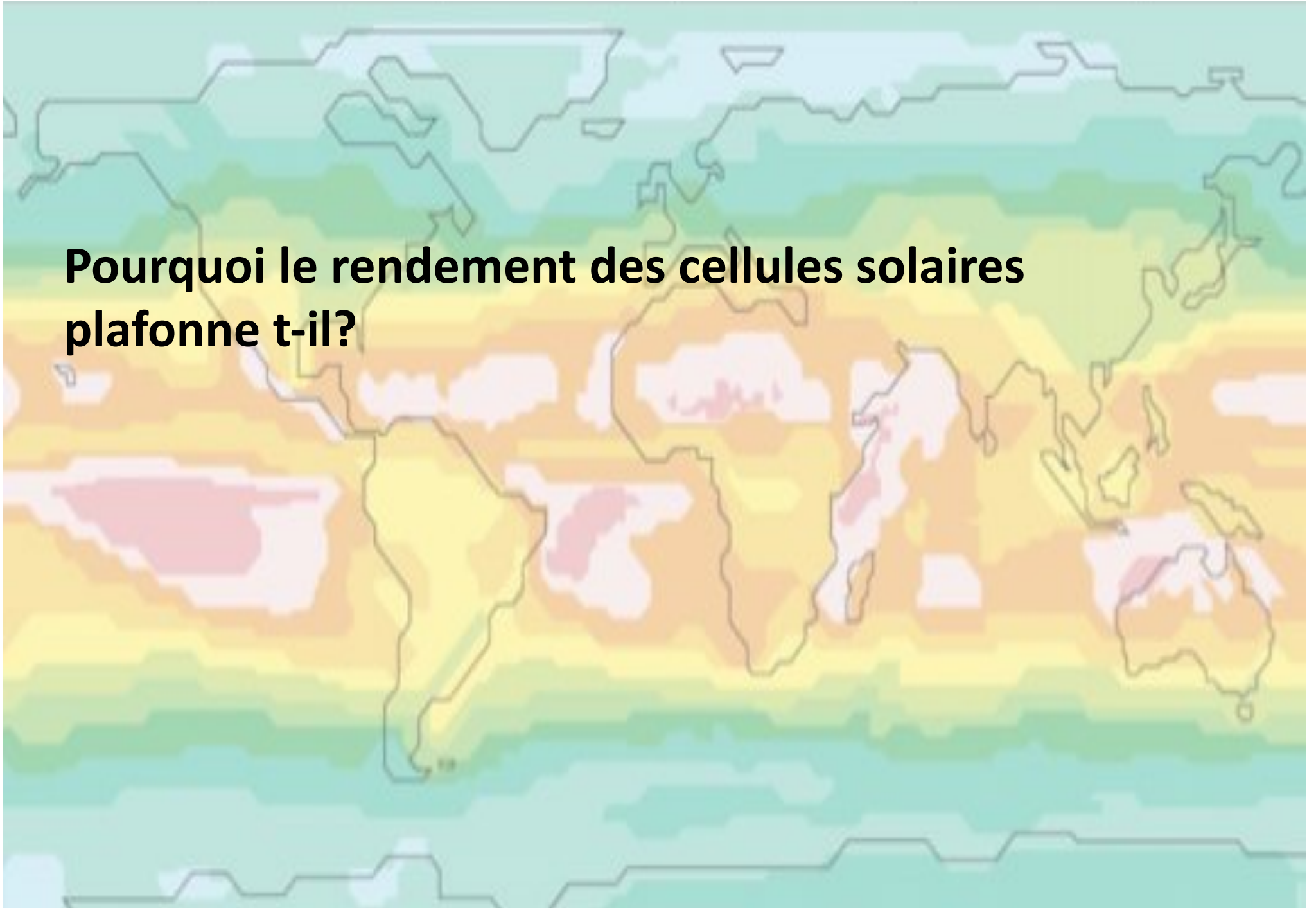
Des porteurs de charges, électrons et trous, sont créés quand on irradie la cellule solaire avec de la lumière d'énergie supérieure à son gap.

Il apparaît alors aux bornes de la jonction (cad de la cellule solaire) une ddp (une tension utile) proche de l'énergie du gap: on récupère quasiment l'énergie utilisée pour exciter l'électron à travers la bande interdite.

Exemples; pour du Silicium, dont le gap est proche de 0.9eV, la tension utile est de l'ordre de 0.8V. pour de l'Arseniure de Gallium, dont le gap est proche de 1.4eV, la tension utile est de l'ordre de 1.3V.

La tension ou voltage d'une cellule solaire est la barrière de potentiel entre électrons et trous dans une jonction pn du matériau soit au maximum  $\approx$  la bande interdite

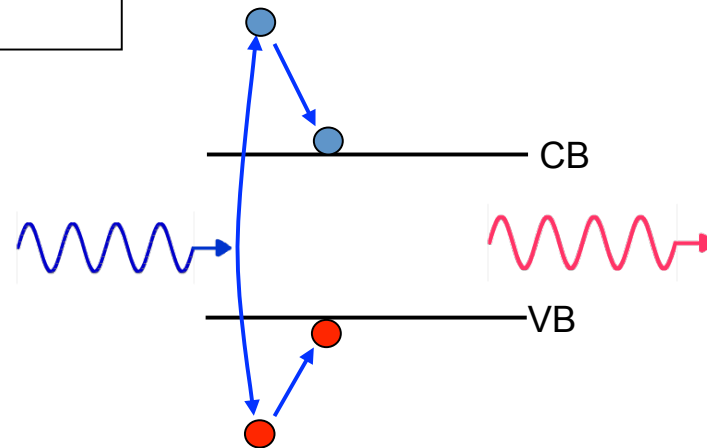
**Pourquoi le rendement des cellules solaires plafonne t-il?**



# Les sources intrinsèques de perte d'énergie dans les cellules solaires

Le spectre solaire comprend des photons de toutes énergies

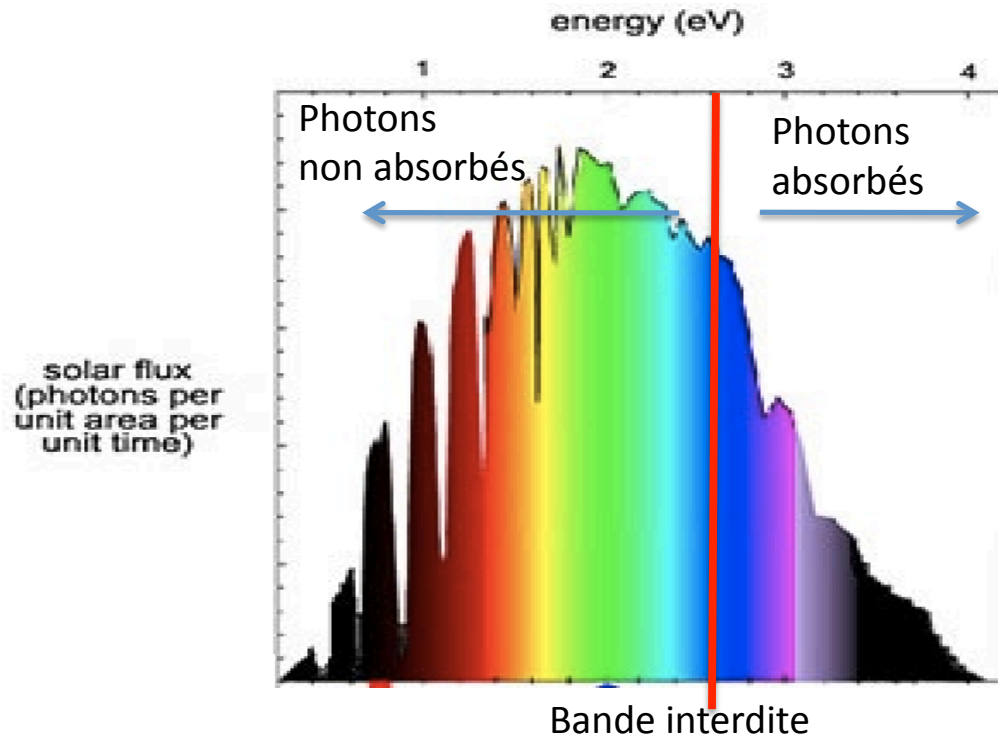
Si un photon de grande énergie est absorbé, il crée des électrons et des trous de grande énergie cinétique. L'énergie en excès des électrons et trous est perdue par relaxation de l'excès d'énergie vers les extremas des bandes d'énergie pour les électrons et les trous



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).

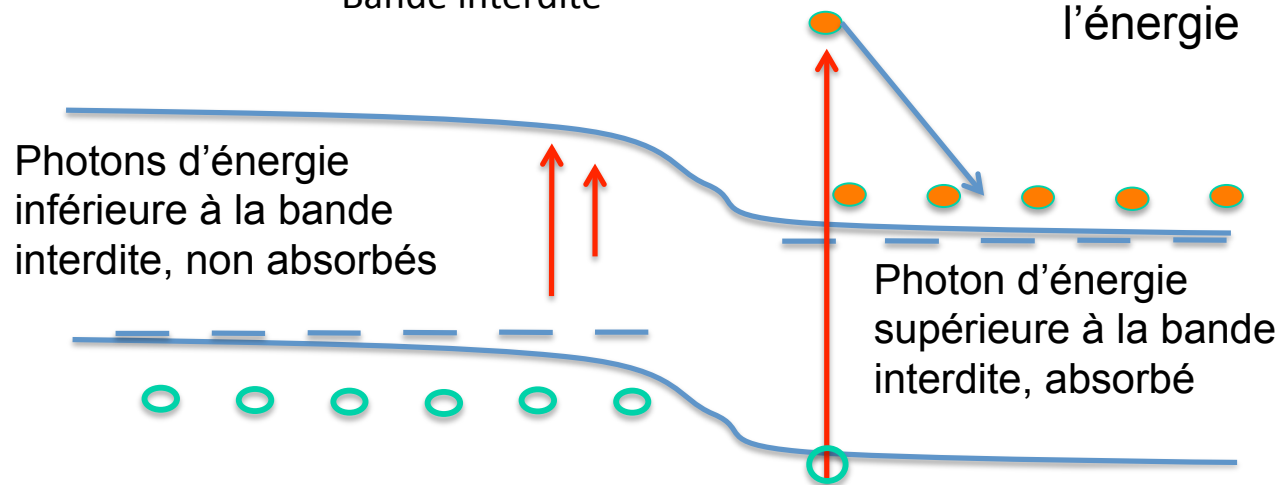
# La limite de 30% pour une cellule à un semiconducteur, dite à jonction unique



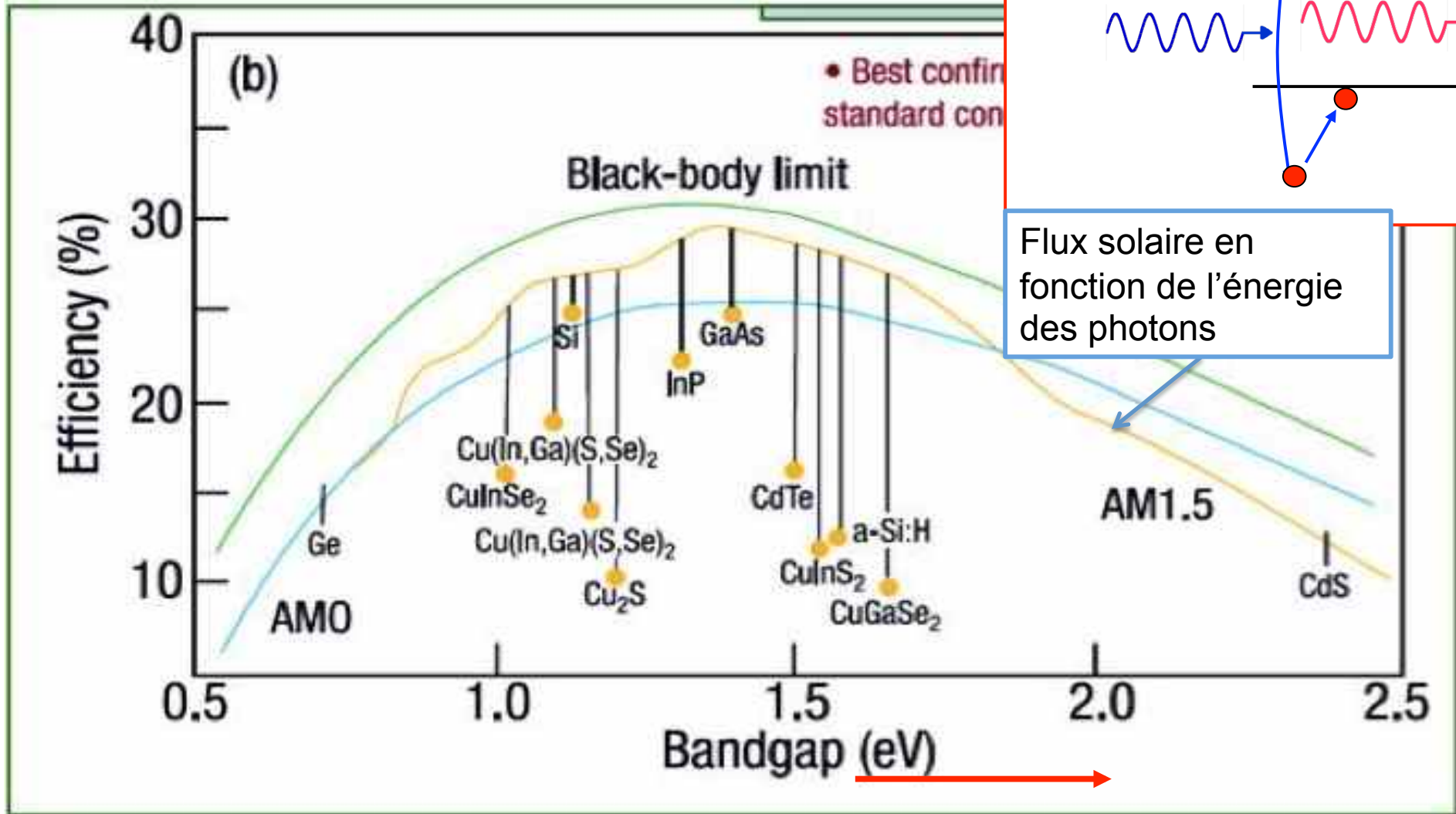
Choix du semiconducteur:  
*Si on choisit une bande Interdite faible*

- 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

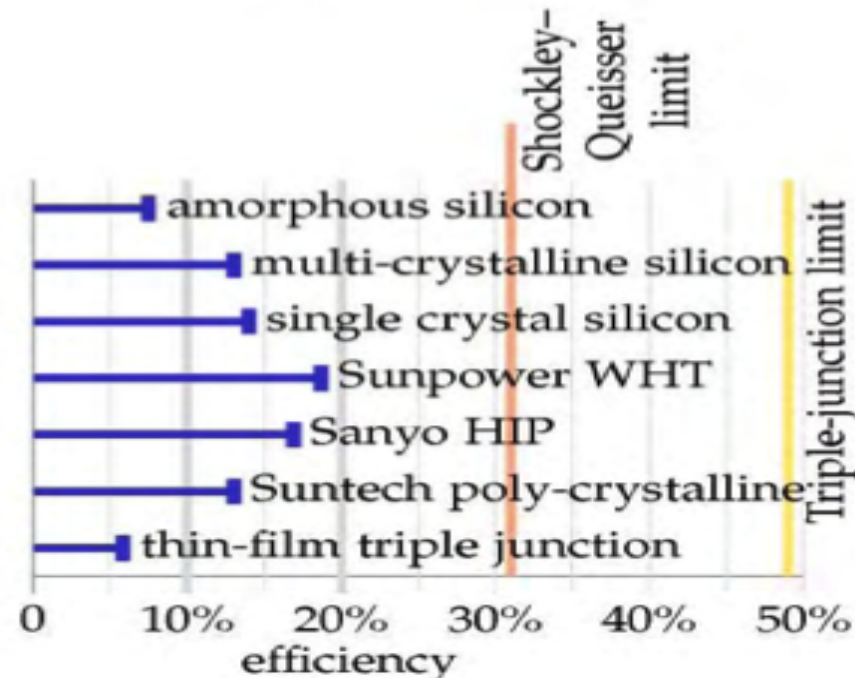


V augmente (comme le bandgap) mais le courant I diminue comme le flux de photons d'énergie supérieure au bandgap.

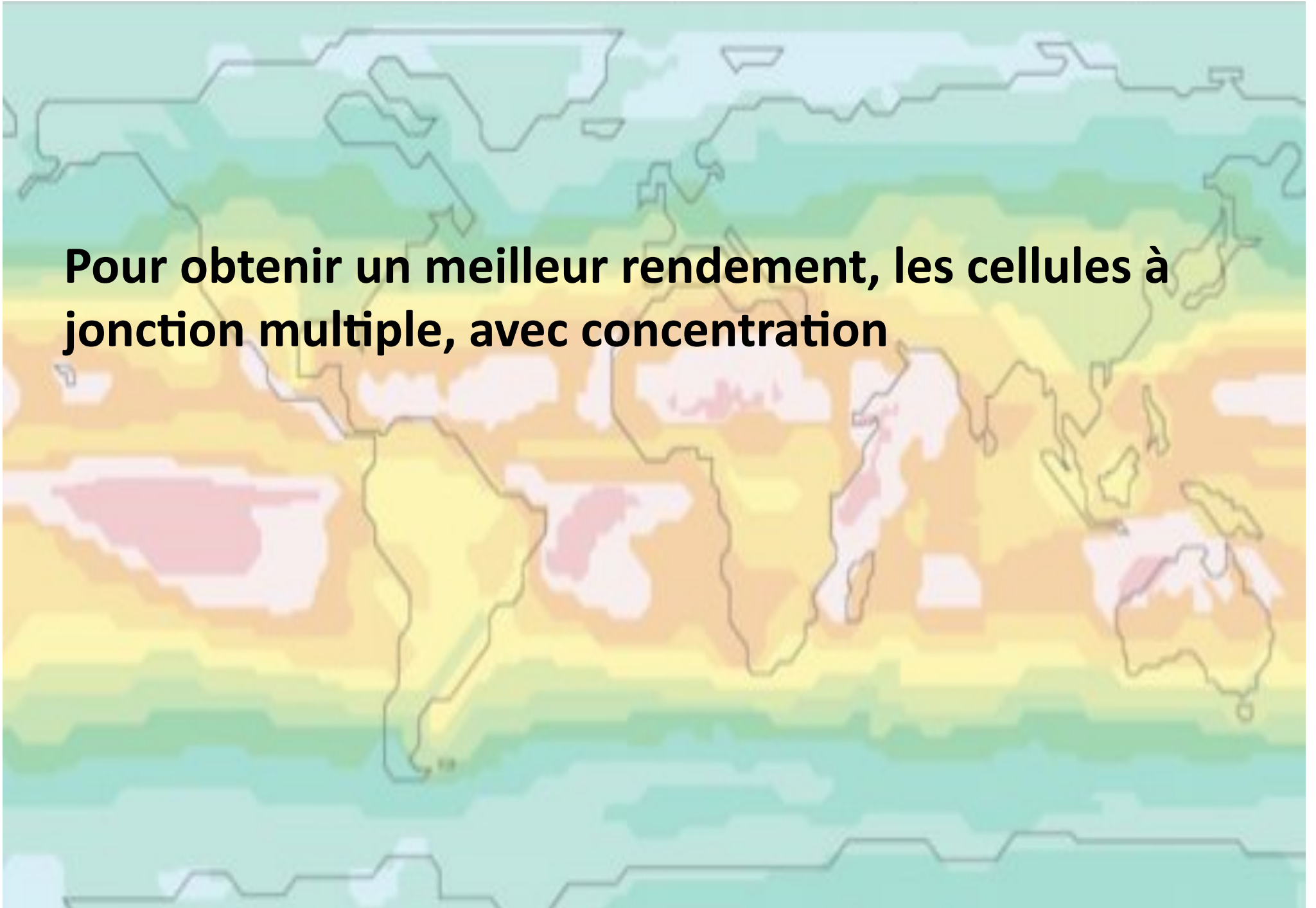
la **limite** d'environ 30% n'est donc pas vraiment due au semiconducteur utilisé. Cette limite physique pour une cellule solaire à une jonction est de 32%. En fait, le rendement est souvent très inférieur, à cause de pertes en tension et en courant, spécifiques du matériau utilisé, de sa pureté et de 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 efficiencias

---

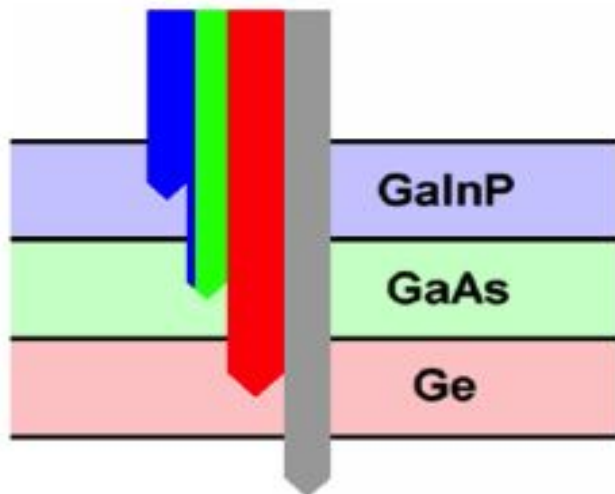
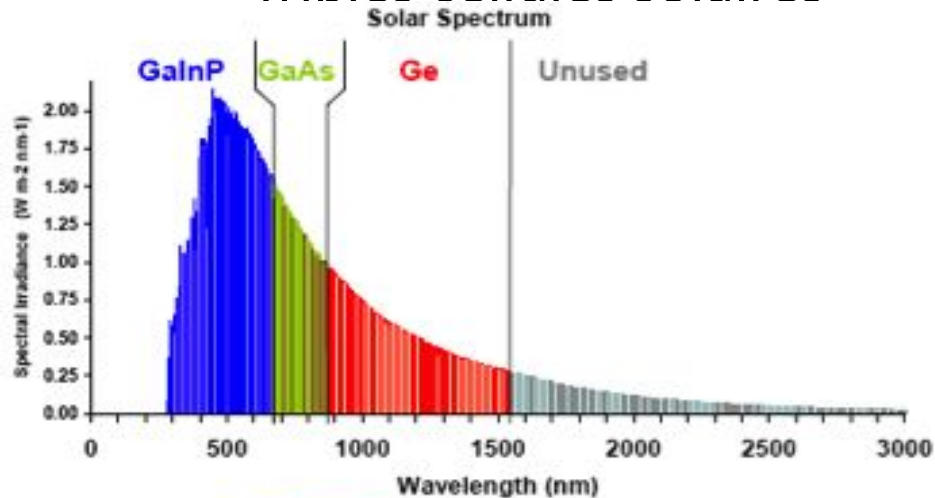


**Pour obtenir un meilleur rendement, les cellules à jonction multiple, avec concentration**



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%

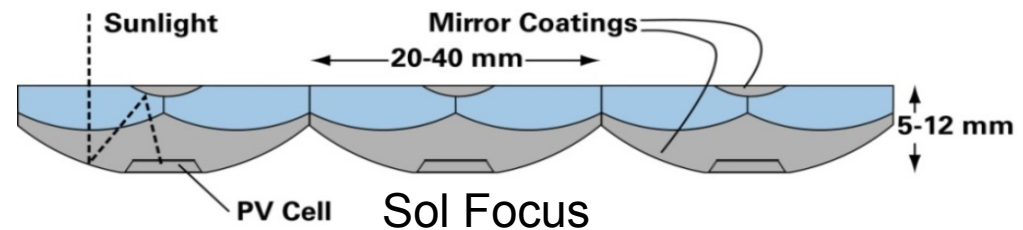
- - Les cellules sont en série: le même courant passe dans toutes les cellules
- - Le courant est limité par la cellule qui produit le moins de courant sous éclairement solaire.
- - Les tensions des cellules empilées s'additionnent.
- - La cellule de plus grand gap voit la lumière en premier car elle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

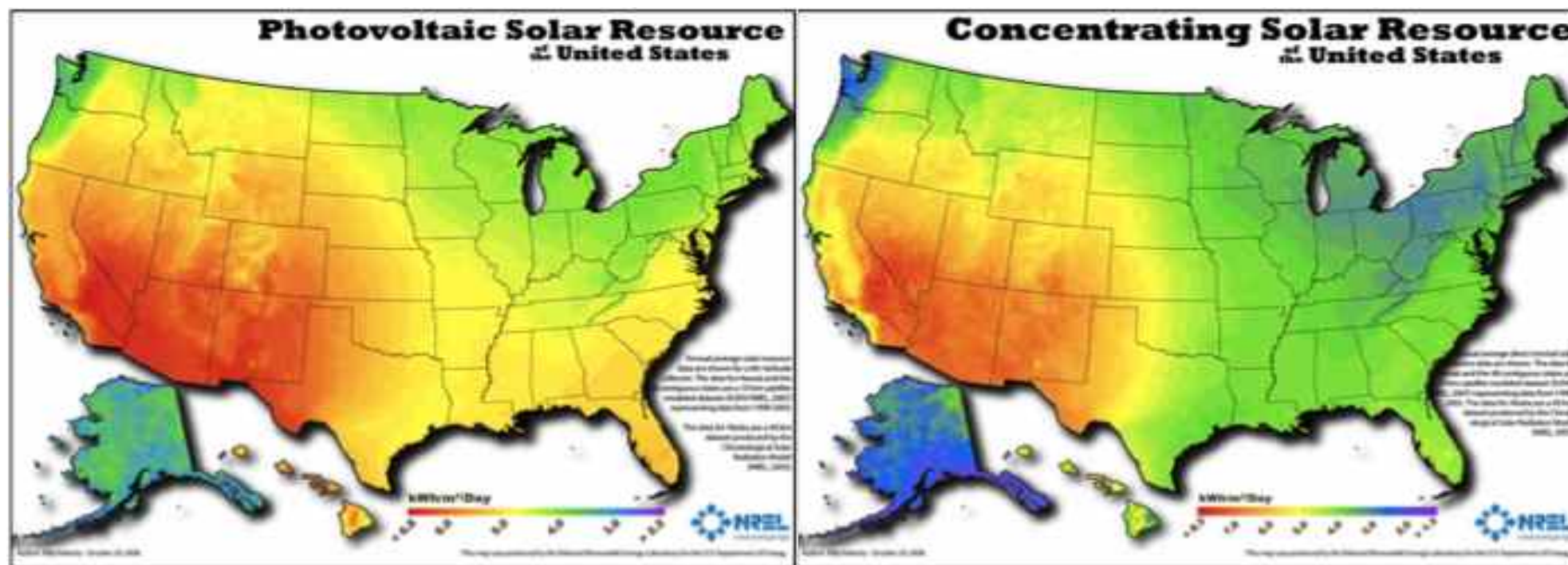


Dish Shape



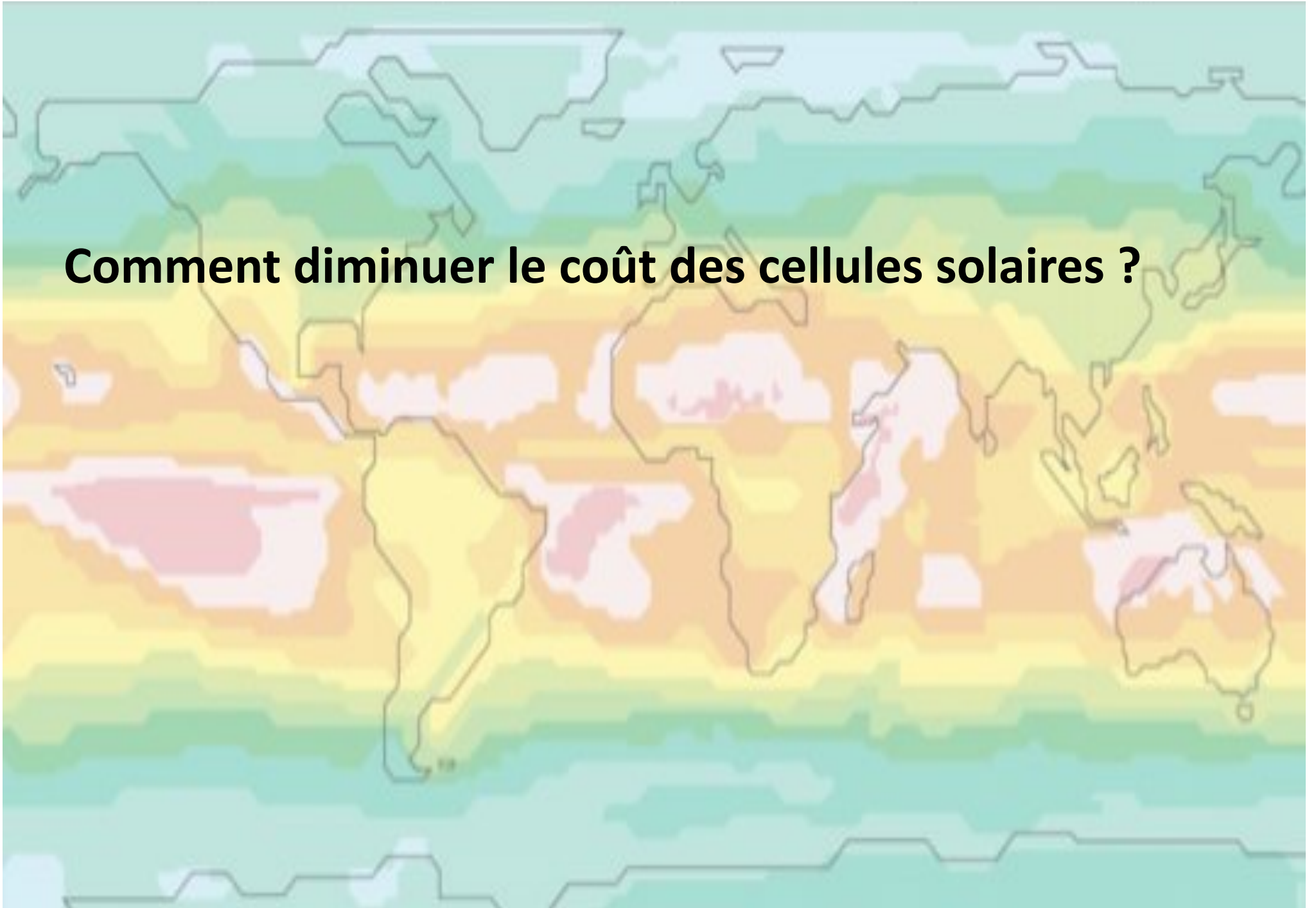
L'énergie solaire utilisée par les centrales photovoltaïques à concentration, comme pour les centrales solaires thermiques à concentration (Concentrating Solar Power, CSP) est celle de l'ensoleillement direct, celui reçu normalement aux rayons du soleil. Comme la direction du soleil change dans la journée,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

Les deux cartes ci-dessous montrent la différence de ressource sur l'année

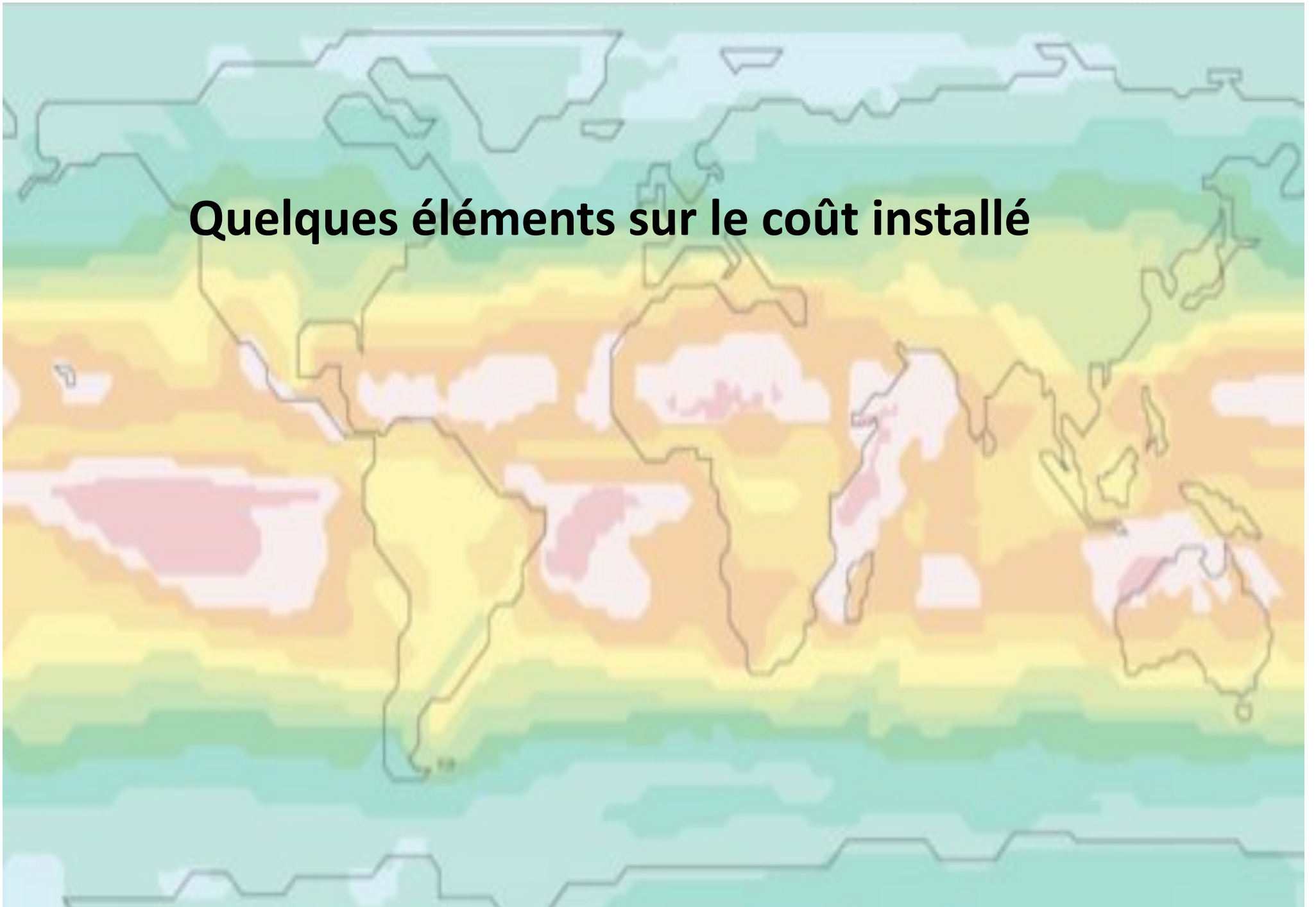


<http://www.nrel.gov/gis/solar.html>

**Comment diminuer le coût des cellules solaires ?**



## **Quelques éléments sur le coût installé**



# Composantes du coût du photovoltaïque



+

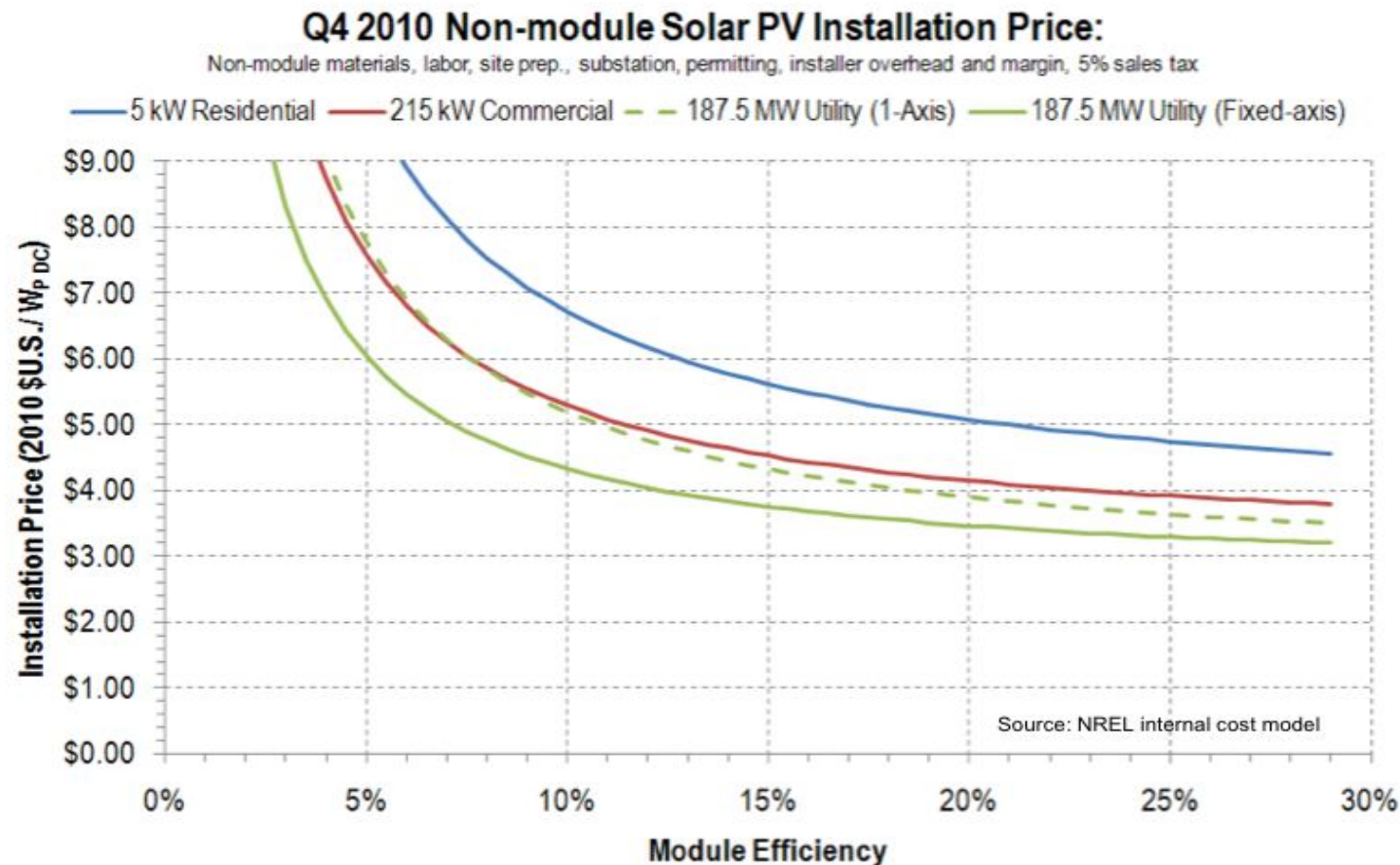


- coûts des matériaux
- Coûts de fabrication
- Rendement du module

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

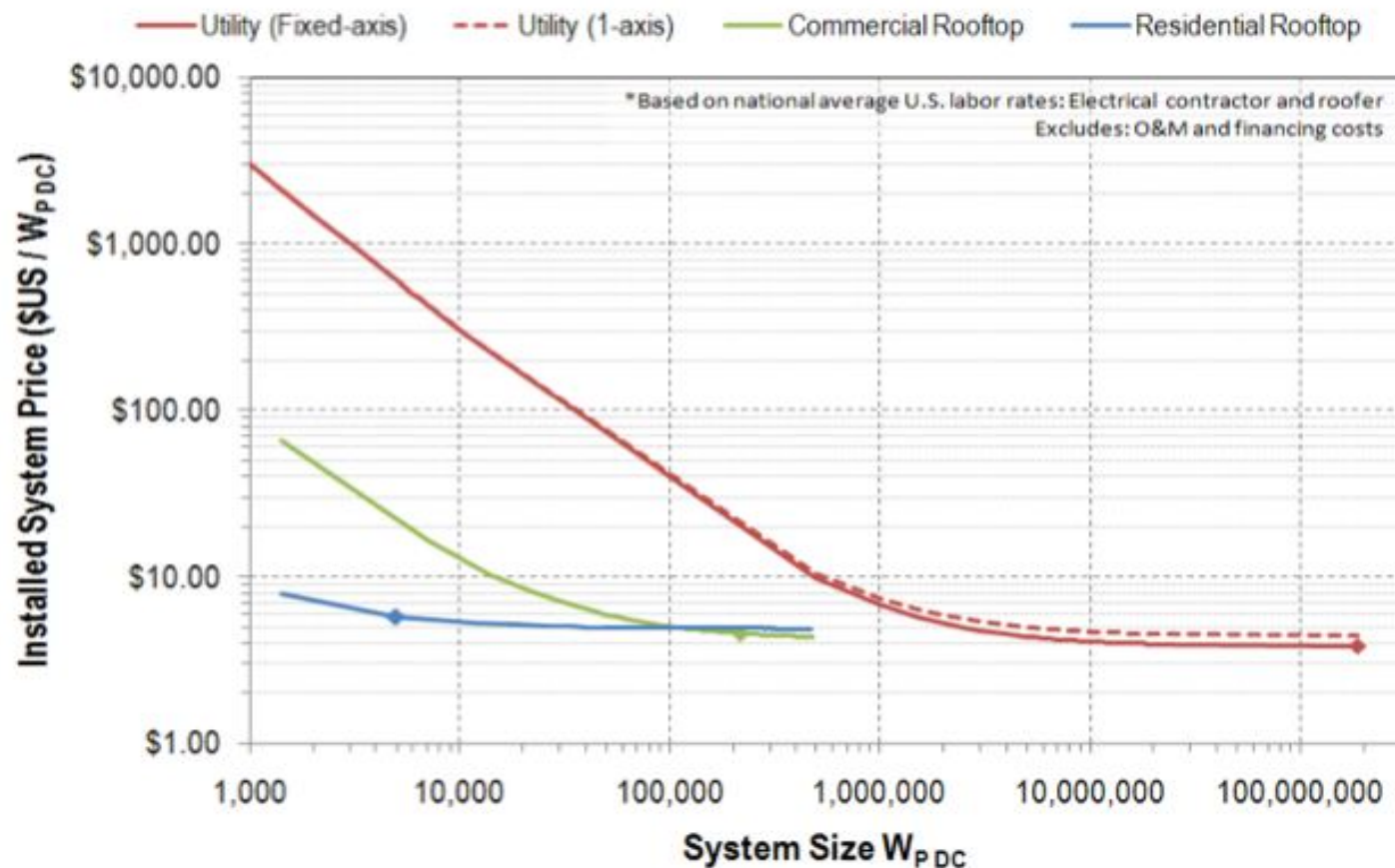
$$= \frac{\text{Coût / m}^2}{\text{Watt / m}^2}$$

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



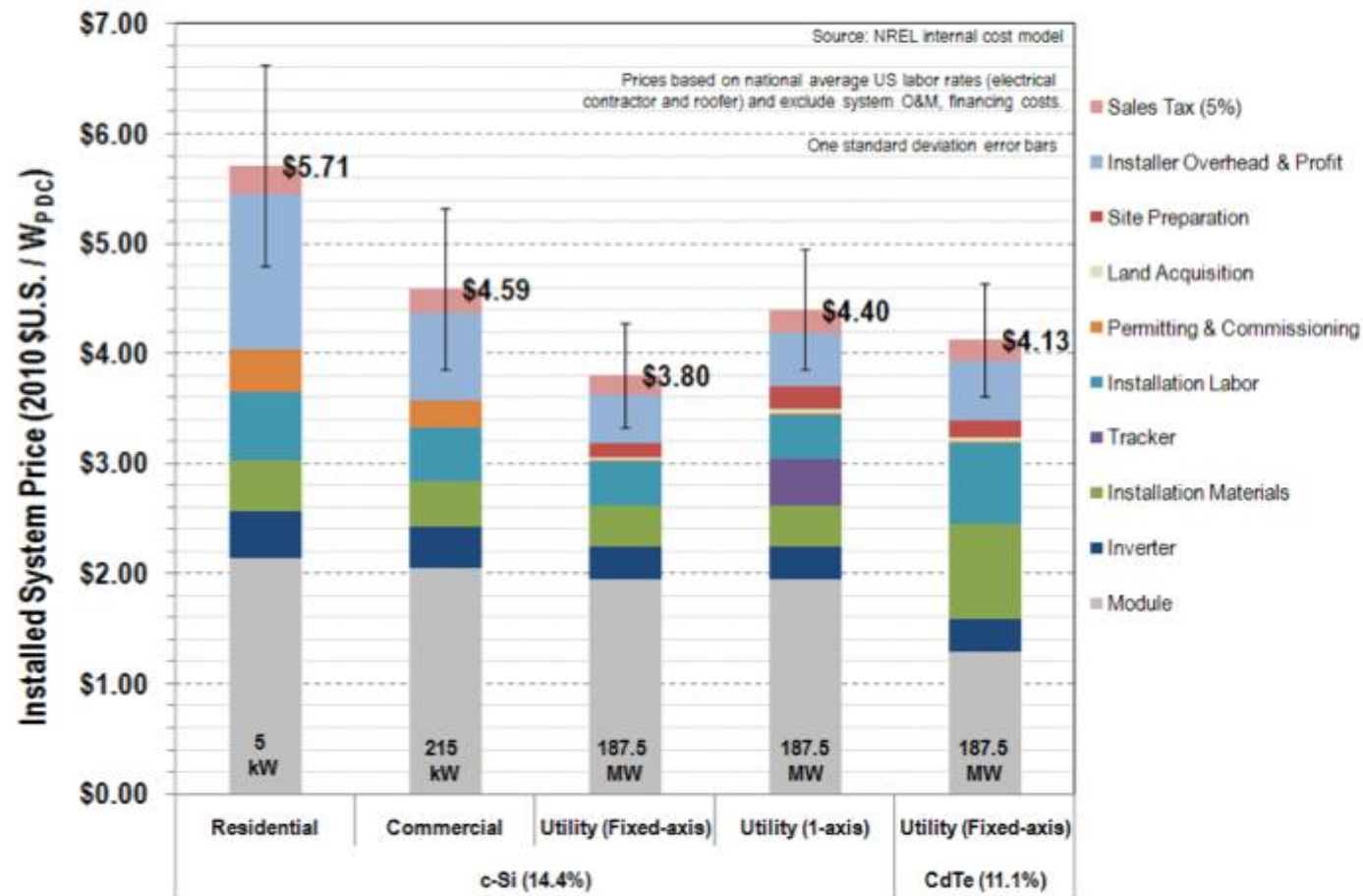
- \$0.05–\$0.10/W<sub>DC</sub> /1% (absolute)

# 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<sub>DC</sub>

# 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**

*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 Tellure de cadmium**

**Avantages: utilisent moins de matériau**

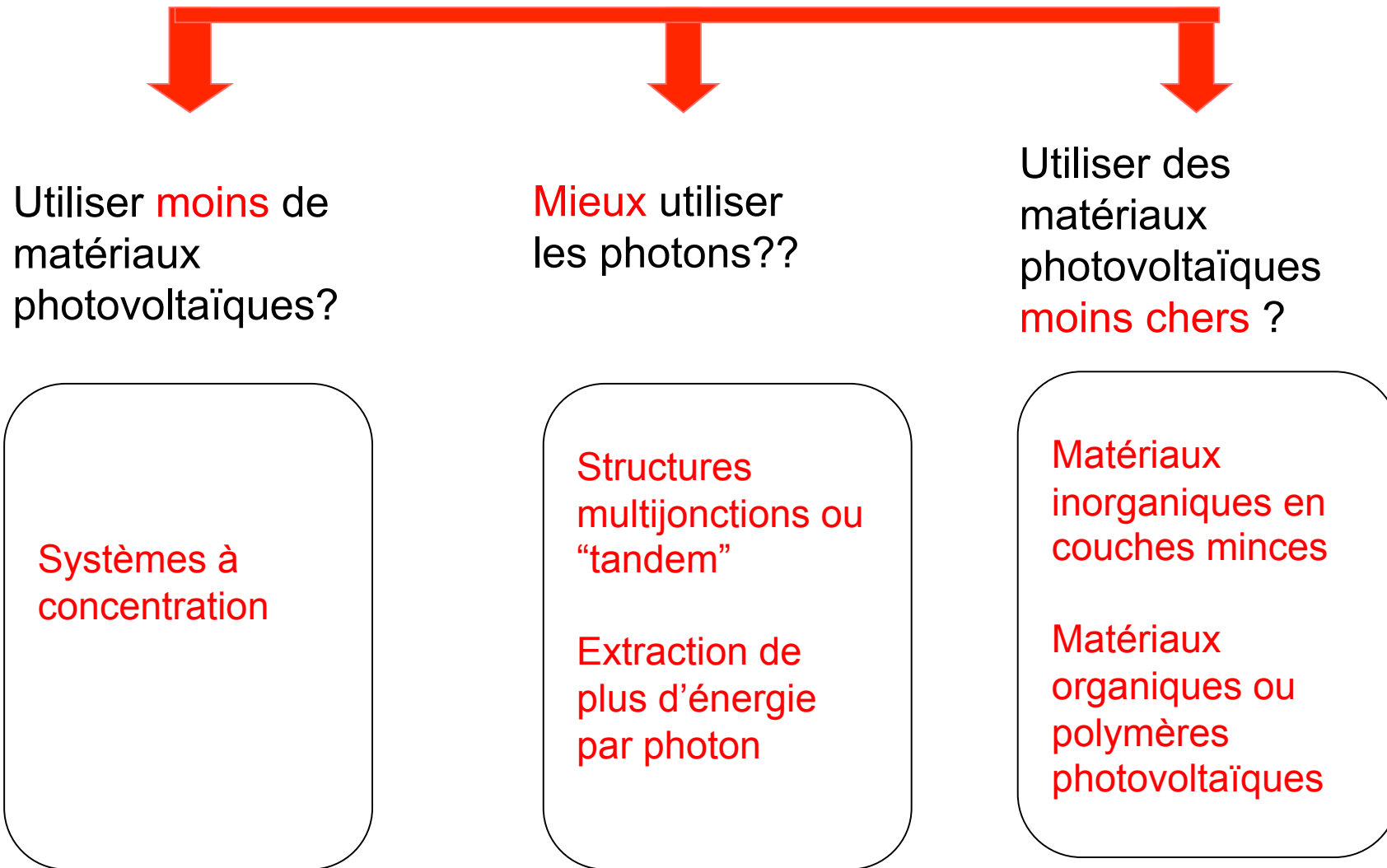
*Les filières en matériaux organiques*

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

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

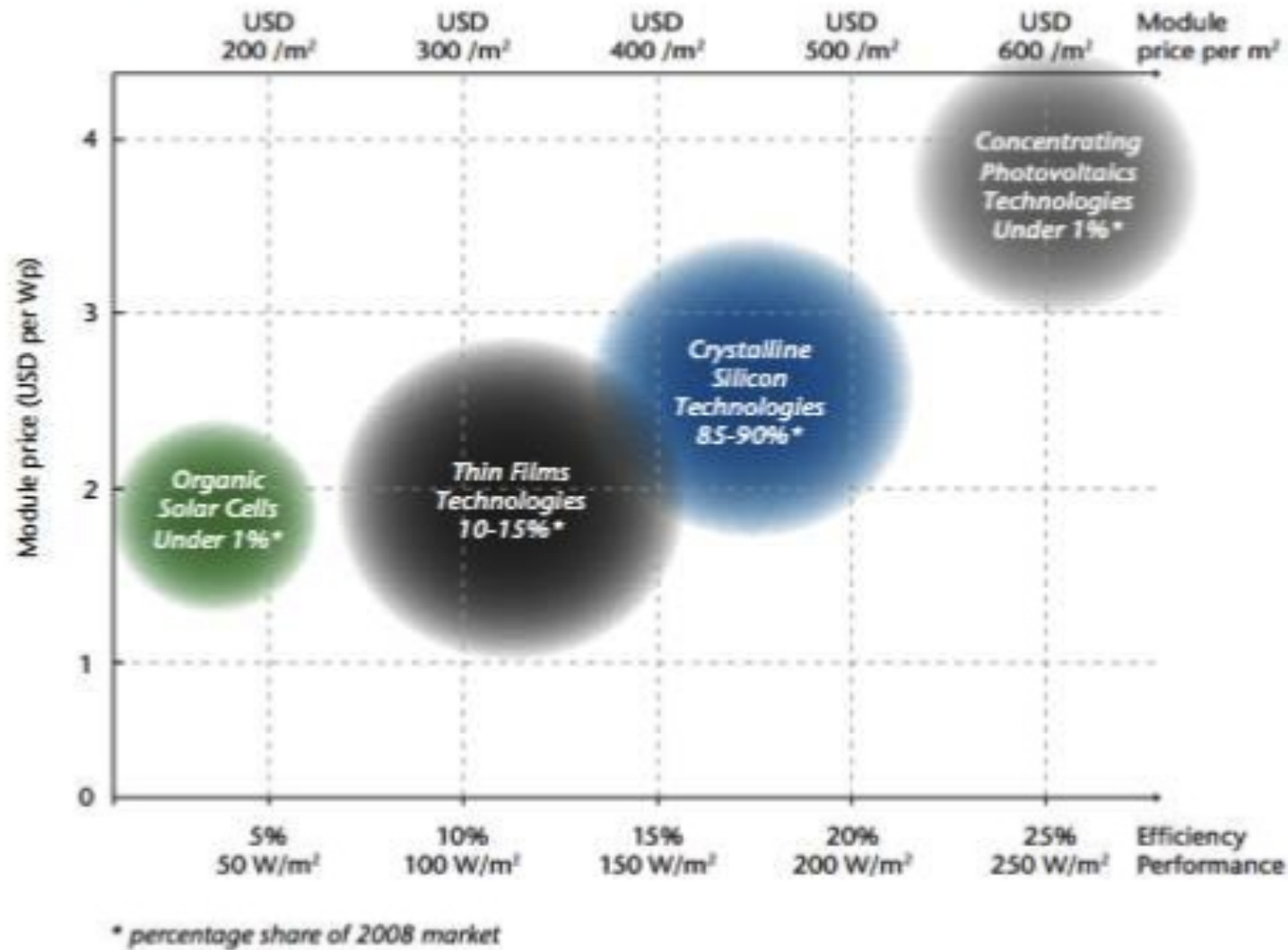
Ceci permet d'évoluer vers des modes de fabrication moins chers mais le rendement est le plus souvent moins bon qu'avec le silicium massif

# Les strategies pour réduire le coût

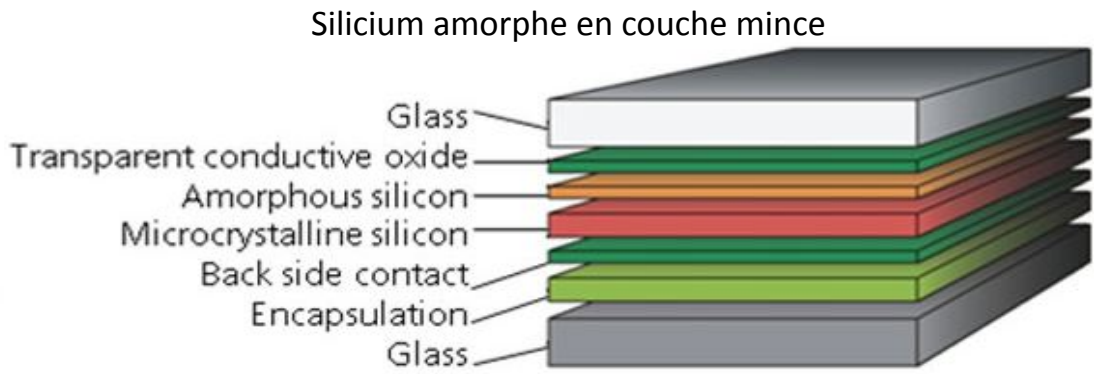
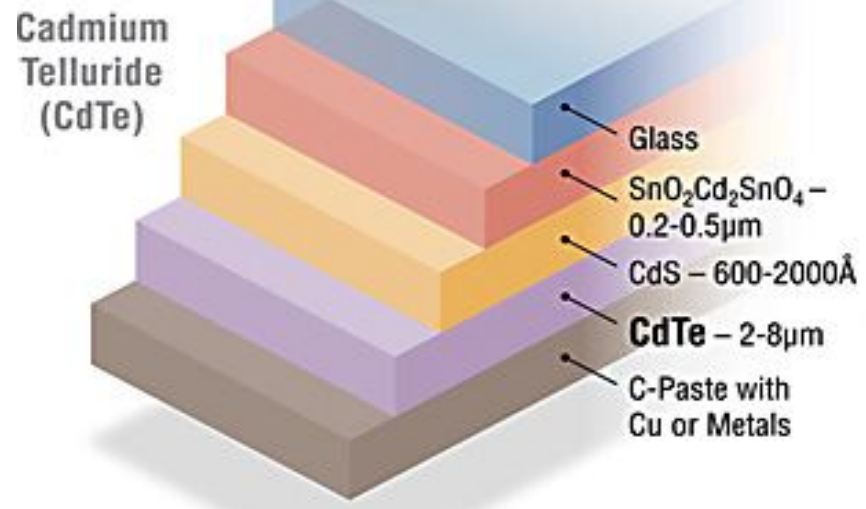
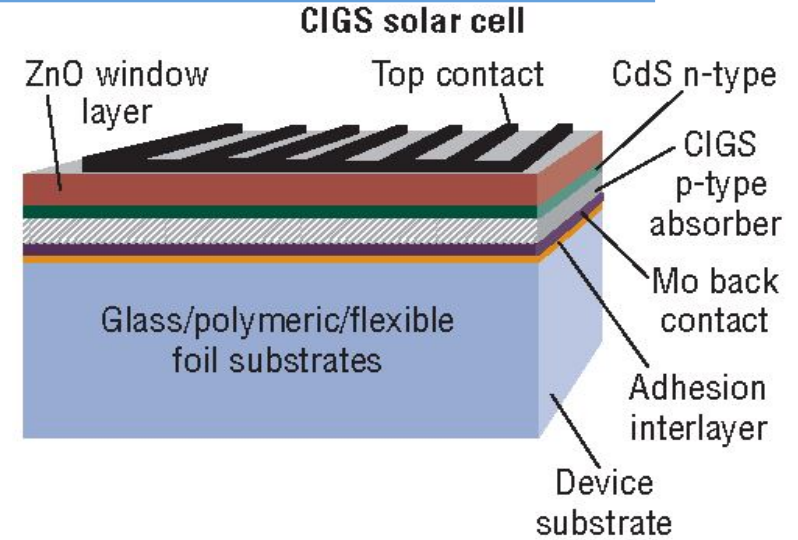
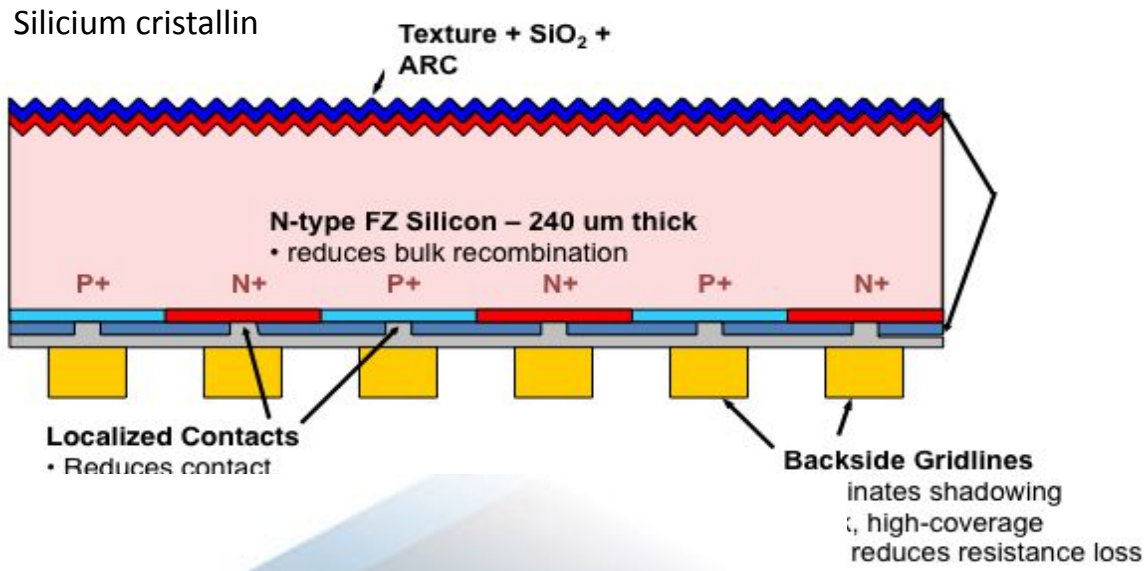




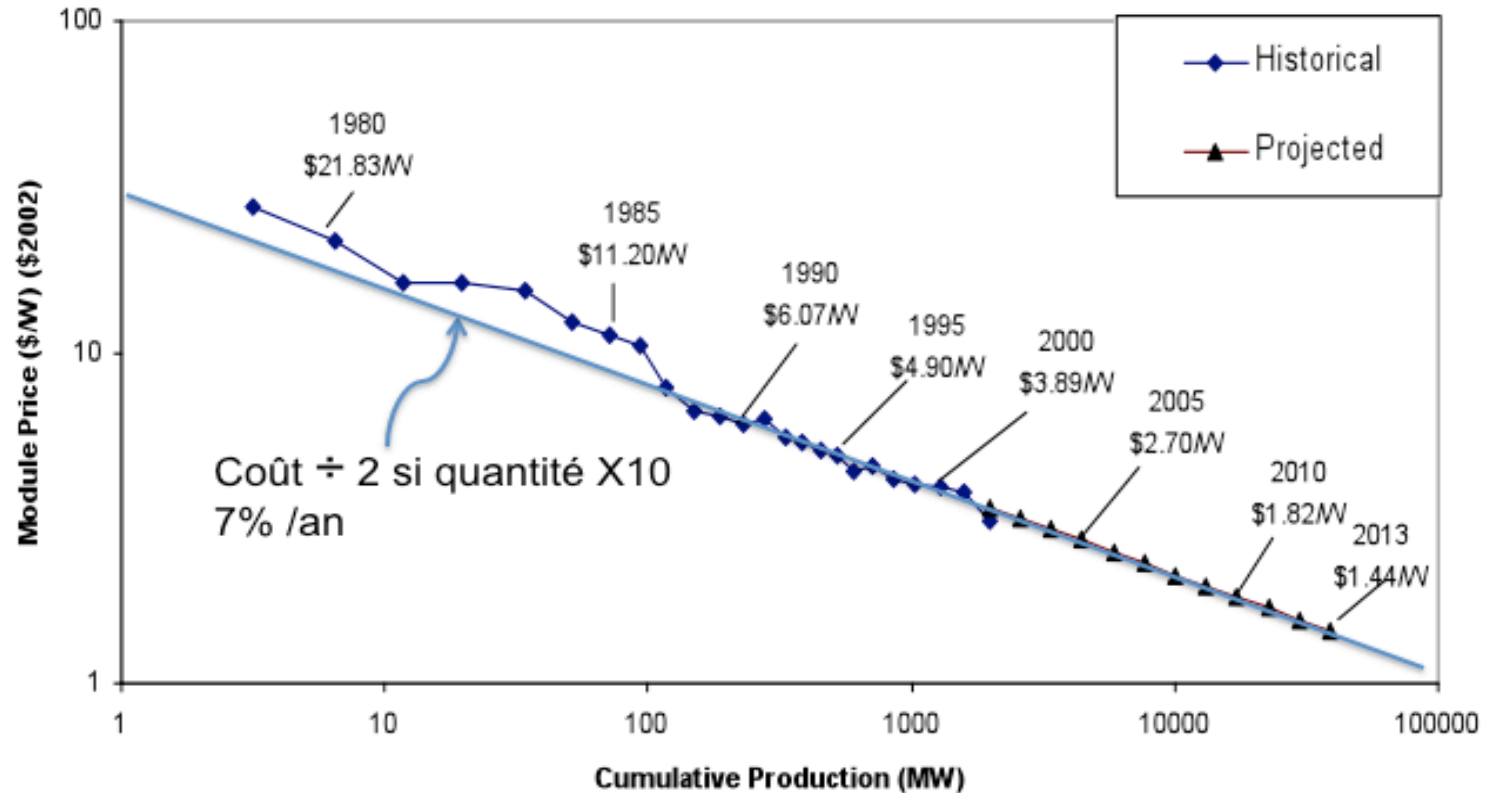
# Prix, performance, marchés des différentes technologies de cellules solaires (2008)



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



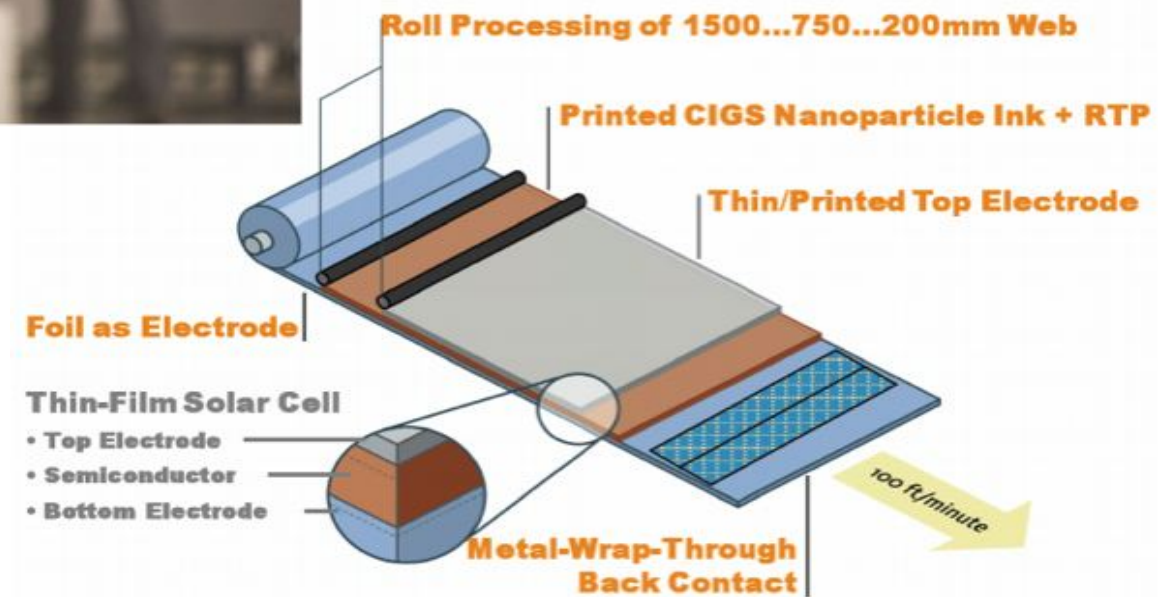
Peut on espérer une réduction drastique du coût des cellules solaires (il resterait encore le coût d'installation, qui diminue beaucoup moins vite)



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).

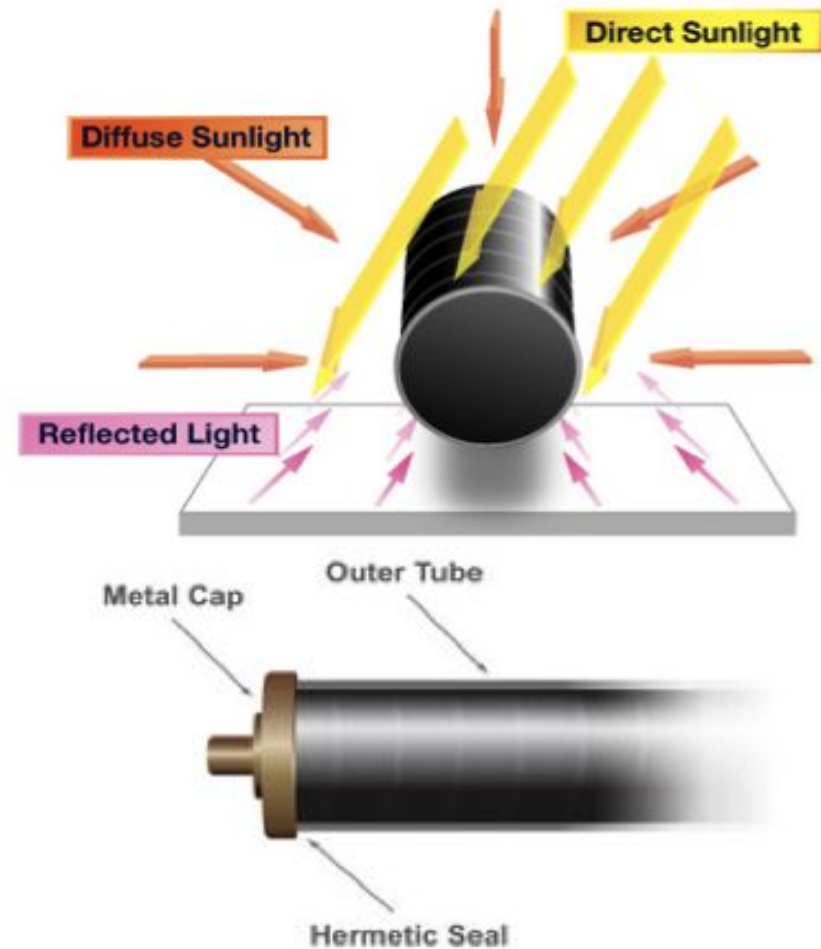
# Mode de fabrication moins cher: le dépôt sur rouleau (Nanosolar)



See videos of the coating machine and module packaging on Nanosolar's website  
<http://www.nanosolar.com/technology>

# Solyndra's CIGS modules

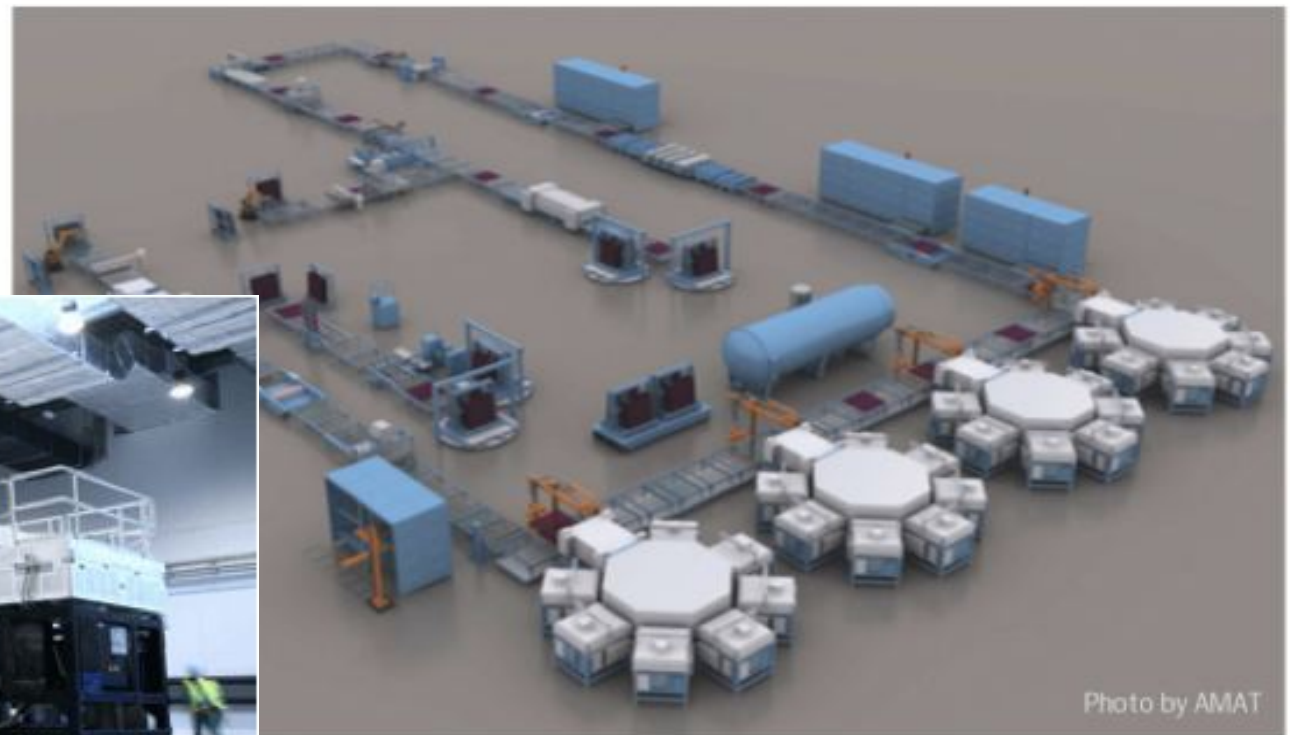
Les cellules de CIGS sont en forme de cylindres déposés sur un toit blanc. Elles capturent ainsi efficacement la lumière directe et la lumière diffuse.



Sur la faillite de Solyndra, le pourquoi et ses conséquences, voir <http://gigaom.com/cleantech/was-the-doe-loan-guarantee-for-solyndra-a-mistake/>  
<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/67635.htm>

## Le système de production à grande échelle de cellules en silicium amorphe en couches minces d'Applied Materials

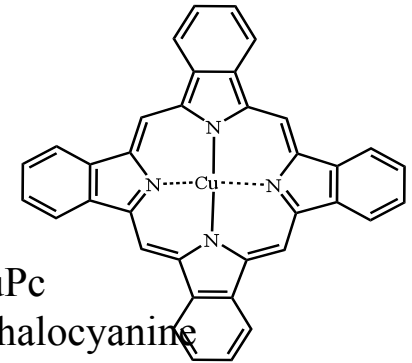
*The Applied SunFab Thin Film Line is the world's only integrated production line for manufacturing thin film silicon solar modules using 5.7 m<sup>2</sup> glass substrates. These ultra-large panels, targeted for large-scale applications such as solar farms, utilities and building-integrated PV system installations, provide production and installation savings that drive down the cost of solar electricity.*



Voir pourquoi cette technologie a été abandonnée à

<http://www.betasights.net/wordpress/?p=1059>

# Les semiconducteurs polymères organiques



Pourquoi?:

- Les polymères sont abondants: ~100,000 tonnes/an
- marchés et technologies matures
- Coûts faibles des matériaux: ~1\$/g → 17¢/m<sup>2</sup>
- Fabrication à faible coût par impression



Kornaka

## 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)**

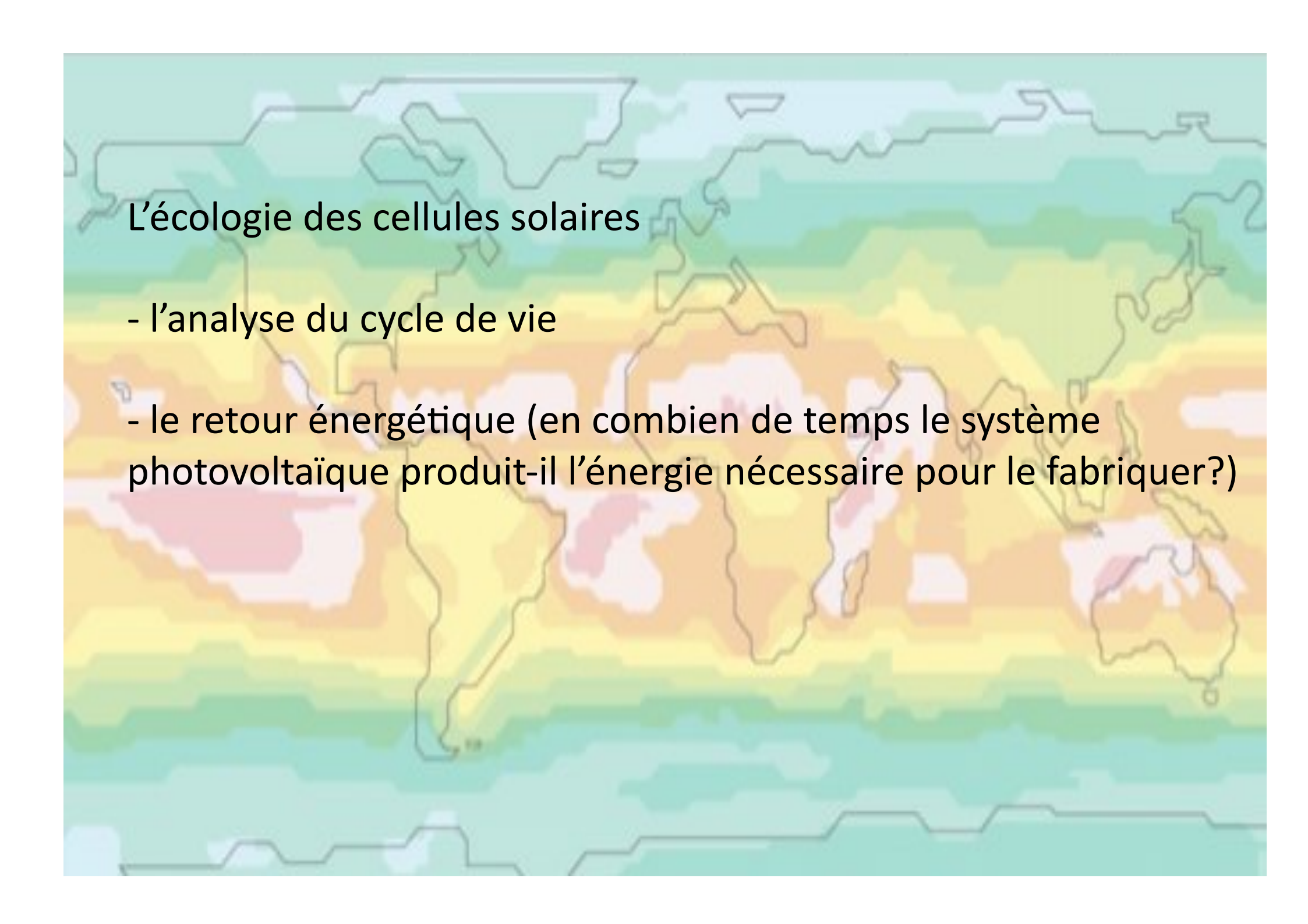
	2010	2016	\$1/Watt
Module	\$ 0.063	\$ 0.037	\$ 0.018
BOS/Installation	\$ 0.055	\$ 0.034	\$ 0.014
Power Electronics	\$ 0.008	\$ 0.006	\$ 0.004
O&M	\$ 0.013	\$ 0.009	\$ 0.003
	\$ 0.139	\$ 0.086	\$ 0.038

**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)

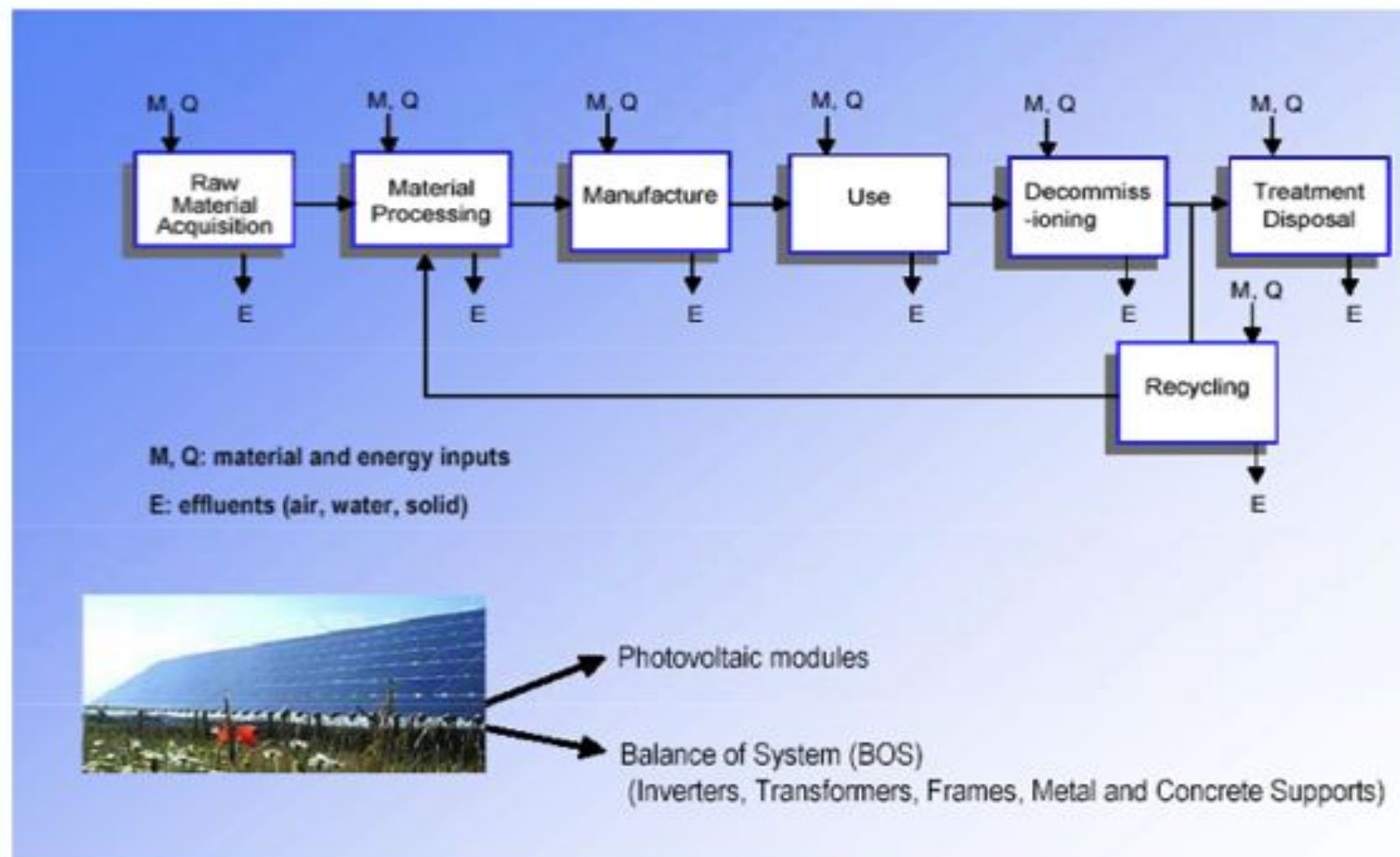
A world map with a color gradient representing solar energy potential. The colors range from light blue (low potential) in the high northern and southern latitudes to bright yellow and orange (high potential) in the tropical regions. The map shows the outlines of continents and oceans.

## L'écologie des cellules solaires

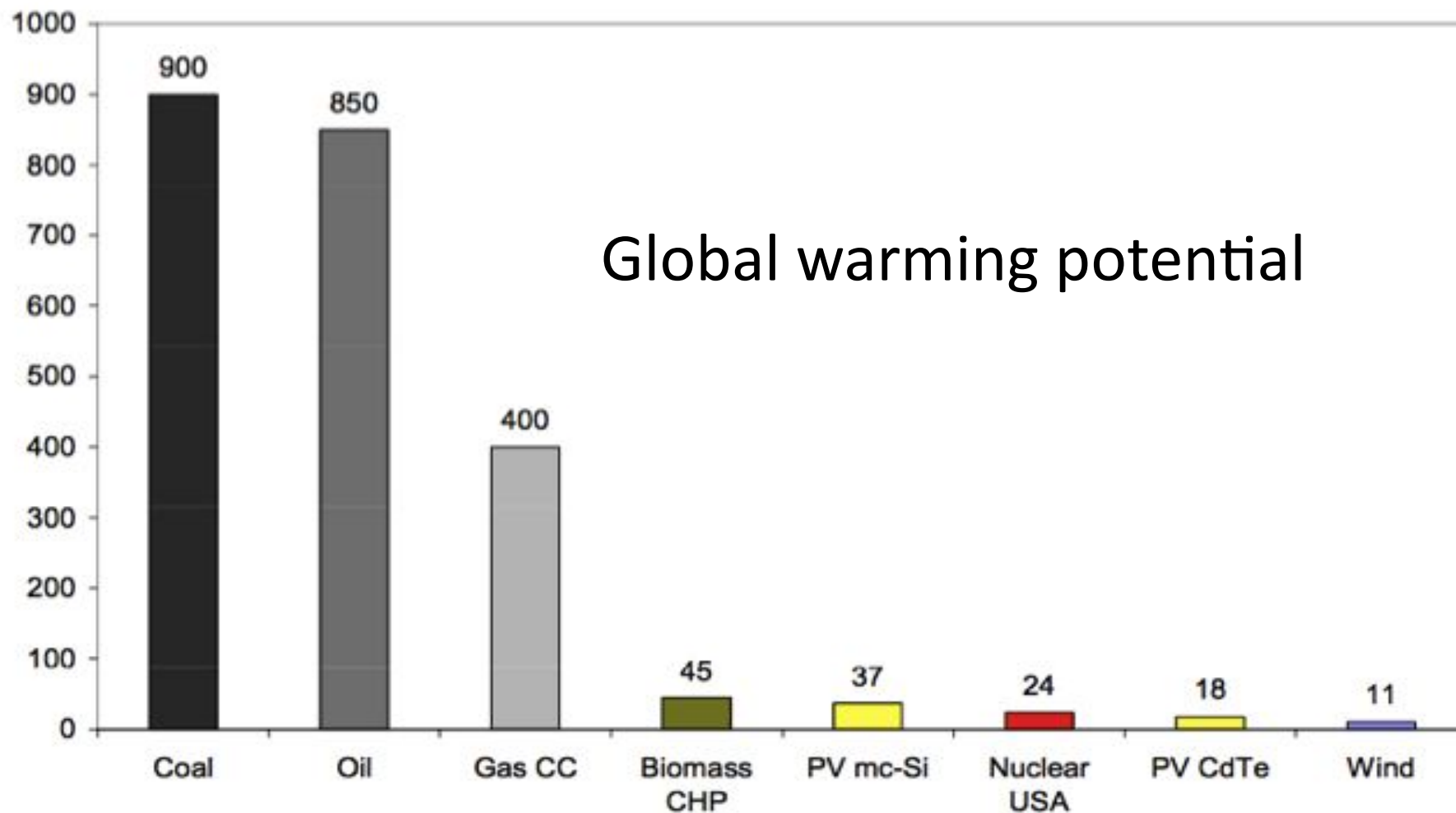
- l'analyse du cycle de vie

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

# The Life Cycle of PV

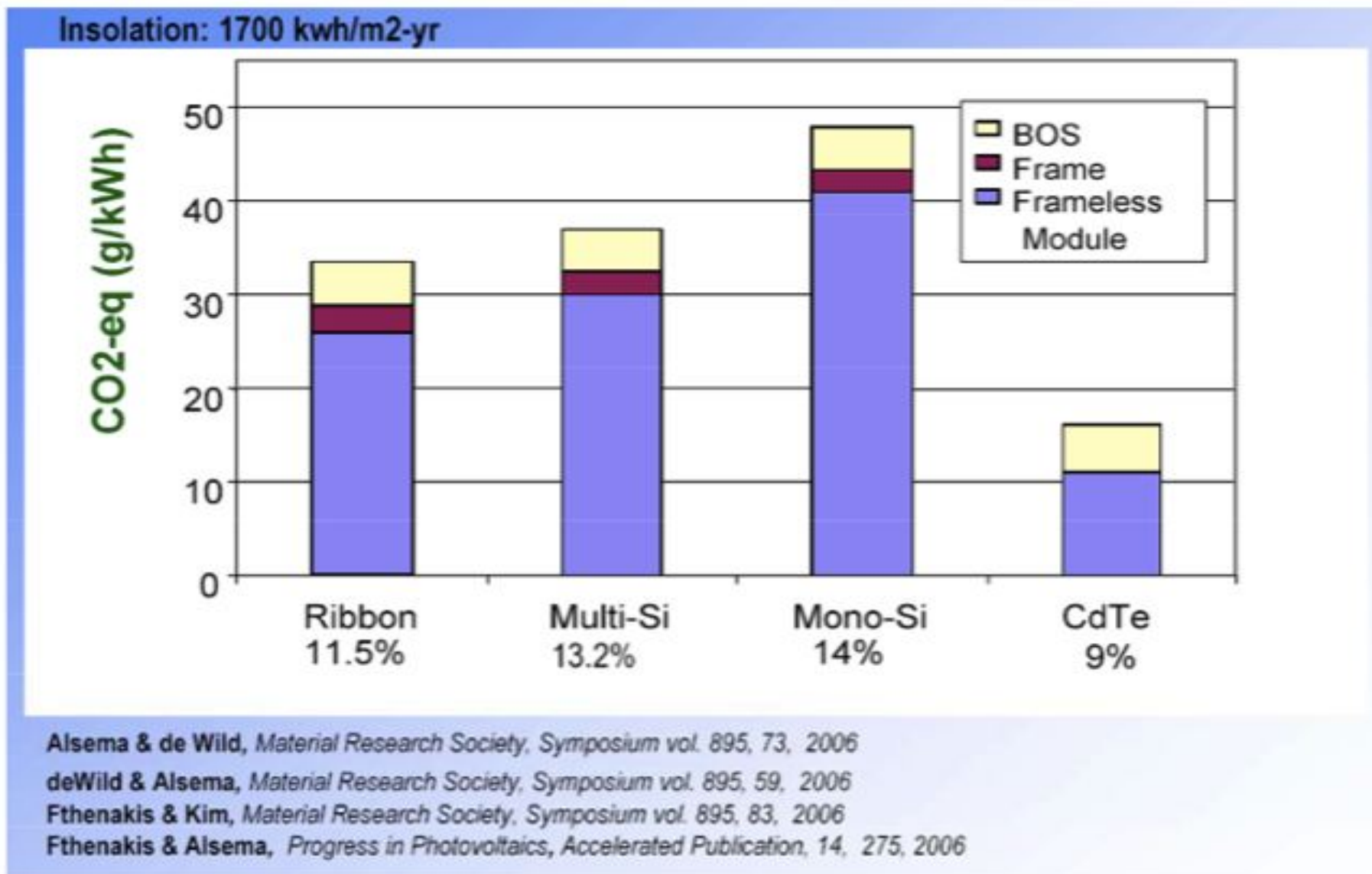


# Empreinte CO2 des différentes sources d'énergie



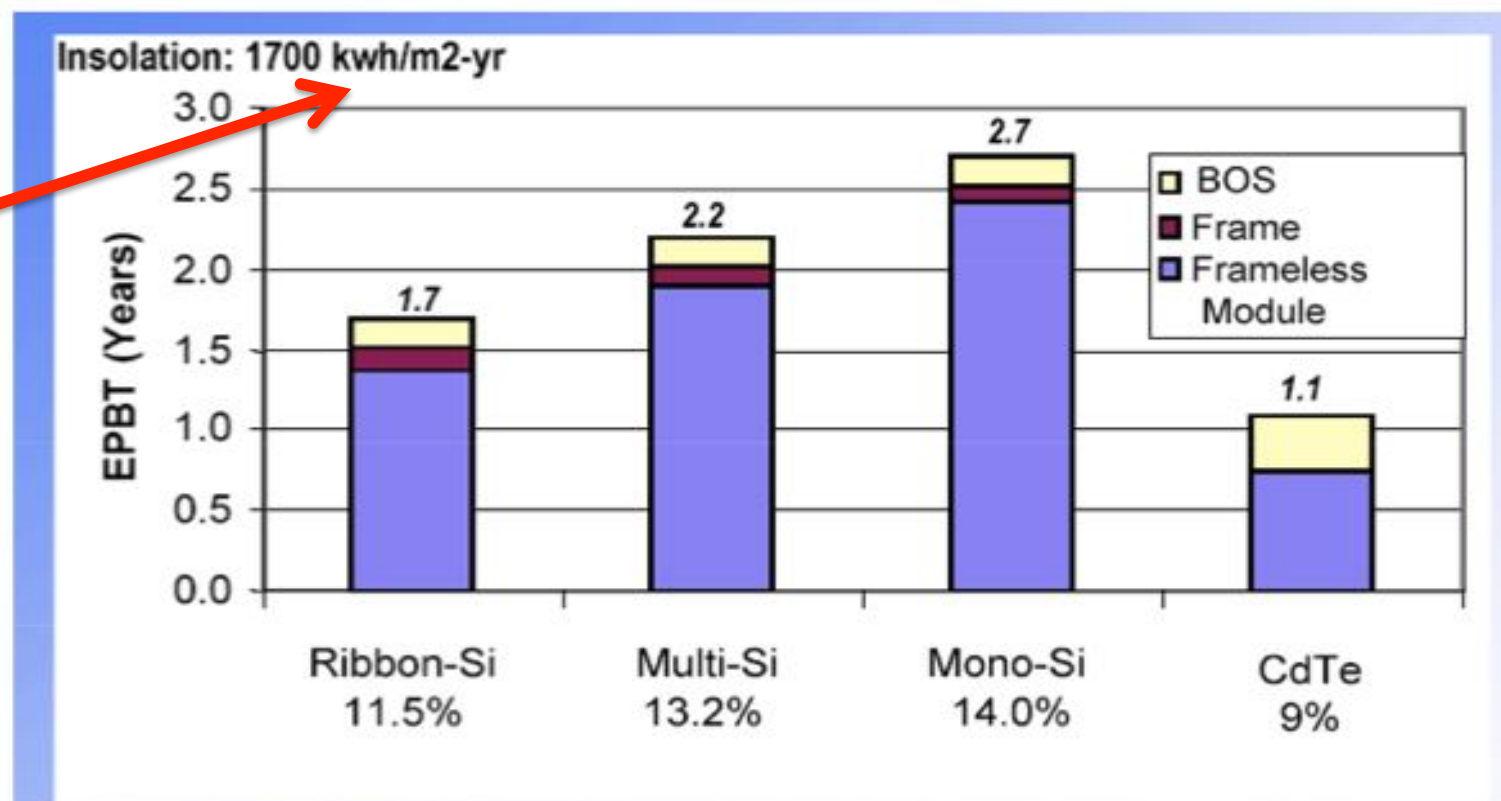
Sources: ExternE project, 2003; Kim and Dale, 2005; Fthenakis and Kim, 2006; Fthenakis and Alsema, 2006; Fthenakis and Kim, in press.

# Empreinte CO2 des différentes cellules solaires



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

## Energy Pay-Back Time



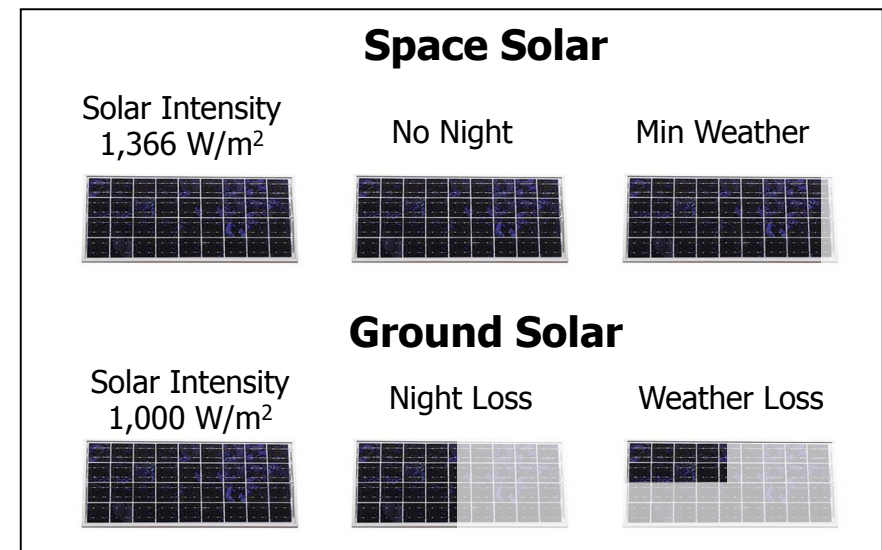
- Alsema & de Wild, *Material Research Society, Symposium vol. 895, 73, 2006*
- deWild & Alsema, *Material Research Society, Symposium vol. 895, 59, 2006*
- Fthenakis & Kim, *Material Research Society, Symposium vol. 895, 83, 2006*
- Fthenakis & Alsema, *Progress in Photovoltaics, 14, 275, 2006*



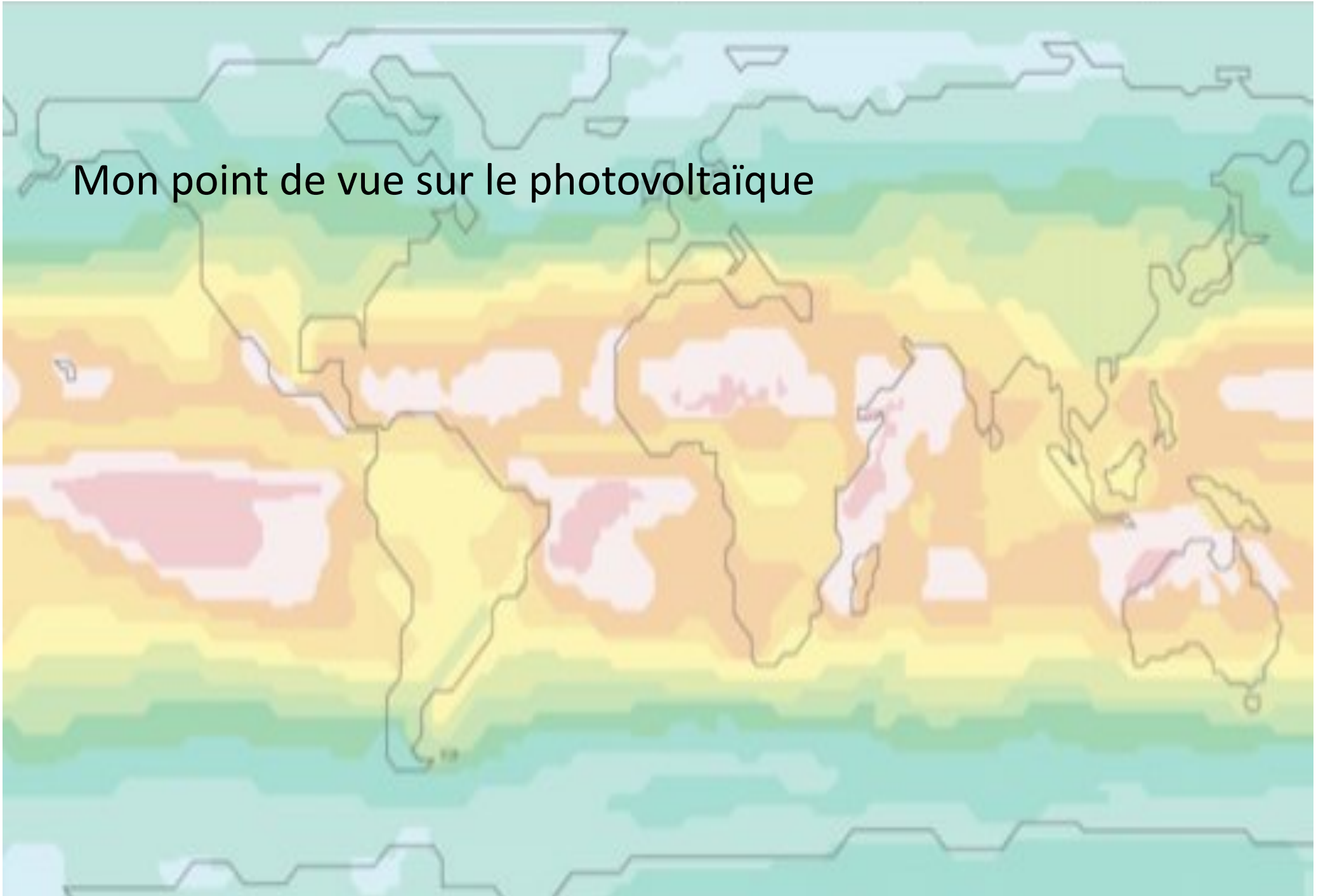
Autre solution  
Le solaire spatial

# 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.
- 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
- 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 (avec solution pour stockage et smart grid longue distance)

**POSSIBLE**

I. Solomon, Ecole polytechnique  
position de 1980 a 2011

### Production centralisée d'électricité dans

#### **LES PAYS INDUSTRIALISES**

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

**SUJET POLEMIQUE !**  
**(Utopie ou réalité ?)**

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)

A world map where the landmasses are represented by a dense network of yellow and white lights, symbolizing city lights at night. The oceans are dark blue. The text "Diodes émettrices de lumière" is overlaid in white on the map.

Diodes émettrices 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)
- Les lampes fluorescentes compactes donnent une puissance lumineuse comparable à un coût moindre (même nombre de lumens @ 30 W que les incandescentes à 100W)
- Le coût d'achat plus élevé (2 à 4 €) des Les lampes fluorescentes compactes peuvent se rembourser sur leur coût de fonctionnement (durée 10 000 h, et surtout consommation qui rembourse le surcoût en 1 an)
- Les lampes à diodes electro luminescentes (DELs) durent encore plus longtemps (50,000 heures pour les DELs blanches)

# 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)
- Des points de référence:
  - Lampes à incandescence: 15 lm/W
  - Lampes fluorescentes compactes: 50 à 60 lm/W
  - lampes à DELs: aujourd'hui 80lm/W, demain (3 à 5 ans) 150 à 200lm/W

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

## Illuminations typiques pour une pièce: 800 à 1600lm

- Une lampe à incandescence de 75 W délivre ~ 1000 lm
- Une lampe fluorescente compacte de 20W délivre ~1000 lumens
- Une lampe à DELs (comportant 10 DELs de 100lm) consomme 12,5 W pour 1000 lm

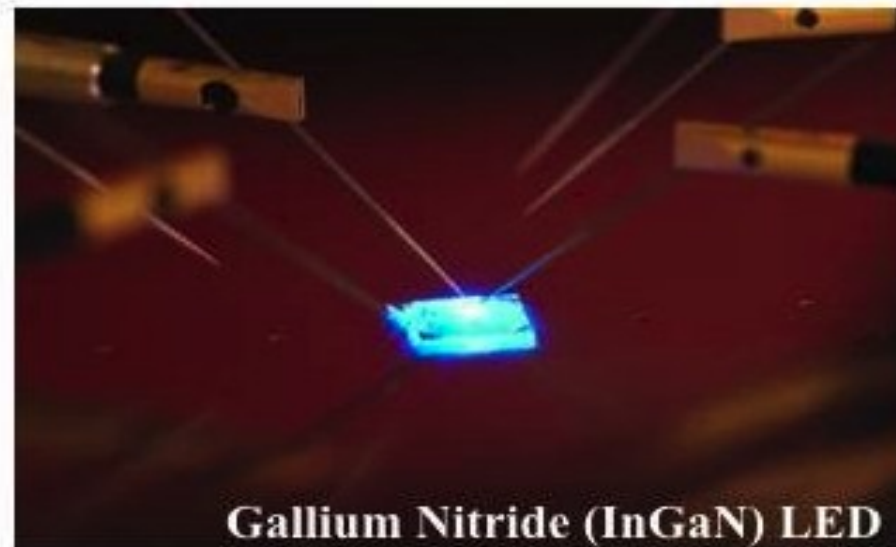
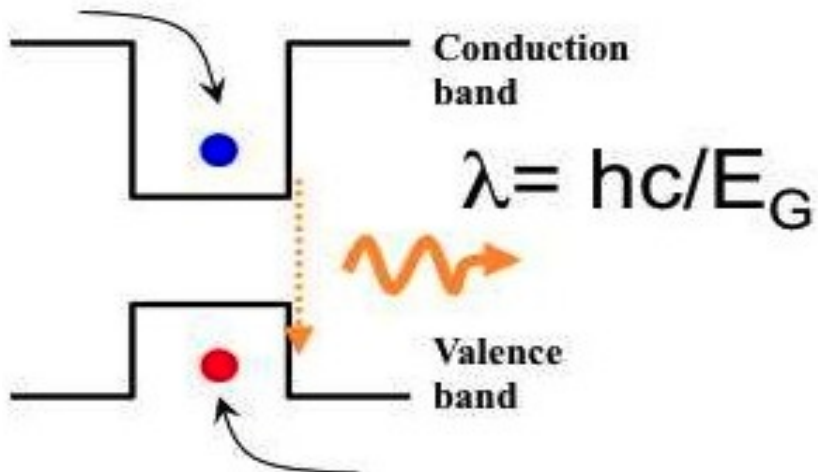
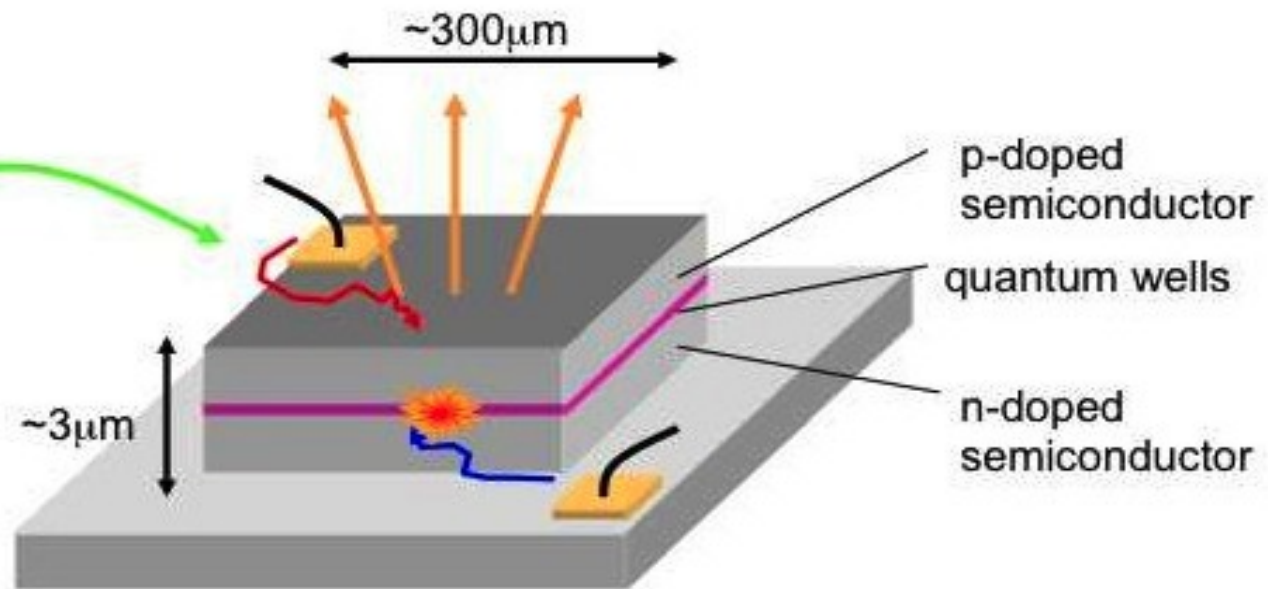
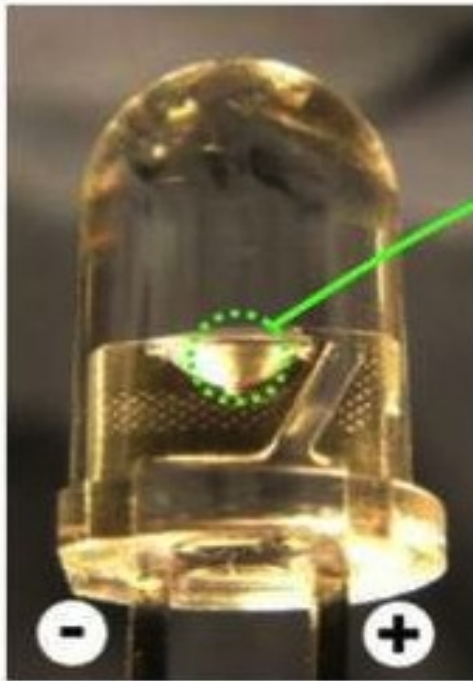
# Prix d'achat et consommation d'énergie

- 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 80 lm/W), équivalente à une lampe de 75W délivrant 800 lm, la consommation électrique annuelle est de 6,57 kWh, soit un coût de 0,657 € et l'économie de 4,3€/an\*
- Sur 10 ans, on économise 5 lampes (5€) et 21,5€ d'électricité. Il faut que le prix soit inférieur à 26,5€ pour être amorti en 10ans.\*\*

•Noter la grande élasticité 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 44 € sur 10 ans). L'électricité à 23c (Allemagne) augmente le coût d'incandescence à 87,5€ pour 3h/jour.

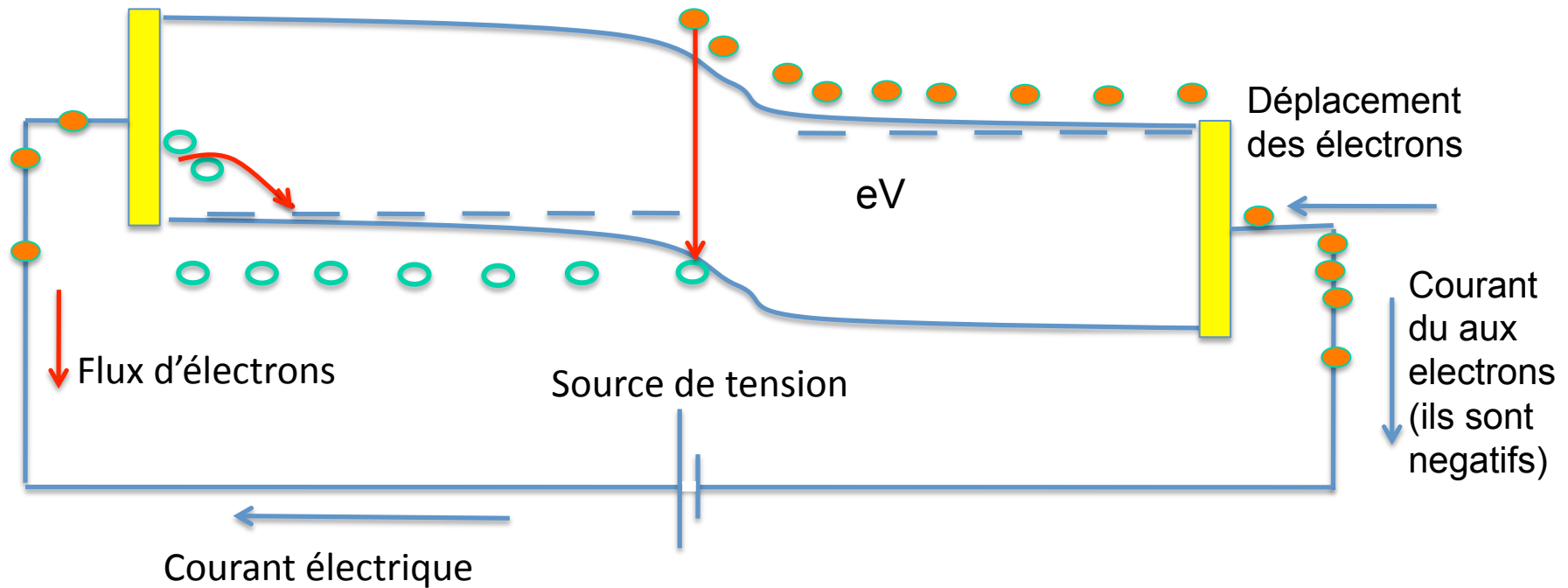
# Diodes émettrices de lumières DELs



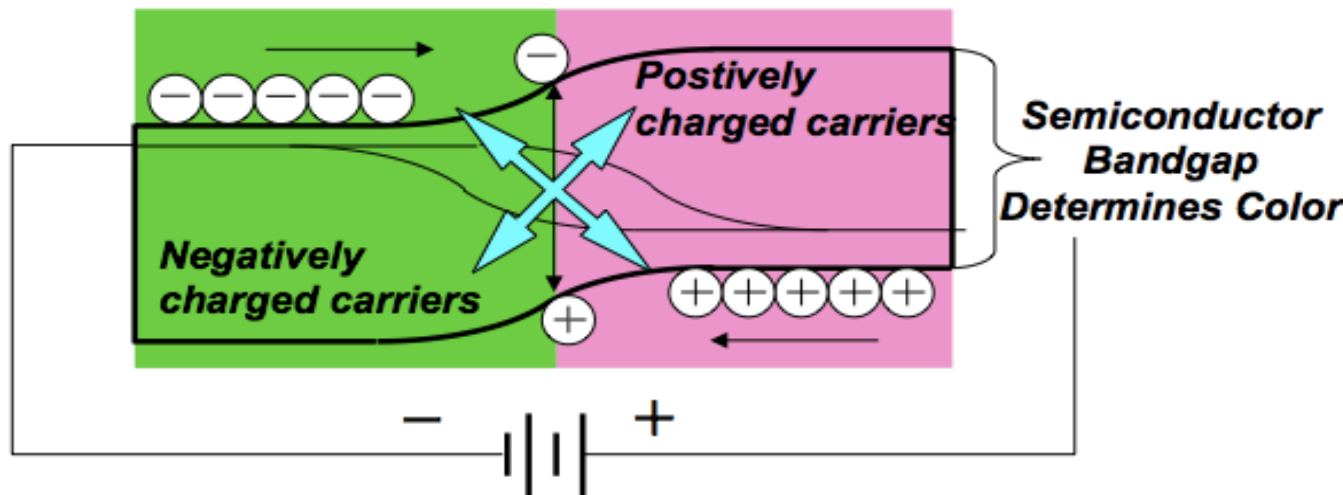
Gallium Nitride (InGaN) LED

# Principe de fonctionnement des DELs

Les charges +(trous) et – (electrons) 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.



# What is an LED? Why can LEDs be brighter than any other light source?



## Colored LEDs:

**Red, Yellow** - AlInGaP  
**Blue, Green** - InGaN

## White LEDs:

**Red + Green + Blue**, or  
**Blue + phosphor**

- With applied voltage positive and negative charge carriers recombine
- Energy may be released as light or heat
- **Theoretically can be a 100% efficient with unlimited life!**  
**(compared to incandescent which is 5% efficient, 2000 hour life)**
- Commercial LEDs can be expected to reach 50% efficiency and possibly more

# Réchauffement climatique /économies d'énergie par lesDELS

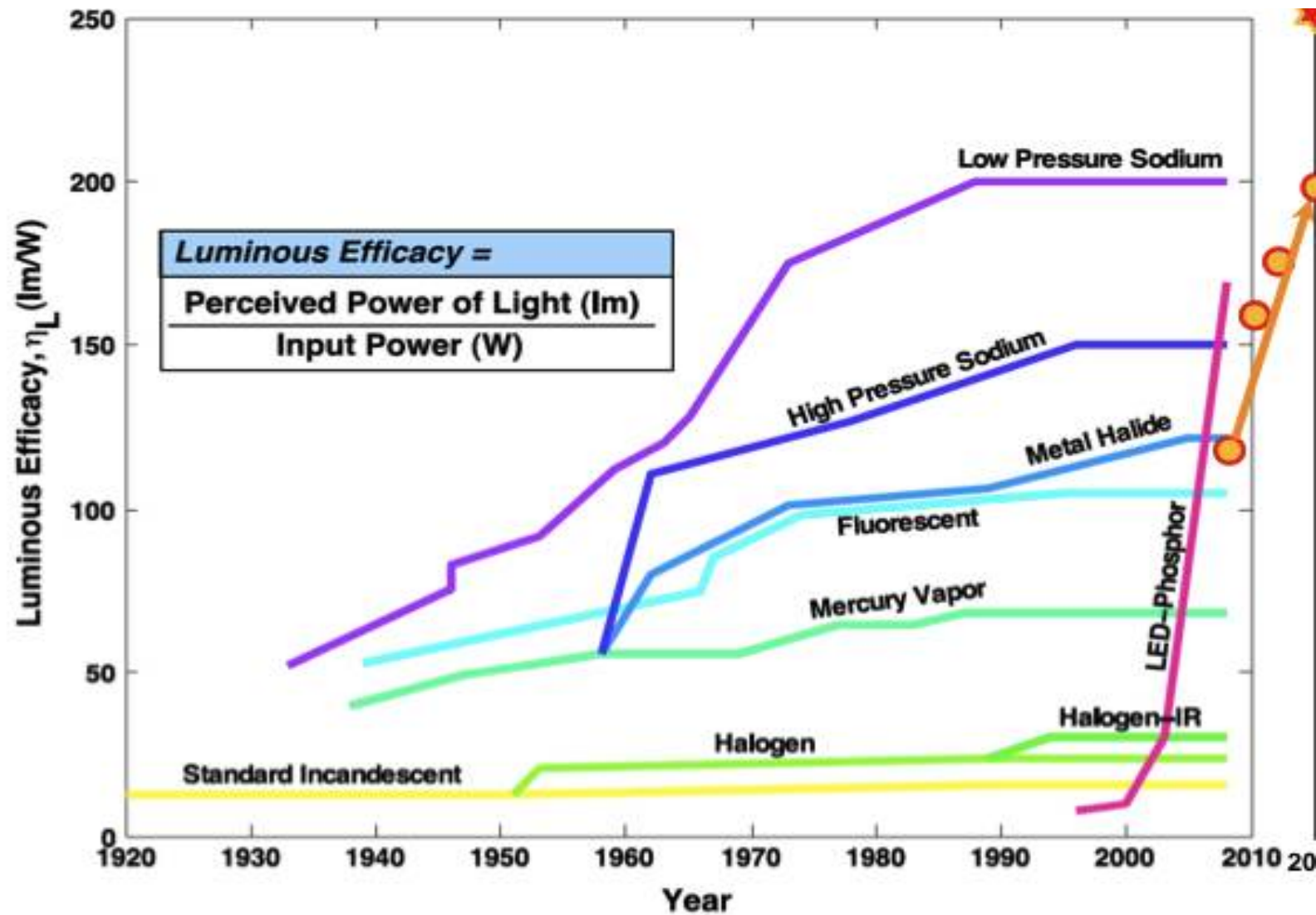


- >l'éclairage consomme 18-22% toute l'électricité
- >si une lampe à DELs de 150 lm/Watt était développée et adoptée, aux Etats Unis seuls:
  - on supprimerait le besoin de 133 centrales!\*
  - on éliminerait l'émission de 258 million de tonnes de Carbone\*

\* "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)

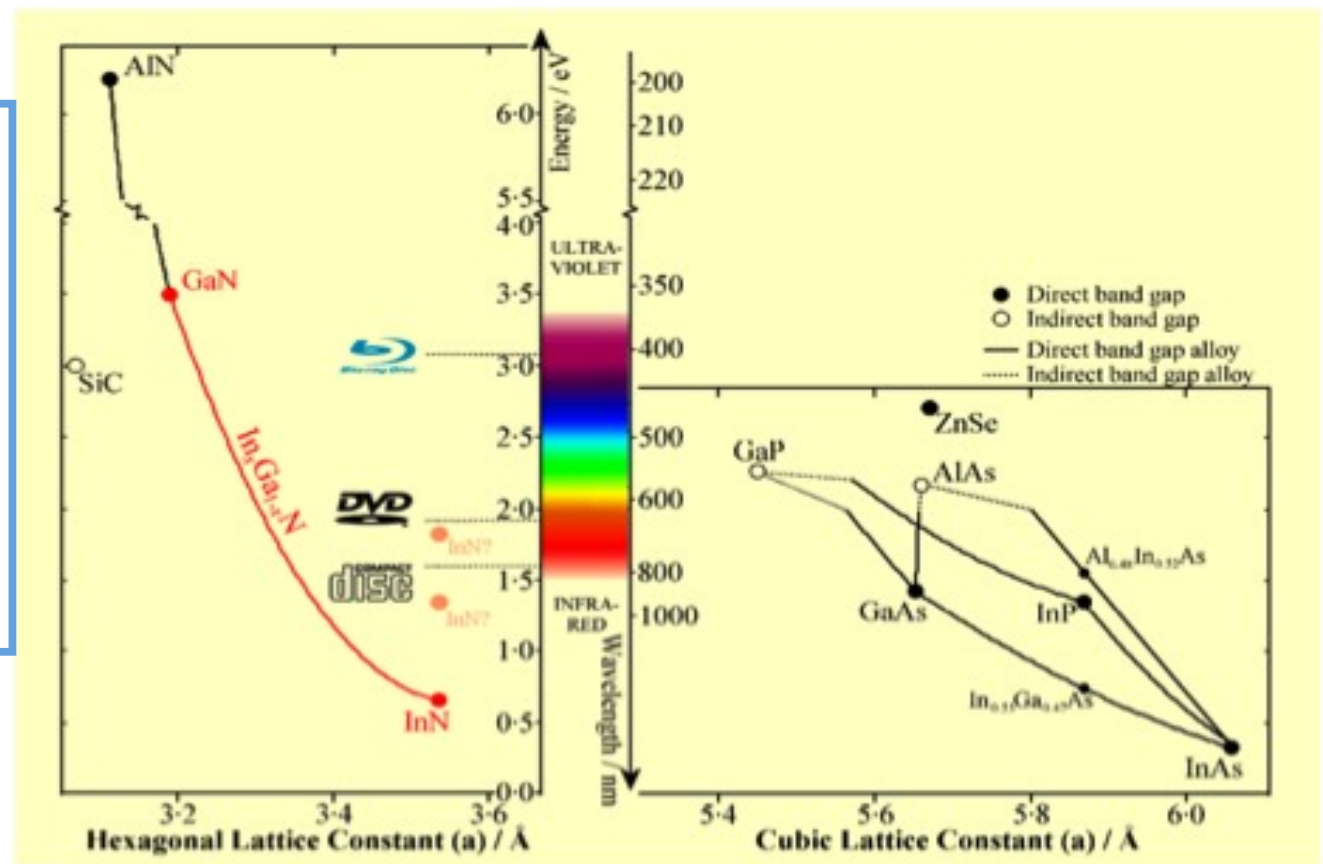
# Comparaison des différentes sources de lumière



# Les matériaux semiconducteurs pour les DELs

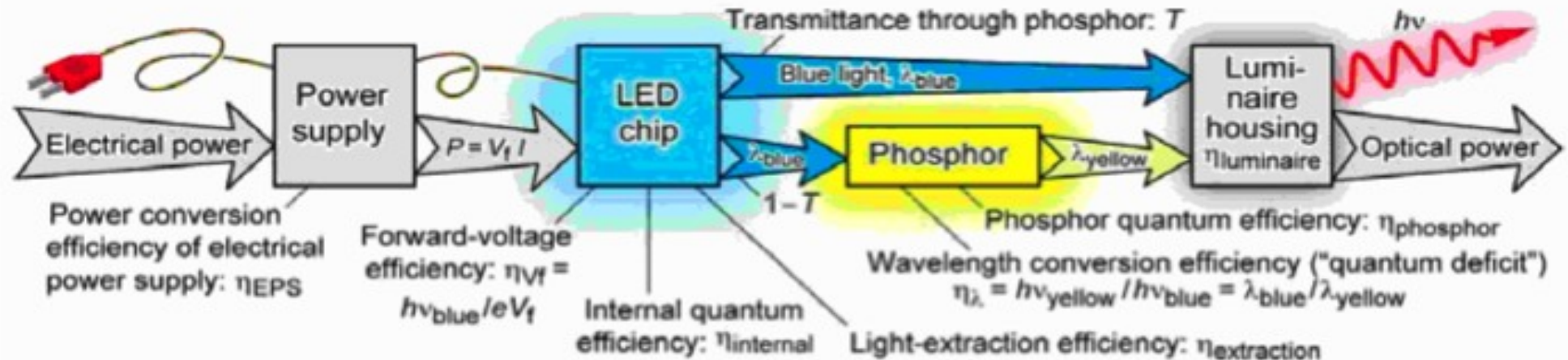
Variations de la bande interdite et de la maille cristalline en fonction de la composition des principaux alliages semiconducteurs utilisés dans les DELs.

A première vue, l'alliage InGaN couvre tout le spectre, mais ce au prix d'une variation de la maille cristalline de plus de 10% qui rend 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) =  $P_{optical\ out} / P_{electrical\ in}$

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

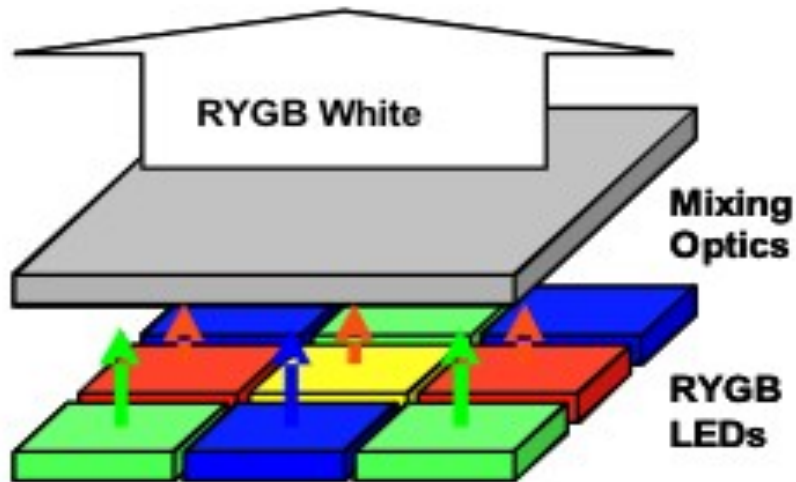
**Efficacité quantique interne** /internal quantum efficiency (IQE) = flux of photons générés dans la DEL/ flux de paires électrons-trous entrantes

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

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

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

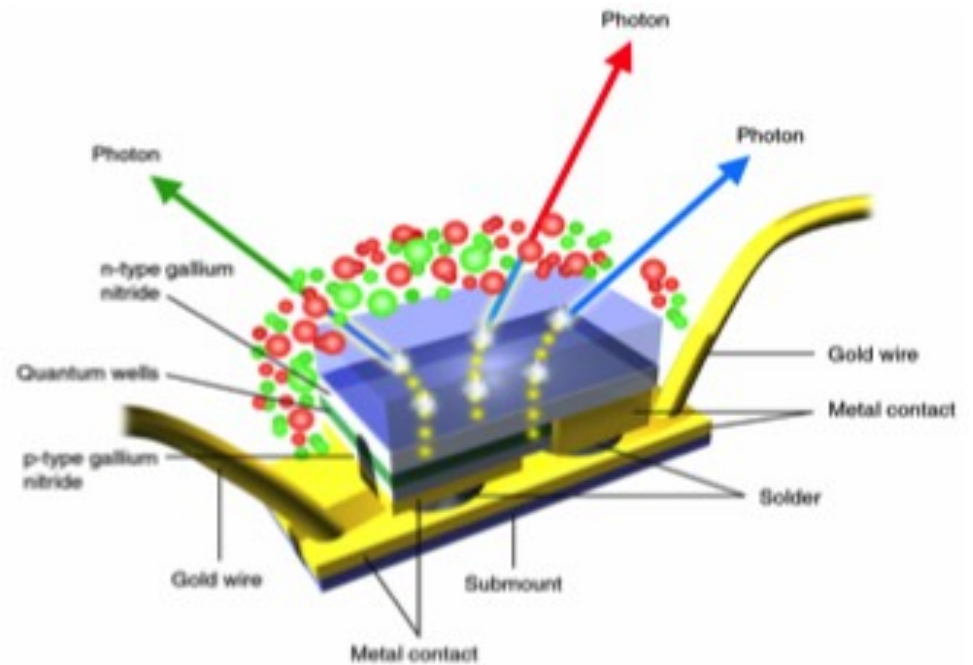
# Les deux approches pour réaliser une source blanche



- 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

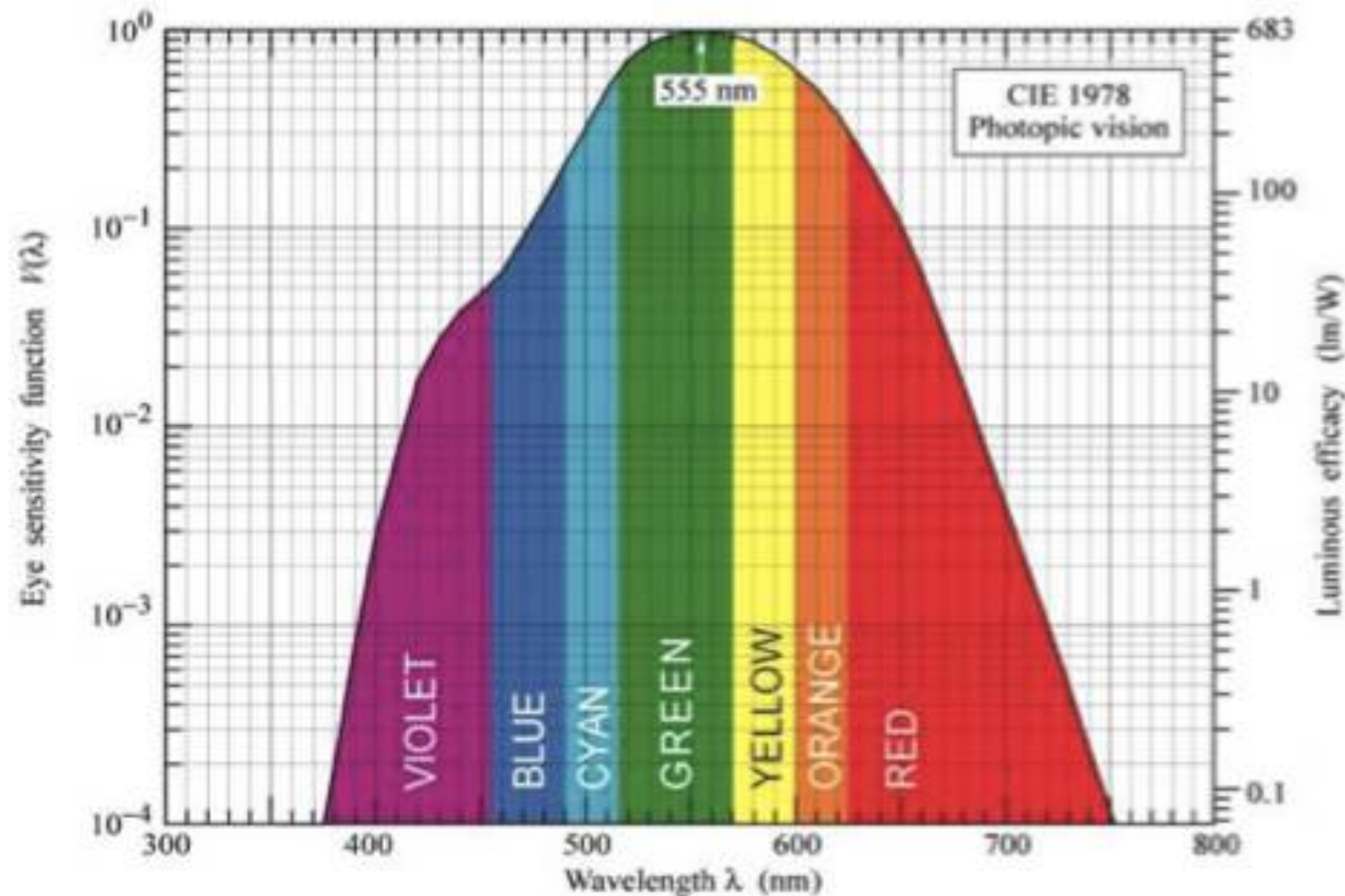
## Diode bleue avec phosphore(s)\* de conversion

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



after Mueller-Mach *et al.*, *phys. stat. sol. (a)* 202, 1727 (2005)

# 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).

# 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]

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

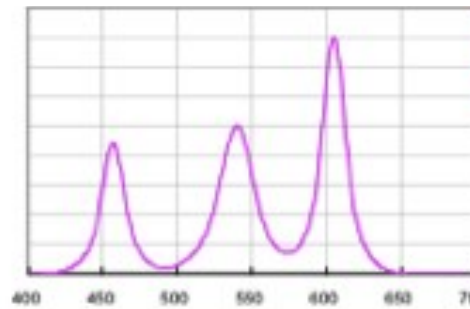
$$\frac{\text{Puissance optique [W]}}{\text{Puissance électrique [W]}}$$

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

EQ interne x efficacité d'extraction

Efficacité lumineuse de la source

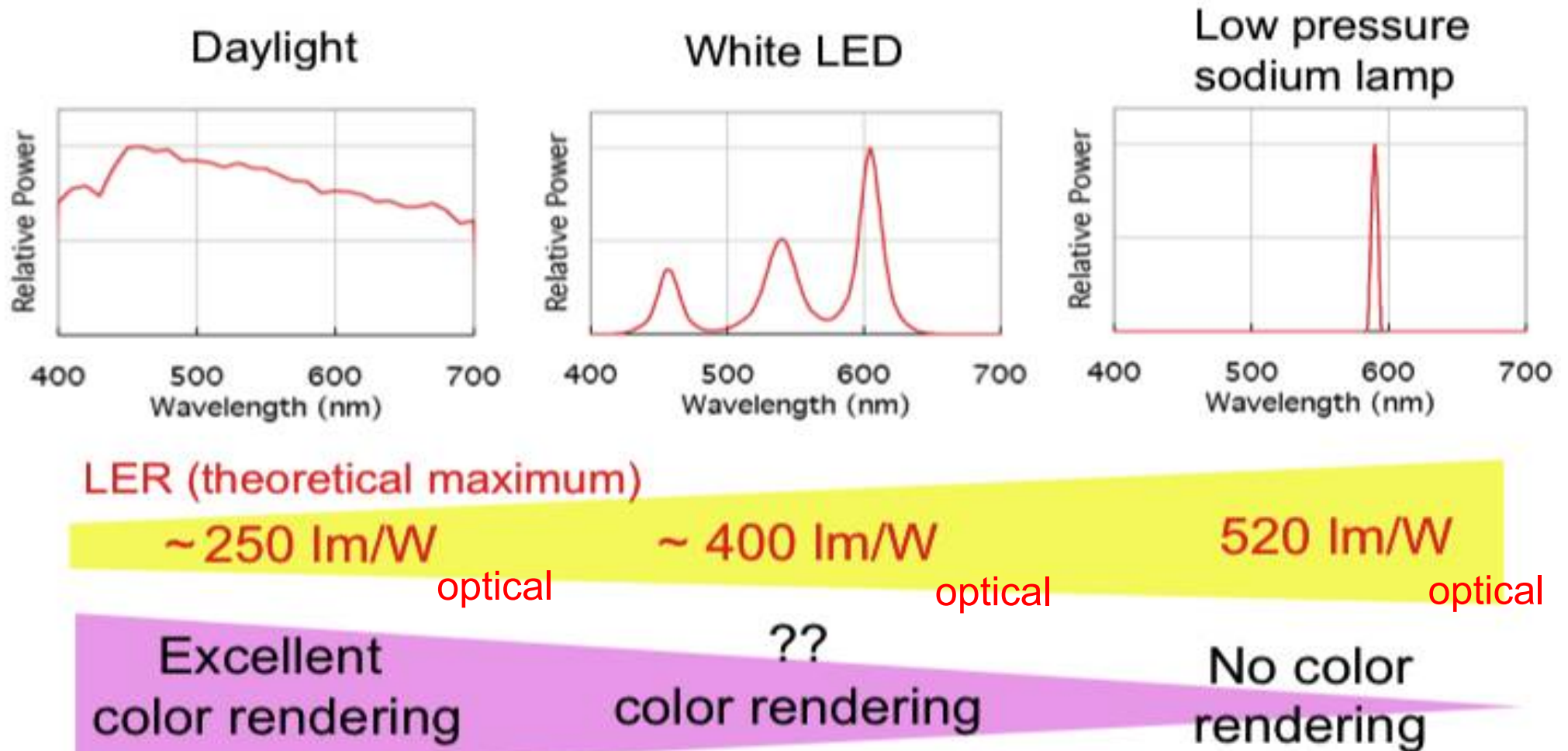
Efficacité lumineuse de l'émission **maximum** pour lumière ≈ blanche [lm/W]  
**411 lm/W**



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

Déterminée par le spectre seul de la source

L'efficacité lumineuse d'une source pour l'éclairage (lm/W) dépend 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*

# L'efficacité lumineuse des sources pour éclairage

## Du passé au futur <sup>re</sup>

10..17  
 $\text{lm/W}_{\text{electrical}}$



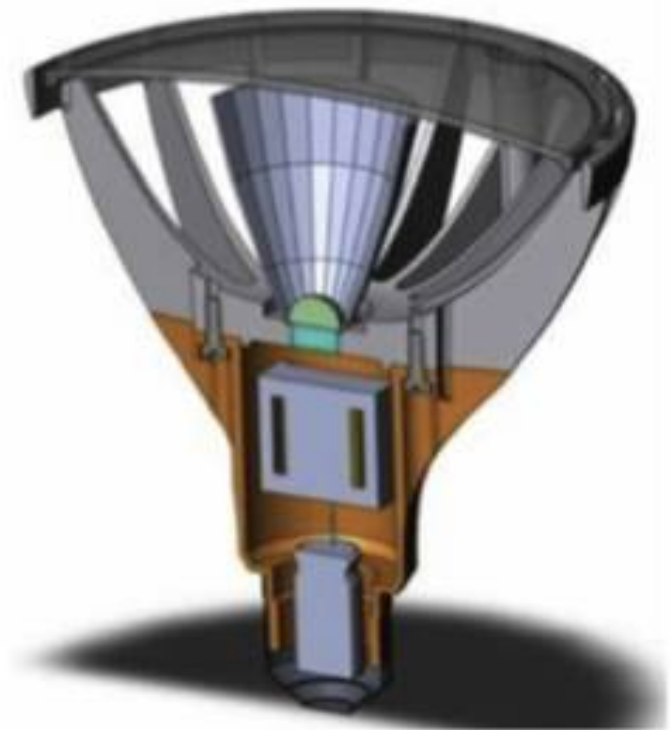
1 klum needs 100W

35..45  
 $\text{lm/W}_{\text{electrical}}$



1 klum needs 25W

70..150  
 $\text{lm/W}_{\text{electrical}}$



1 klum needs 7W

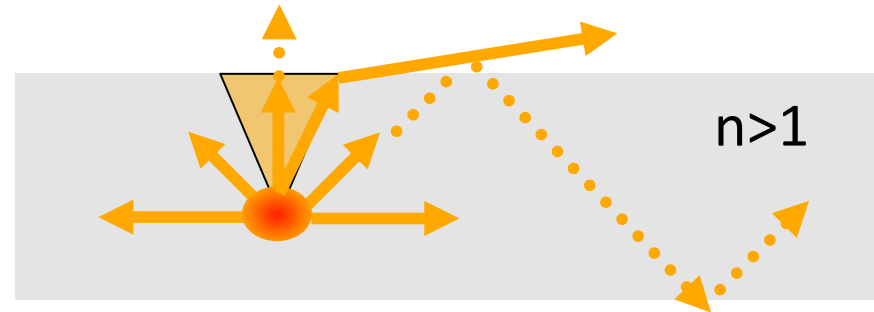
*Bruning, Philips, 2009*

# 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  $\geq 80\%$

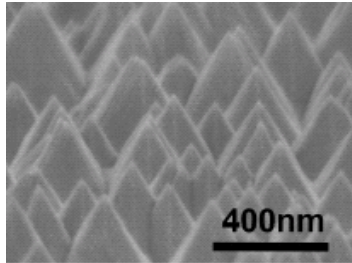
## Discussion: comment faire sortir les photons du matériau?

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 réflexion interne totale

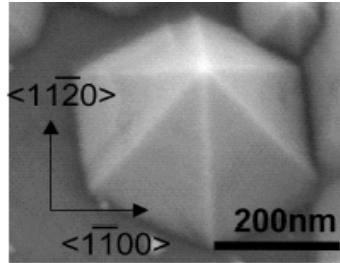


- DELs monochromatiques
  - Solutions basées sur l'optique géométrique: la direction de propagation de la lumière est changée à chaque incidence sur l'interface DEL-air
  - Solutions basées sur l'optique ondulatoire: on utilise la diffraction par un cristal photonique (modulation périodique de l'indice 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...).

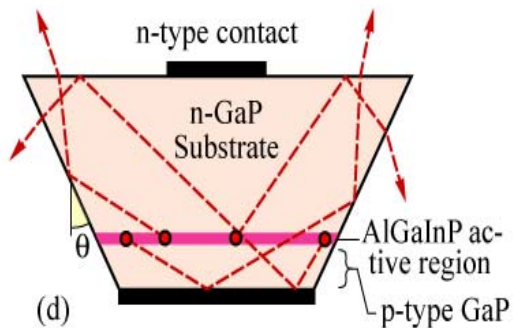
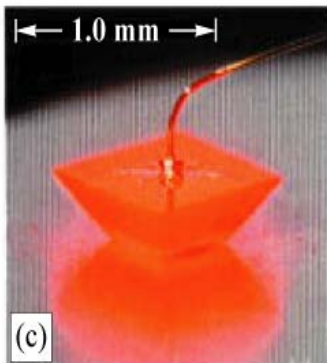
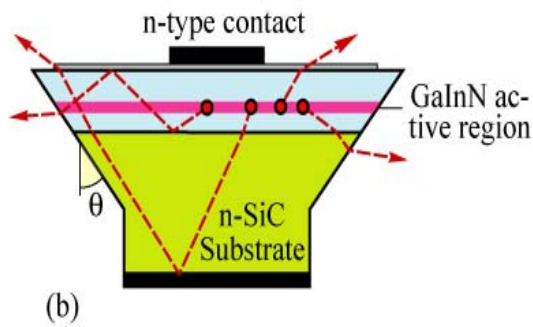
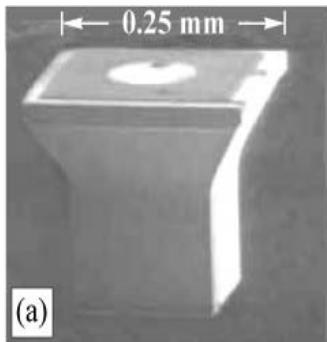
# DELs: solutions basées sur l'optique géométrique



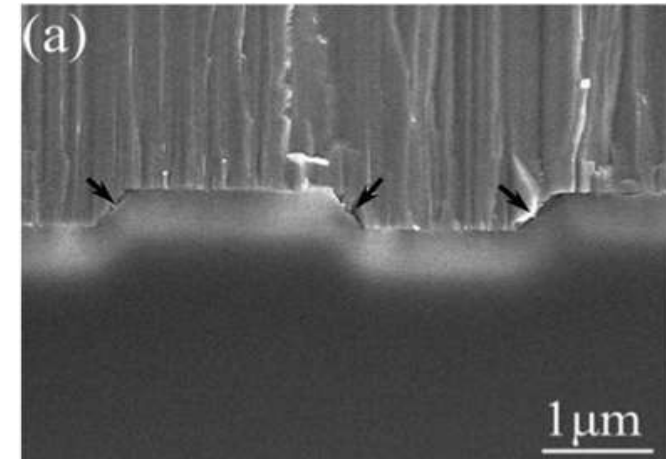
Surface rugueuse



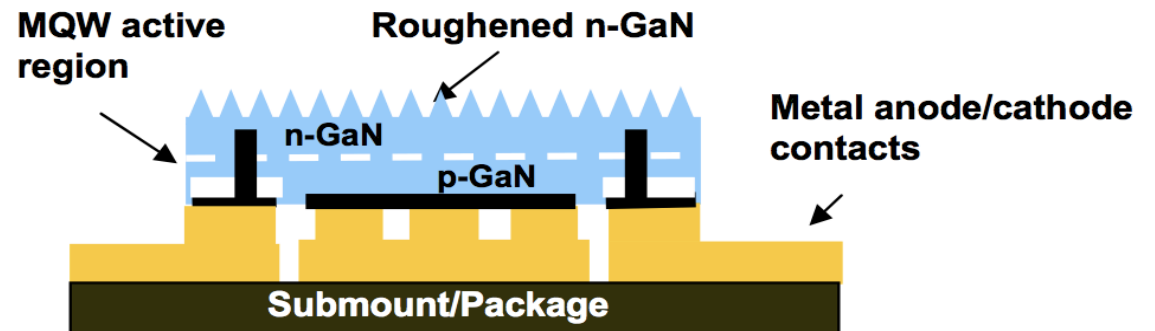
Substrate formé



Substrate "patterné"




Couche mince à surface rugueuse



# 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 and Cost of White-Light Sources

## Source efficacy (2005)

- Incandescent (75W) ~13 lm/W
- Fluorescent (T8) ~83 lm/W
- HID (Metal Halide) ~100 lm/W
- **SSL (White LED) ~50 lm/W**

2010 200lm/W

## Normalized retail lamp price (2005)

- Incandescent (75W) ~0.60 \$/klm
- Fluorescent (T8) ~0.73 \$/klm
- HID (Metal Halide) ~1.27 \$/klm
- **SSL (White LED) ~150.00 \$/klm**

\*manufacturer data

2010 50 \$/klm

**Research is improving SSL efficacy while decreasing price**



# Efficienne énergétique

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

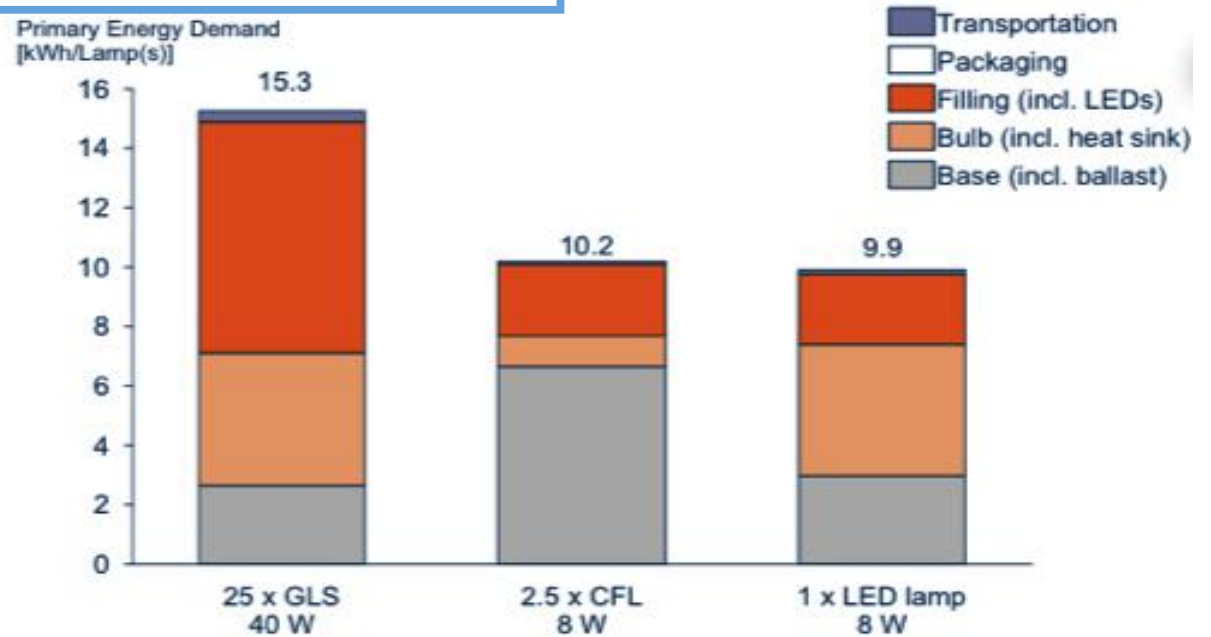


Fig. 8 Primary Energy Demand for manufacturing of all three lamps (Transportation displayed separately)



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

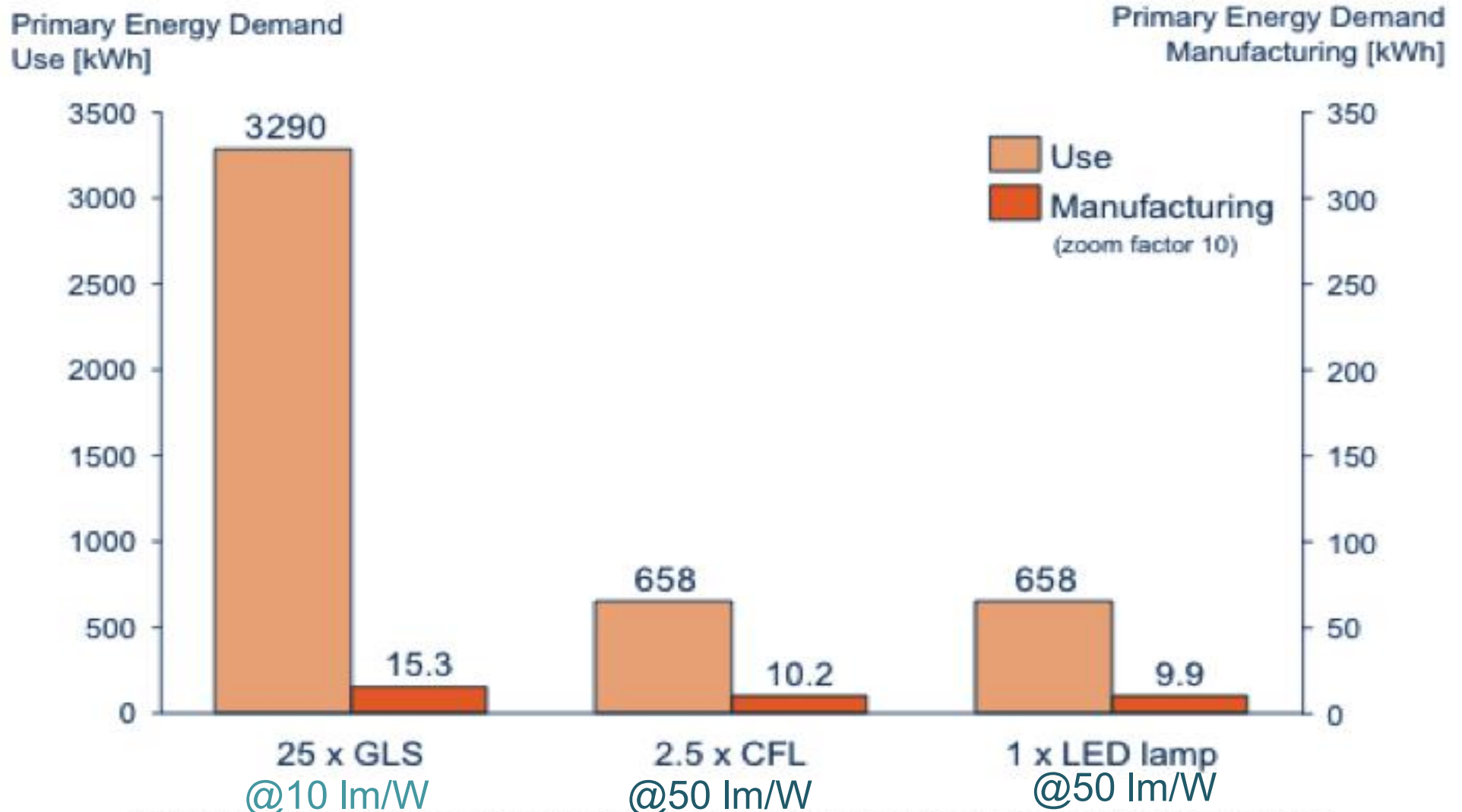


Fig. 9 Primary Energy Demand for manufacturing and use of all three lamps

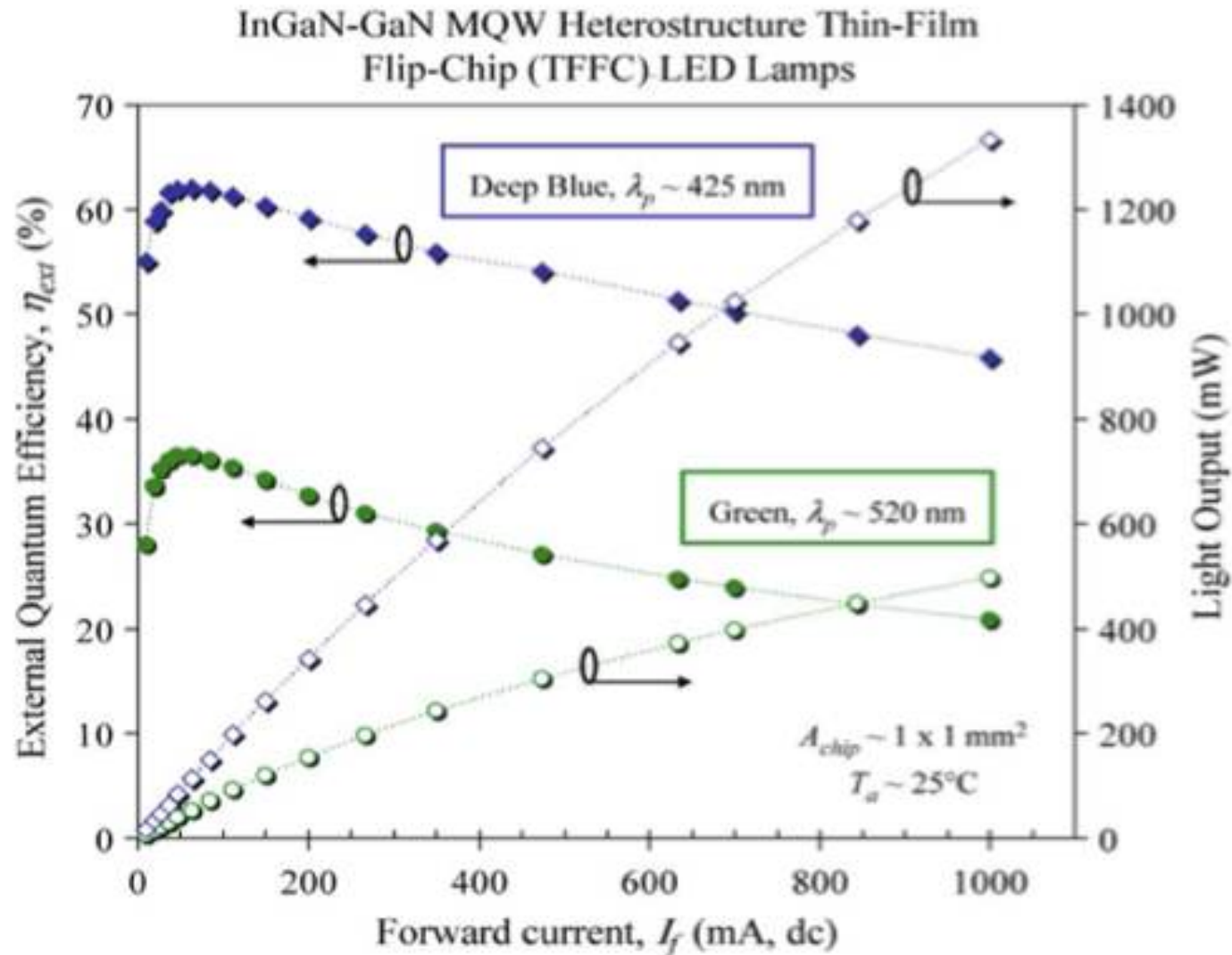
**Valeur de l'énergie économisée: 2600kWh@10c= 260 €!**

# Pourquoi essayer de gagner les derniers % d'efficacité?

	WPE 40%	WPE = 60%	WPE = 70%	WPE = 80%
Limite de puissance imposée par la chaleur extraite de la DEL, pour une même surface	20W	20W	20W	20W
Chaleur en % of la puissance injectée: 100% - WPE	60%	40 %	30 %	20 %
Puissance injectée totale	33.3W	50 W	66.6W	100 W
Puissance lumineuse extraite: (entrée) – (chaleur)	13.3W	30 W	46.6 W	80 W
Aumentation de puissance lumineuse par rapport à la DEL à 40%	+0%	+225 %	+350 %	+600 %

Avec une même surface de matériau DEL, on peut produire une bien plus grande puissance lumineuse, avec la diminution de coût correspondante

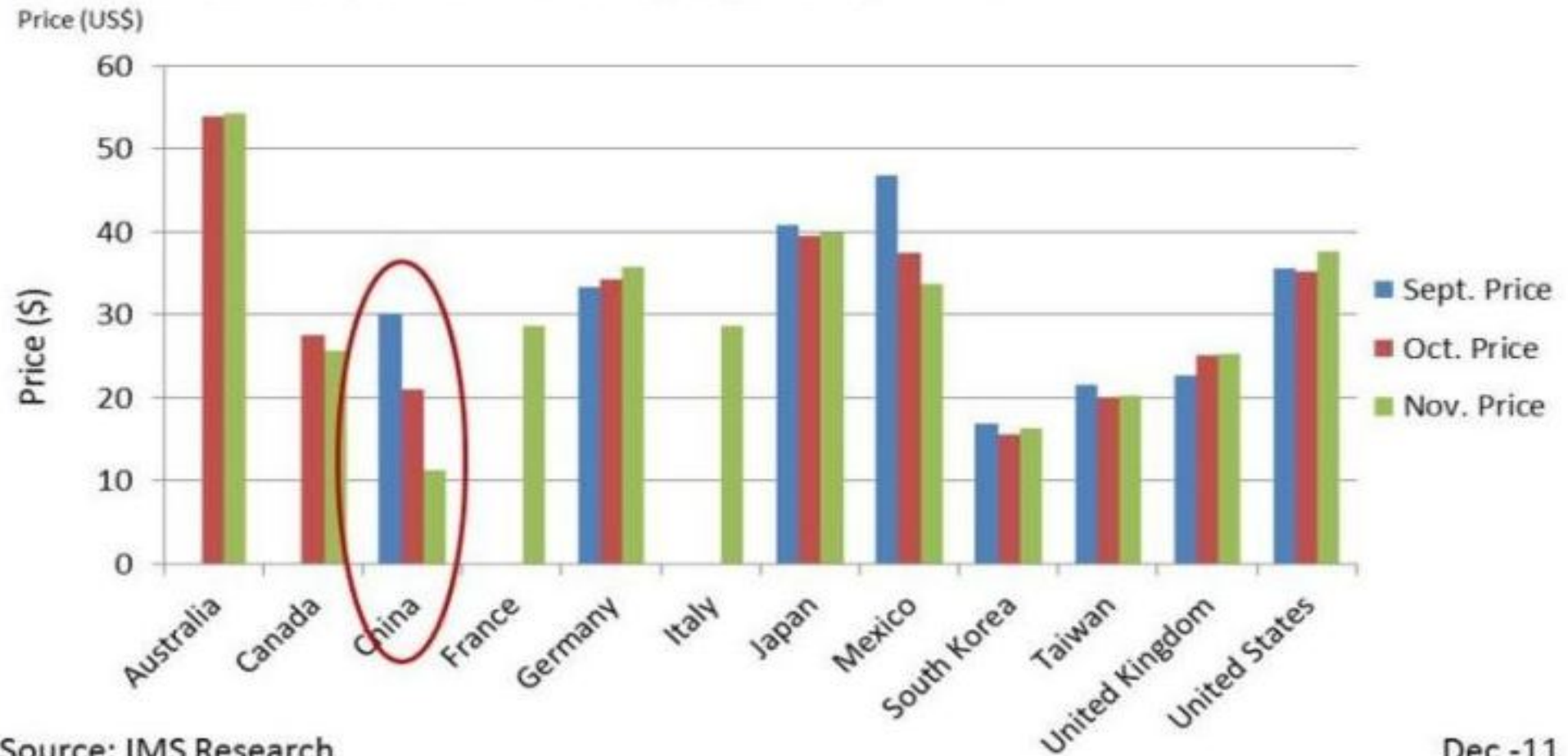
# Un des problèmes des DELs non encore résolu: la perte d'efficacité à grande densité de courant



# Prix des lampes LED remplaçant des lampes à incandescence 40/60W

Variation (chute) des prix entre sept. et nov. 2011

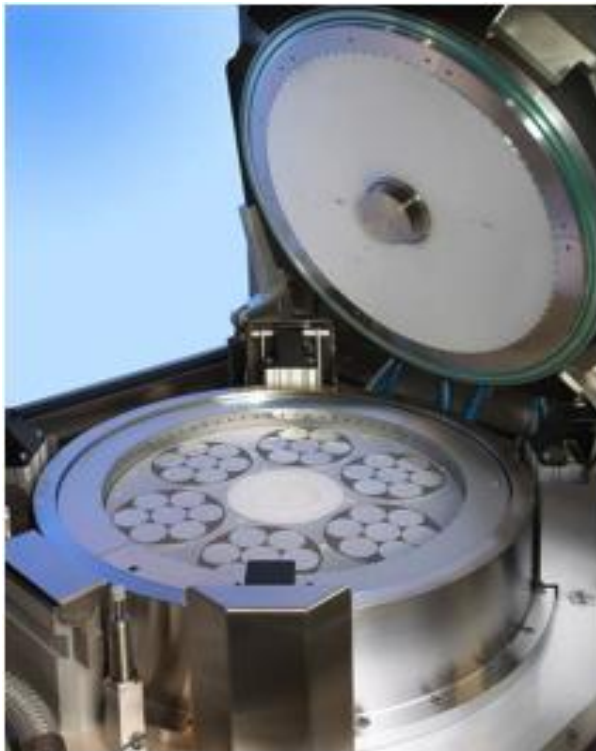
### Retail Price for All Replacement LED Lamps by Country and Month



Retail replacement lamp prices by country.

# Coup d'oeil dans le futur: Productivité

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 par lot, toute la surface des plaquettes est convertie en DELs

$$\approx 8 \cdot 10^2 \times 125^1 \text{ A/cm}^2 \times 3\text{V} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ W}$$

$$\approx 10^5 \text{ W de lumière blanche/lot @33\% efficacité lumineuse}^2$$

$$\approx 5 \cdot 10^5 \text{ W de puissance économisée par les lampes d'un lot}$$

**(remplacent lampes avec une efficacité  $\times 5$  <sup>2</sup>)**

**Supposons une usine majeure large: 100 machines qui font chacune 1000 lots/year<sup>3</sup>**

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

**Si utilisation 3hrs/jour<sup>4</sup>/365 days  $\Rightarrow 5 \cdot 10^{10}$  kWh économisés**

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

**La production annuelle de DELs économise l'énergie produite par 5 nouvelles centrales électriques!**

$$\text{Valeur of l'énergie économisée: } 5 \cdot 10^{10} \text{ kWh} = 5 \cdot 10^9 \text{ € @ } 10 \text{c}$$

$$\text{DELs produites ? : } 10^8 \text{ cm}^2 = 10^{10} \text{ DELs @ } 1 \text{mm} \times 1 \text{mm}^5$$

## 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: peut être un peu élevé

<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

# Qui fait des DELs?

## LED Wafer Manufacturers

Capture value from the rapidly growing GaN LED market by sales, royalties and strategic partnerships



### ✧ United States

- BridgeLux
- Cree\*
- Phillips Lumileds\*

### ✧ Japan

- Nichia\*
- Seiwa Electric
- Showa Denko
- Toyoda Gosel\*

### ✧ South Korea

- Epiplus
- Epi Valley
- LG Valley
- NINEX
- Samsung Electro-Mechanics
- Seoul Semiconductor

### ✧ Europe

- Osram Opto Semiconductors\*

### ✧ Taiwan

- Arima
- AU Optronics
- Chi Mei
- EpiLED
- Epistar\* 300 MOCVD
- Formosa Epitaxy
- Genesis Photonics
- Huga
- Lumitek
- SemiLEDs
- Tekcore
- Touchtek

### ✧ China

- Aqualite
- Huinen
- Lanbao
- Lian Chuang
- Li De
- Lumi Optoelectronics
- Nanchang Sunrise
- Podium
- Shandong Huaguang
- Shanghai Blue Light
- Shenzhen Fangda
- Xiamen Sanan

\*Largest Producers

# Impact dans les pays en voie de développement

## 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!*



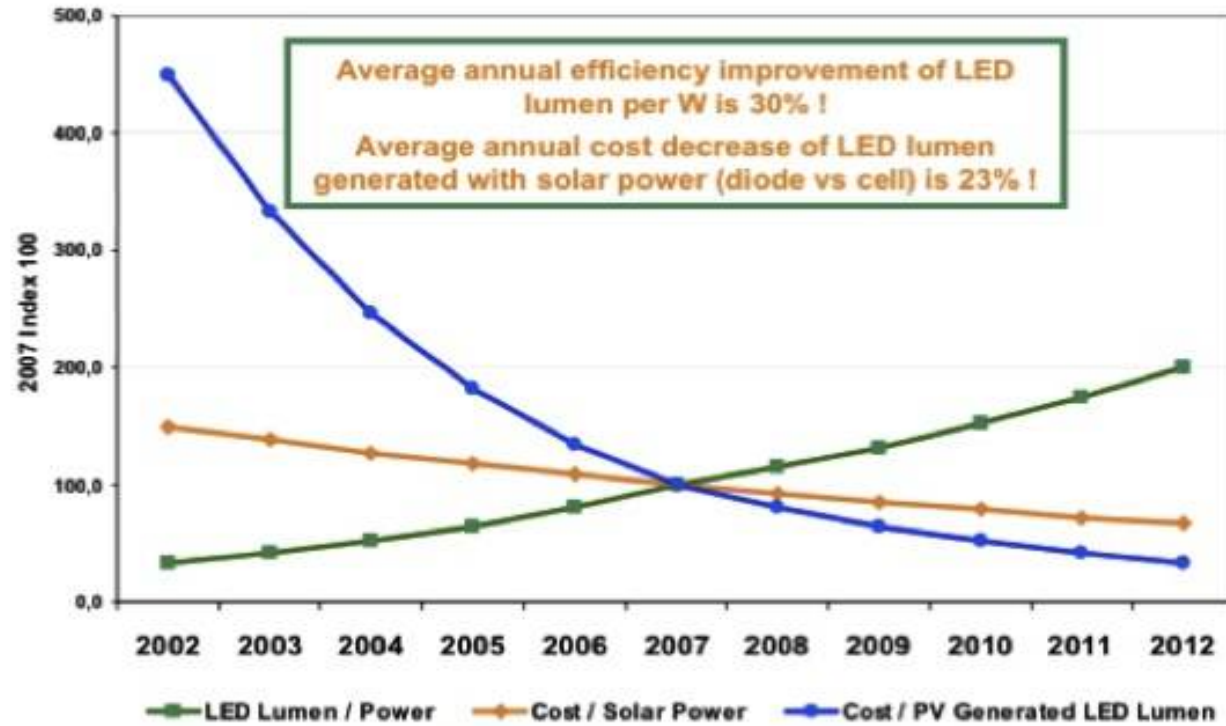
# Impact dans les pays en voie de développement

## Cellules solaires+ DELs

Address Book in Solar Electricity Systems



### VII Combined Photovoltaic and LED Development



# Un dilemme: PV ou DEL?

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=  $3V \times 100A/cm^2 \times 10\,000cm^2 = 3MW$ , 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!

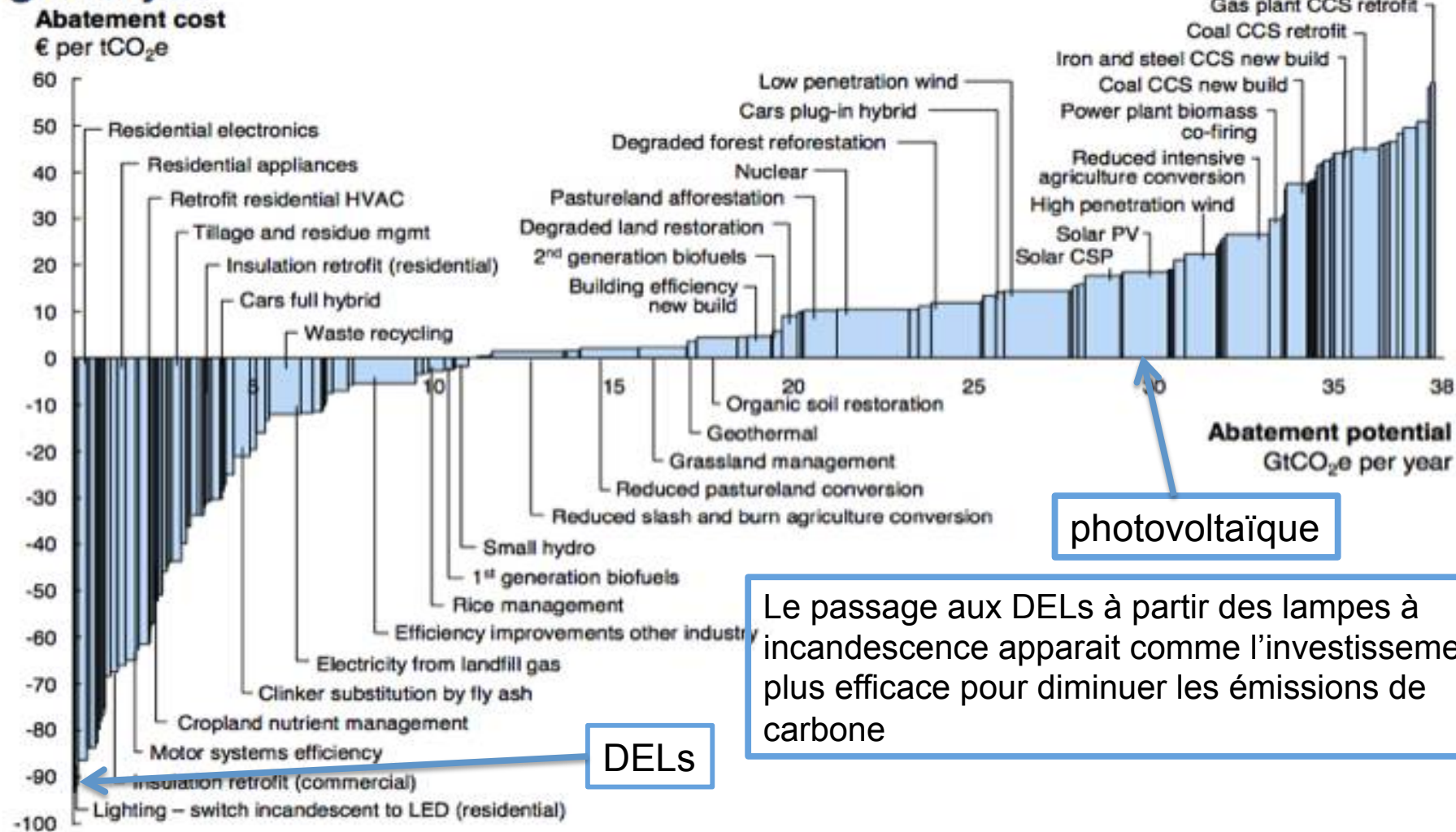
Il vaut mieux, pour l'instant, faire des DELs avec le GaN

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)

\* Moyenne française; Pourrait être 6 h en région de fort ensoleillement

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

## Energy efficiency is a key lever to reduce carbon emissions – both globally...



Le passage aux DELs à partir des lampes à incandescence apparaît comme l'investissement le plus efficace pour diminuer les émissions de carbone

Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €60 per tCO<sub>2</sub>e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.  
Source: Global GHG Abatement Cost Curve v2.0  
McKinsey & Company | 14

# 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 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

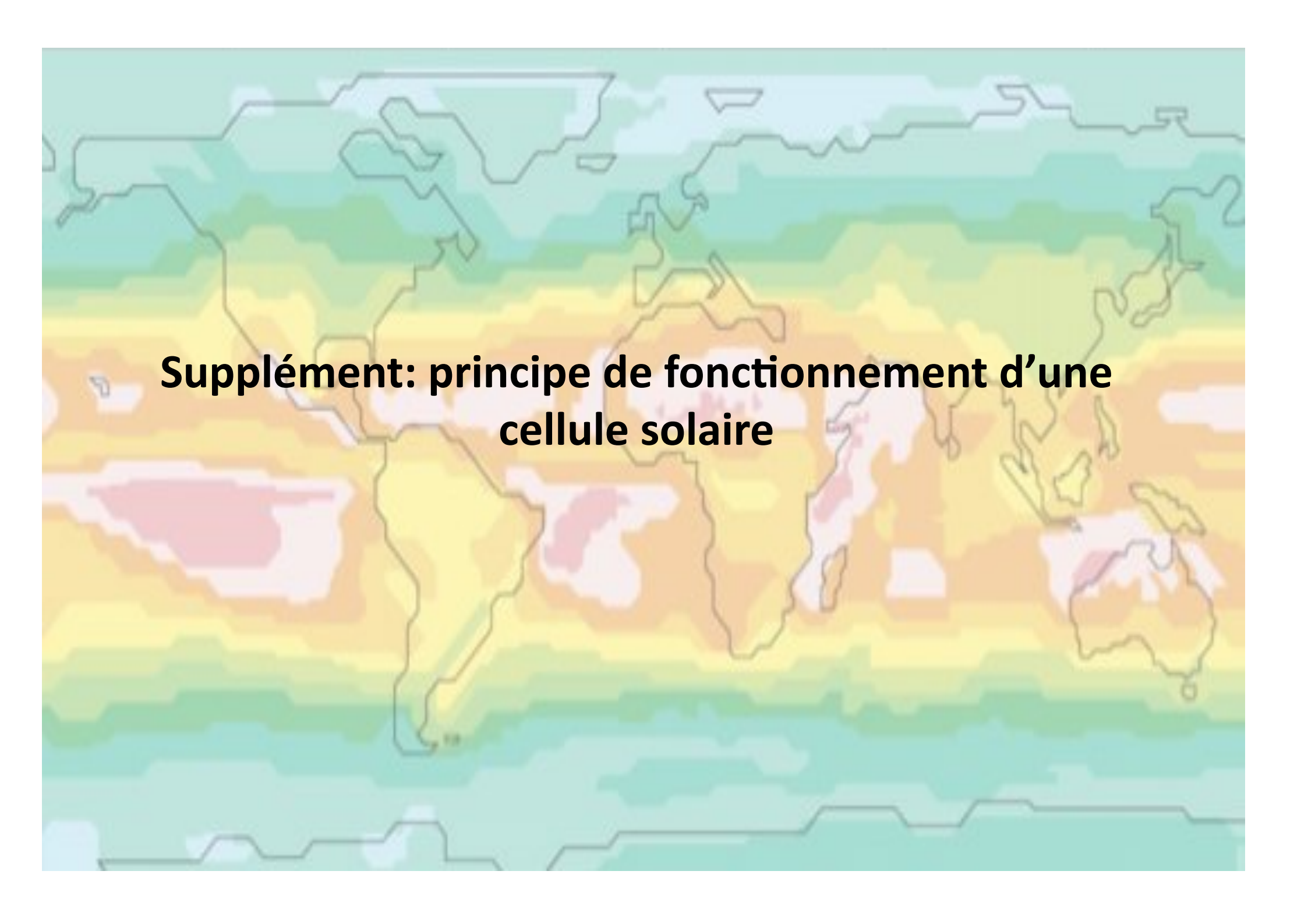
Techniquement au point, mais réduction de coût très importantes possibles par augmentation de la densité de courant.

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 ?

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

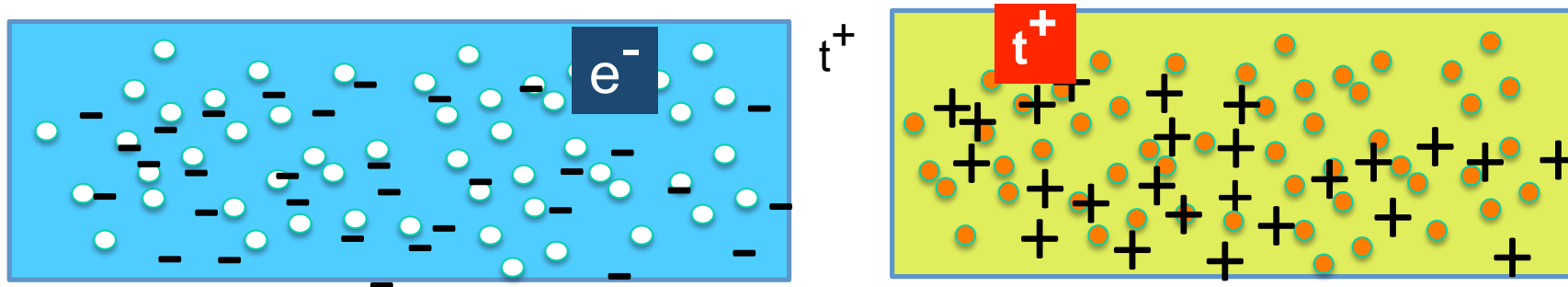
(Pas au Japon car pénurie d'électricité)

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

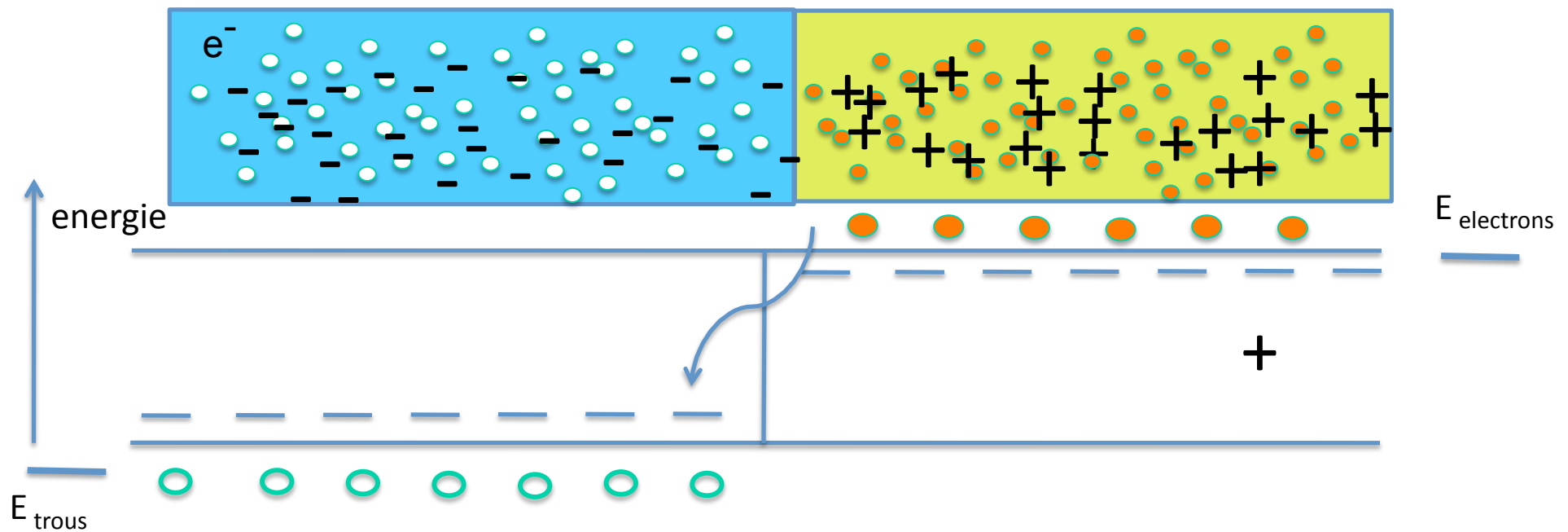
A world map illustrating the principle of solar cell operation. The map uses a color gradient to represent solar radiation intensity, with the warmest colors (red and orange) at the equator and the coldest colors (teal and blue) at the poles. The text is centered over the map.

**Supplément: principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

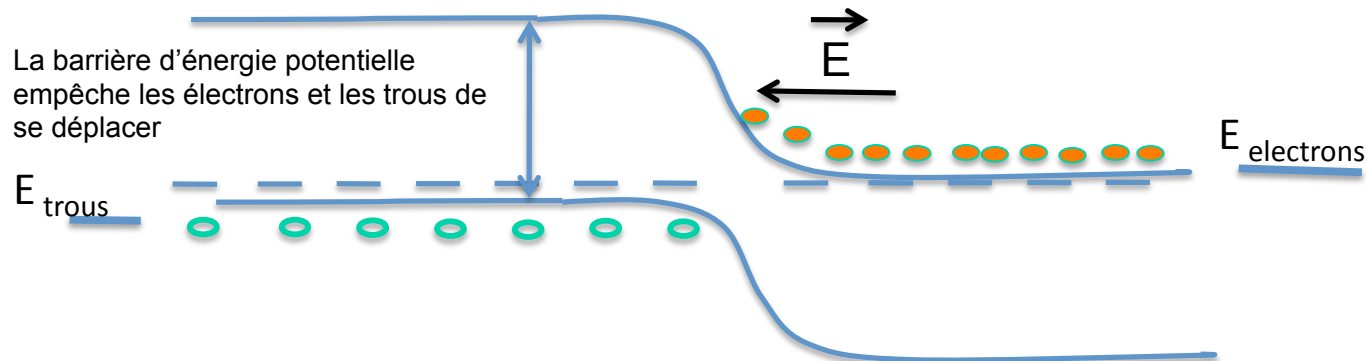
Les semiconducteurs sont des matériaux dont on peut imposer la conductivité électrique en les "dopant" avec des atomes précis: dopage n pour une conduction par électrons chargés négativement avec des atomes de Phosphore, dopage p pour conduction par des trous positifs avec des atomes de Bore.



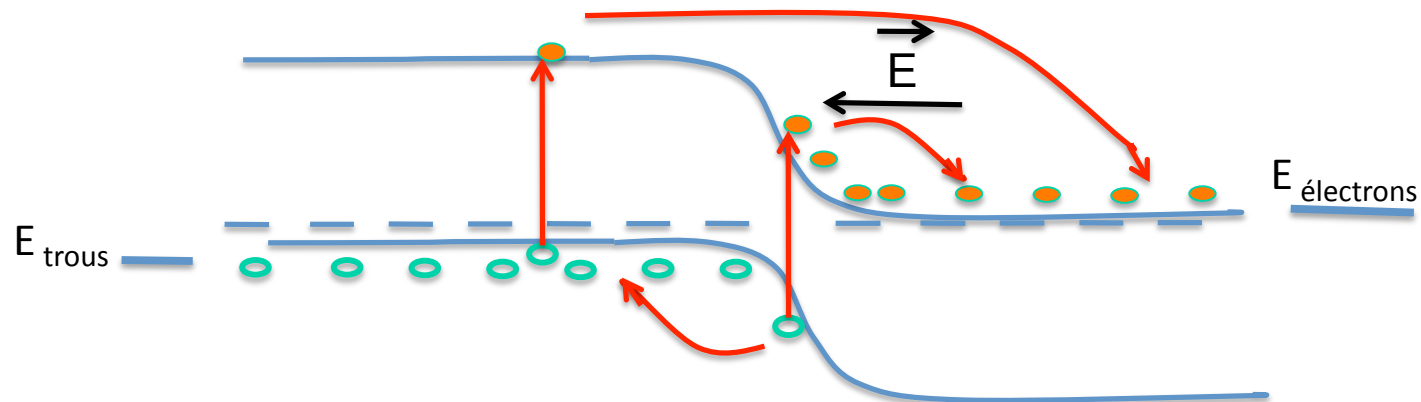
Si on met au contact des semiconducteurs n et p, il se produit un transfert de charges + (trous) et - (électrons) car elles n'ont pas le même niveau d'énergie dans les matériaux. La différence d'énergie s'appelle la bande interdite ("bandgap" ou "gap").



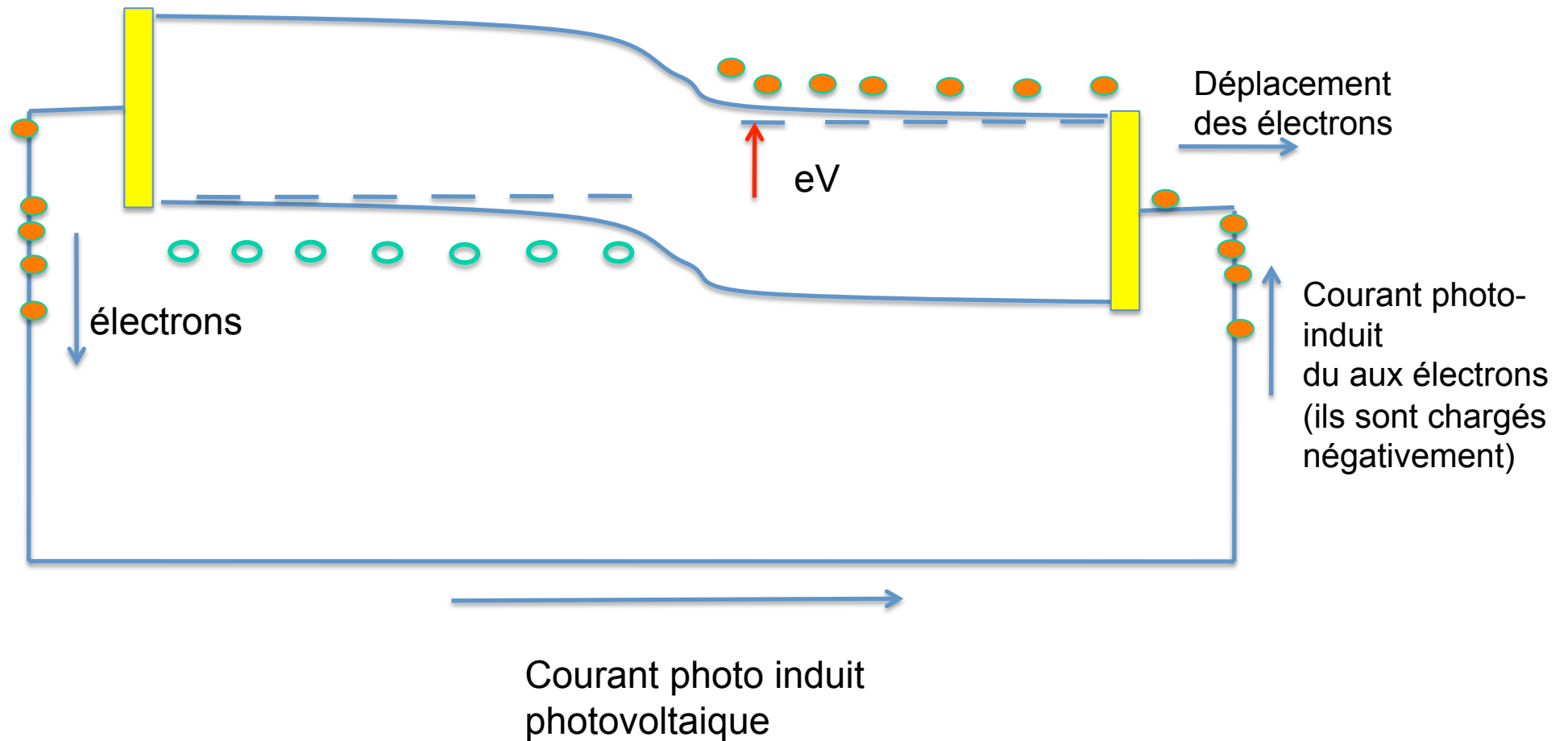
A cause du transfert de charges électriques, électrons négatifs et trous positifs, il se développe un champ électrique et une barrière d'énergie potentielle qui 's'opposent au transfert de charges, qui s'arrête quand les niveaux d'énergie des charges sont les mêmes des deux cotés de la jonction p-n. Il ne passe donc pas de courant dans la jonction quand elle a atteint son équilibre.



Par contre, **si l'on envoie de la lumière sur le semiconducteur au niveau de la jonction**, on crée des paires électrons-trous par absorption de la lumière si les photons ont une énergie suffisante. Les électrons négatifs photocréés sont dirigés par le champ électrique vers la partie n, les trous positifs vers la partie p de la jonction. Il y a création de courant, LE COURANT PHOTOVOLTAÏQUE.



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



# La jonction p-n sous eclairement:

