

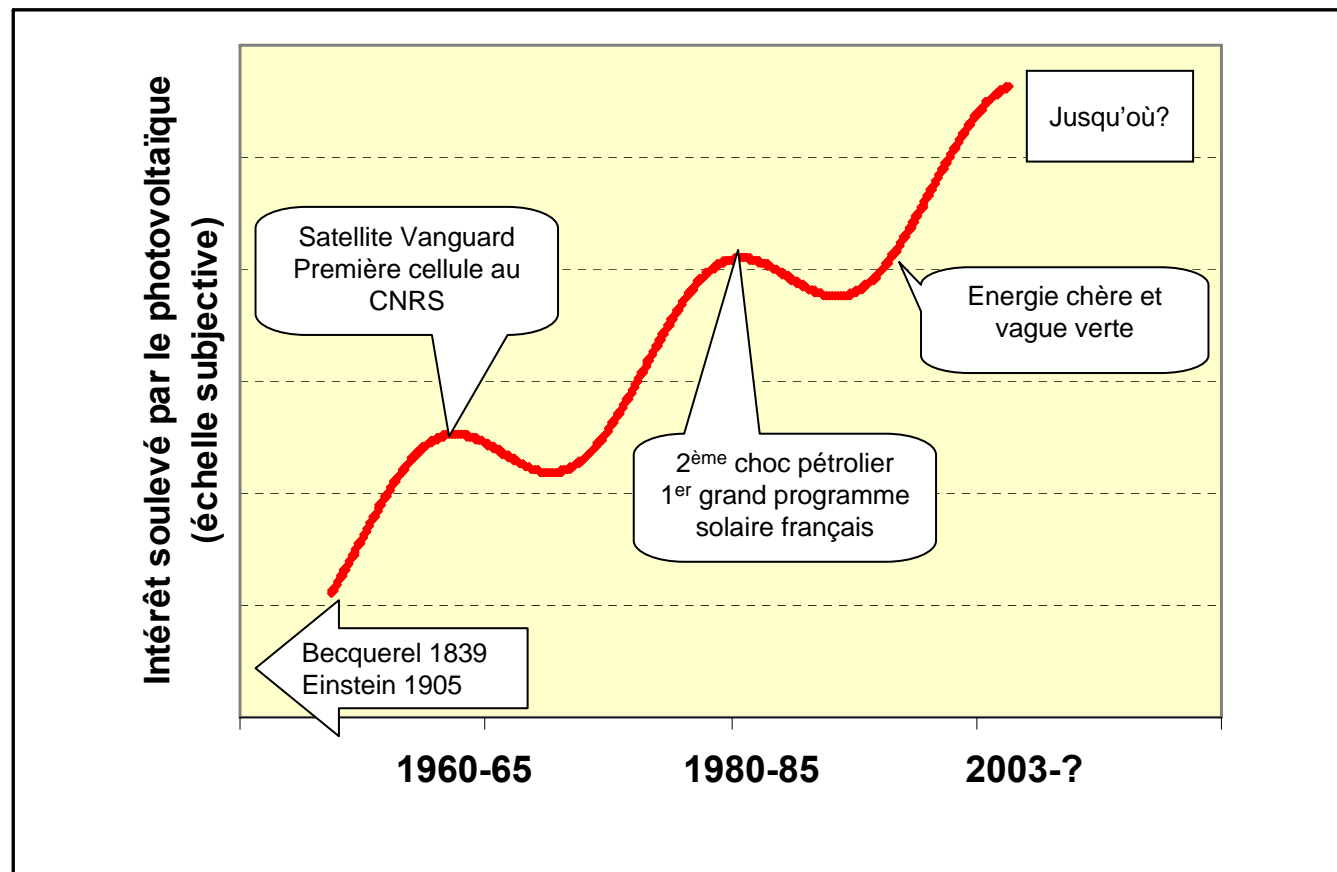


Energie photovoltaïque Réalités et perspectives

Jean-Pierre HAUET
Membre émérite de la SEE
Président d'ISA-France

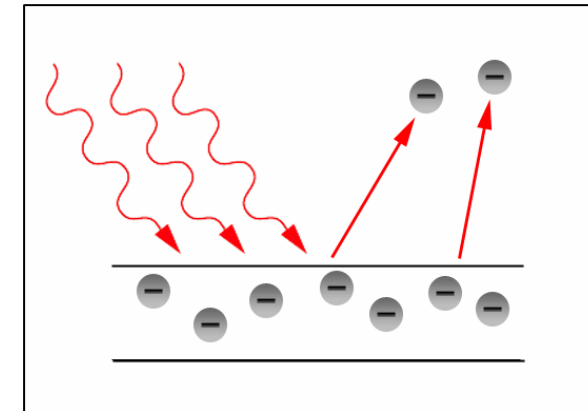
Assemblée Générale de la SEE du 22 juin 2009

Le photovoltaïque : une technologie « cyclique » depuis sa découverte

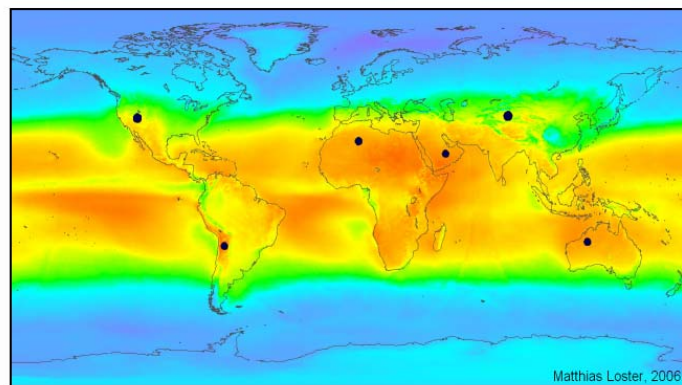


Le photovoltaïque : une technologie séduisante

- ✚ Conversion directe et statique de l'énergie solaire
- ✚ Energie totalement renouvelable
- ✚ Utilisant la matériau le plus abondant : la silice
- ✚ Non émettrice de CO₂ (après investissement)
- ✚ Réputée non polluante
- ✚ Modulaire, universellement distribuée et libre d'accès



Effet photoélectrique



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m² Σ● = 18 TWe

Atlas solaire mondial

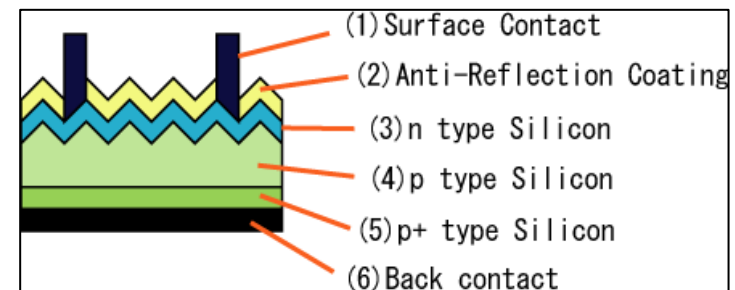
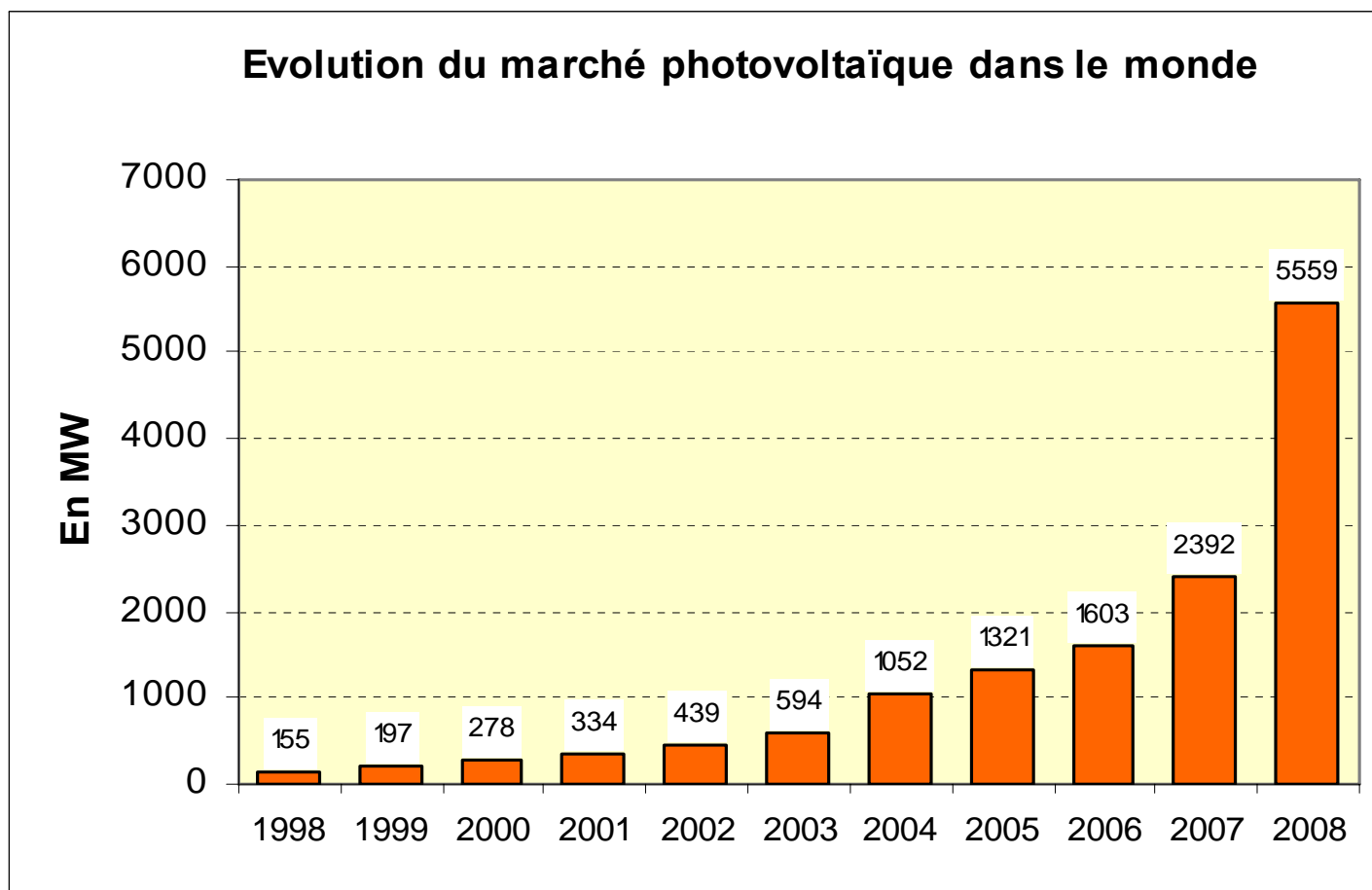


Schéma d'une cellule photovoltaïque

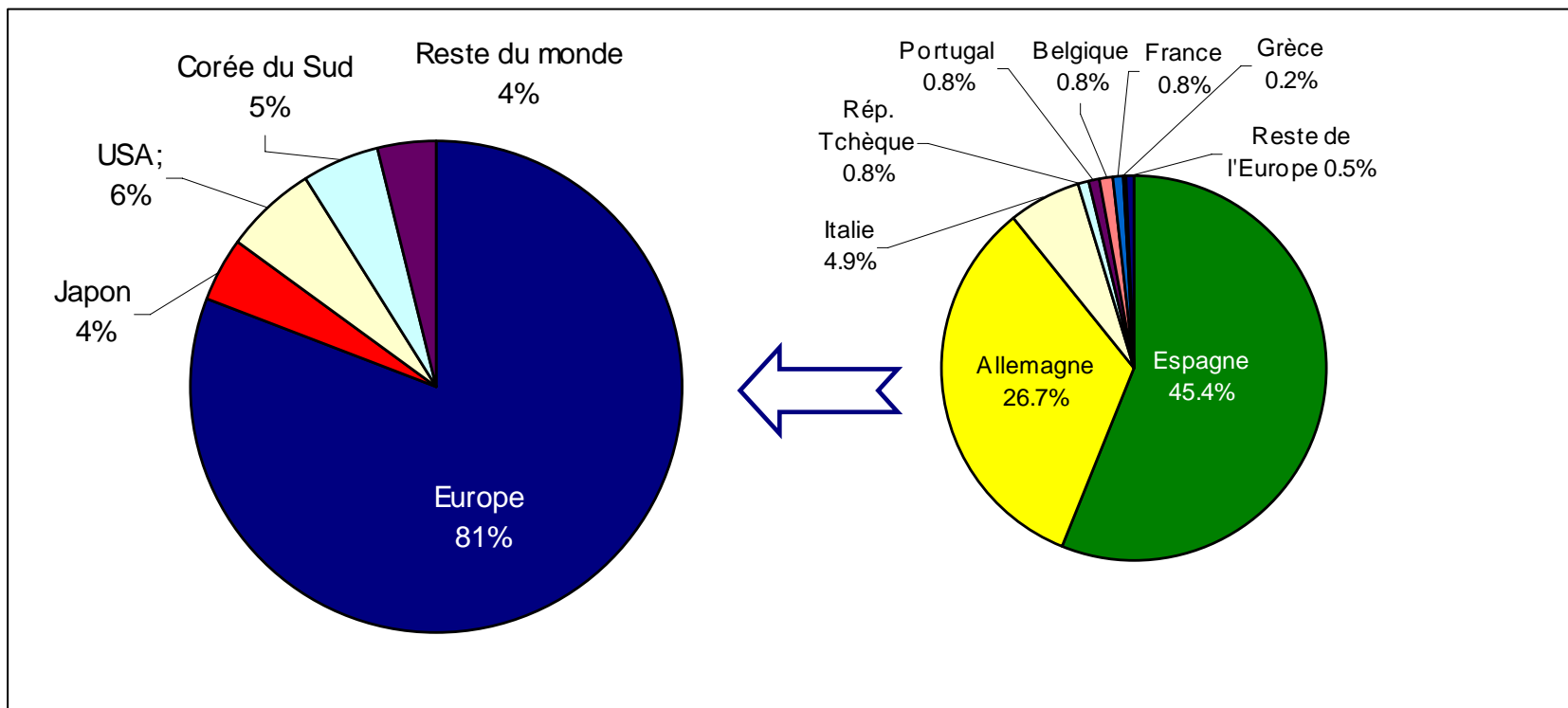
Une énergie en plein développement...



Source : EPIA

...sur des marchés inattendus

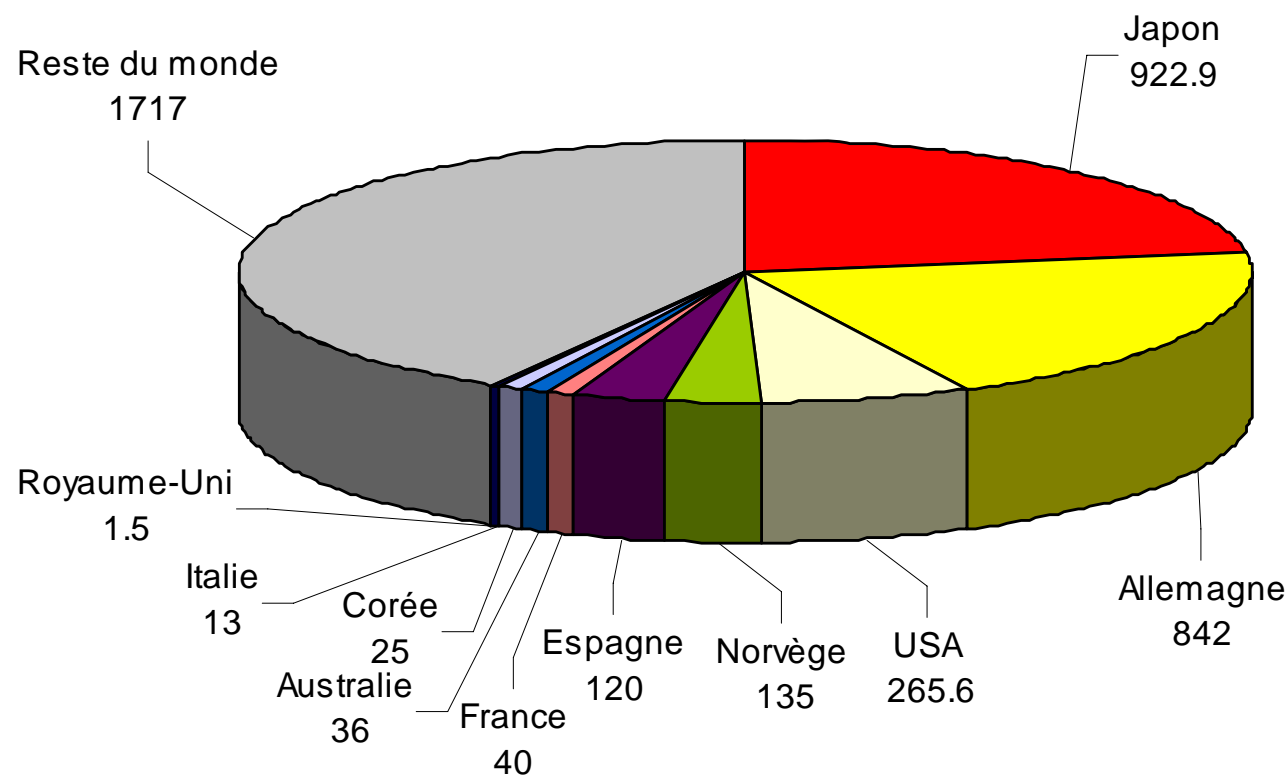
Majoritairement en Europe



Marché du photovoltaïque dans le monde en 2008

Source : EPIA

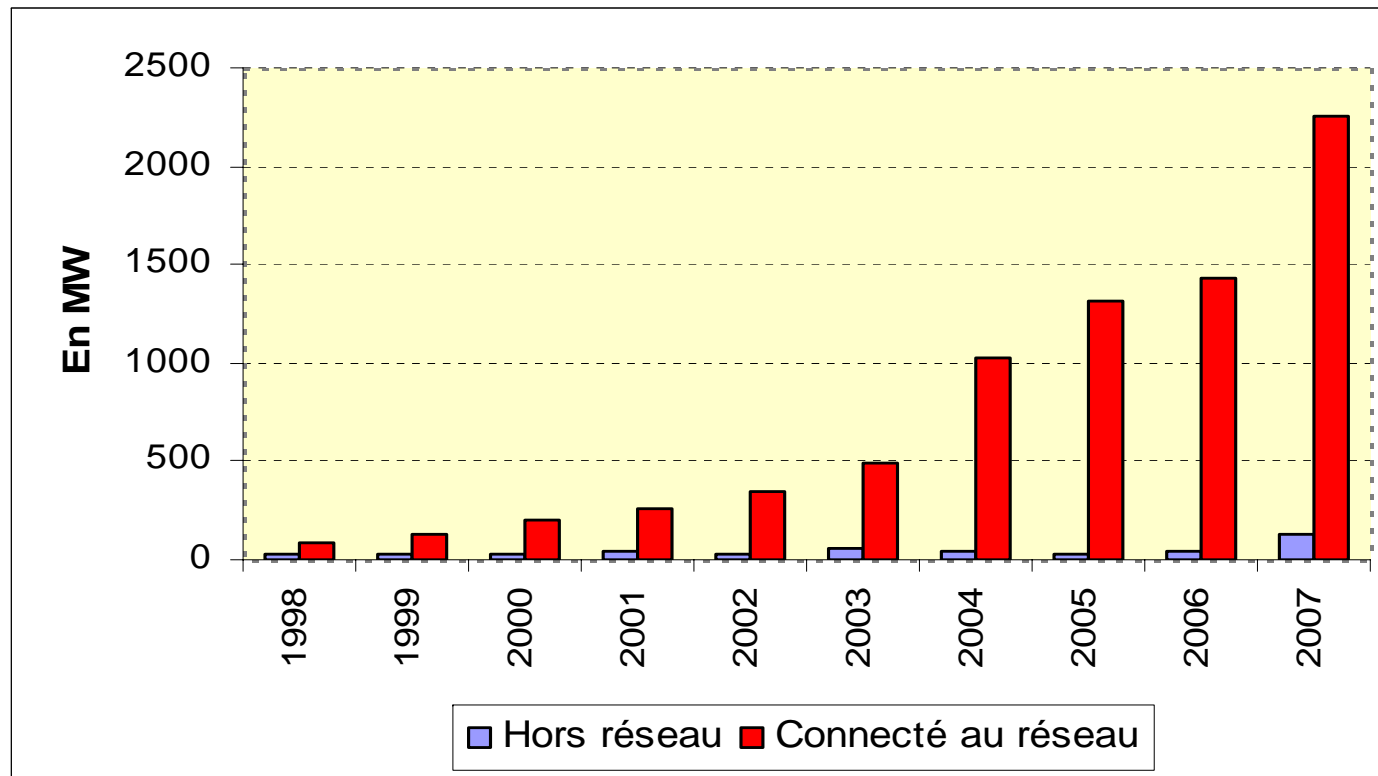
...en forte disharmonie avec les pays producteurs



Répartition de la production mondiale de cellules photovoltaïques dans le monde en 2007

Source : AIE - PVPS

...sur des créneaux ne correspondant pas majoritairement à un besoin économique prioritaire



Evolution de la répartition du marché photovoltaïque dans les pays de l'AIE – PVPS

Nota : Le marché chinois et le marché indien étaient chacun évalués à 40 MW en 2008 par l'EPIA

Source : AIE - PVPS

**Les applications raccordées croissent à plus
de 40% par an**

Des lotissements au Japon



Le marché des sites isolés reste cependant un marché à forte valeur ajoutée

- ✚ En 2011, le marché mondial des sites isolés pourrait représenter 500 MWc
- ✚ Principales applications :
 - Electrification Rurale Décentralisée (60% ; CAGR > 15%)
 - Pompage, adduction d'eau
 - Electrification villageoise
 - Eclairage extérieur, autres...
 - Applications Professionnelles (40% ; CAGR > 12%)
 - Communication & Télémétrie
 - Protection Cathodique

Source : Apex BP Solar



Malgré les progrès réalisés, le photovoltaïque reste une énergie chère

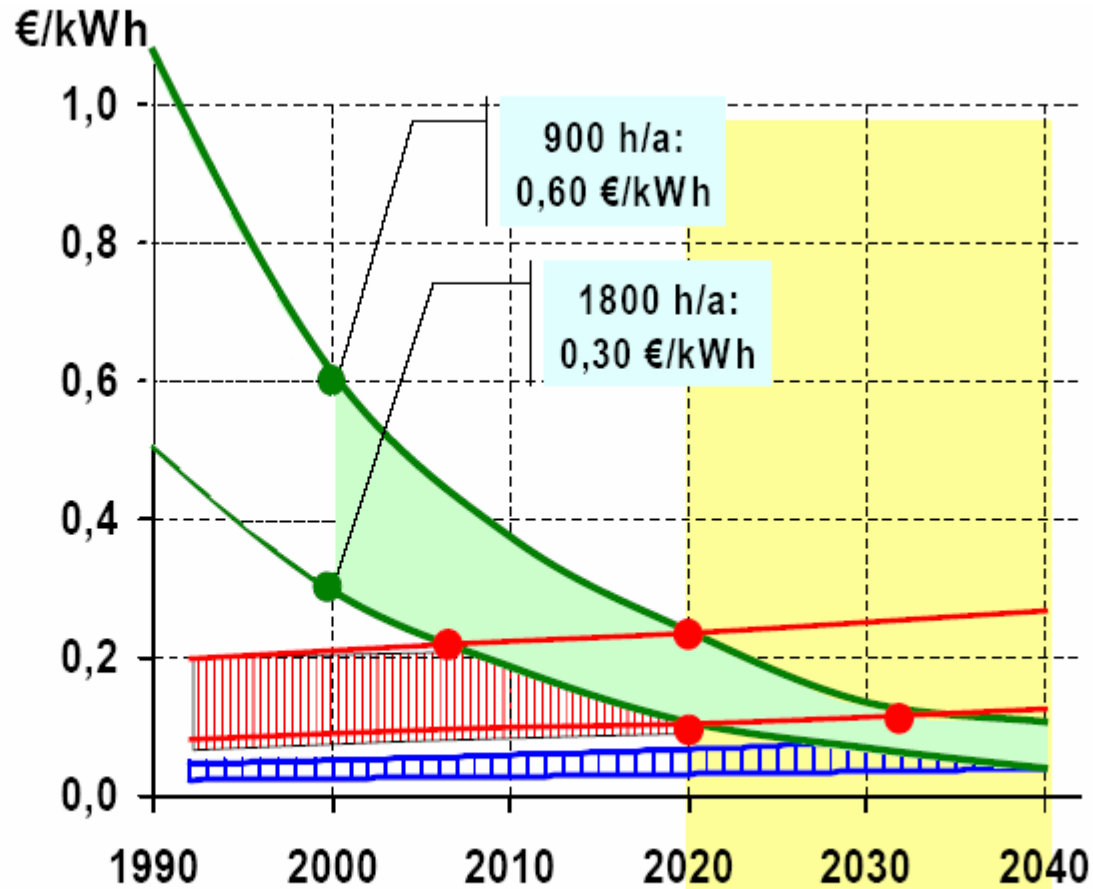
- ✚ **Prix des modules : de l'ordre de 2 000 € par kWc (2 €/Wc)**
- ✚ **Prix des systèmes : de l'ordre de 4 000 à 10 000 € par kWc selon dimensionnement et conditions particulières**
- ✚ **Prix de revient du MWh : varie fortement selon l'ensoleillement**
 - **De l'ordre de 600 €/MWh pour installation domestique de 3 kW produisant 3 000 kWh par an (investissement initial de 6 000 €/W – environ 20 m² de toiture)**
 - **De l'ordre de 300 €/MWh pour une centrale de 5 MW produisant 1 225 h par an (investissement initial de 4 000 €/kW)**
- ✚ **Coût très supérieur à celui de l'énergie éolienne (~ 80 €/MWh) auquel il faut ajouter le coût de l'intermittence et le coût du raccordement au réseau**
- ✚ **Prix de revient de la tonne de CO₂ évitée de l'ordre de 350 € en 2009 par référence à une turbine à gaz à cycle simple et avec un prix du gaz de 10 \$/MBtu**

kWc = Kilowatt crête : puissance délivrée sous conditions standard 1000 W/m² – 25 °C

La « grid-parity » n'est atteinte aujourd'hui que sous certaines conditions

Situation typique de Californie

- Photovoltaics
- Utility peak power
- Bulk power



L'essentiel du marché est aujourd'hui dépendant des mesures incitatives

- ✚ Politiques incitatives mises en place dans de nombreux pays : Allemagne (« Feed-in-Tariff), USA, Italie, Japon, Espagne, France
- ✚ Effet des mesures incitatives dépassant parfois les prévisions : l'Espagne a vu son marché quintupler en 2008 (2 511 MW contre 560 MW en 2007) et a décidé de plafonner son programme à 500 MW en 2009
- ✚ La France est partie en retard mais la politique mise en place par l'arrêté du 10 juillet 2006 est la plus incitative d'Europe :
 - Rachat des kWh à 300 €/MWh (base 2006 en métropole) portés à 550 €/MWh en cas d'intégration au bâti, sur 20 ans, sans dégressivité
 - Crédit d'impôt, prêts à taux zéro, aides régionales
 - Système d'aide confirmé jusqu'en 2012 avec création d'un tarif grandes toitures
- ✚ Croissance très rapide des demandes de raccordement qu'ERDF peine à satisfaire (70 MW raccordés au 31/03/09 sur 15 034 sites mais 767.4 MW en demandes en cours sur 19 307 sites)

kWc = Kilowatt crête : puissance délivrée sous conditions standard 1000 W/m² – 25 °C

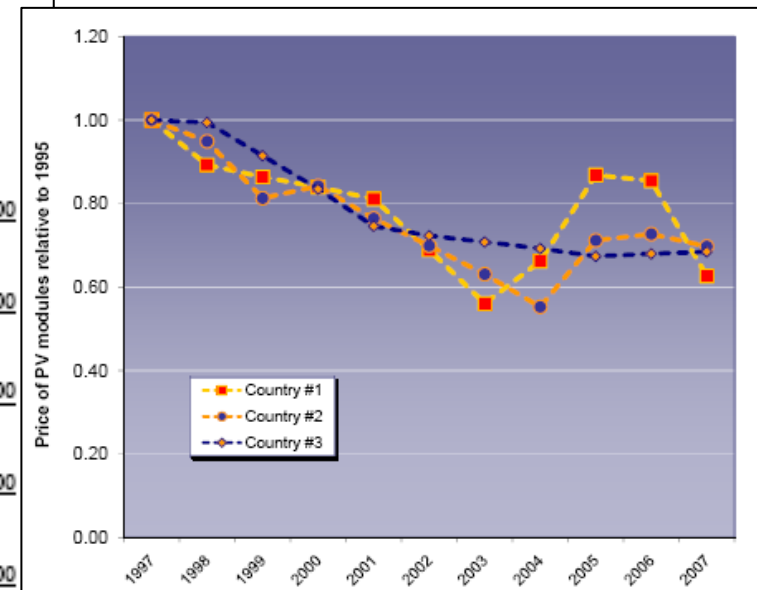
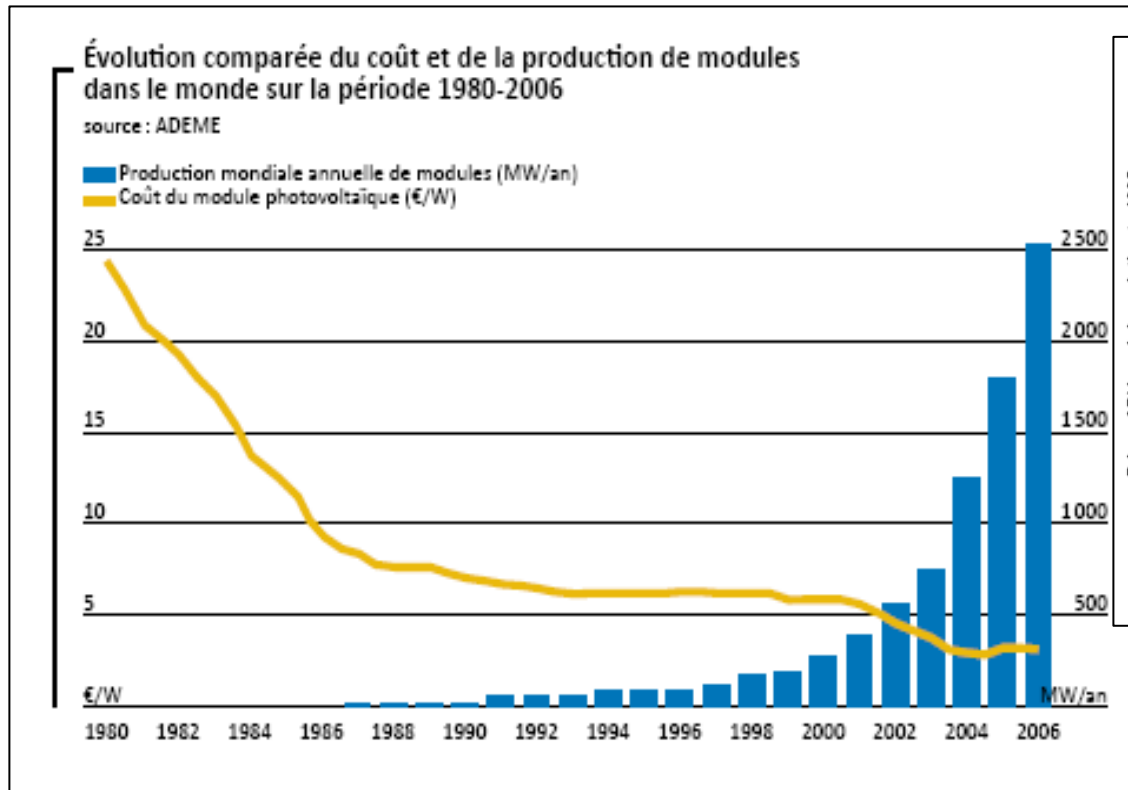
Le photovoltaïque peut-il continuer à se développer sans aide publique ?

- ✚ La hausse des énergies fossiles et la généralisation d'un prix du CO₂ y contribueront mais ne seront sans doute pas suffisantes
- ✚ Le prix du Wc photovoltaïque doit impérativement continuer à diminuer
- ✚ Objectif communément admis : 1 \$/Wc (modules) soit 1 500 €/KWc (systèmes)

Prix du gaz \$/MBtu (Turbine à cycle simple)	Fermes photovoltaïques	
	Technologies actuelles (4000 €/kW installé)	Technologies futures (1500 €/kW installé)
6	418 €	87 €
8	392 €	61 €
10	367 €	36 €
12	340 €	9 €

Evaluation du prix d'équilibre du CO₂ entre turbines à gaz et fermes photovoltaïques dans diverses hypothèses (hors coût d'intermittence) Source : KB Intelligence

La décroissante des coûts a été très forte depuis 25 ans



La tension de 2004-2007 sur les prix du silicium semble aujourd'hui estompée

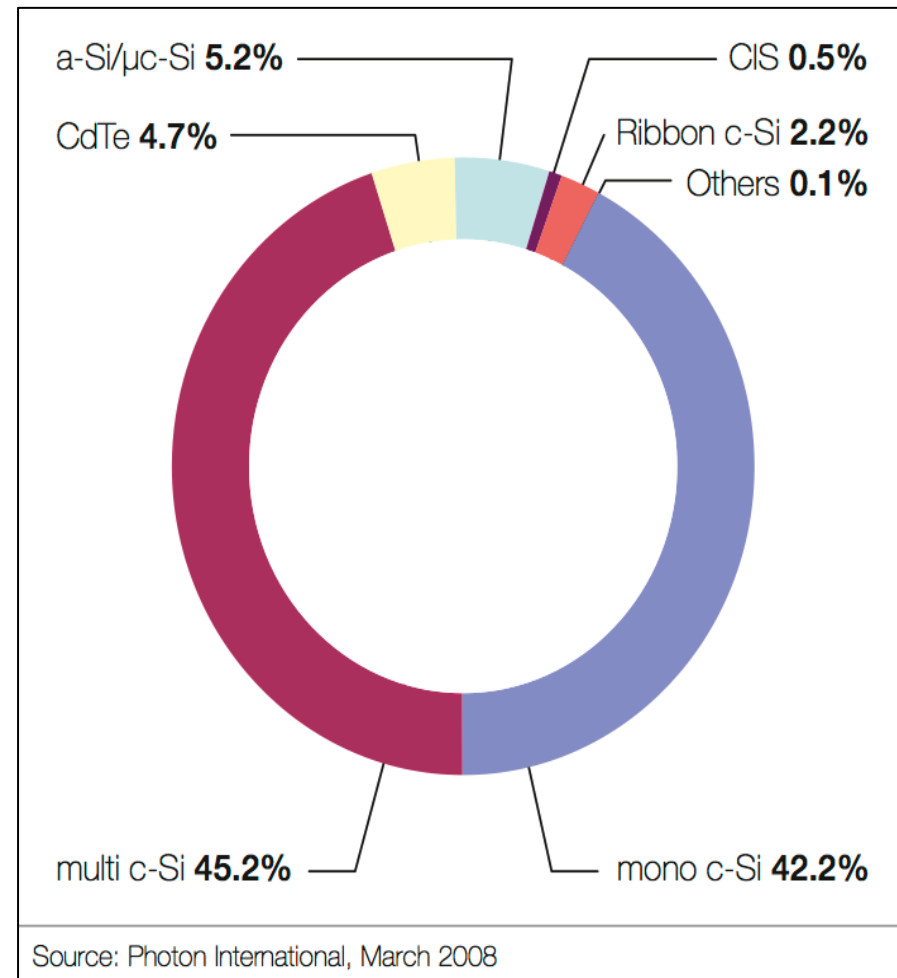
Source : AIE - PVPS

Un doublement de la production entraîne, en moyenne une baisse des coûts de 20%

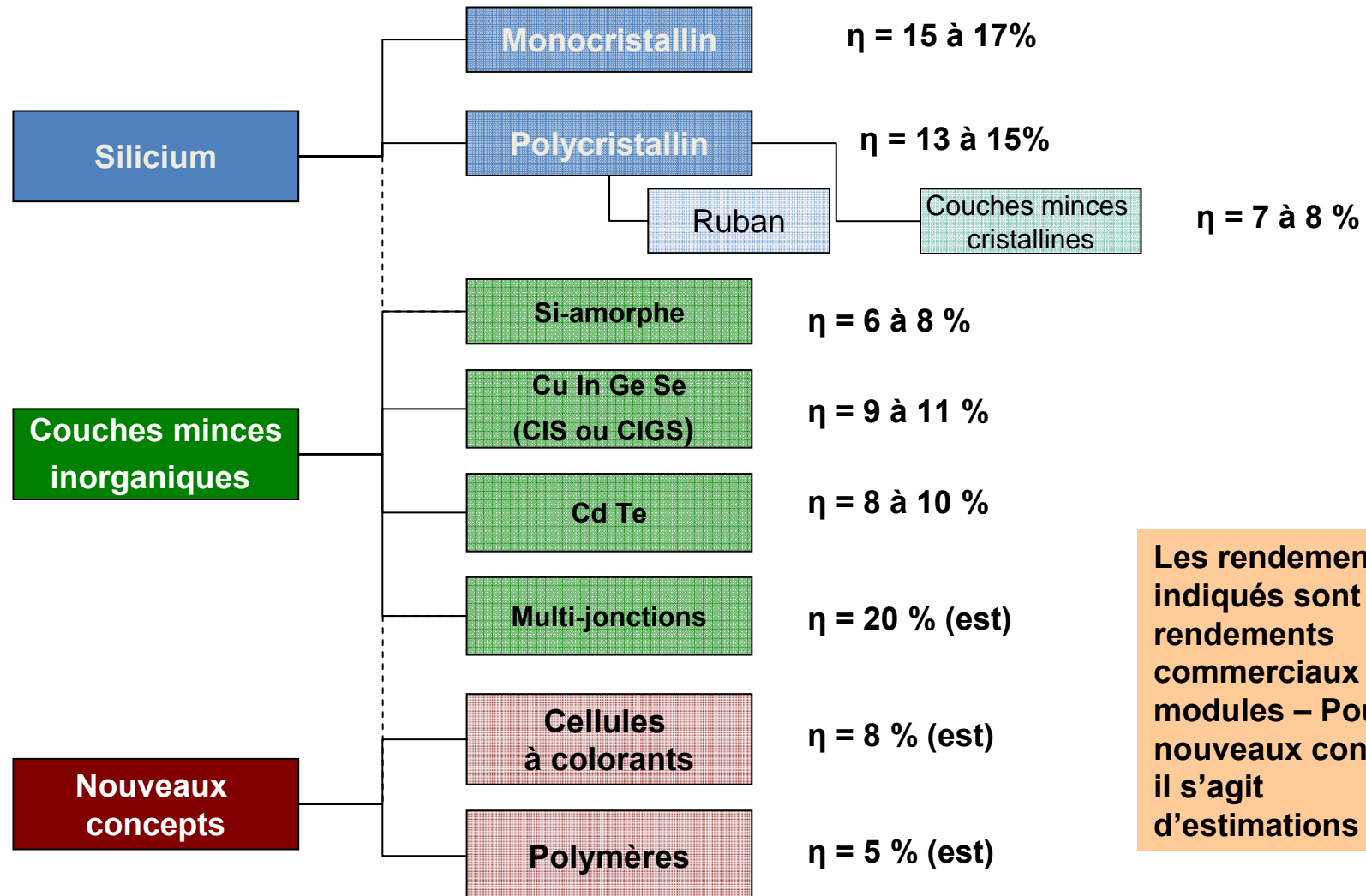
Le photovoltaïque recèle encore un très fort potentiel de progrès technologiques

- ✚ Par diminution des coûts de fabrication au m² des cellules
- ✚ Par augmentation des rendements
- ✚ Sans oublier les coûts de fabrication des modules et des systèmes, l'allongement des durées de vie, les possibilités de concentration et de tracking

- ✚ Aujourd'hui les filières silicium cristallines continuent à dominer le marché
- ✚ Mais les couches minces qui arrivent sur le marché offrent des perspectives très attractives



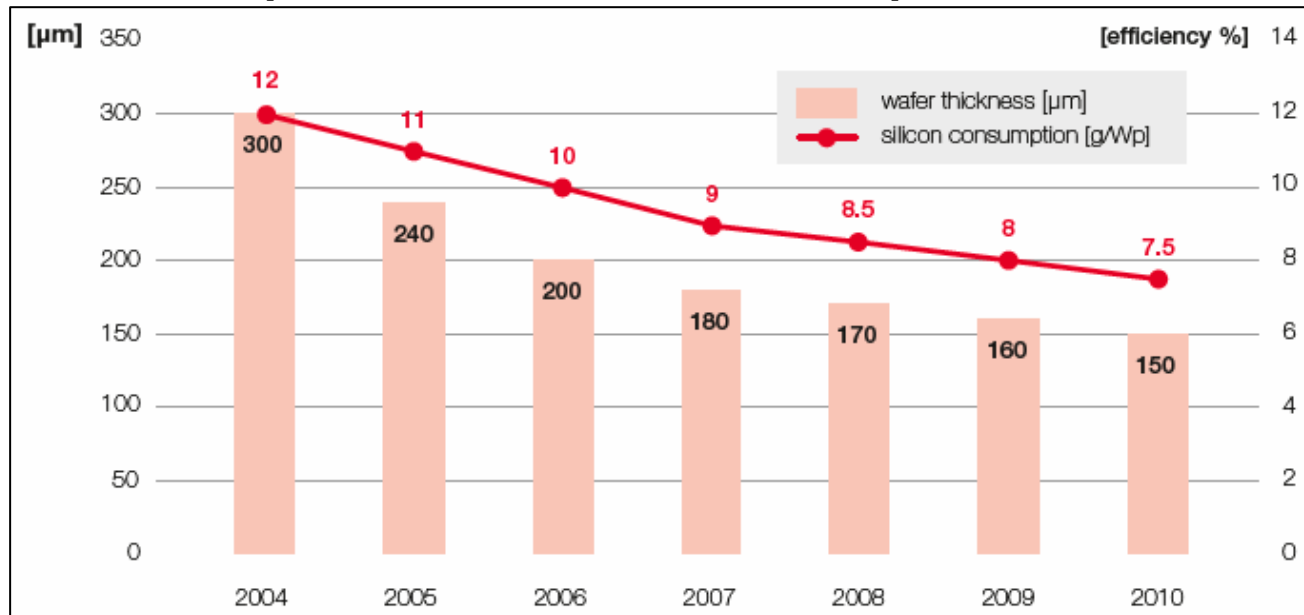
Classification simplifiée des filières



Les rendements indiqués sont des rendements commerciaux des modules – Pour les nouveaux concepts, il s'agit d'estimations

Le silicium cristallin continue à progresser

✚ Réduction de l'épaisseur des cellules et du poids de Si/W



Source : EPIA -2008

- ✚ Objectif : 5 g/W (20 g en 1990)
- ✚ Amélioration de l'ensemble du process

Les couches minces représentent le défi majeur pour l'avenir

- ✚ Forte réduction de la quantité de matériau nécessaire (couche active de 2 μ) – Pas de sciage
- ✚ Réduction des coûts
- ✚ Adaptabilité à différents supports, y compris flexibles
- ✚ Possibilités de jouer sur la couleur, la transparence etc.

Mais :

- ✚ Nécessité de trouver des matériaux performants, abondants (pb de l'indium) et non polluants (pb du cadmium)
- ✚ Stabilité dans le temps à valider
- ✚ 150 matériaux ont été testés

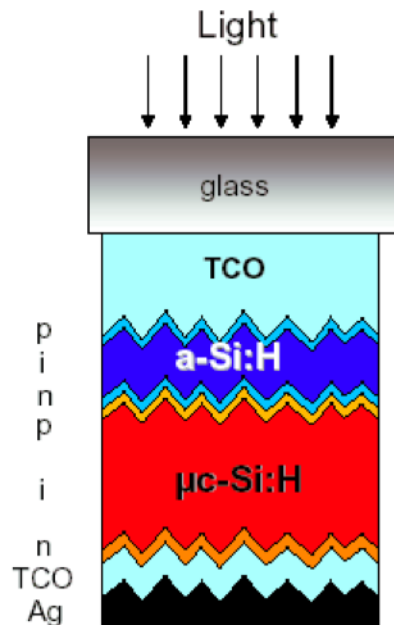


Silicium amorphe sur inox (Unisolar)



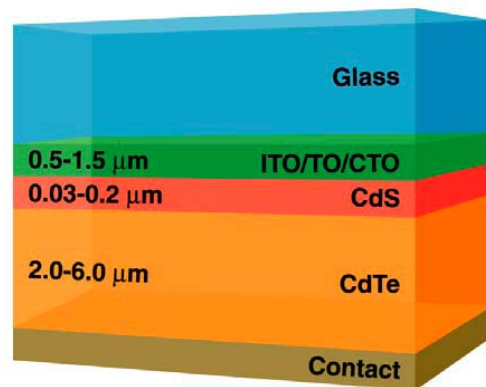
Silicium amorphe sur plastique (Flexcell)

Les trois grande filières de couches minces

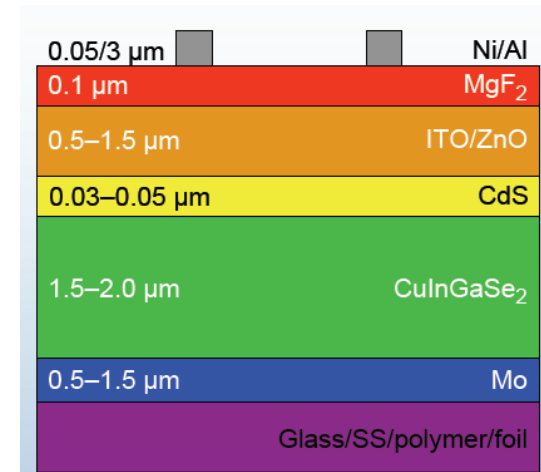


(d'après J-F Guillemoles)

Le silicium amorphe :
 découvert par hasard en
 1960 – Rendement assez
 faible mais toujours très
 utilisé – Capte bien le
 diffus – Leader : Sharp



Le tellure de cadmium :
 Bonnes caractéristiques
 mais bridé par le problème
 du cadmium – Leader:
 First Solar



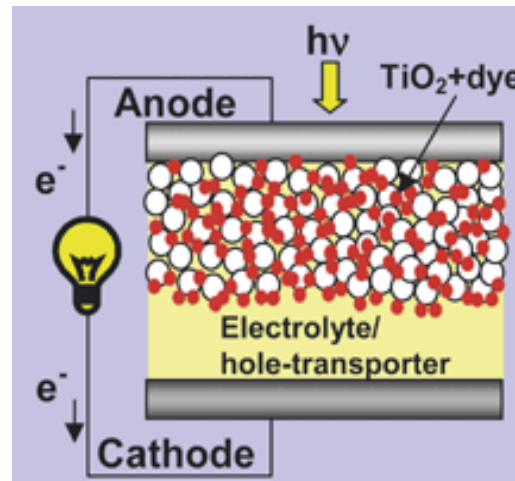
**Les calcopyrites
 ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}$) :** Bonnes
 caractéristiques mais
 problème de l'indium –
 Leader: Nano Solar

(d'après Bernard Equer)

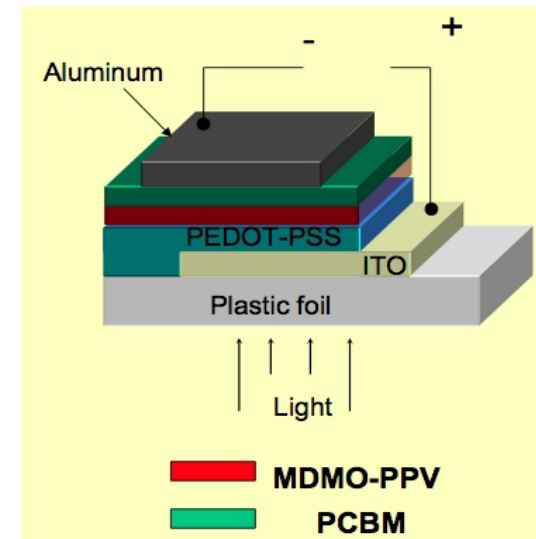
Trois nouvelles filières



Les multijonctions :
Vers les hauts rendements

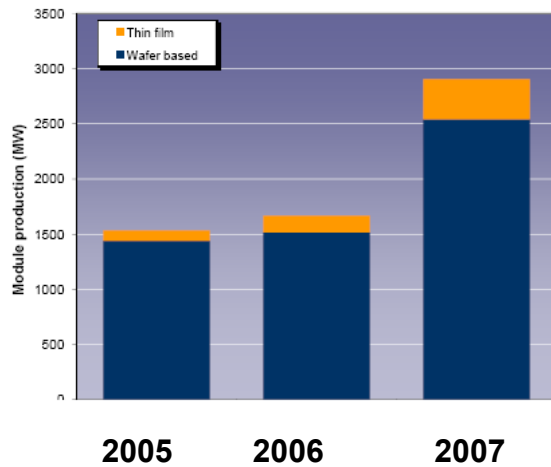


Les cellules à colorants :
découvertes en 1991 – Pas encore d'industrialisation



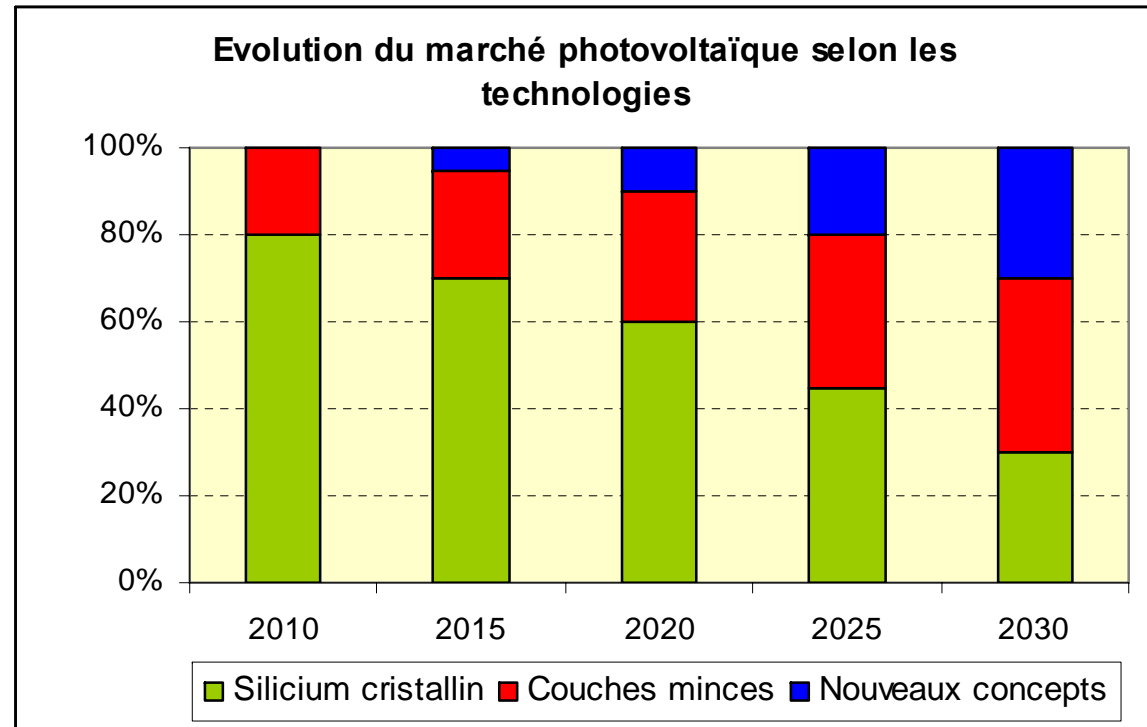
Les semi-conducteurs organiques :
découverts en 1970 – Rendements faibles – Stabilité incertaine

Les nouvelles filières vont se développer



Source : AIE - PVPS

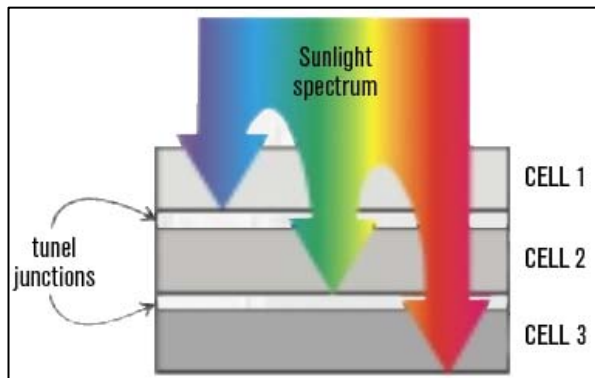
Les couches minces ont atteint le stade industriel La Chine a pris le leadership.



(selon Guy Malbranche)

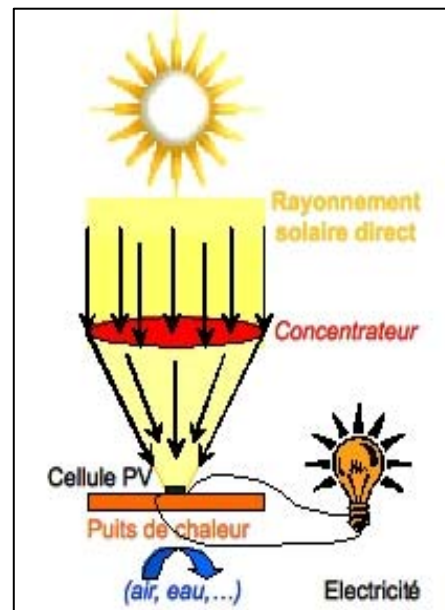
Le rendement peut être amélioré

- ✚ Limite thermodynamique théorique de 87 % environ
- ✚ Rendements de 42% obtenus en laboratoire
- ✚ 20% commercialement visés vers 2010/2012
- ✚ Deux voies principales : les multijonctions et la concentration



Les multijonctions :

Empilement de cellules permettant de mieux couvrir l'ensemble du spectre solaire



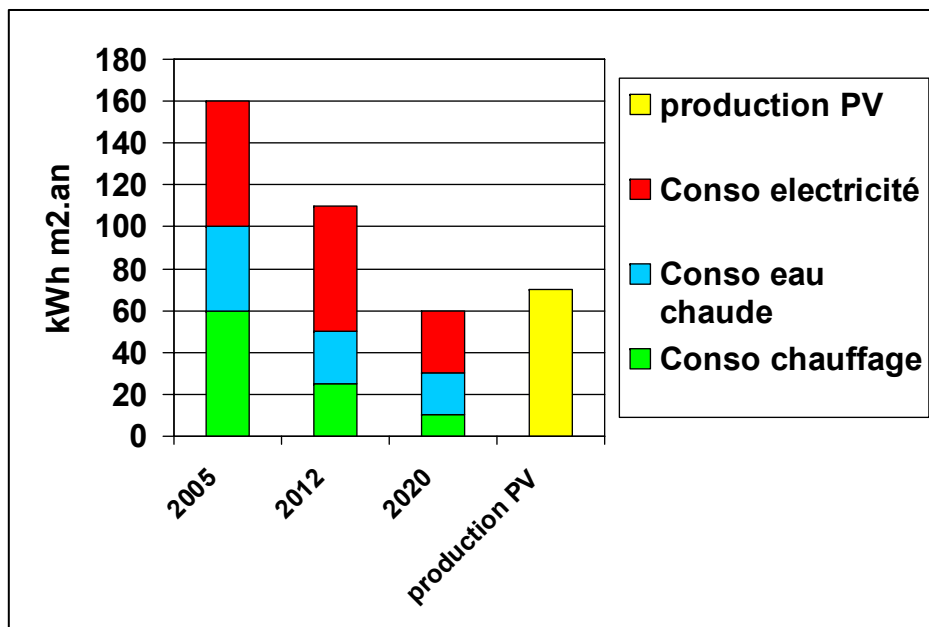
La concentration :

Possibilité d'atteindre 40% de rendement mais nécessité de refroidissement et de tracking

(selon Bernard Equer)

Une idée forte : faire du photovoltaïque un composant du bâtiment

- ✚ Voie relativement originale suivie par la France
- ✚ Soutenue par la politique tarifaire
- ✚ Promue et développée par le CSTB
- ✚ Développer des bâtiments à énergie positive à horizon 2020
- ✚ Politique Qualité et Sécurité : normes et avis techniques



(Source: CSTB)

Exemples d'intégration



Toitures



Vitrages et verrières



Source : www.bipv.ch, SCHÜCO, ADEME



Brise-soleil et garde-corps



Films sur support

(Source: CSTB)

Conclusions

- ✚ **Les objectifs de 20% de rendement et de prix de revient de 1\$/Wc seront atteints**
- ✚ **Au-delà, des sauts technologiques restent possibles permettant de faire du photovoltaïque une source d'énergie majeure à prix compétitifs**
- ✚ **Sous nos latitudes, les applications « centrales » peuvent donner lieu à débat**
- ✚ **Les applications « bâtiments », associant technologies photovoltaïques et développement de composants intégrables, sont prometteuses**
- ✚ **Un gros effort de R &D reste nécessaire**
- ✚ **Mais prépare-t-on correctement l'avenir en soutenant massivement la mise en œuvre des technologies existantes dont on connaît les limites?**



Merci de votre attention