



Energie solaire photovoltaïque

- Anne KAMINSKI-CACHOPO
- IMEP-LAHC / PHELMA

Sommaire

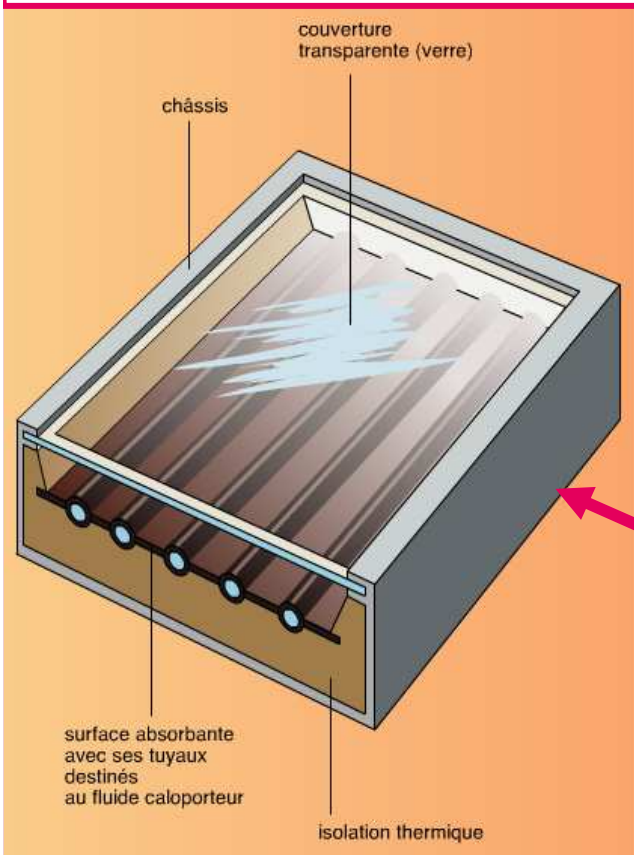
- Introduction
- Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques
- Première génération
- Deuxième génération
- Troisième génération
- Conclusion-perspectives

Capteurs solaires : thermique et photovoltaïque

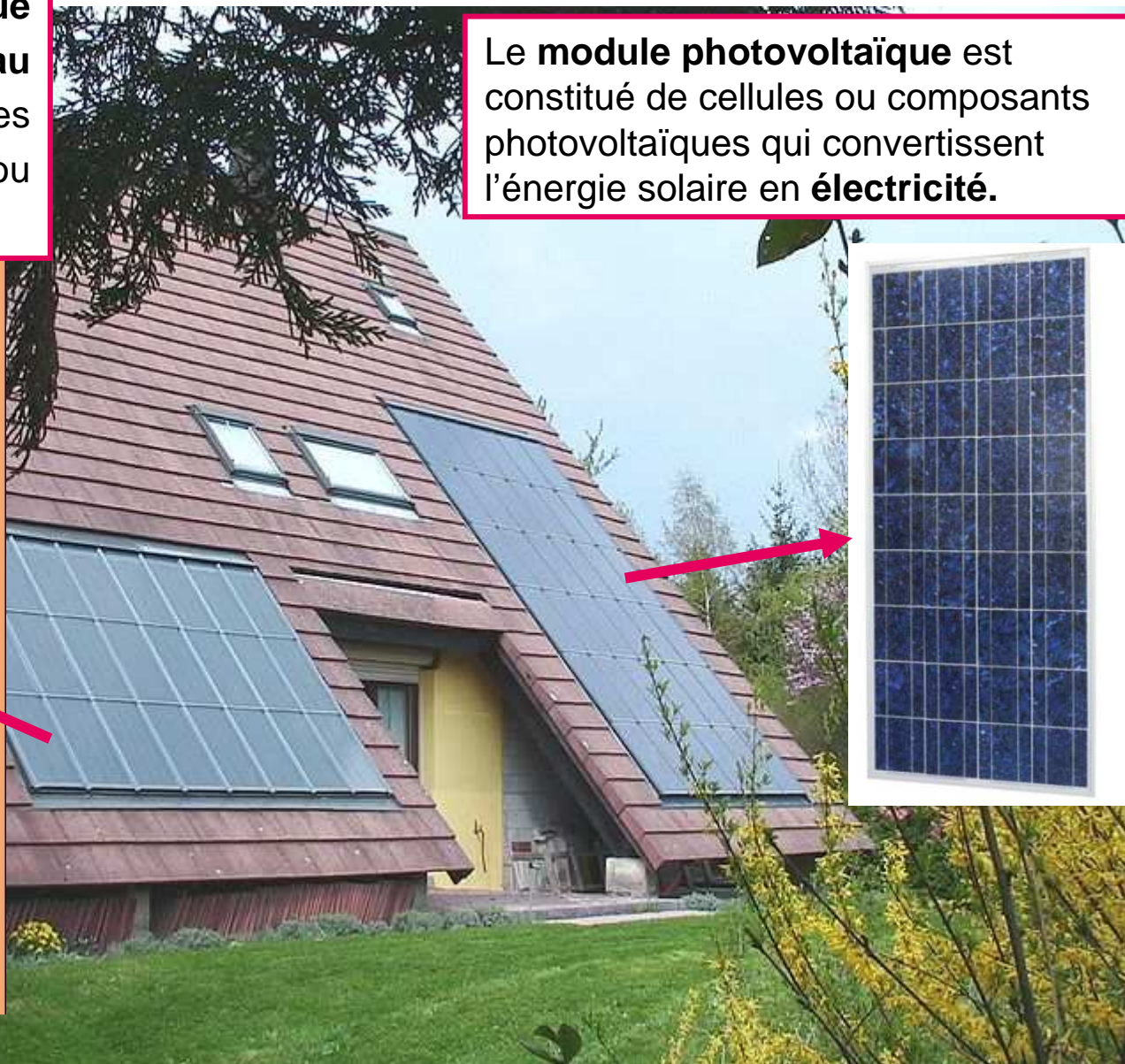
Quelle source d'énergie ?	Comment la capter et la transformer ?	Sous quelle forme l'utiliser ?
Photovoltaïque	Cellules photovoltaïques	<ul style="list-style-type: none">• électricité directe ou batteries• électricité injecté dans le réseau
Thermique	<ul style="list-style-type: none">• capteurs solaires basse température• capteurs solaires haute température	<ul style="list-style-type: none">• chauffage• eau chaude sanitaire• électricité injectée dans le réseau

Energie solaire : thermique et photovoltaïque : pour l'habitat

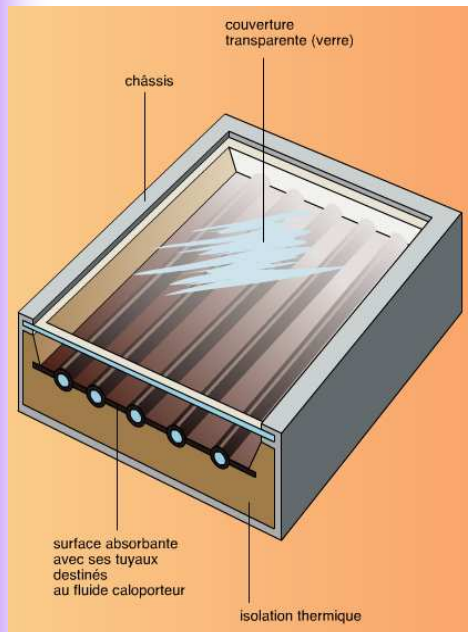
Le **capteur solaire thermique** produit du **chauffage** et de l'**eau chaude** sanitaire (ECS) pour les bâtiments en pays tempérés ou froids.



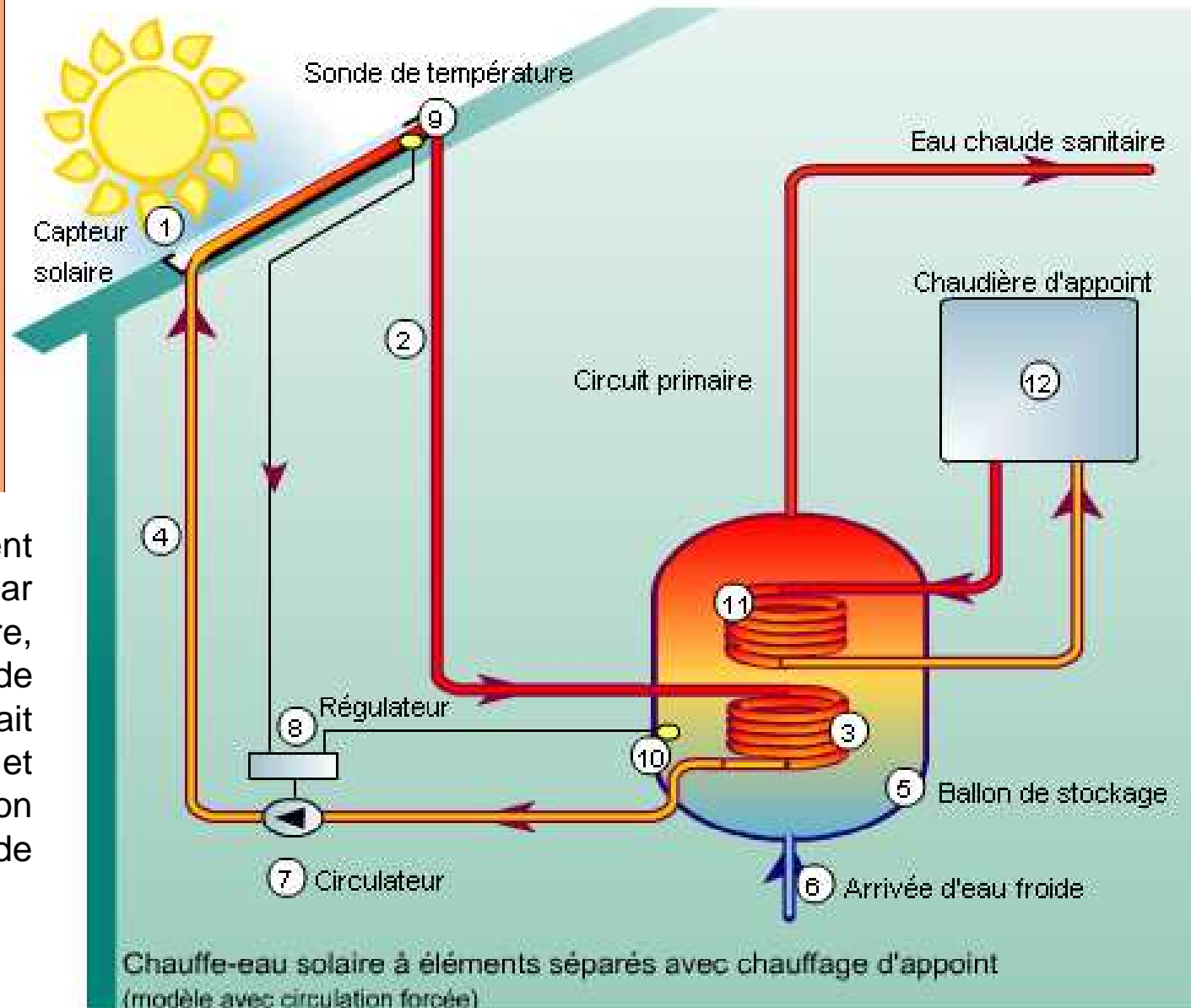
Le **module photovoltaïque** est constitué de cellules ou composants photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire en **électricité**.



Exemple de système avec capteur solaire thermique pour le chauffage de l'eau chaude

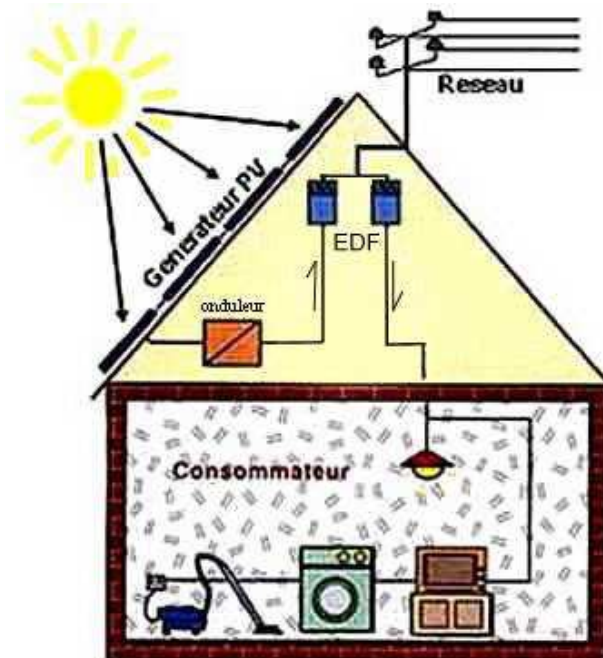
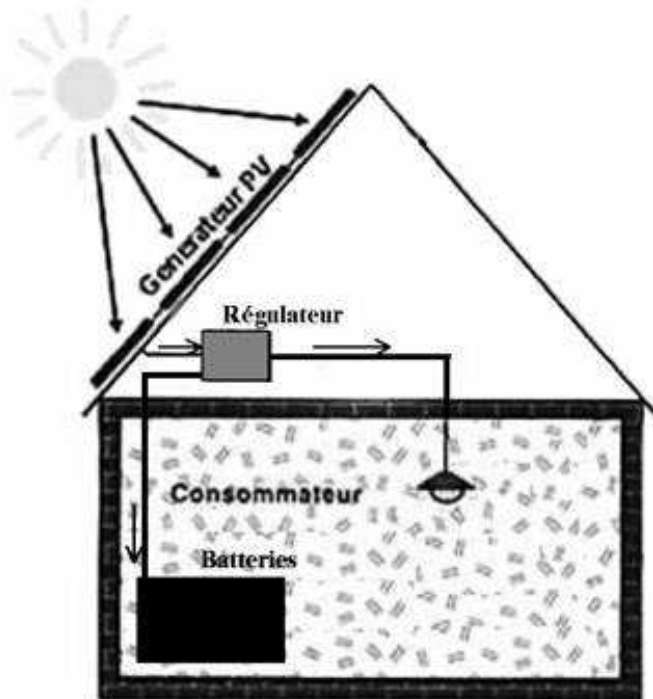
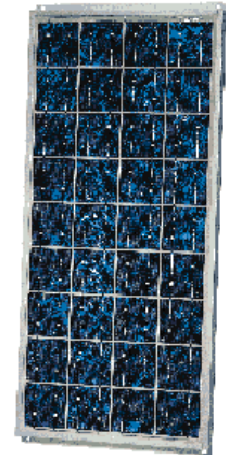


➤ Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son milieu d'utilisation ou de stockage.



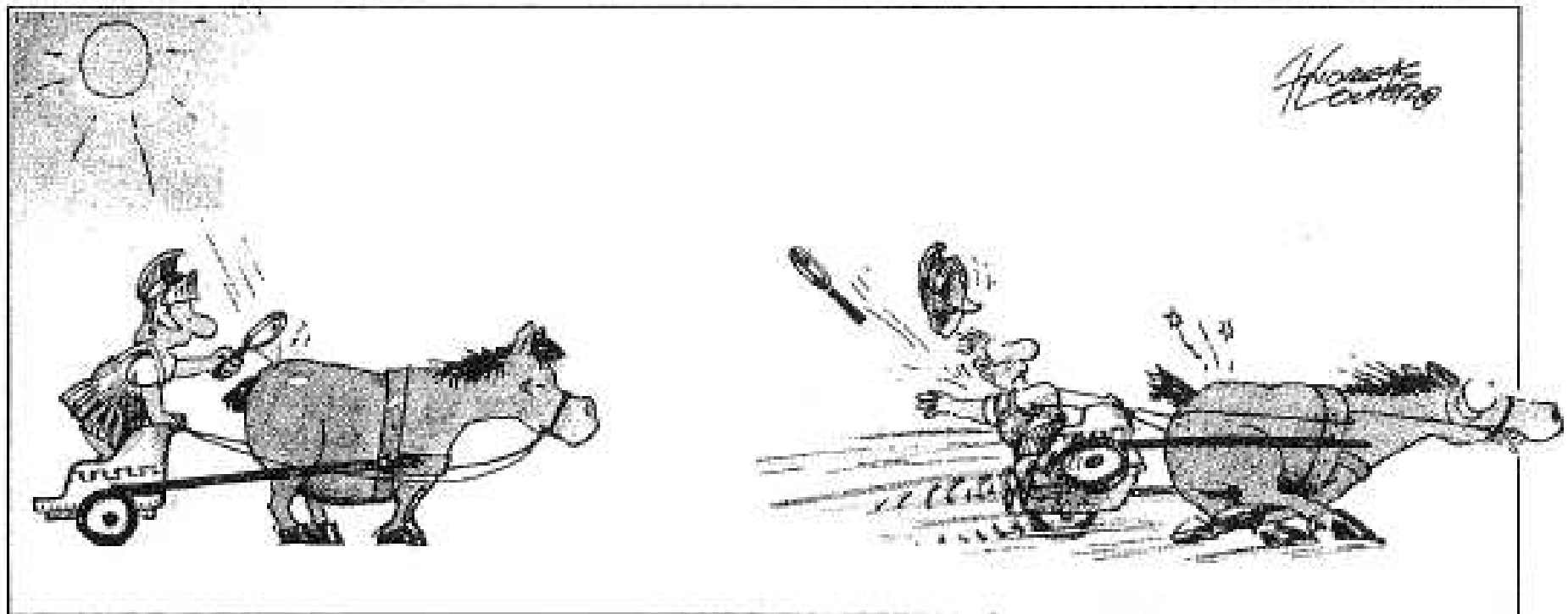
Production d'électricité avec capteur solaire photovoltaïque

- La cellule : C'est le constituant de base, l'unité de production
- Le module : Assemblage de cellules pour constituer une source de puissance donnée
- Le système : Intègre les modules avec les systèmes auxiliaires en vue de fournir le service attendu :
 - Stockage pour les systèmes autonomes
 - Onduleur pour les systèmes raccordés au réseau

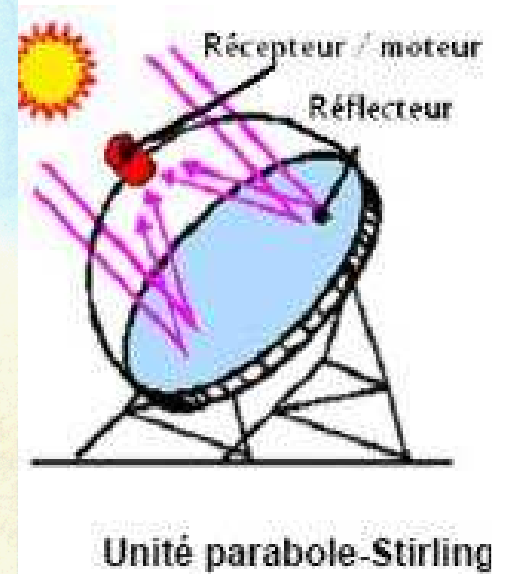
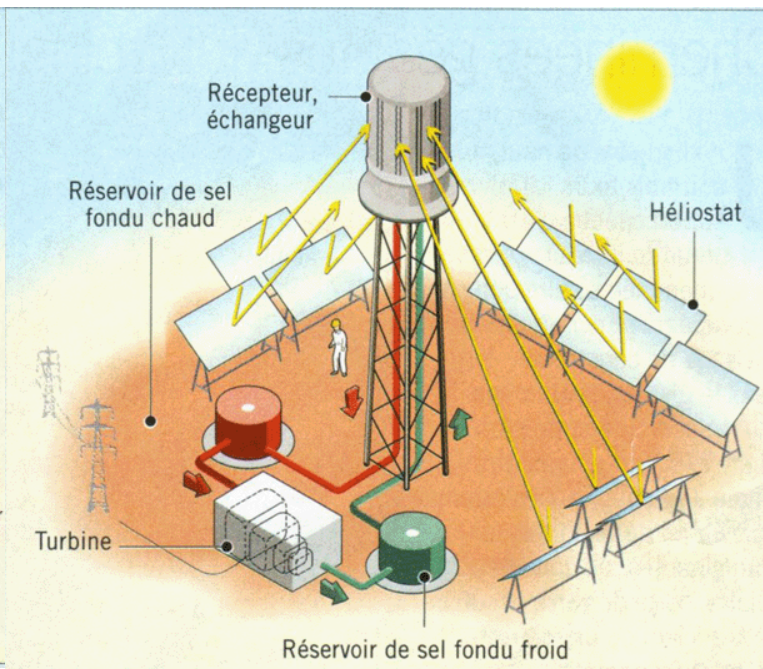
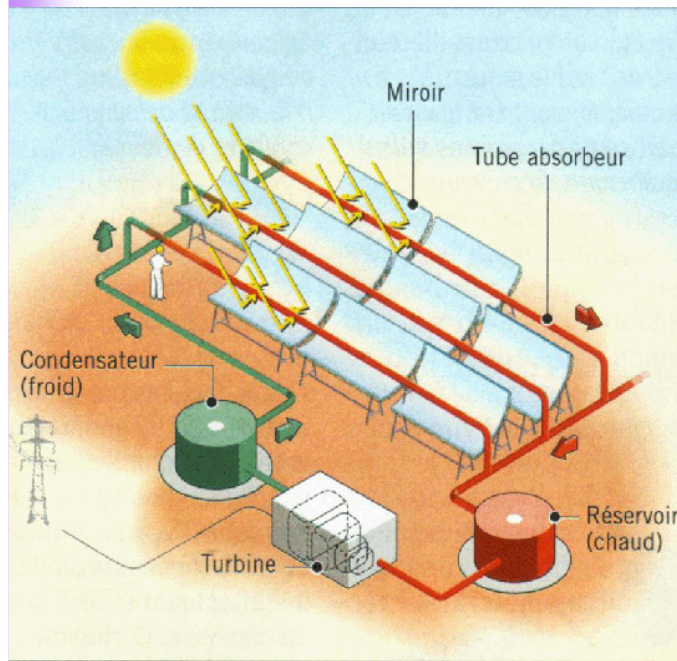
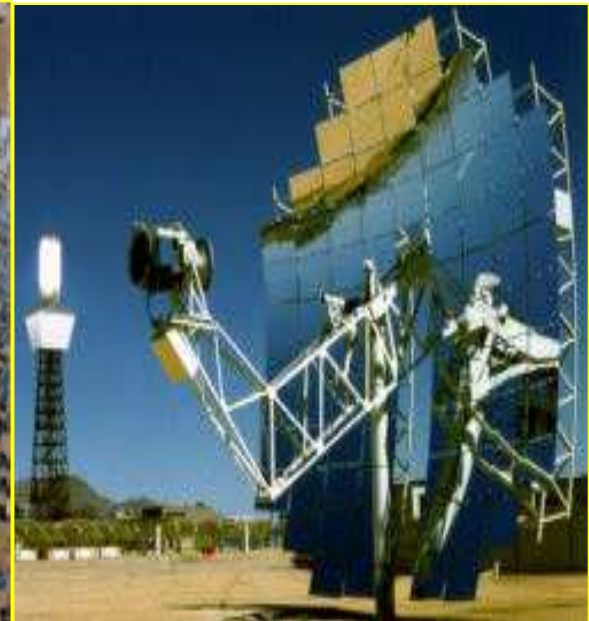


Les centrales solaires pour la production d'électricité

- Centrales solaires thermiques
- centrales solaires photovoltaïques



Les centrales solaires thermiques



Centrale solaire photovoltaïque



**SolarPark Beneixama /Espagne,
20MW
100 000 modules
Électricité pour 12000 habitations
Surface : 500 000m²**

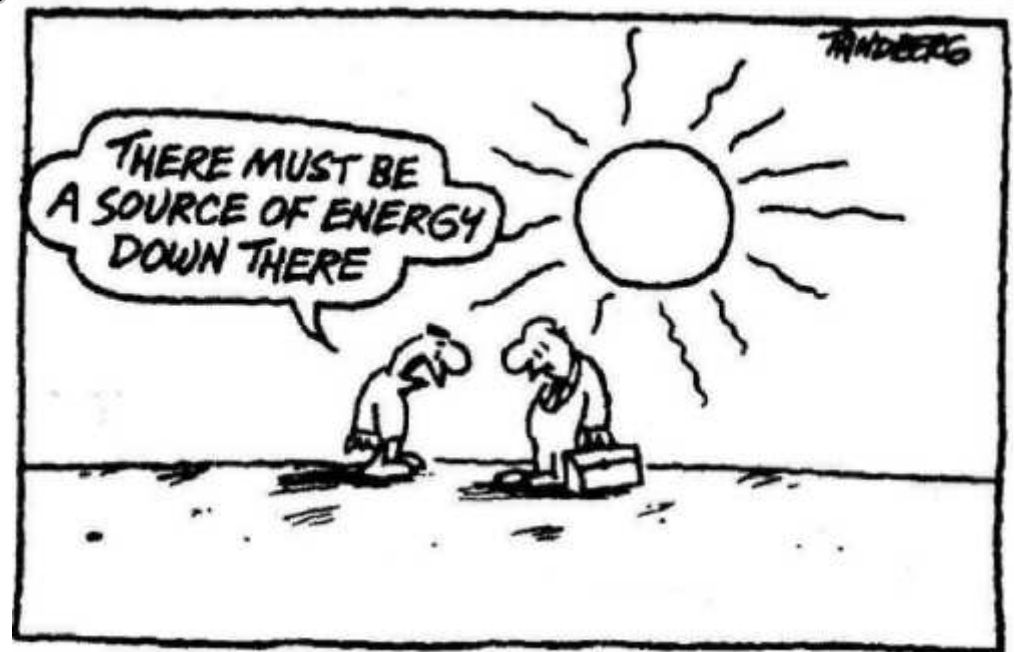
Pertinence du solaire thermique et photovoltaïque



- Energie disponible, renouvelable (le soleil)
- Pas d'émission de CO₂
- Technologie simple
 - Facilement accessible dans un site isolé
- Durée de vie garantie : 20-30 ans pour le PV
 - Faible maintenance

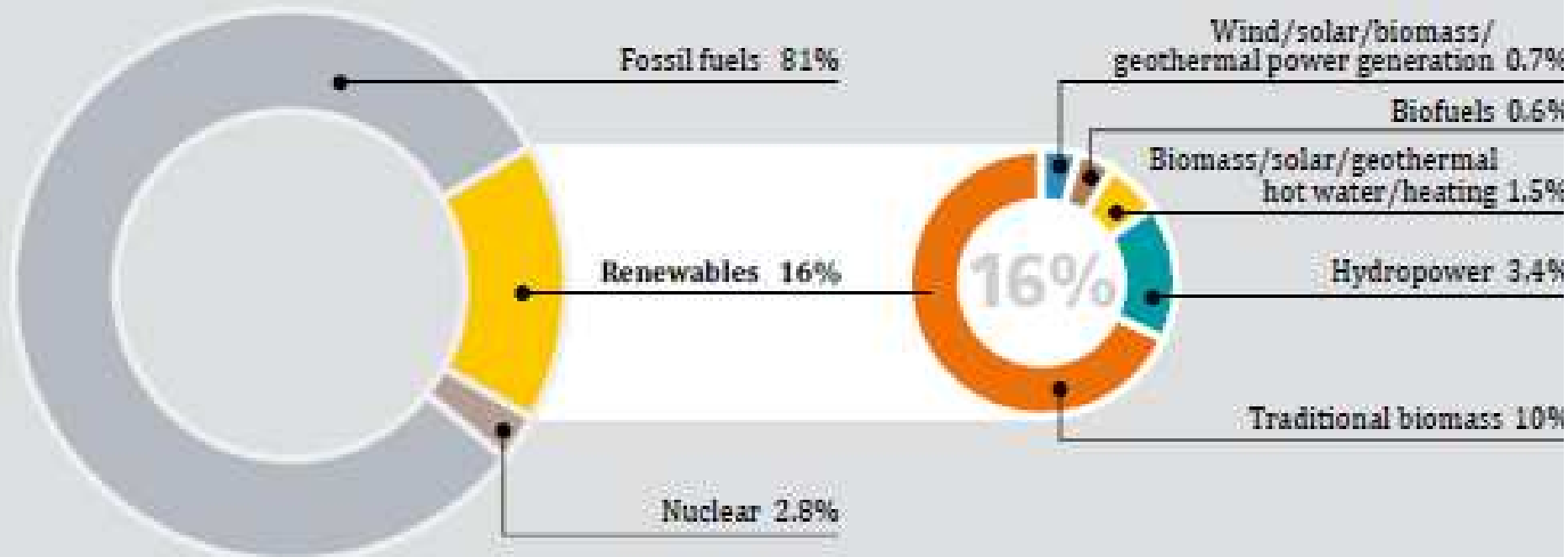


- Sources d'énergie intermittentes
- Problème du stockage
- Coût élevé



Des énergies renouvelables faciles à implanter et pourtant....

Figure 1. Renewable Energy Share of Global Final Energy Consumption, 2009

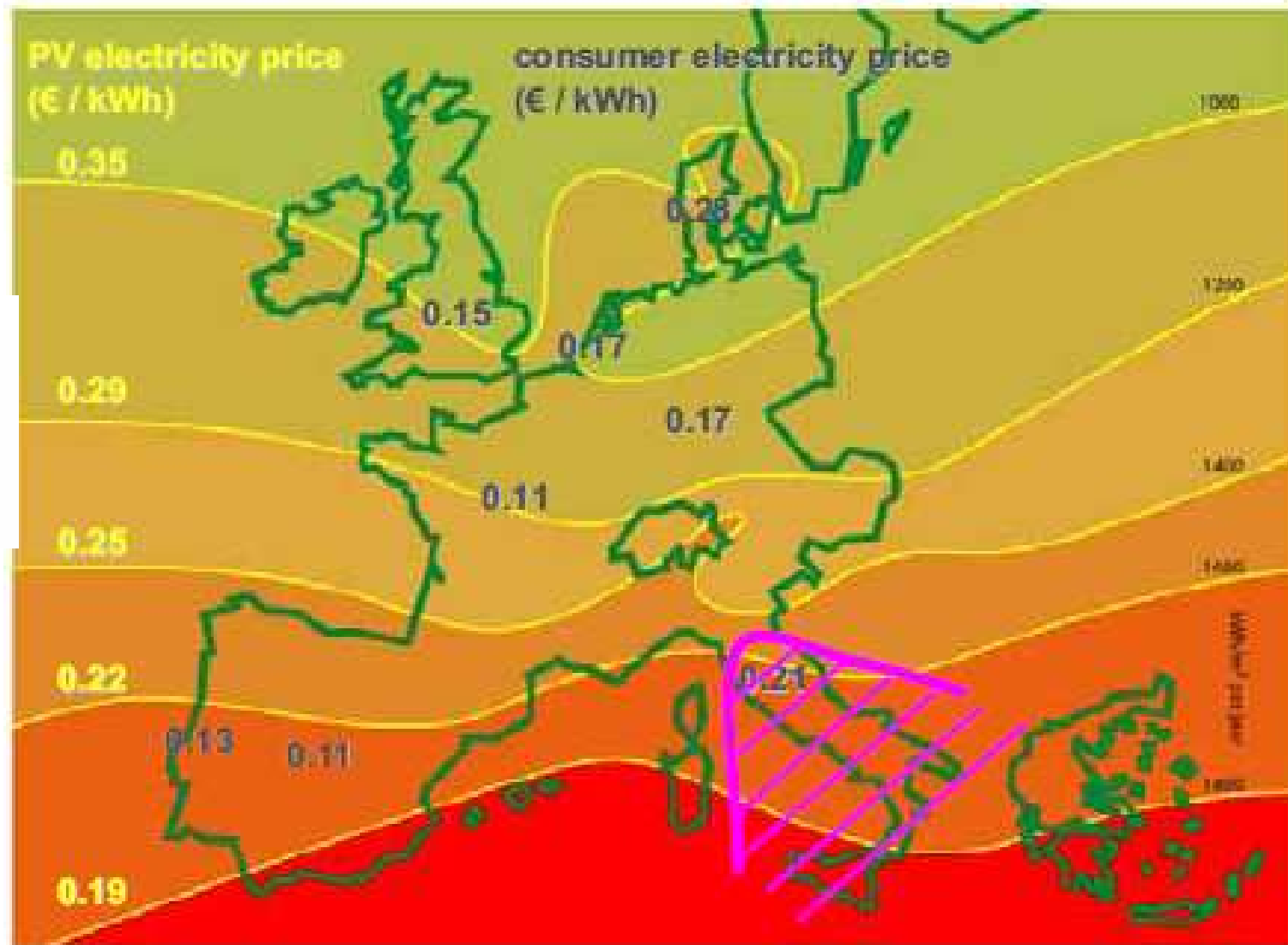
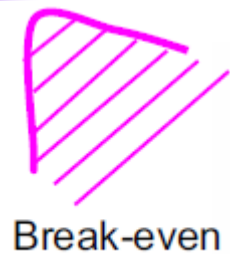


La part des énergies solaires thermiques et photovoltaïques reste très faible par rapport à la consommation d'énergie mondiale dominée par les énergies fossiles.

-> Nécessité de rendre ces énergies renouvelables plus compétitives.

Prix de l'électricité PV comparée avec les prix attendus de l'électricité payée par les consommateurs en Europe

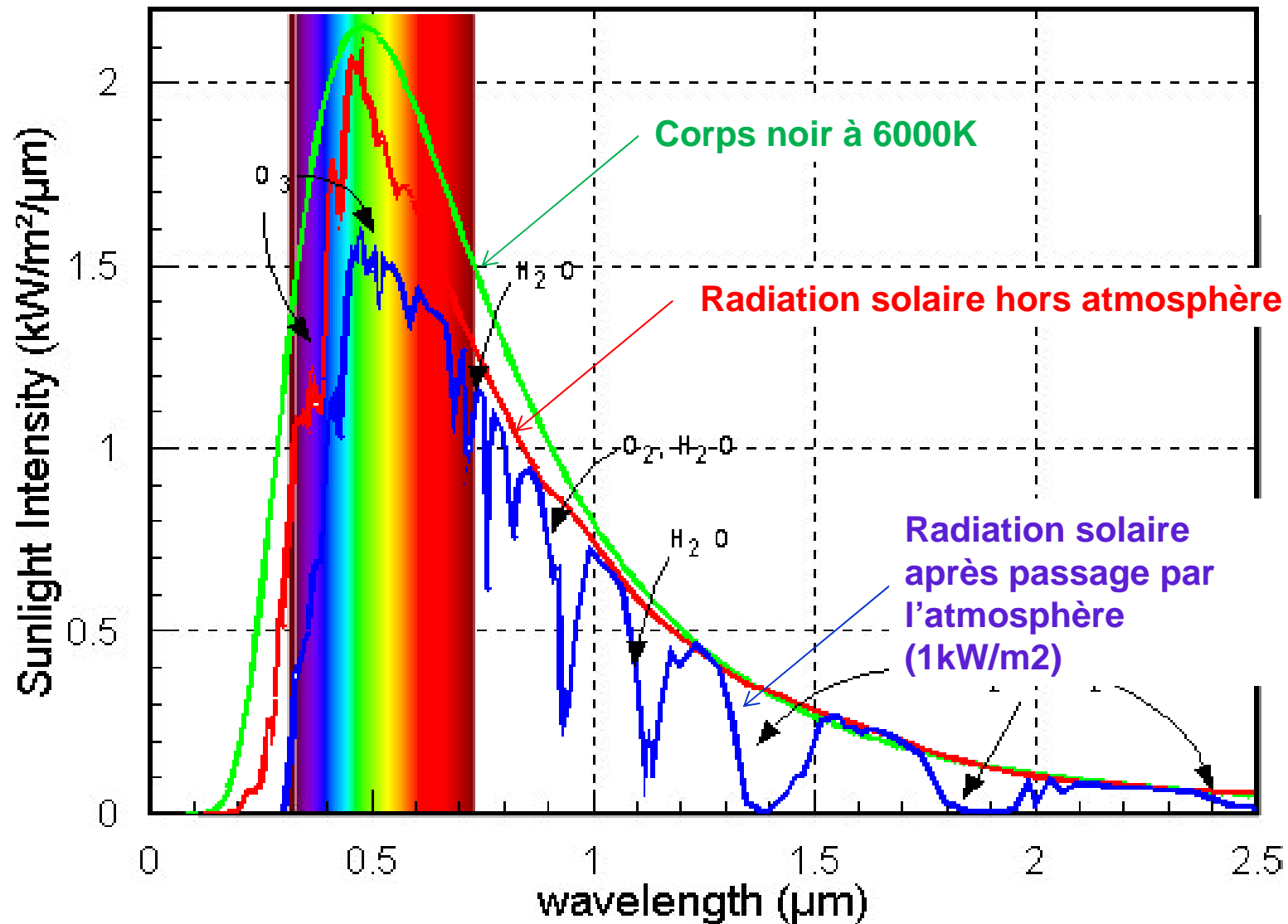
Source: EU PV Platform



Comment fonctionne une cellule photovoltaïque ?

- Energie incidente: soleil
- Semiconducteur convertisseur de lumière en charges électriques :
 - Propriétés d'absorption de la lumière
 - Propriétés de conduction électrique
- structure ou dispositif adapté à la collecte du courant :
 - Diode (jonction P/N) : champ électrique

Radiation solaire

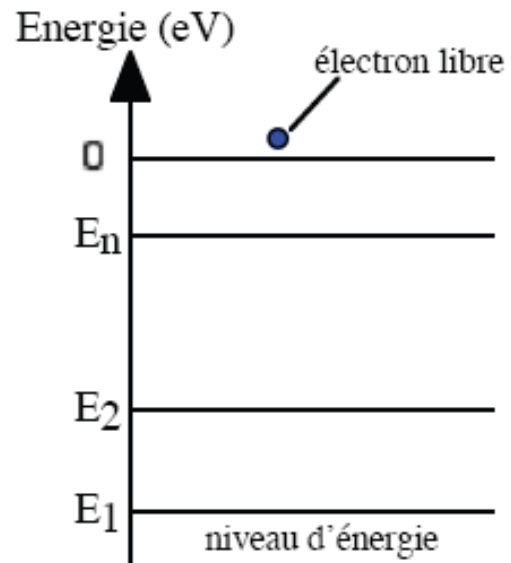


Energie du photon :

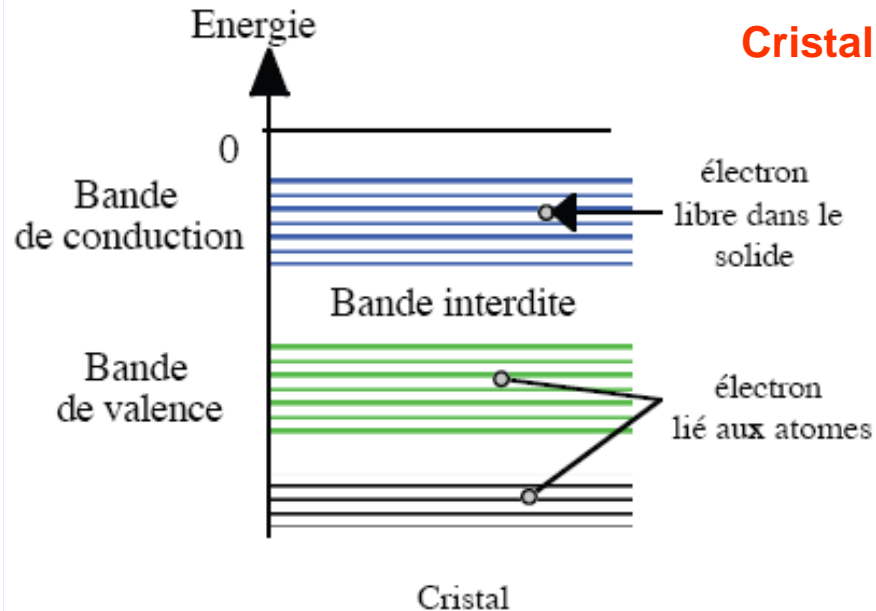
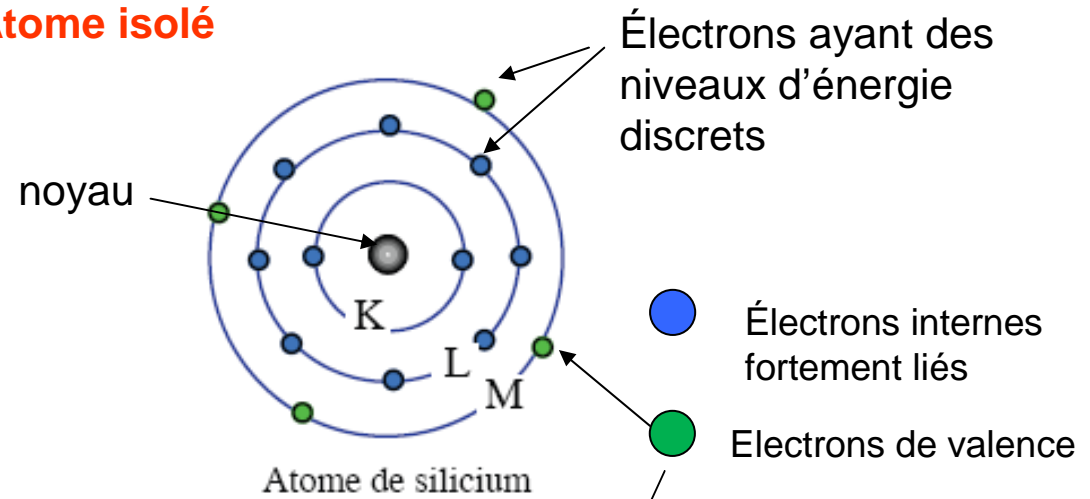
$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda}$$

h : constante de Planck
c : vitesse de la lumière
 λ : longueur d'onde

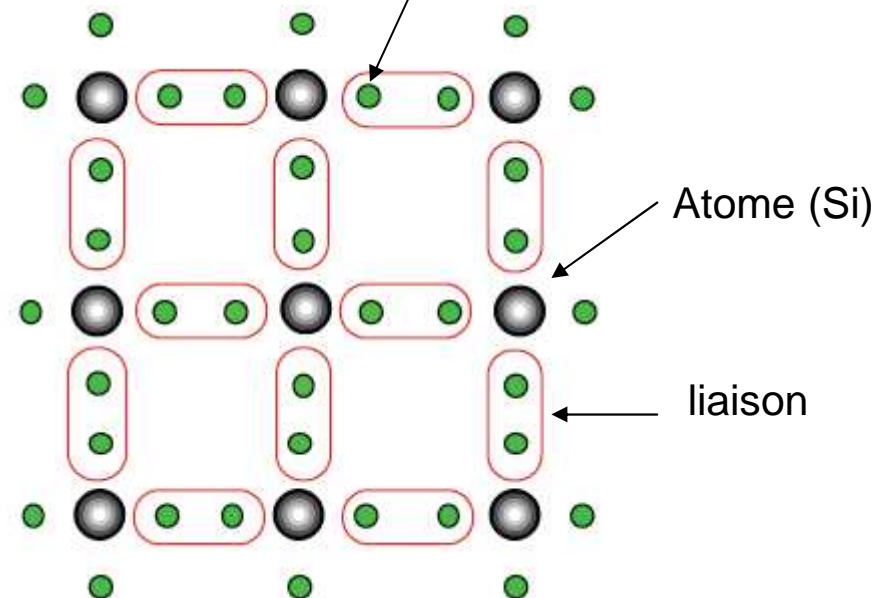
Propriétés des matériaux semiconducteurs



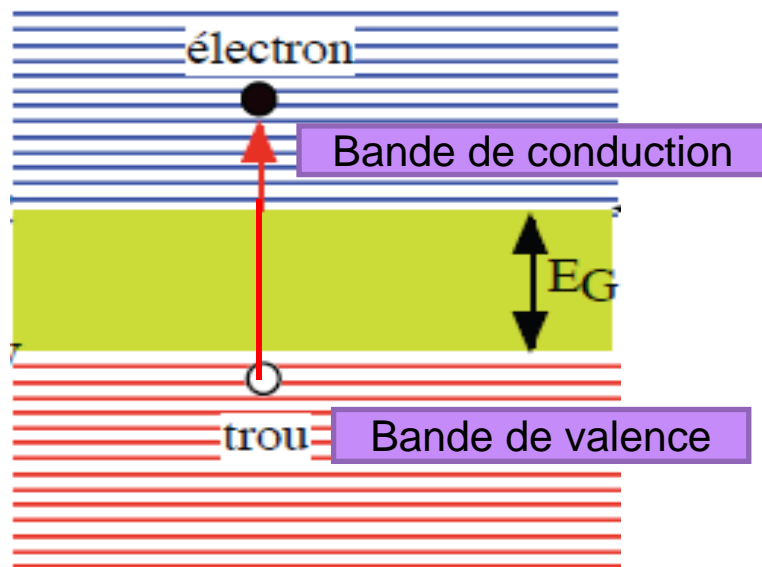
Atome isolé



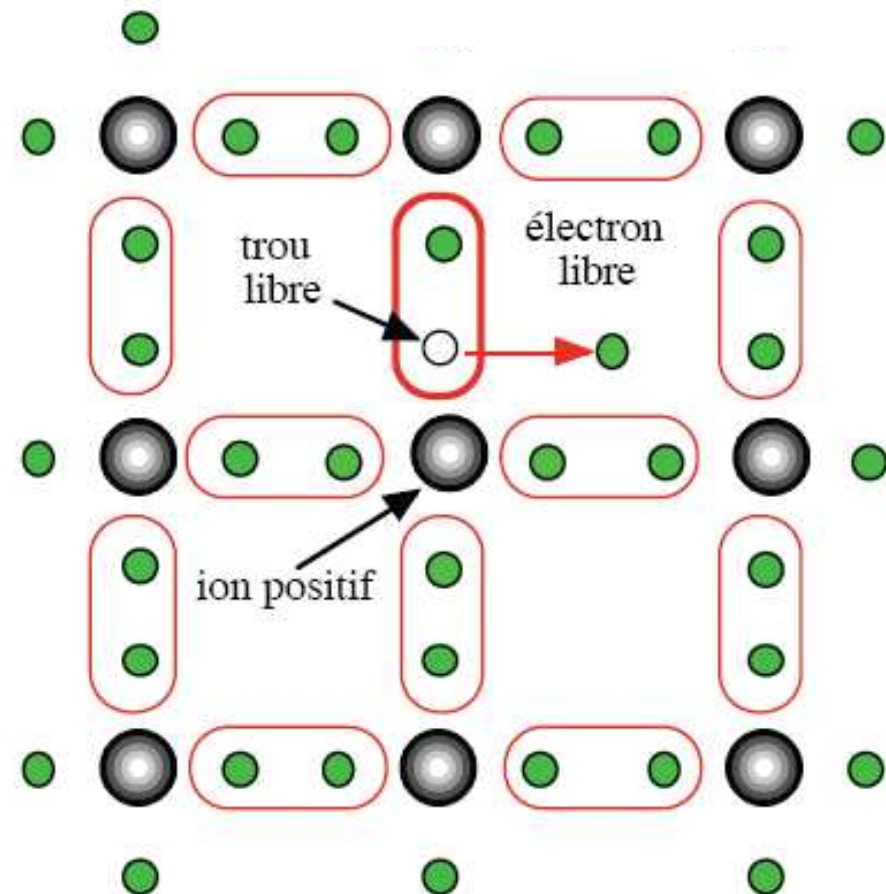
Cristal



Si un électron de valence acquiert une énergie (lumière ou thermique) $> E_g$ (bande interdite), il peut passer dans la bande de conduction, circuler librement dans le solide et participer à la conduction électrique.

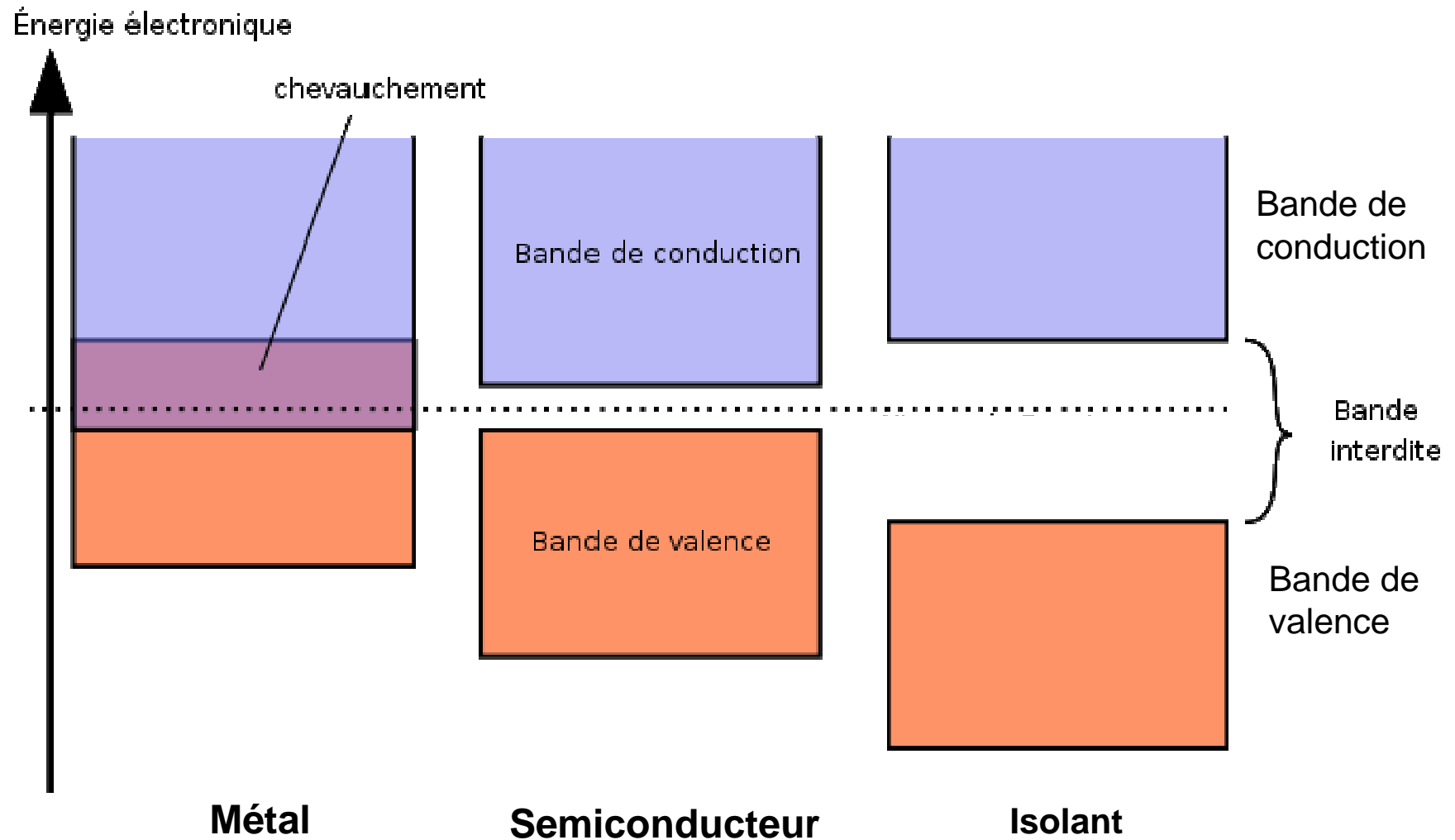


Exemple du Silicium



Création d'une paire électron trou par rupture d'une liaison σ sous l'effet de la température

Les positions respectives entre les bandes de valence et bande de conduction vont déterminer le comportement électrique des matériaux et permettre la classification suivante :

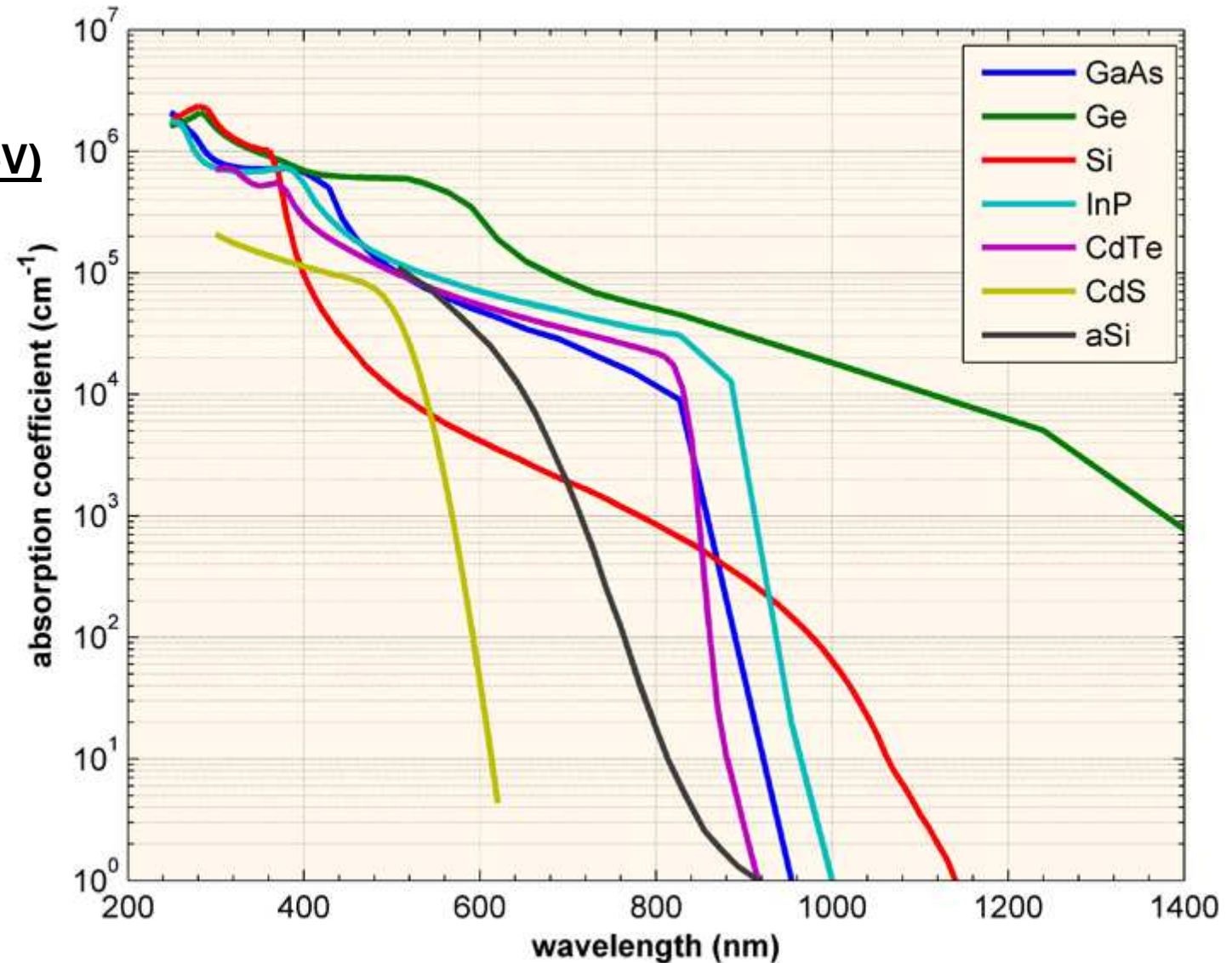


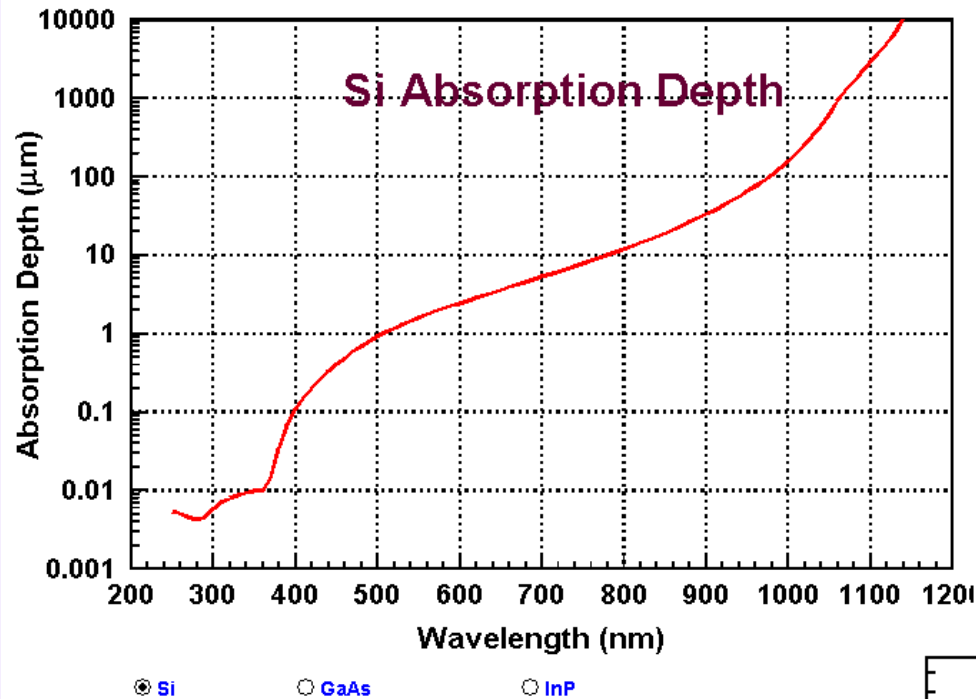
Le **coefficient d'absorption α** caractérise les propriétés « absorbantes » du matériaux semiconducteur et permet de choisir un matériau adapté pour la conversion photovoltaïque.

Il est lié au gap (bande interdite).

Matériau	Gap(eV)
----------	---------

InSb	0,2
InAs	0,4
Ge	0,6
CIS	1,06
c-Si	1,12
GaAs	1,43
CdTe	1,44
a-Si	1,72
AlAs	2,2
GaP	2,35
CdS	2,42





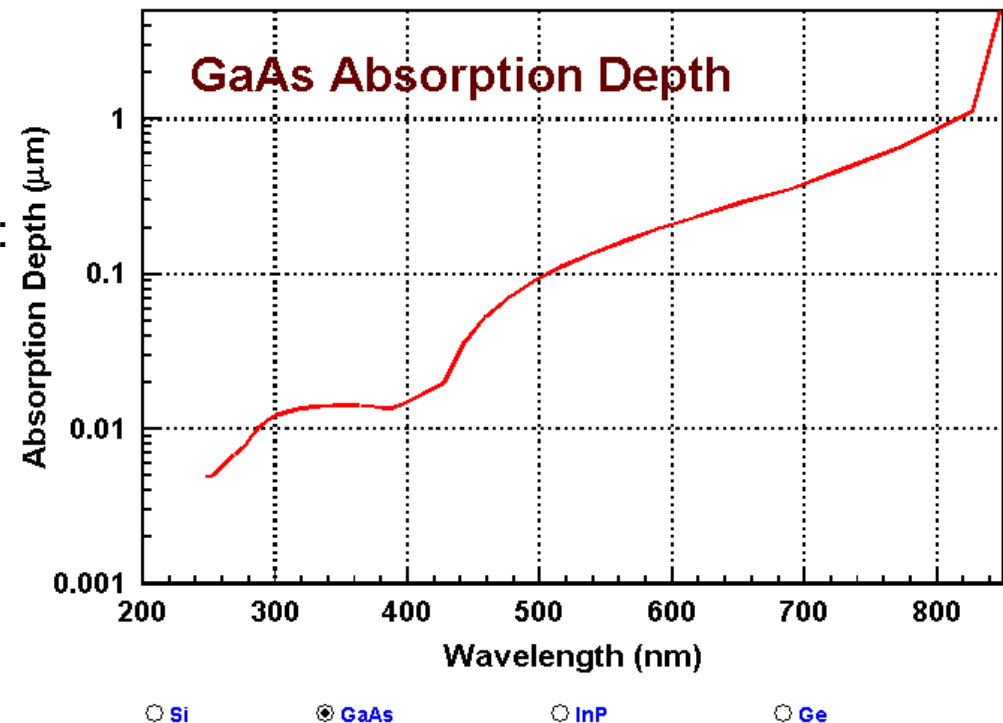
$1/\alpha$ indique l'épaisseur de matériau nécessaire pour absorber environ 70% du rayonnement incident à une longueur d'onde donnée.

-> Il faudra beaucoup plus de silicium que GaAs pour absorber la même quantité de rayonnement

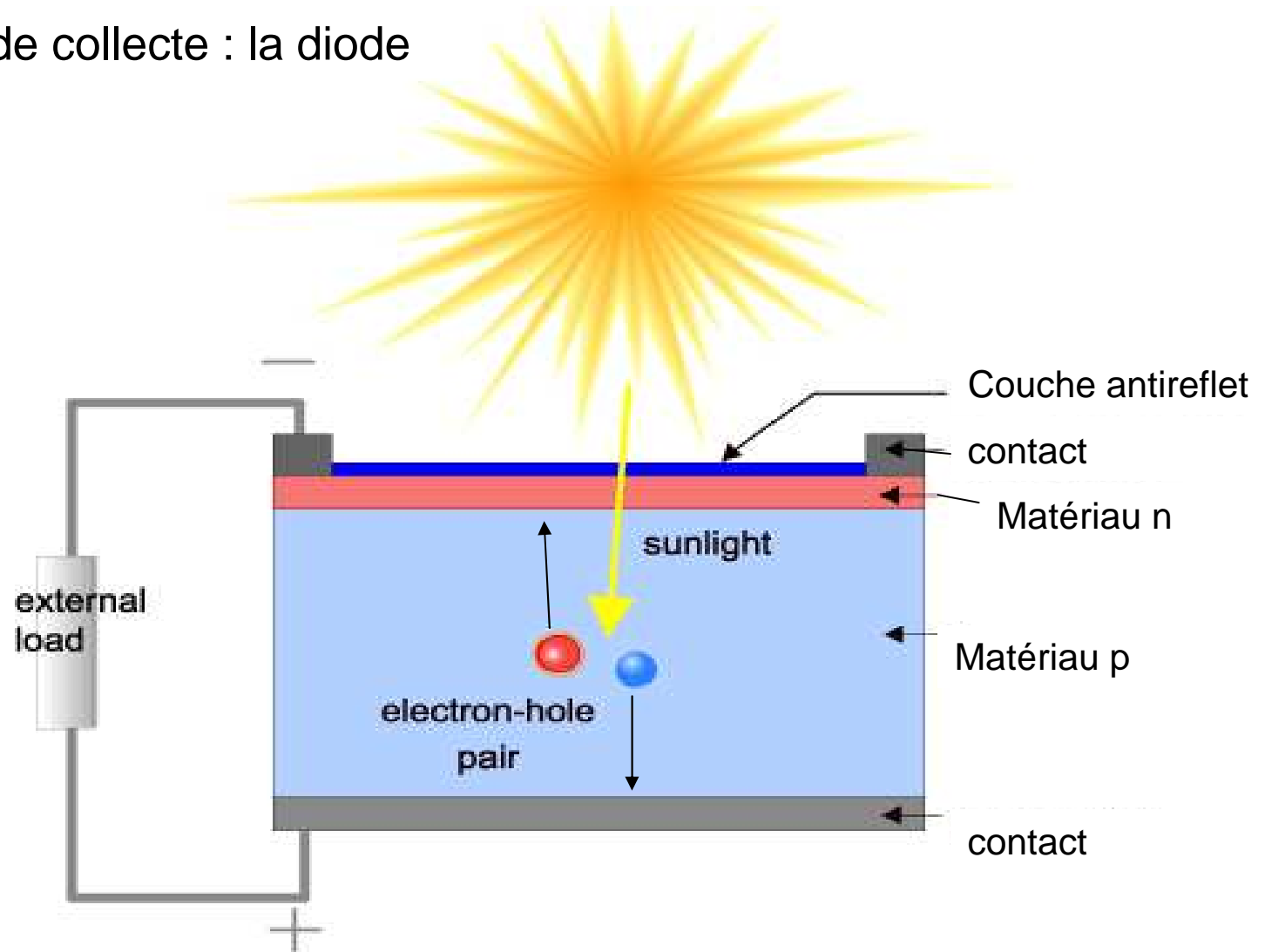
Intensité de la lumière à la profondeur x (loi de Beer-Lambert):

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

I_0 : intensité incidente



La structure de collecte : la diode



Cette structure (jonction pn ou diode) est nécessaire pour collecter les charges électriques.

Paramètres importants

η : Rendement

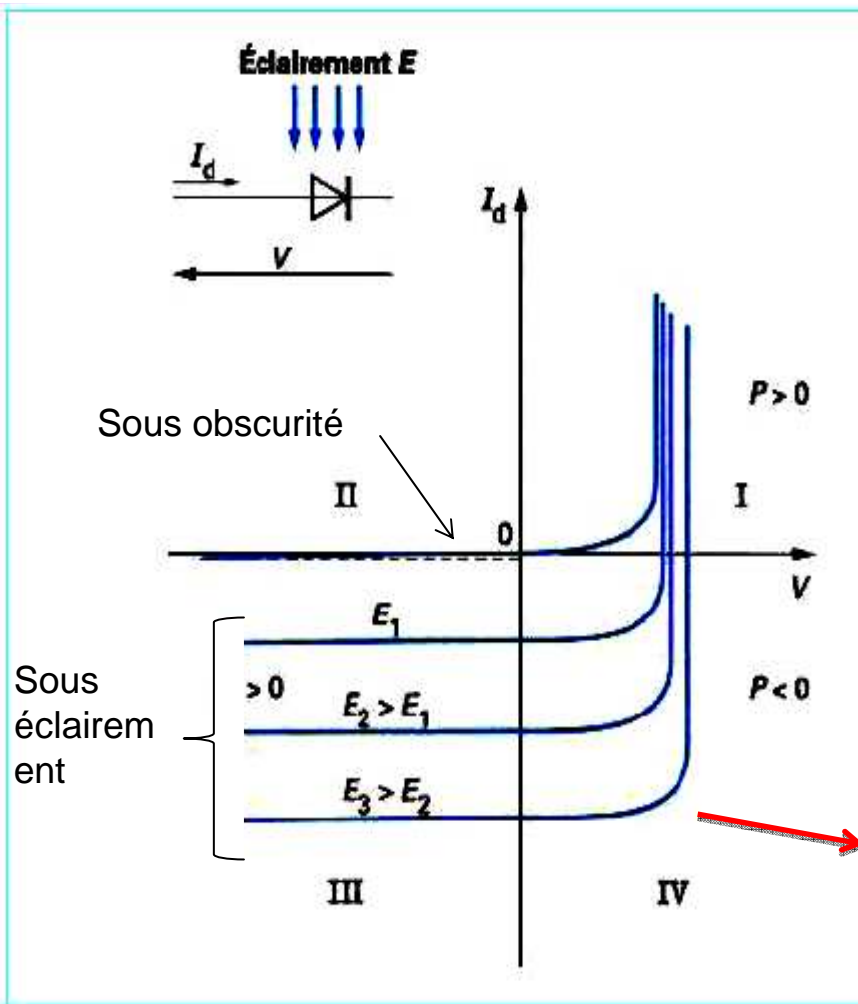
V_{mp} : tension à la puissance maximale

I_{mp} : courant à la puissance maximale

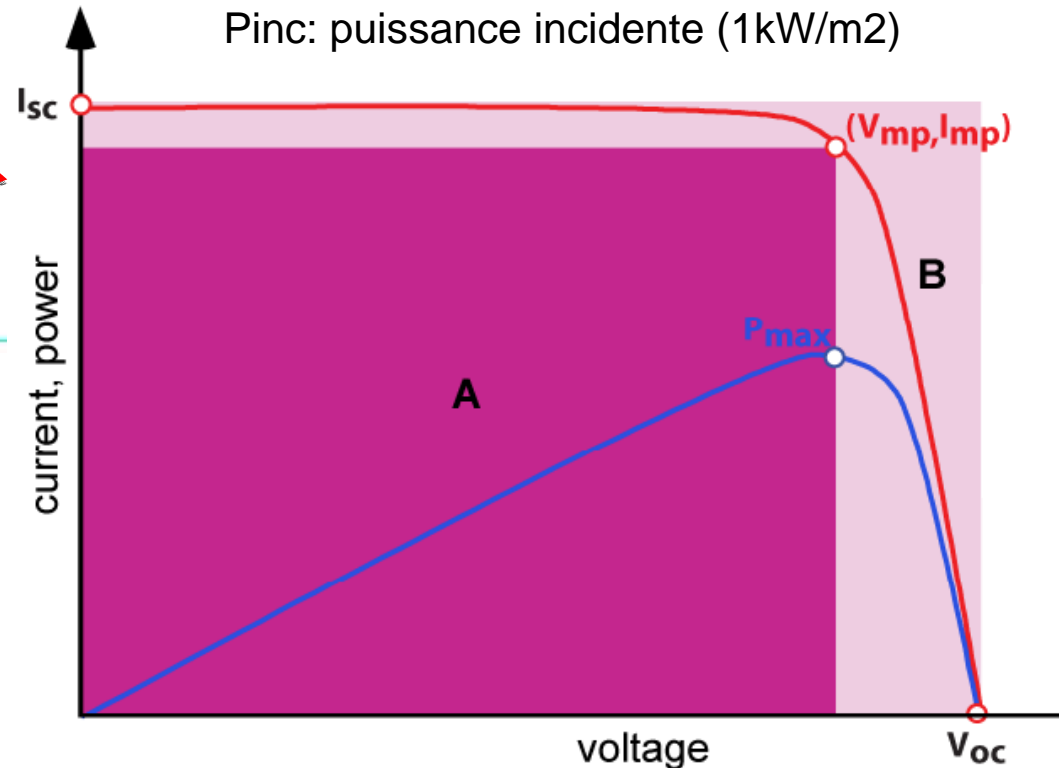
P_{max} : puissance maximale fournie :

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$$

P_{inc} : puissance incidente (1kW/m2)



$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}}$$



3 générations de cellules solaires

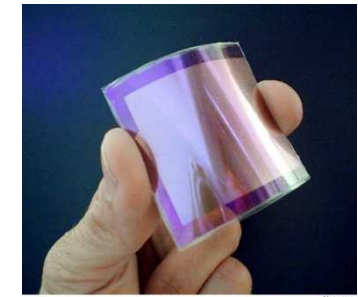
■ Première génération : Si massif (200-300 μ m)

- Technologie mature
- 2-4 €/W ; 14-19%



■ Seconde génération : couches minces/faibles coûts

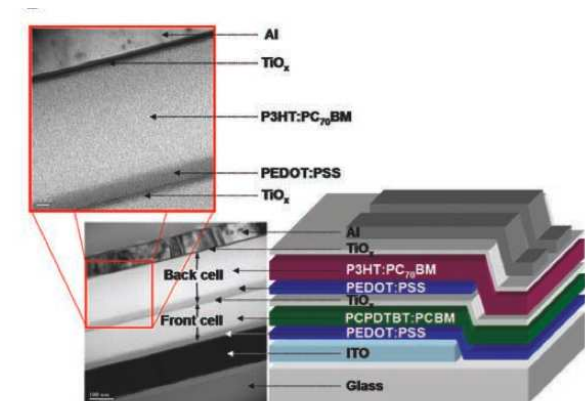
- Si amorphe
- Matériaux composés (CuInGaSe, CdTe...)
- <1 €/W : 6-12%



■ Troisième génération : Nouveaux concepts

- Concentration : matériaux III-V
- Multijunctions...
- Structures complexes

■ Technologies émergentes : Cellules solaires organiques





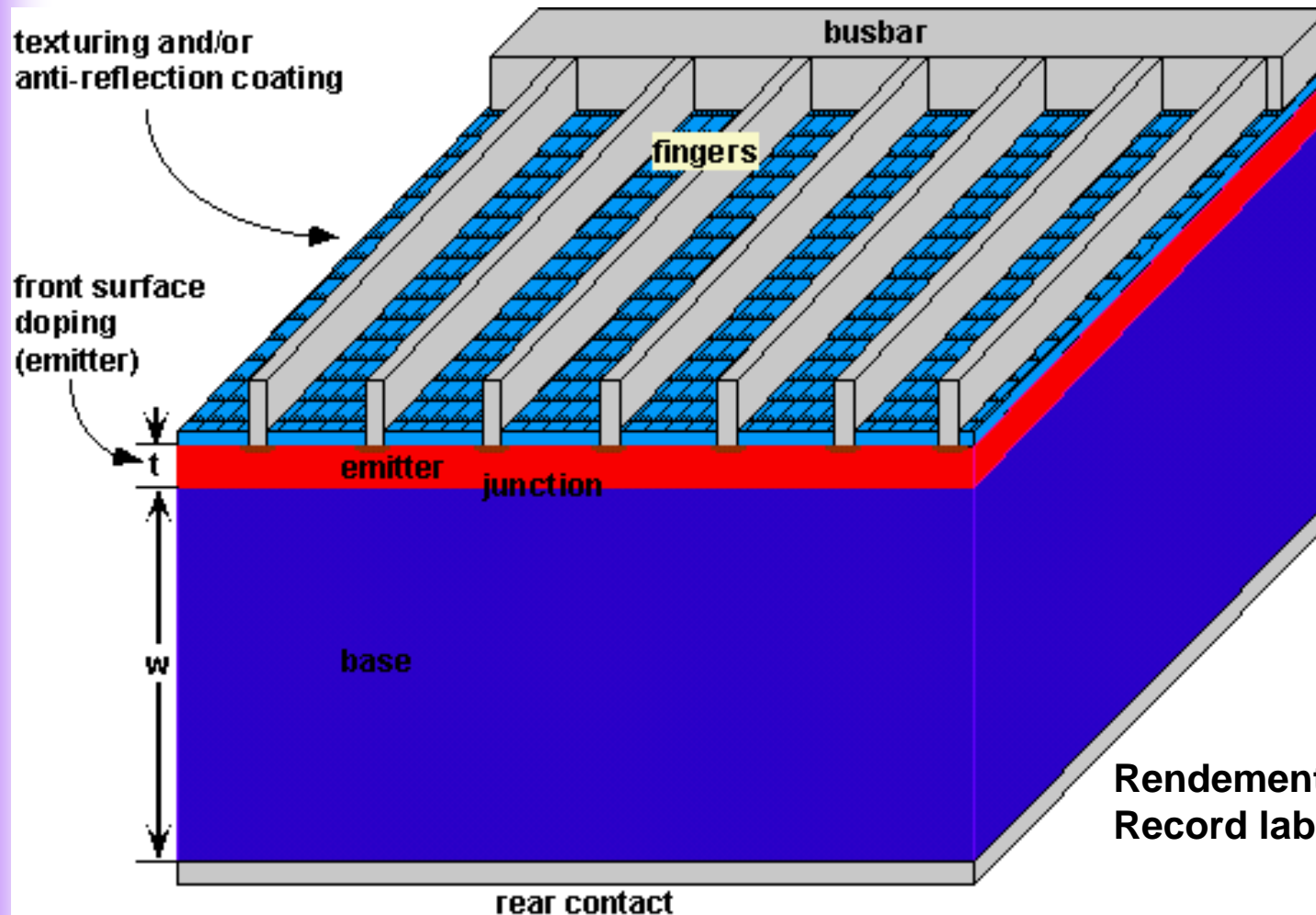
Première génération

Silicium massif

Silicium : environ 80% de la production photovoltaïque

- Abondance en Si: 26% de la surface de la terre (Silice)
- Savoir faire de l'industrie microélectronique

Structure de base d'une cellule solaire de première génération



Rendements industriels : 14-20%
Record laboratoire : 25%

Optimisation des:

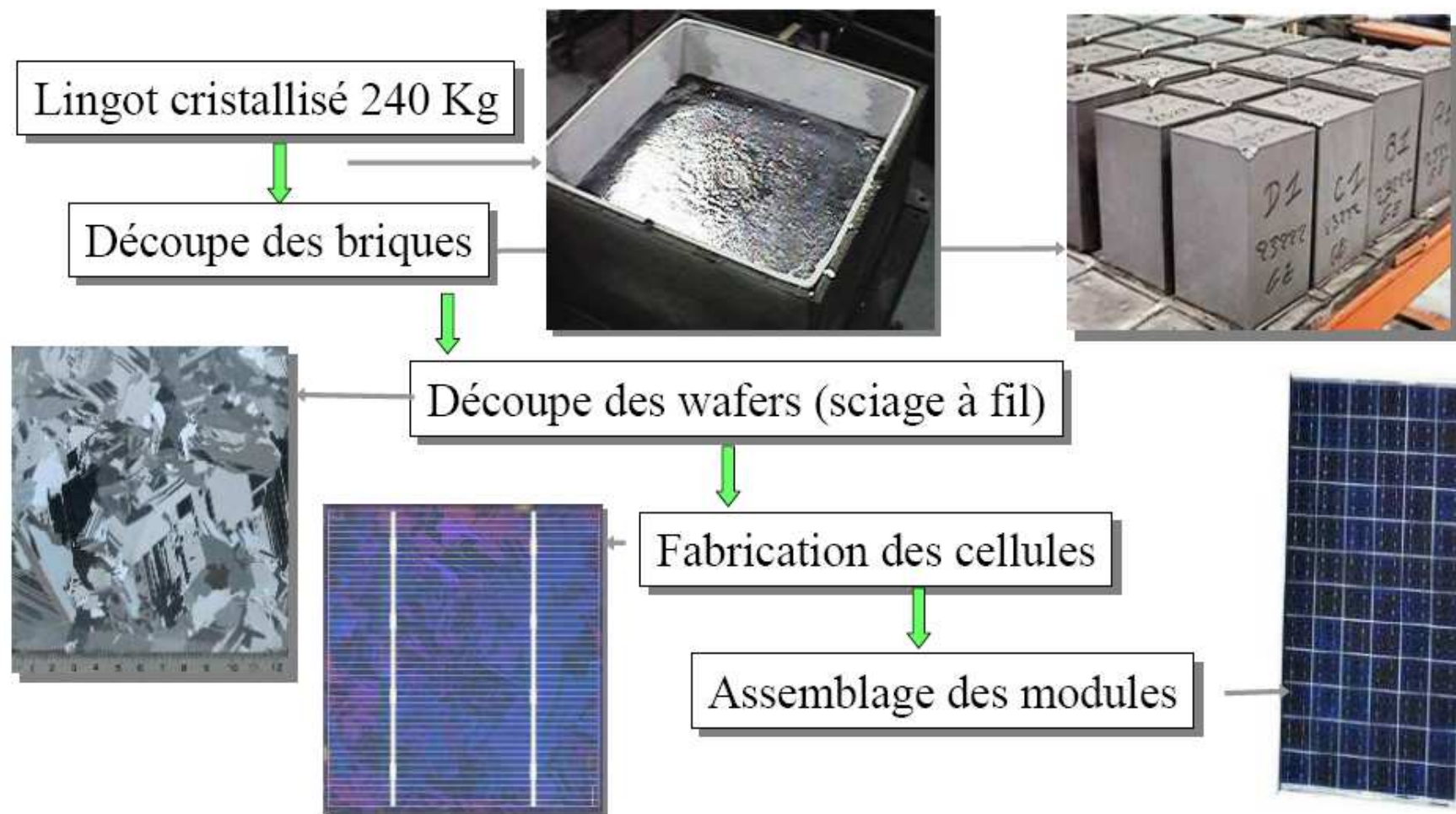
- Pertes optiques (ombrage dû aux métallisations, réflexions...)
- Recombinaisons (perte) des charges électriques (aux défauts, impuretés ...)
- Pertes de puissance en raison de la résistance série (métallisations,...)

Un procédé industriel adapté au silicium multicristallin

Cellules de 1^{ère} génération



Production verticalement intégrée



Silicium source :

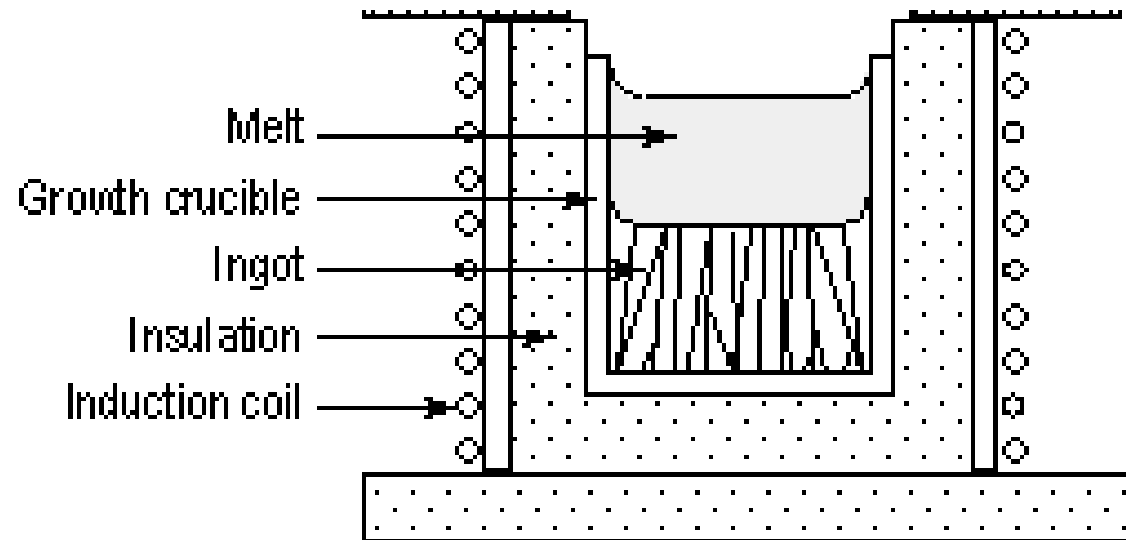
- Rebus de la microélectronique
- Production propre au PV



Silicium multicristallin

- Solidification directionnelle :
 - Fusion et stabilisation du bain
 - 1450 °C (10 à 20 h)
 - Solidification
 - Vitesse : 0,1 mm/min (30 à 40 h)

Le silicium est placé dans un creuset et porté à 1500°C. Après la phase de fusion, le creuset est refroidi.

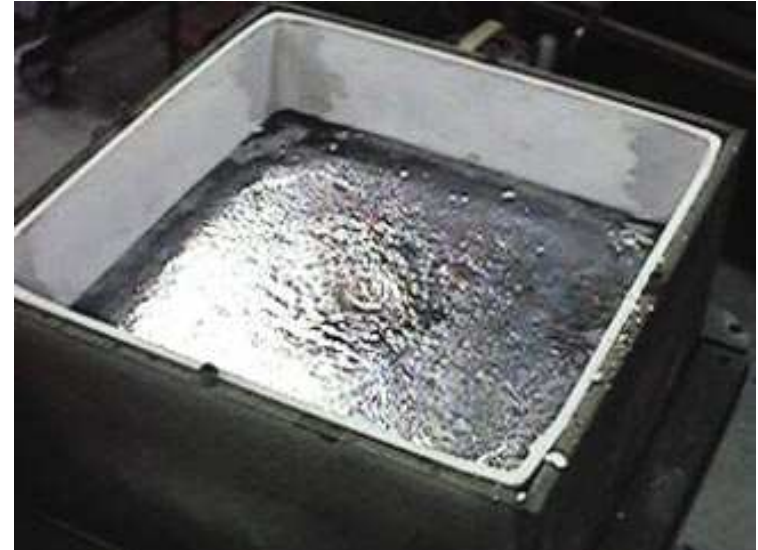


■ Découpe du lingot

- Matériau Si obtenu :
Bon compromis coût/qualité



Lingot

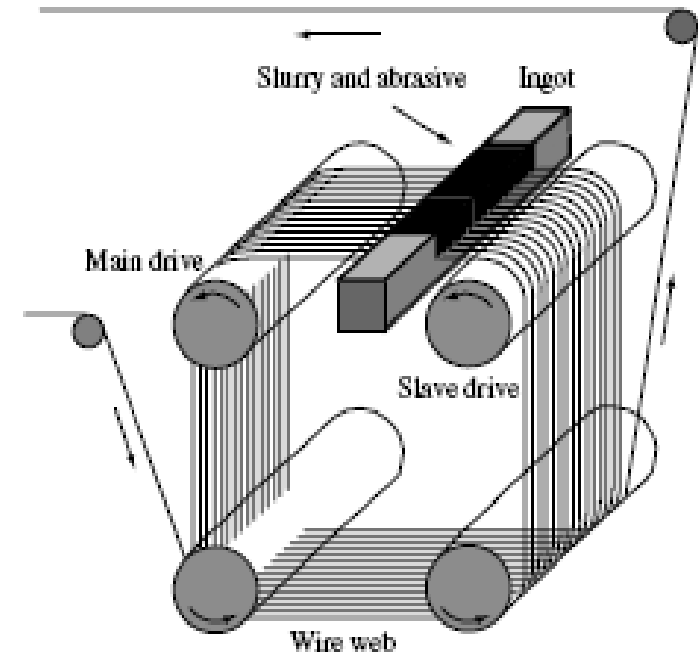


Après sciage



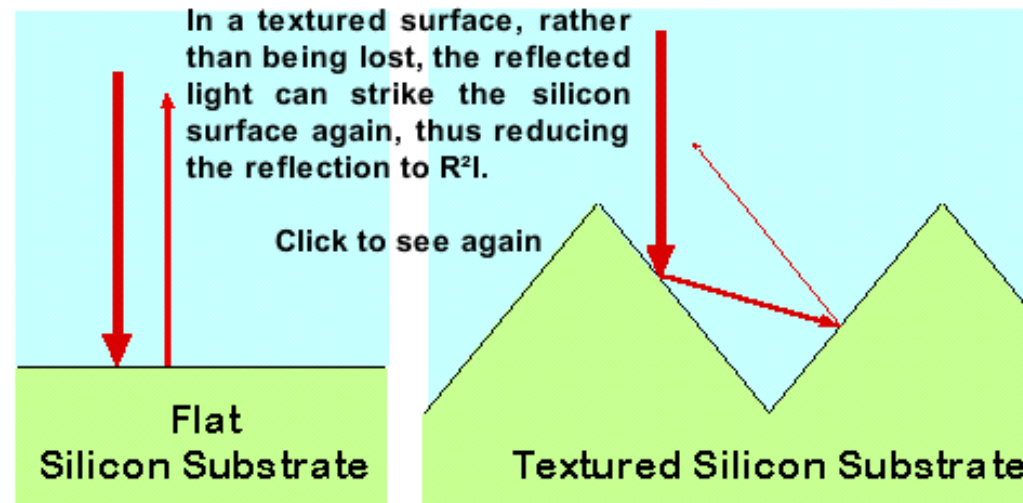
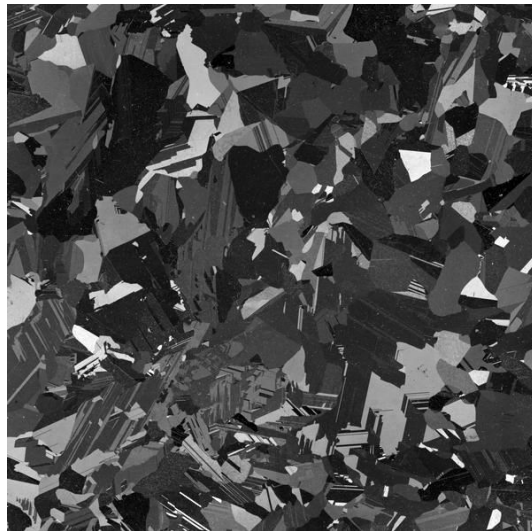
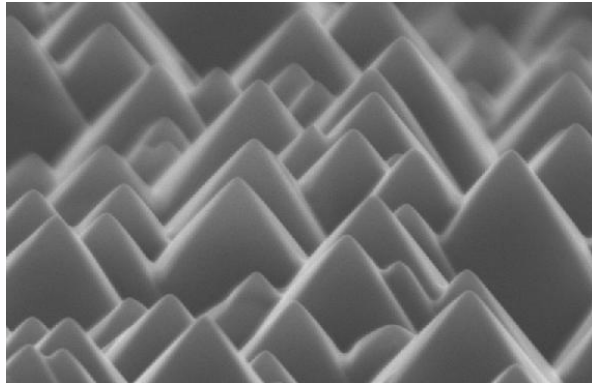
Production des wafers

- Découpe des wafers par scies à fil (2-6 h)
 - Fil : 180 μm + SiC
 - Wafers : 180 à 300 μm
 - 50% du silicium est perdu



Les fils servent de véhicule à un mélange abrasif déposé en continu, qui rode et découpe le silicium en plaques carrées.

Texturisation : attaque chimique (soude ou potasse) afin d'augmenter la rugosité de la surface et diminuer sa réflectivité.

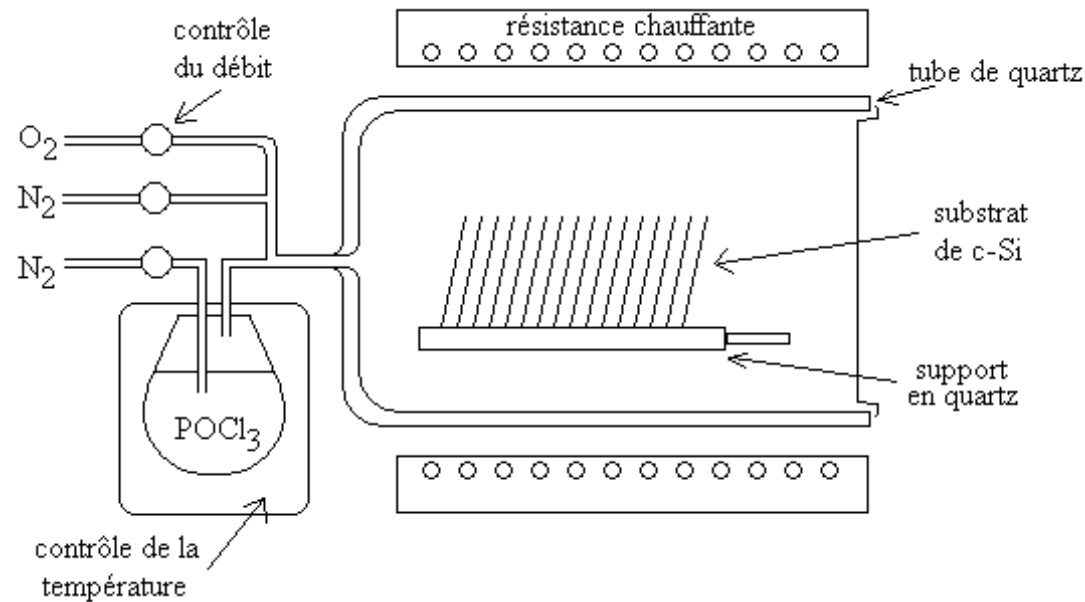


Réalisation de la « zone n » par diffusion de phosphore

Junction formation by doping.

Heating the wafer in a furnace (800 - 1000 °C) with a phosphorous atmosphere causes small amounts of phosphorous to be incorporated in the outer layers of silicon.

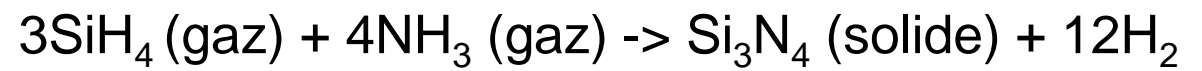
phosphorous atoms
produce n-type layer



Dépôt de nitrure de silicium SiNx comme couche antireflet



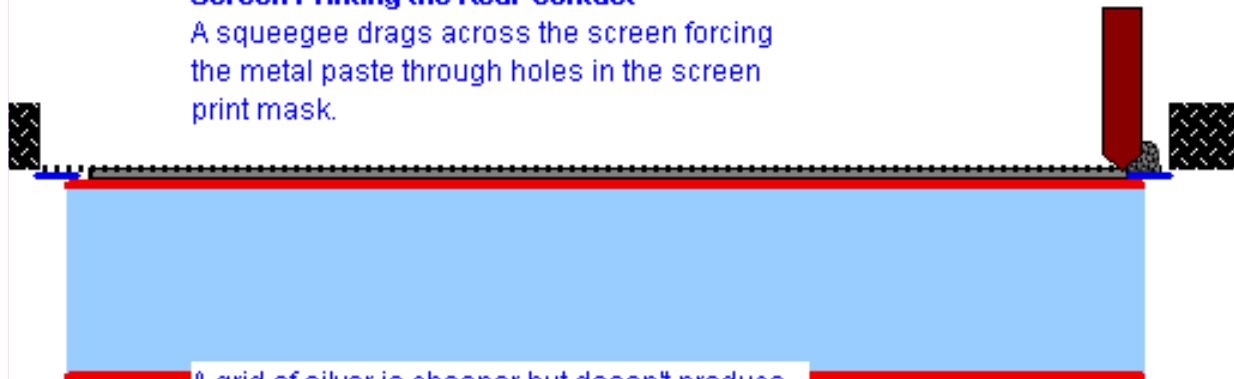
Le dépôt se fait en phase gazeuse :



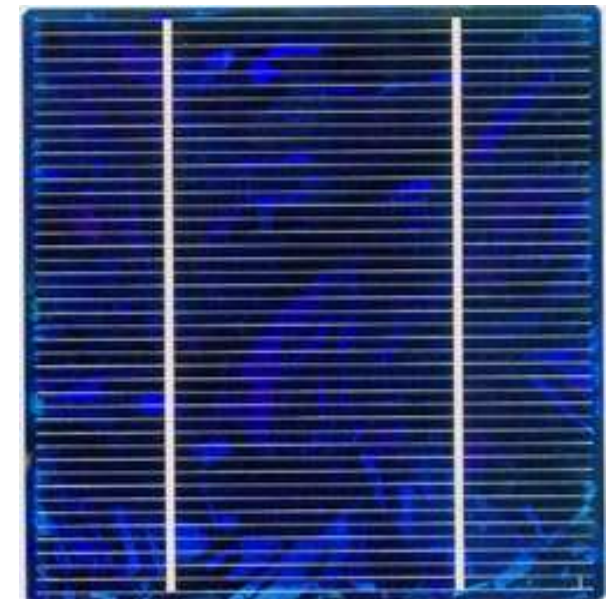
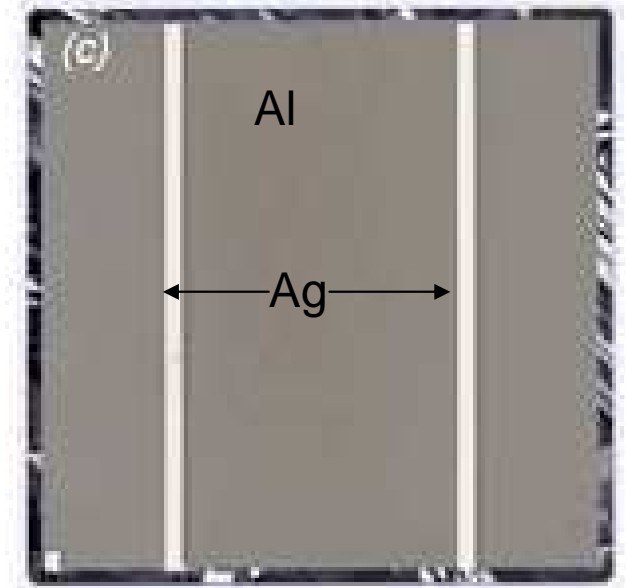
Sérigraphie puis cuisson (800°C) des contacts avant e t arrière

Screen Printing the Rear Contact

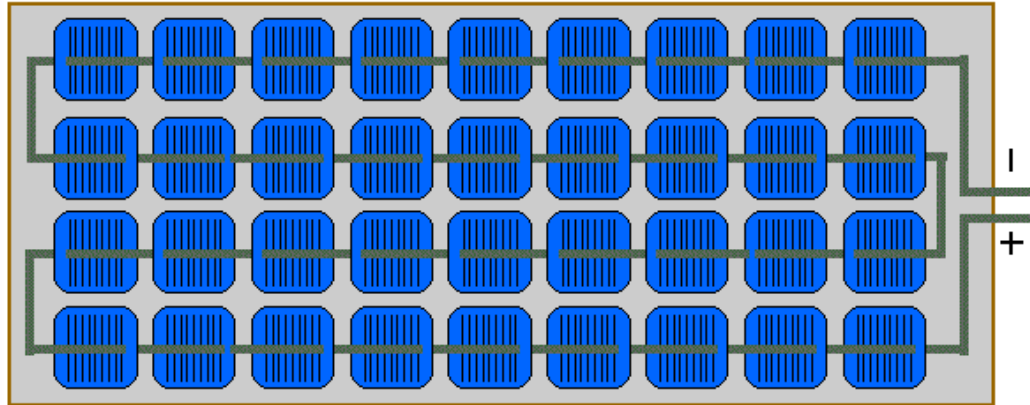
A squeegee drags across the screen forcing the metal paste through holes in the screen print mask.



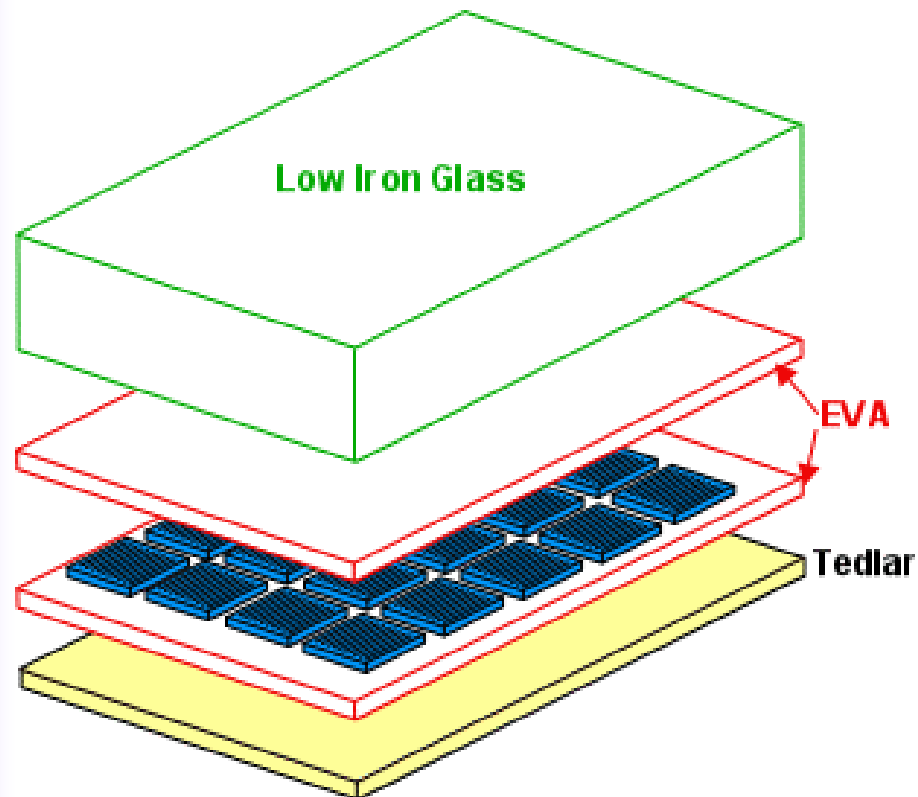
A grid of silver is cheaper but doesn't produce a back surface field (BSF). Aluminium paste produces a higher performance cell with a BSF but requires a second print of silver paste for a solderable contact.



A typical module has
36 cells in series

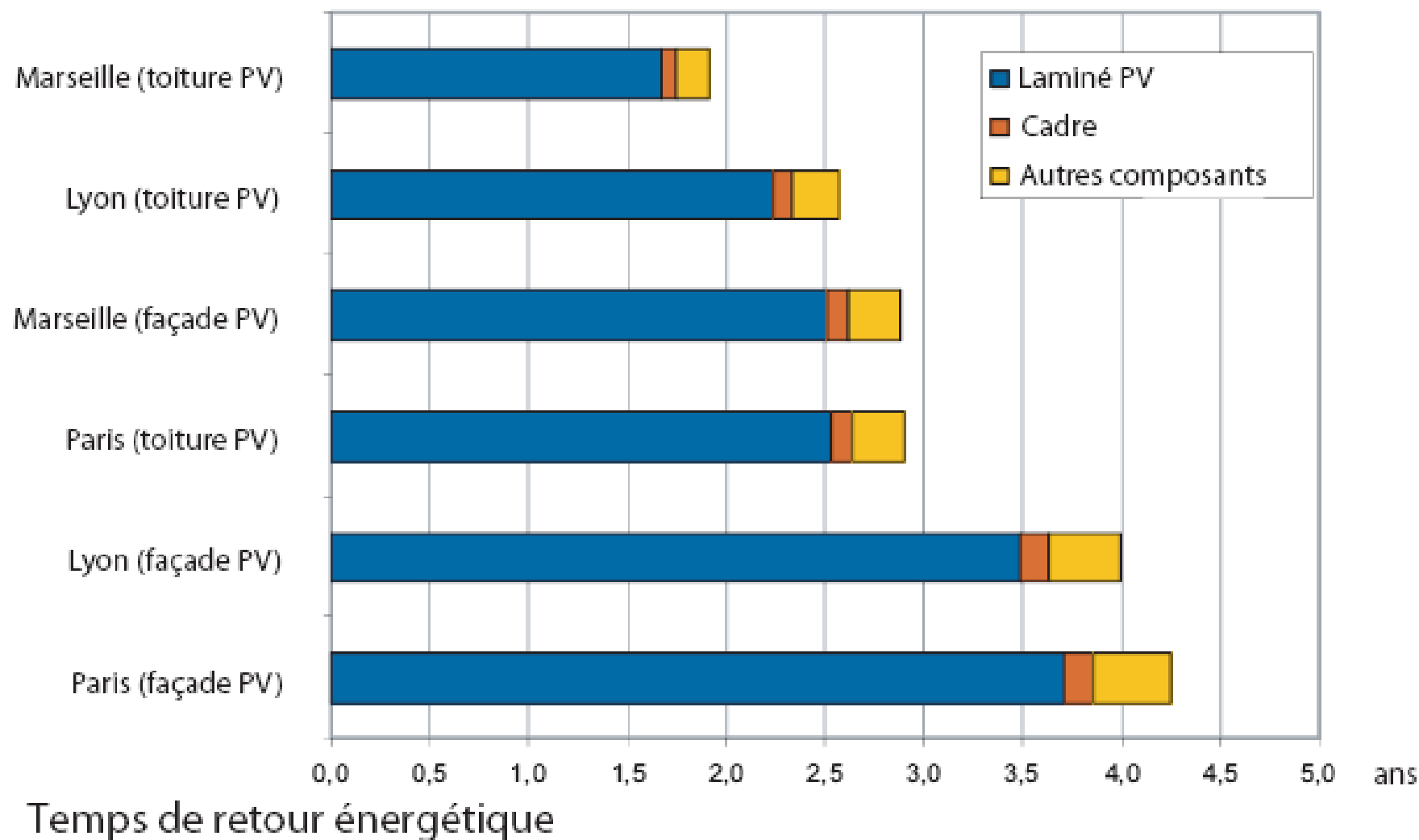


Les cellules sont assemblées
dans le module.



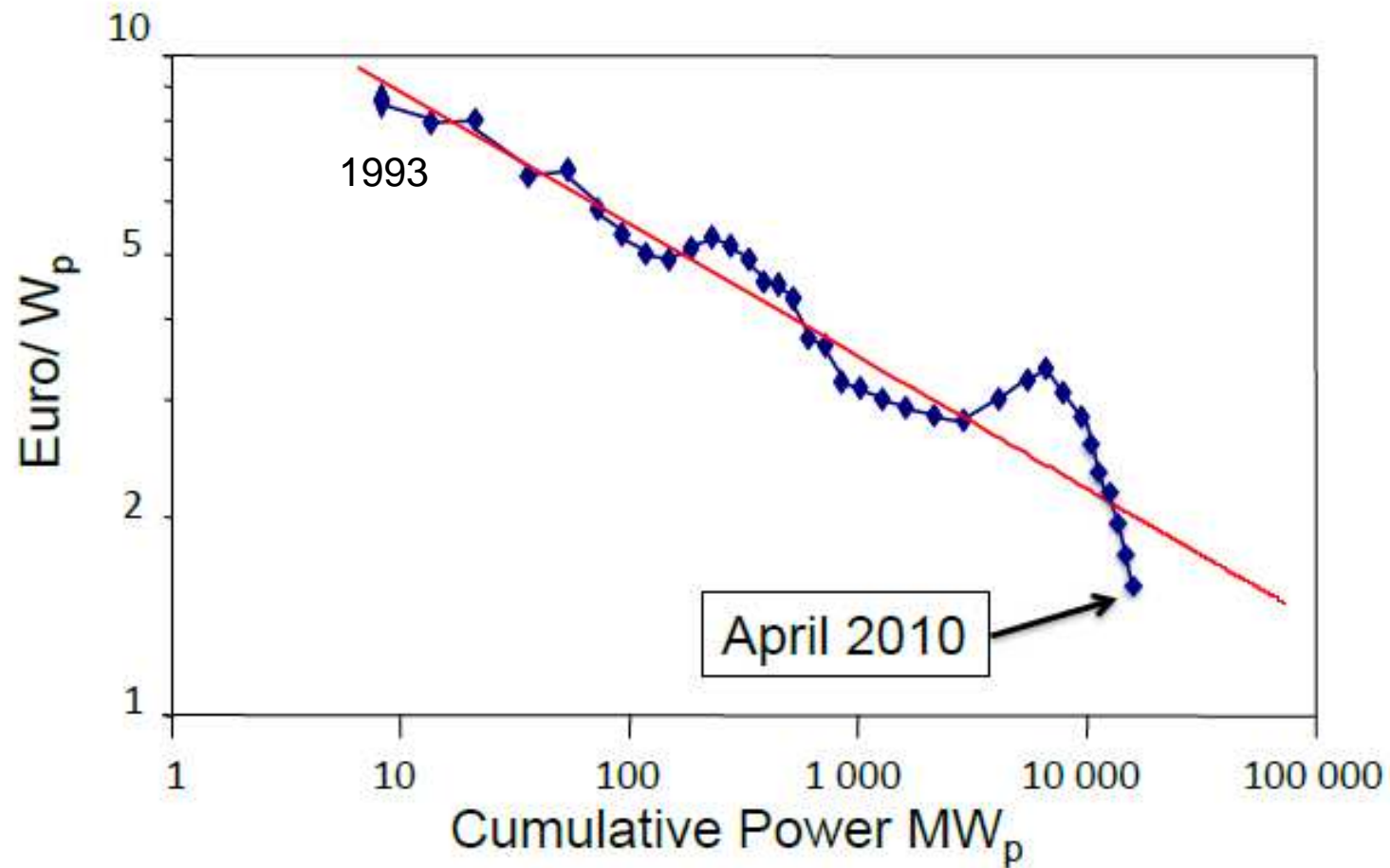
Les cellules sont placées entre 2
feuilles EVA (acétate de vinyle),
enserrées entre deux verres trempés
ou entre une plaque de verre et une
feuille de Tedlar®.

Technologie Si cristallin : temps de retour énergétique



Temps de retour énergétique : 2-3 ans
Modules garantis 20-30 ans

Silicon-wafer based modules



Source: Solar Generation, IEA-PVPS 2006; SERIS market research 2010

Perspectives : le Silicium Photovoltaïque (PV)

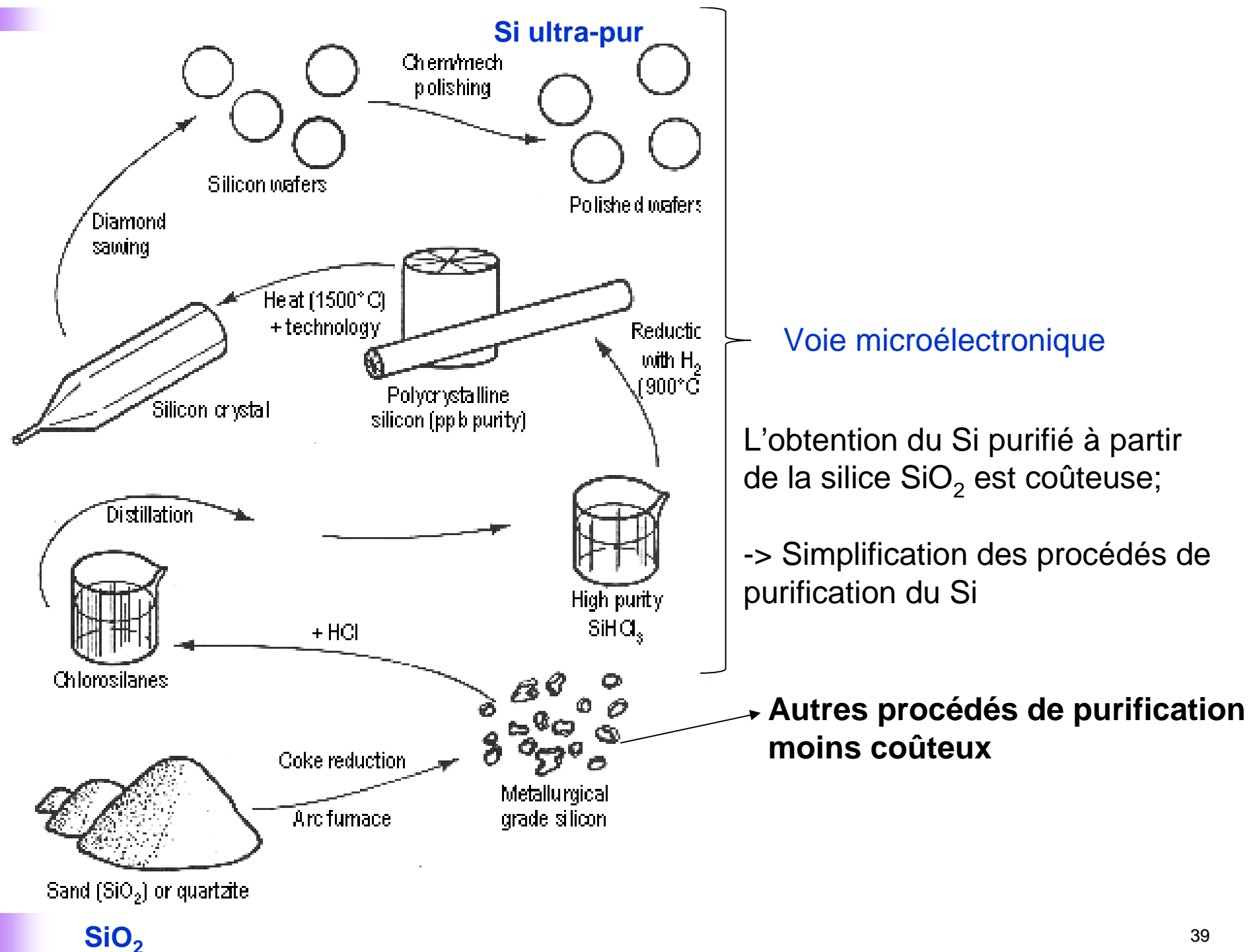
- 80% de la production de cellule PV est en silicium → technologie durable et mature
- Croissance de 30%/an de la production
- Problème prix Si : 40% du prix du module :

Module
31%

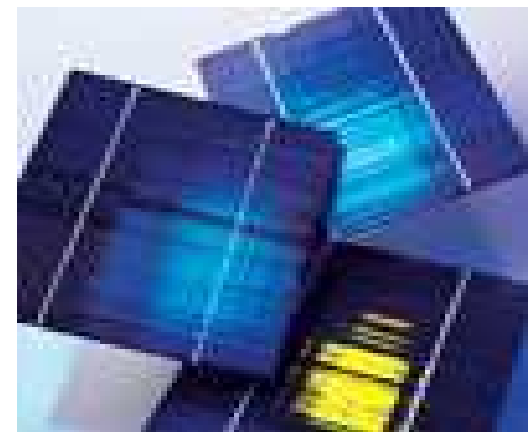
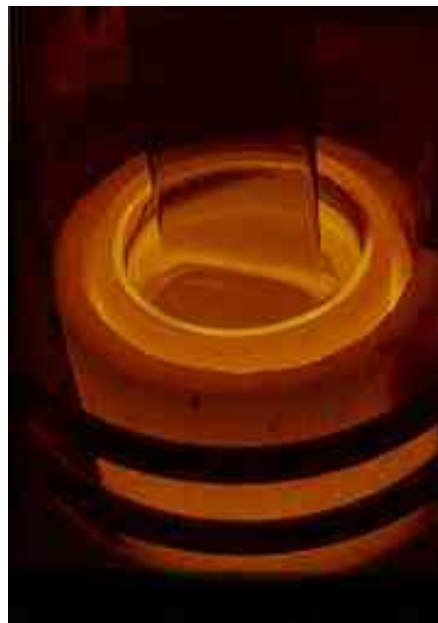
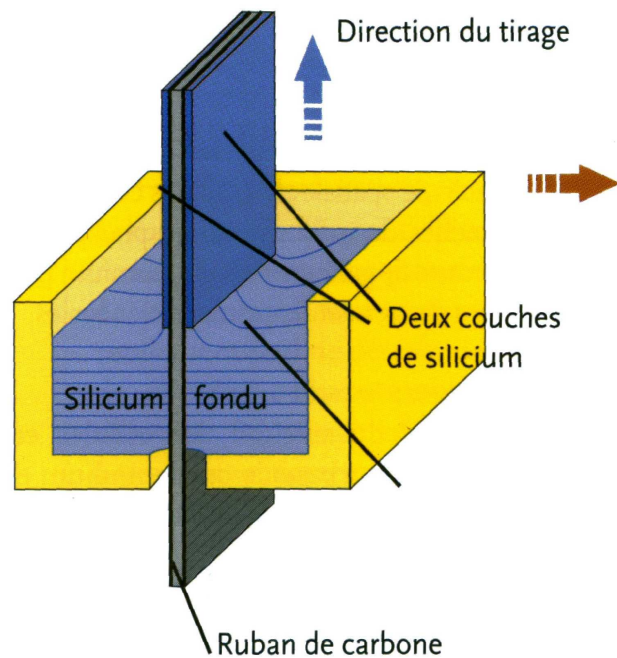
**Technologie
cellule**
23%

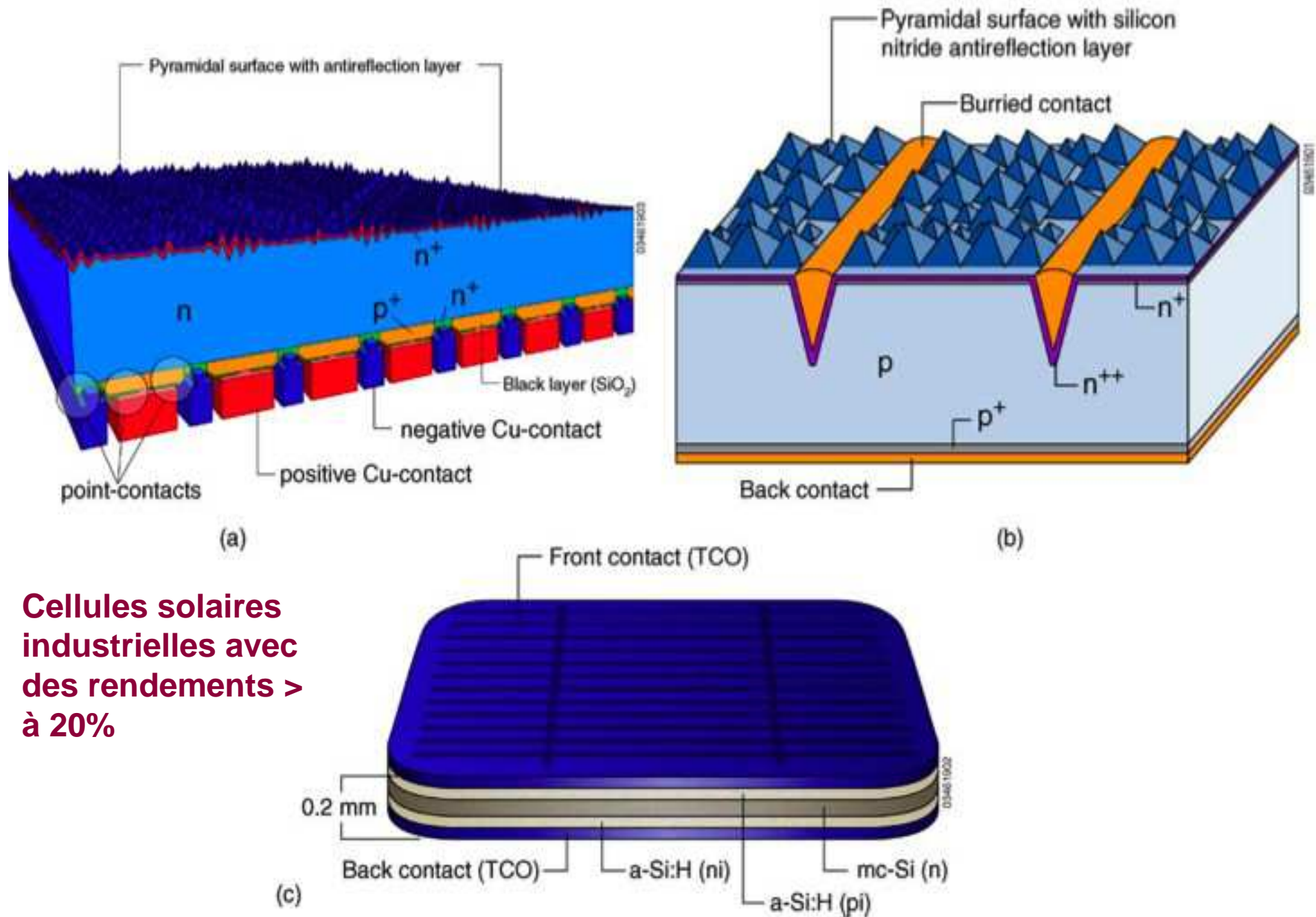
Silicium
46%

- Réduire la consommation en matériau (épaisseur des cellules)
- Utiliser du silicium « basse pureté »



Une autre solution : Supprimer le sciage : les rubans de Si





Cellules solaires
industrielles avec
des rendements >
à 20%

Cellules « Couches minces »

2^{ème} génération

a-Si
CdTe
CIGS

Concept des cellules « Couches minces » : 2^{ème} génération

■ Absorption complète du spectre solaire:

- 700 μm de Si cristallin sont nécessaires
- Matériau coûteux car bonne pureté (40-50% prix du module)



Idée : épaisseur plus faible de matériau : **1-10 μm**

Candidats : **Si amorphe (a-Si), CuInGaSe(CIGS), CdTe**



→ Optimisation :

- collecte des photons : piégeage optique
- collecte des porteurs de charges
- support mécanique (verre ou support souple)

Intégration au bâtiment

- en toiture ou façade, avec transparence partielle



Silicium amorphe (a-SiH) : depuis 70-80

- Matériau ordonné sur des courtes distances : < 1 nm

	c-Si	a-SiH
Coef. absorption	Faible	fort
Qualité	Fort	faible
Epaisseur cellule (μm)	180 - 300	0.5 - 2

Une épaisseur de $1\mu\text{m}$ déposée à $T < 150^\circ\text{C}$ sur du verre ou un substrat souple suffit !

Coût très compétitif

Mais :
- matériau instable : rendement baisse avec le temps
- rendements faibles : 6-8%



Le dépôt Roll-to-Roll sur substrat souple

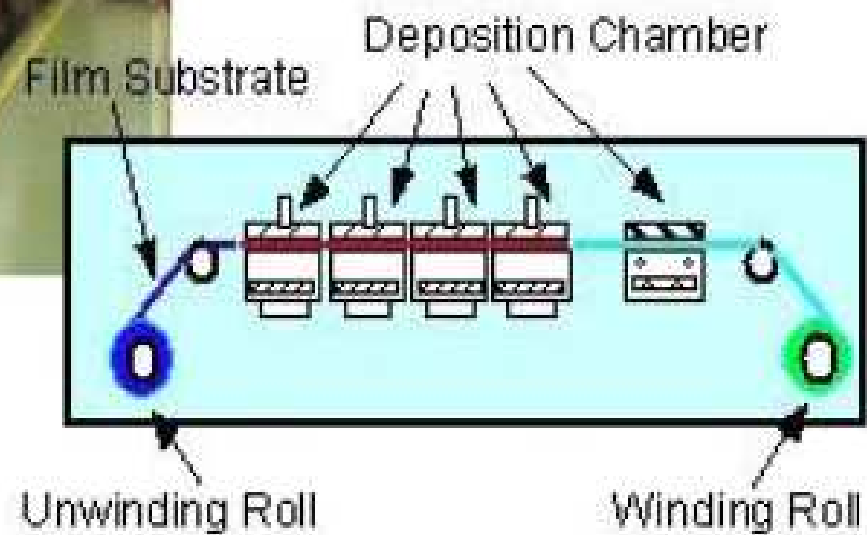
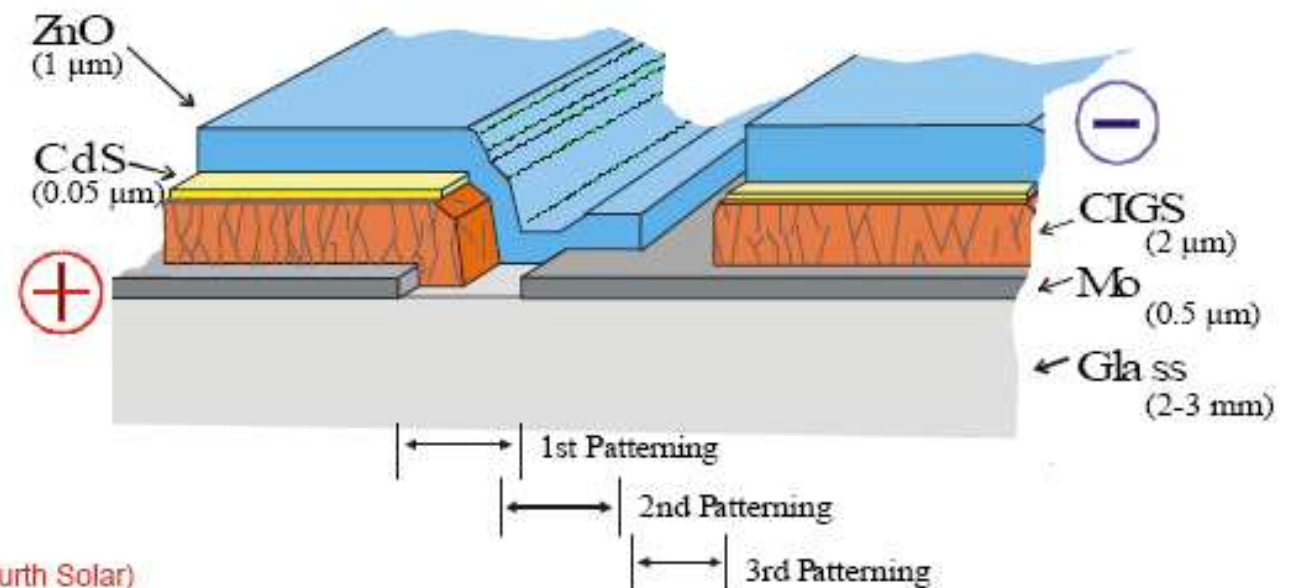


Fig.2 Roll-to-Roll Film Deposition Process

Les couches minces hors silicium

- Deux matériaux ont émergé parmi les centaines testés dans les années 1975-1990 :
- CdTe : bonnes performances (>10%) à coût compétitif (roll-to-roll possible), mais menacé par la législation anti-Cd
- CIGS : $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$



Un démarrage tardif des couches minces ?

- Les trois filières ont connu une industrialisation lente jusqu'en 2005

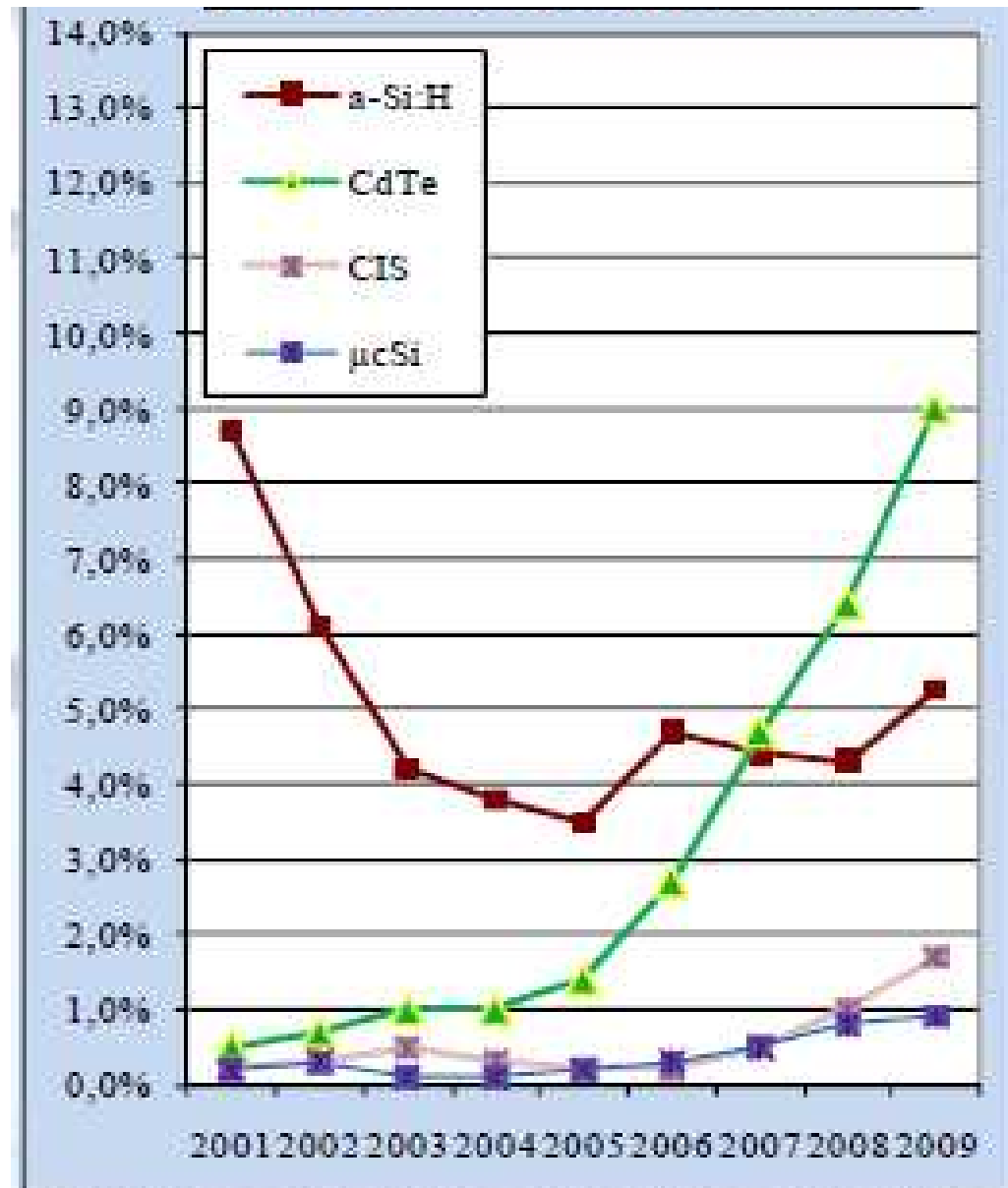
Raisons spécifiques :

- craintes d'une réglementation excluant le CdTe pour la filière CdTe
- Apparente complexité pour CIGS
- difficulté pour atteindre un rendement $> 6\%$ stabilisé pour a-Si

- Raisons générales :

- Concurrence du Si cristallin
- Doute sur un marché pour des produits avec des rendements $< 10\%$
- Investissements importants au démarrage, en particulier :
 - > pour les techniques sous vides
 - > pour les procédés Roll to Roll

Part des couches minces dans la production mondiale de modules PV





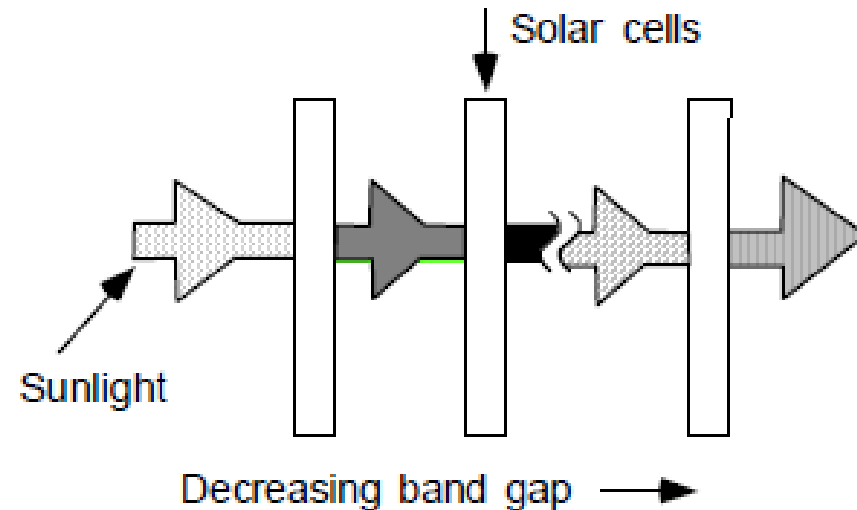
Cellules solaires de troisième génération Composés III-V Nouveaux concepts

Les cellules de troisième génération concernent les structures capables de dépasser le rendement théorique limite d'une simple diode (31%)

Cellules solaires multijonctions

- l'idée est « d'empiler » des cellules solaires constituées de matériaux différents, absorbant chacun une partie du spectre solaire.

Chaque cellule absorbe une partie du spectre solaire.

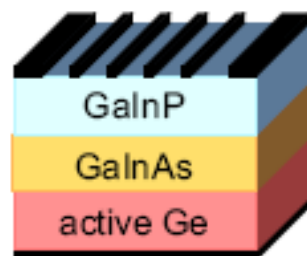


Exemples :

3-cellules

5-cellules

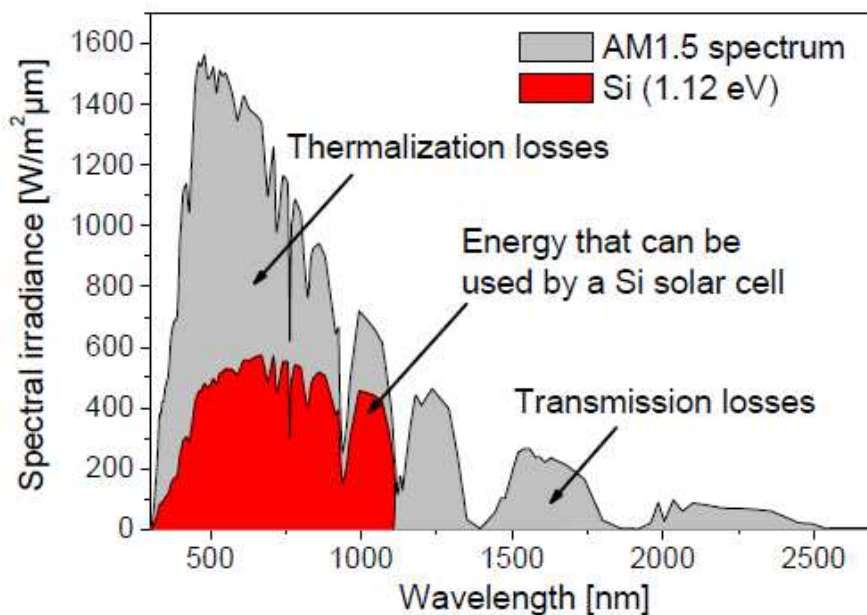
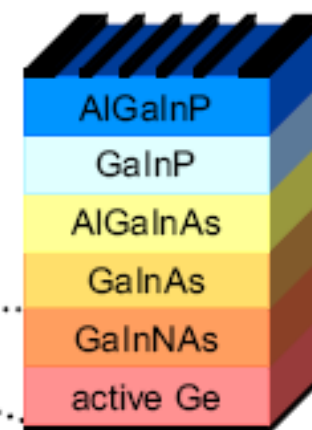
6-cellules



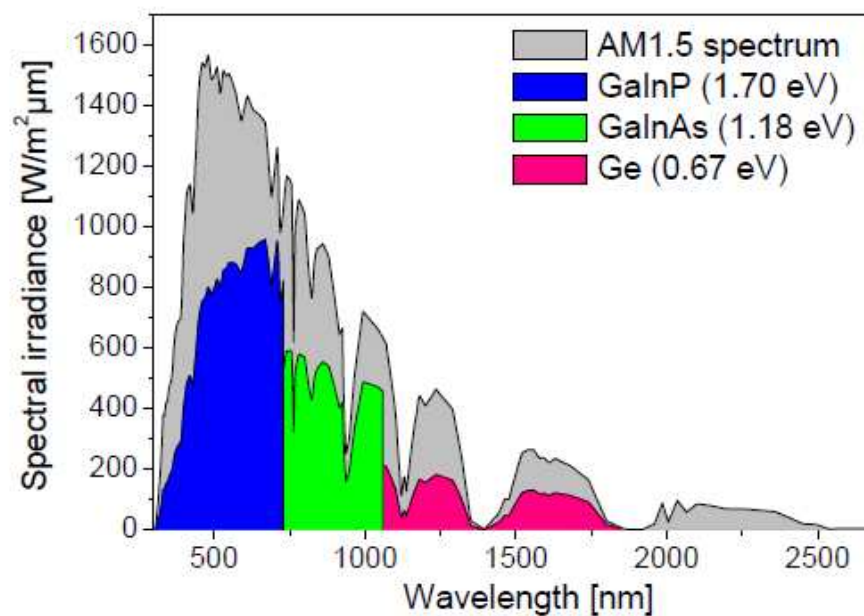
$\eta = 28 \% \text{ AM0}$
 $\sim 31 \% \text{ AM1.5}$



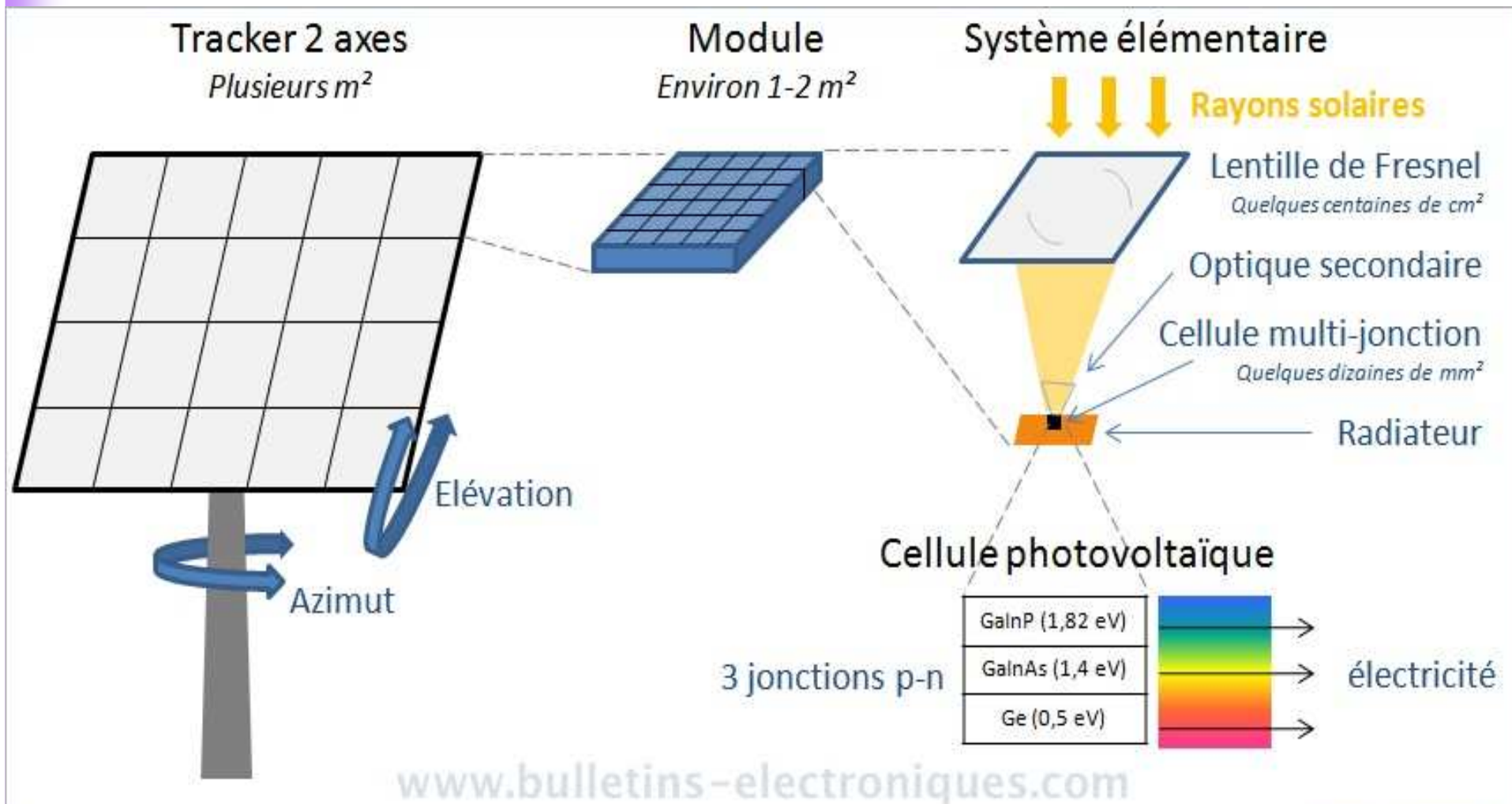
$V_{oc} = 5.2 \text{ V}$



1 cellule en Si



3 cellules avec des matériaux différents

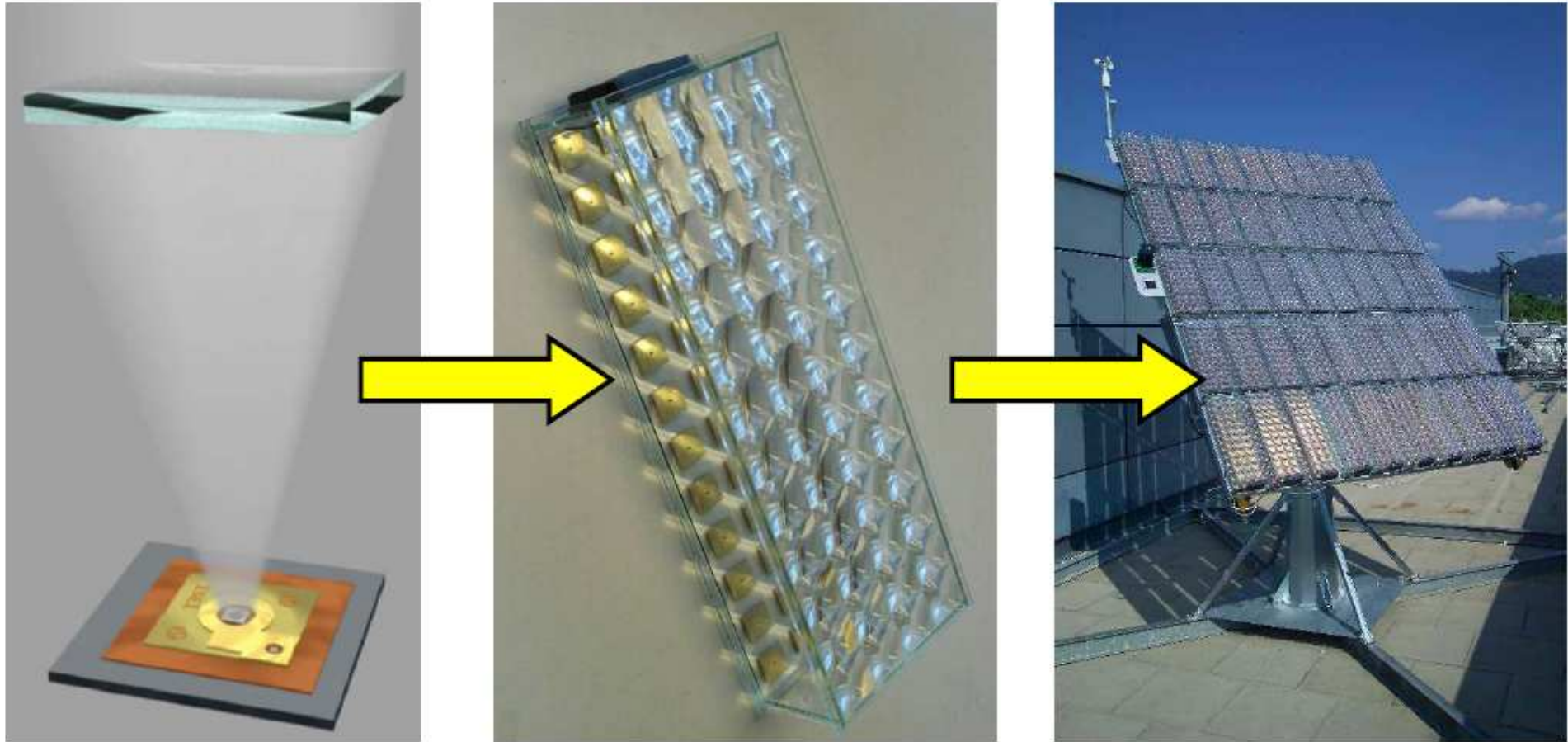


Exemple de structure possible
d'un système photovoltaïque haute concentration



Exemple de système haute concentration avec lentilles de Fresnel
www.bulletins-electroniques.com/actualites/66820.htm
 Crédits : MS&T

The FLATCON[®] concept



Rendements maximum obtenus de l'ordre de 43%
Inconvénient : coût très élevé



Technologies émergentes :

Cellules solaires organiques

Semiconducteurs organiques



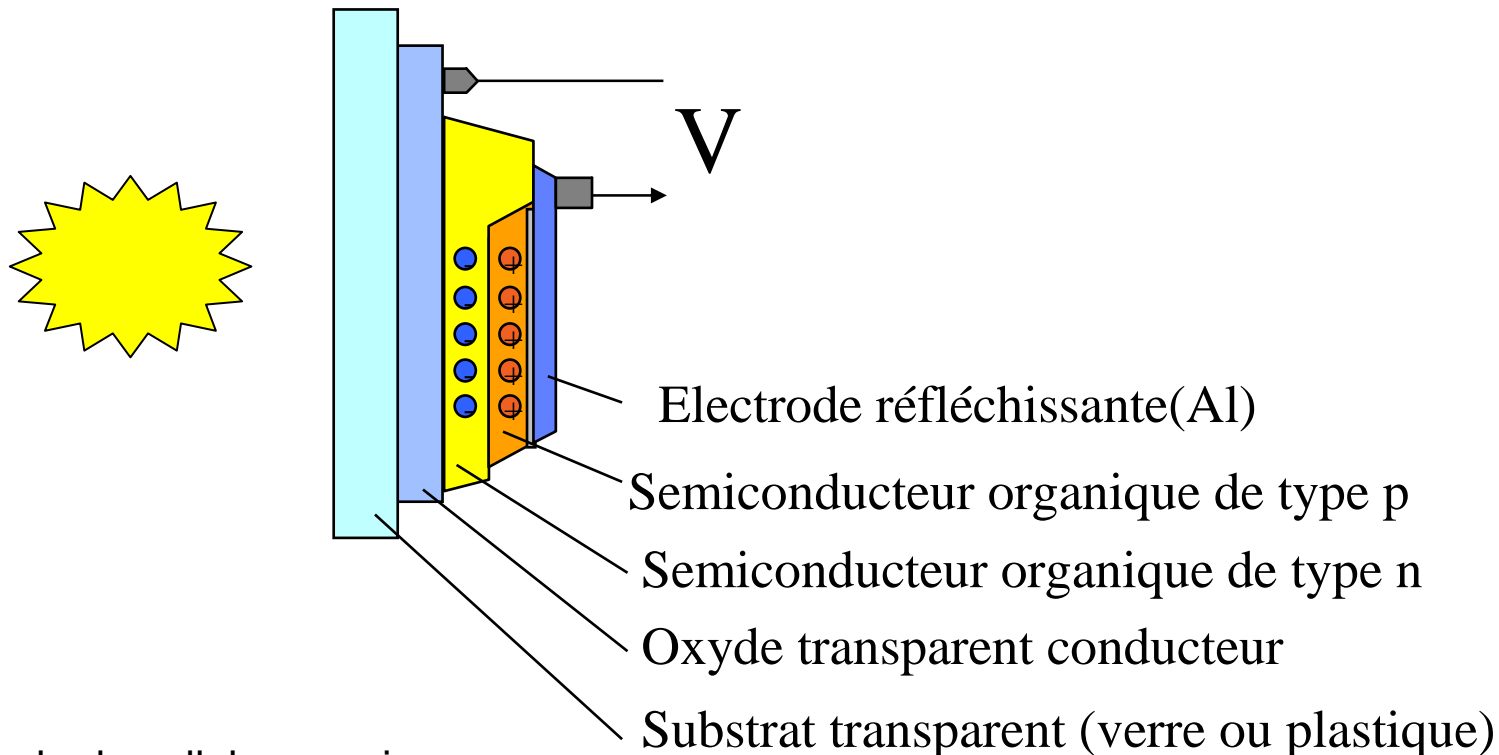
Avantages :

- Faciles à élaborer
- Faible coût



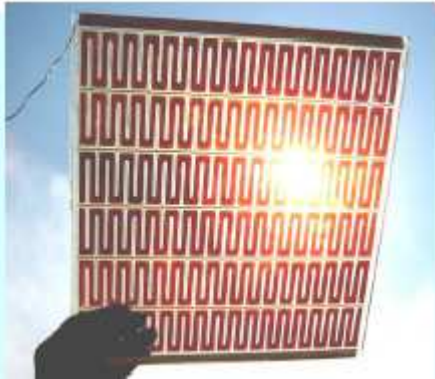
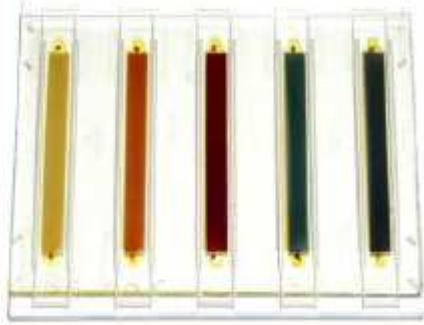
Inconvénients :

- Faible qualité électronique
- Rendements faibles
- Stabilité



Exemple de cellule organique

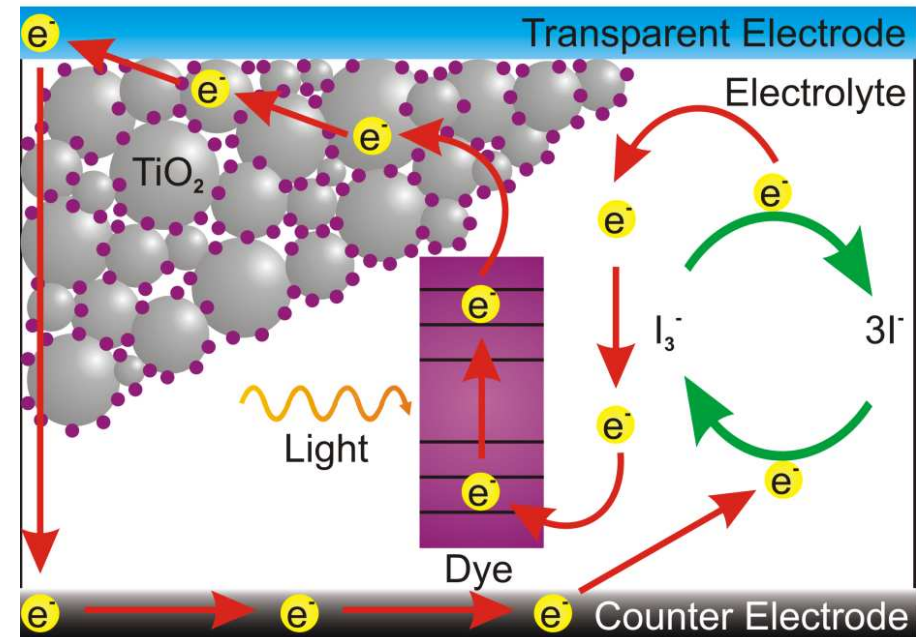
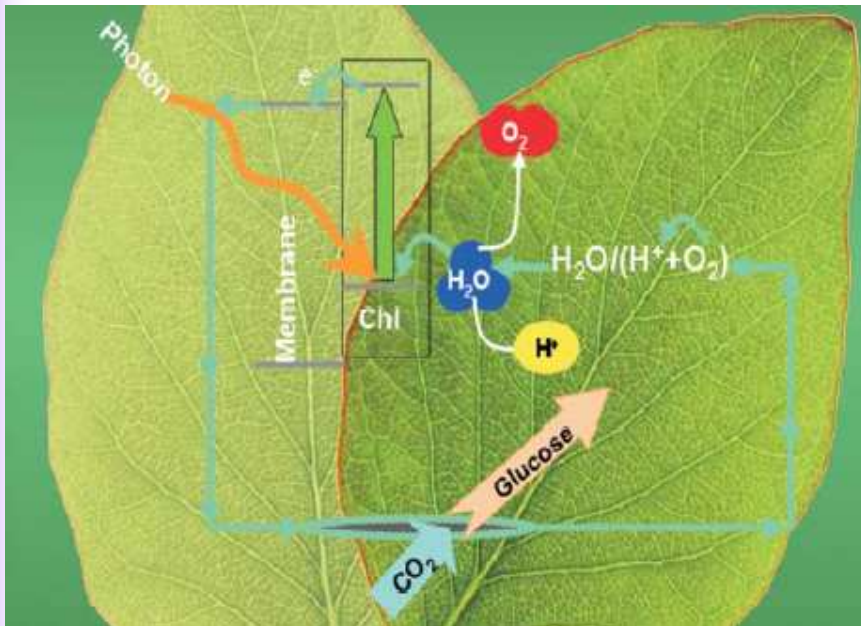
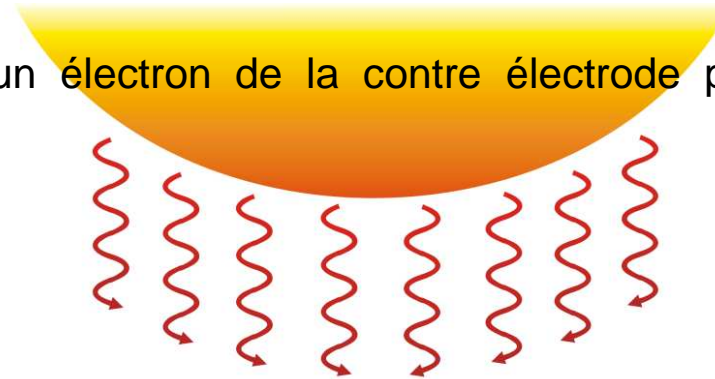
Cellules solaires photoélectrochimiques (Graetzel)



L'absorption est réalisée par un colorant (dye) et l'électron est injecté vers les nanoparticules de TiO_2 . Les charges électriques diffusent jusqu'au contact face avant.

Pendant le même temps, le colorant reçoit un électron de l'électrolyte afin d'éviter de perdre la charge électrique générée dans le colorant.

L'électrolyte récupère un électron de la contre électrode par le circuit extérieur



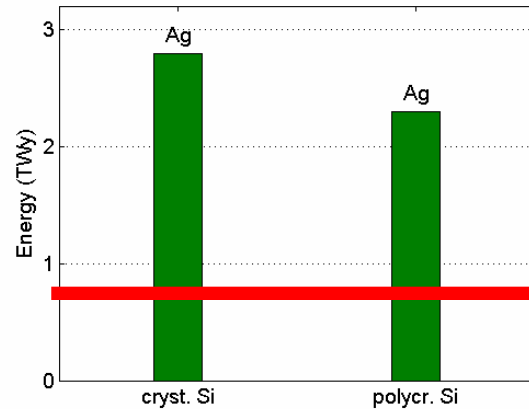


Conclusion-Perspectives

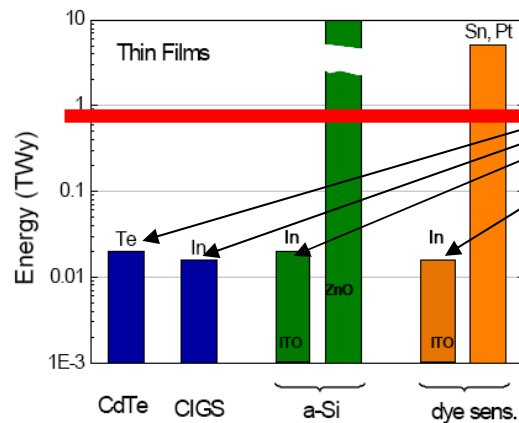
Feuille de route : technologies commerciales		2007	2010	2015	2020
Prix système (euros/Wc)		5	2.5-3.5	2	1.5
Prix électricité sud Europe (euros/kWh)		0.3-0.6	0.14-0.20	0.10-0.17	0.07-0.12
Rendements typiques modules (%)	Si massif cristallin	13-18	15-19	16-21	18-23
	Couches minces	5-11	6-12	8-14	10-16
	Concentration	20	20-25	25-30	30-35
Durée de vie module		20-25	25-30	30-35	35-40
Temps de retour énergétique		2-3	1-2	1	0.5

EPIA, www.epia.org

Limitations en matériaux

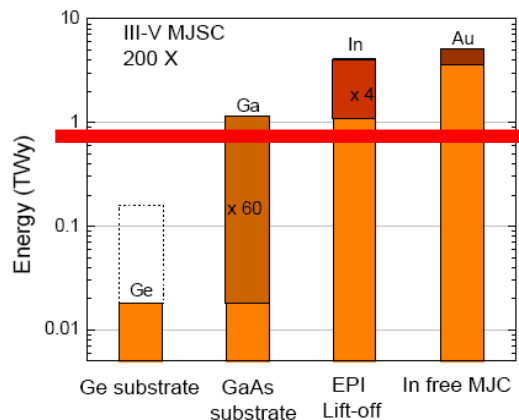


Potential energy limits imposed by global silver (Ag) reserves for **bulk-like silicon** photovoltaic technologies.



Dans 10 ans limitations en Te et In

Potential energy limits imposed for four different **thin film** photovoltaic technologies.



Potential energy limits imposed to **III-V** multijunction cells for **200 sun concentrations**. The third and fourth columns show the extrapolated potential of this technology if the substrates are ignored.

Solar cell	Limiting material	Energy (TWy)	Recommendations
Poly/ c-Si	Ag	~ 2.5	Alt. electrodes
a-Si	--	> 10	Improve efficiency
CdTe	Te	0.02	NA-Limited by cell material
CIGS	In	0.02	NA-Limited by cell material
Dye-sensitized	In(ITO)	~0.01	Alternative contacts
	Sn, Pt	~ 5	Improve efficiency
Con. MJC	Ge	.02	Alt. Substrate
Ge sub.	Ge	to 0.2	lift-off, III-V/Si
GaAs sub.	Ga	~1 to 2	
Con.MJC	In	~ 4	In-free MJC's
III-V, lift-off	Au	~5	Alt. contacts


Table 1: The data and recommendations for future research directions are given in Table 1. Note here one TWy is about 6TWp.

Source: « Material challenges for Terawatt level deployment of photovoltaics »

A. Feltrin & A. Freundlich. Univ. of Houston (TX, USA)-2007-

Bibliography

- A. Luque et al. : *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Wiley (2003)
- S. Bowden & C. Honsberg : *PVCDROM*, 2nd edition. UNSW, <http://pvcdrom.pveducation.org/>
- Baromètre Européen des énergies renouvelables (<http://www.energies-renouvelables.org/>)
- A. Ricaud : *Photopiles solaires*. Presses Polytech. et Univ. Romandes, 1997.
- <http://www.cythelia.fr/>
- L. Protin et S. Astier : *Convertisseurs photovoltaïques*. Technique de l'ingénieur, D3-360.
- V. Fthenakis et al. : *Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status*. Progress in PV 14 (2006).
- M. A. Green et al. : *Solar Cell Efficiency Tables (Version 28)*. Progress in PV 14 (14)
- Bernard Equer, *Journées Couches minces Energies*, Octobre 2008
- Daniel Lincot, *les responsabilités nouvelles de la chimie*, l'Actualité chimique juin-juillet-août 2011, n°353-354
- EPIA : www.epia.org
- ADEME : www.ademe.fr
- www.photowatt.com/
- <http://www.photovoltaique.info/>



Quelques éléments de réponse aux questions
posées suite à la présentation

Quelques polymères utilisés en PV organiques.

Tiré de :

Daniel Lincot, *les responsabilités nouvelles de la chimie*, l'Actualité chimique juin-juillet-août 2011, n°353-354

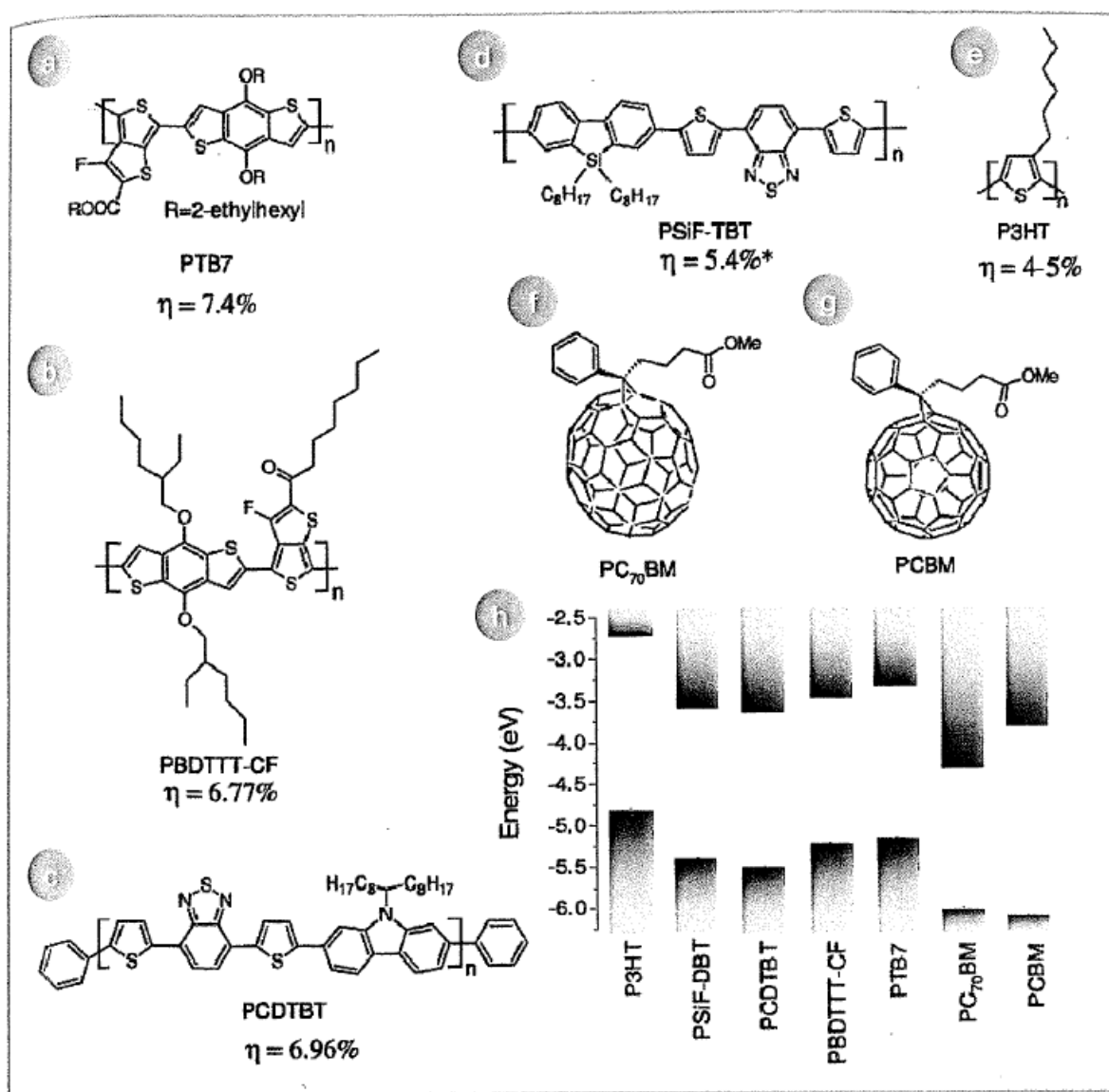


Figure 10 - Formule chimique des principaux polymères utilisés en tant que donneurs (de a à e), ainsi que des accepteurs basés sur les dérivés des fullerènes (f et g), d'après [19].

La représentation énergétique des différentes espèces par rapport au niveau du vide est donnée en bas à droite (h, [17]). a) poly(thienol[3,4-b]thiophène-benzodithiophène); b) poly[4,8-bis substitué-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophène-2,6-diyl-alt-4-substitué-thienol[3,4-b]thiophène-2,6-diyl]; c) poly[N-900-hepta-décanyl-2,7-carbazole-alt-5,5'-(40,70-di-2-thienyl-20,10,30-benzothiadiazole)]; d) poly(2,7-silafurène-alt-4,7-di-2-thienyl-2,1,3-benzothiadiazole); e) poly(3-hexylthiophène); f) [6,6]-phényl C₇₀-acide butyrique méthylester; g) [6,6]-phényl-C₆₁-acide butyrique méthylester.

Fiche technique de module PV : exemple

www.photowatt.com/documents/produits/PW6-110.pdf



EMBALLAGE		
Poids du module	Kg	12,5
Taille du module avec câbles	mm	1424 x 655 x 38
Taille du module avec Jbox	mm	1424 x 655 x 45
Type d'emballage	modules	2 pAr carton
Taille de l'emballage	mm	1565 x 675 x 100
Poids emballé	Kg	27
Taille maximum d'une palette (26 module)	mm	1600 x 752 x 1450
Poids maximum d'une palette (26 module)	Kg	366

- 4x9 cellules polycristallines (150 x 150 mm)
- Cadre en aluminium anodisé renforcé
- Garantie produit : 5 ans*
- Garantie puissance : 25 ans*
- Tolérance de puissance : +/- 3%
- Certificats qualité : ESTI (61215), ISO 9001...

Si multicristallin
Puissance typique 100 W (voir
transparent suivant)

Fiche technique de module PV : exemple (suite)

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES				
PW6-110		Configuration 12 V		
Puissance typique	W	90	100	110
Puissance minimale	W	85	95,1	105,1
Tension à la puissance typique	V	16,4	16,7	17,2
Intensité à la puissance typique	A	5,5	6,0	6,4
Intensité de court circuit	A	6,1	6,5	6,9
Tension en circuit ouvert	V	21,1	21,5	21,7
Tension maximum du circuit	V	1000V DC		
Coefficients de température		a = +2,085 mA/°C ; β = -79 mV/°C ; γ P/P = - 0,43 % /°C		
Spécifications de puissance à 1000 W/m² : 25°C : AM 1,5				

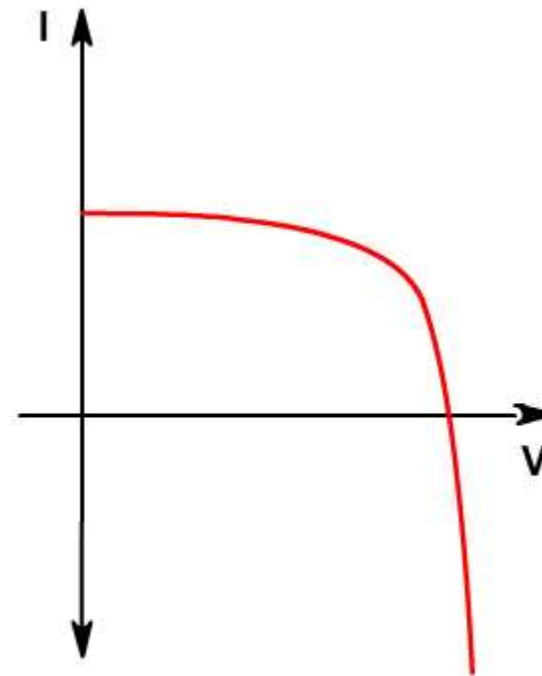
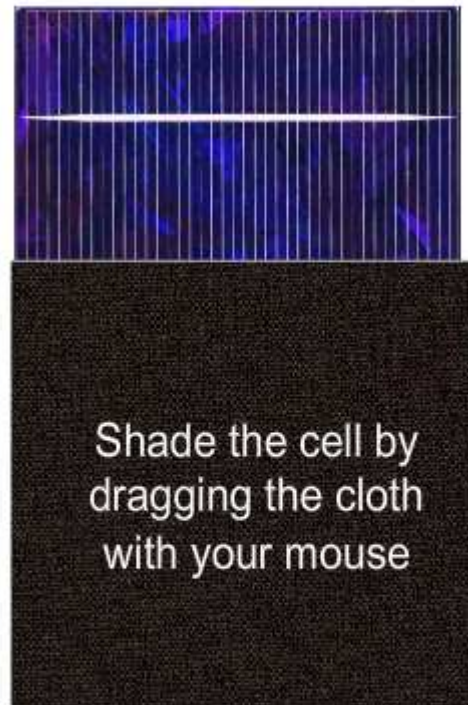
Condition de test des modules

Variation du rendement avec la température

Ombrage du module :

Problème d'ombrage partiel du module : une animation est disponible sur le site suivant qui montre la décroissance du courant en fonction du taux d'ombrage pour une cellule :

<http://pveducation.org/pvcdrom/modules/shading>



unshaded fraction 0.56

Des informations intéressantes sont présentes sur le site suivant (mis en place par l'HESPUL) :

<http://www.photovoltaique.info/>

Notamment sur :

- le **recyclage** des modules photovoltaïques (<http://www.photovoltaique.info/-L-impact-environnemental-.html>)
- les mesures de **sécurité** (risques incendies...)
- l'**entretien** des modules (<http://www.photovoltaique.info/Raccorde-au-reseau.html>)
- la baisse de performance des modules en fonction de la **température** (<http://www.photovoltaique.info/Points-cles-pour-une-installation.html>)
- l'**ombrage** (<http://www.photovoltaique.info/Estimer-la-production.html> , <http://www.photovoltaique.info/Points-cles-pour-une-installation.html>)
-