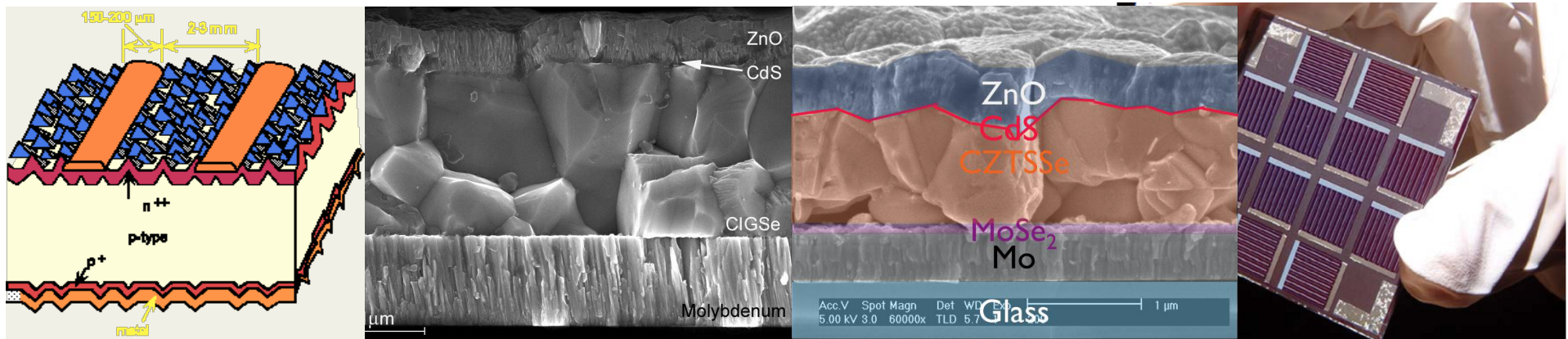


# Matériaux et Technologies pour le Photovoltaïque:

## Etat de l'Art et Perspectives



**Abdelilah SLAOUI**

**Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie : iCUBE**

**Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS**

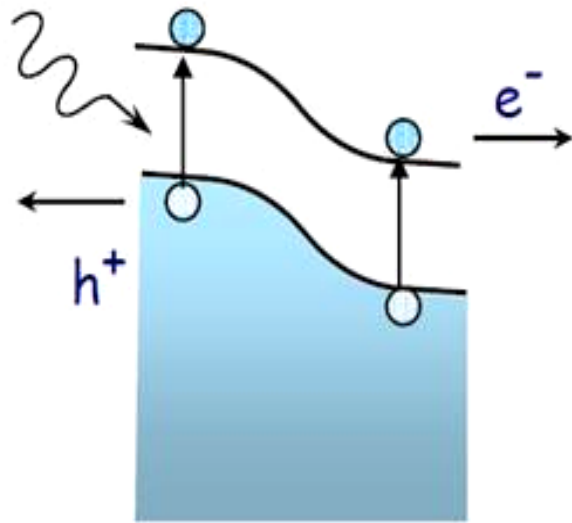
**Université de Strasbourg – Uds**

**FRANCE**

# PLAN

- ❑ **Energie Photovoltaïque: *Principe et Avantages***
- ❑ **Matériaux et Technologies pour le photovoltaïque: *Etat de l'art et Challenges***
  - ✓ pour PV/ Si cristallin
  - ✓ pour PV/ Couches minces
- ❑ **Marché Photovoltaïque: *Présent et Futur***

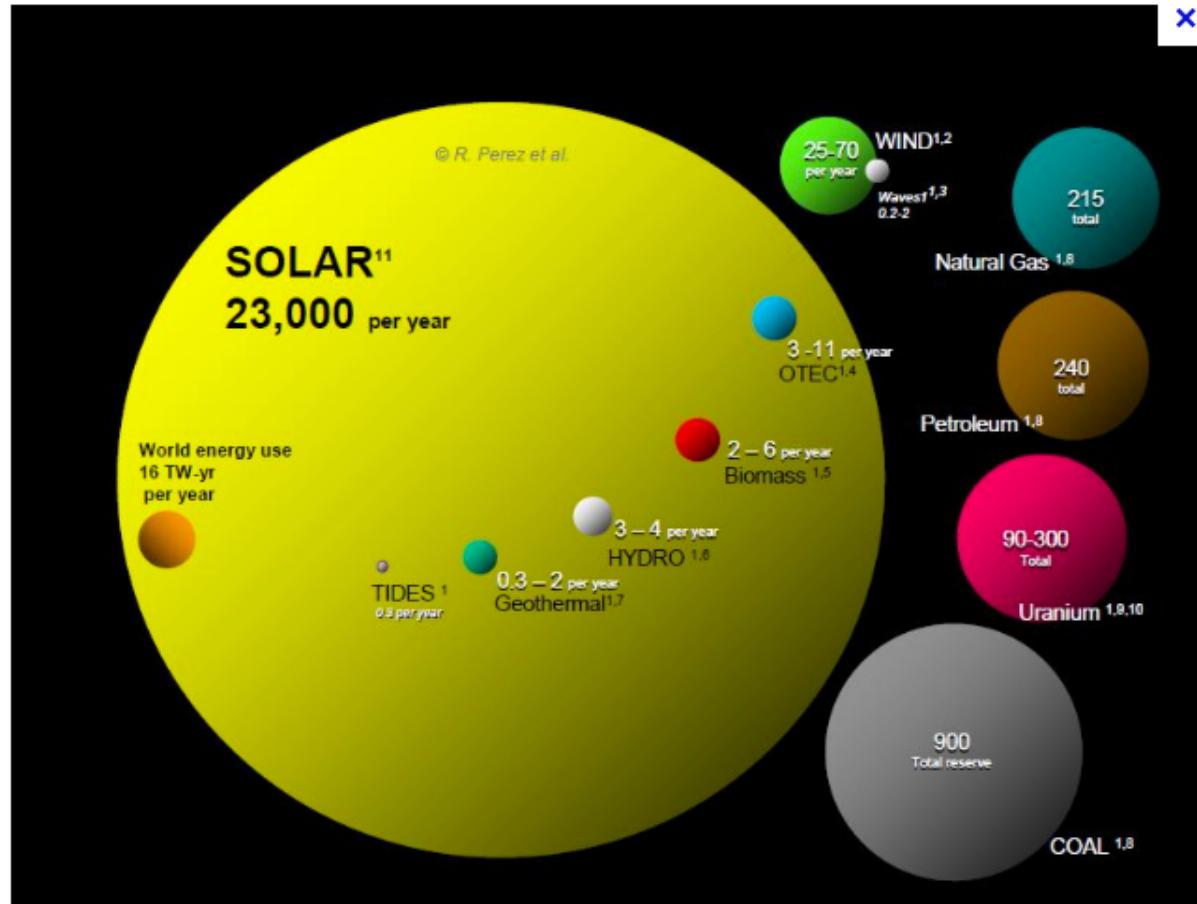
# Énergie Solaire : La ressource



Solar electric  
(PV)



- PhotoVoltaire : **conversion directe de l'énergie solaire en électricité**
- Production PV « potentiel » avec rdt 10% : **1TW / ~40 000 km<sup>2</sup>**



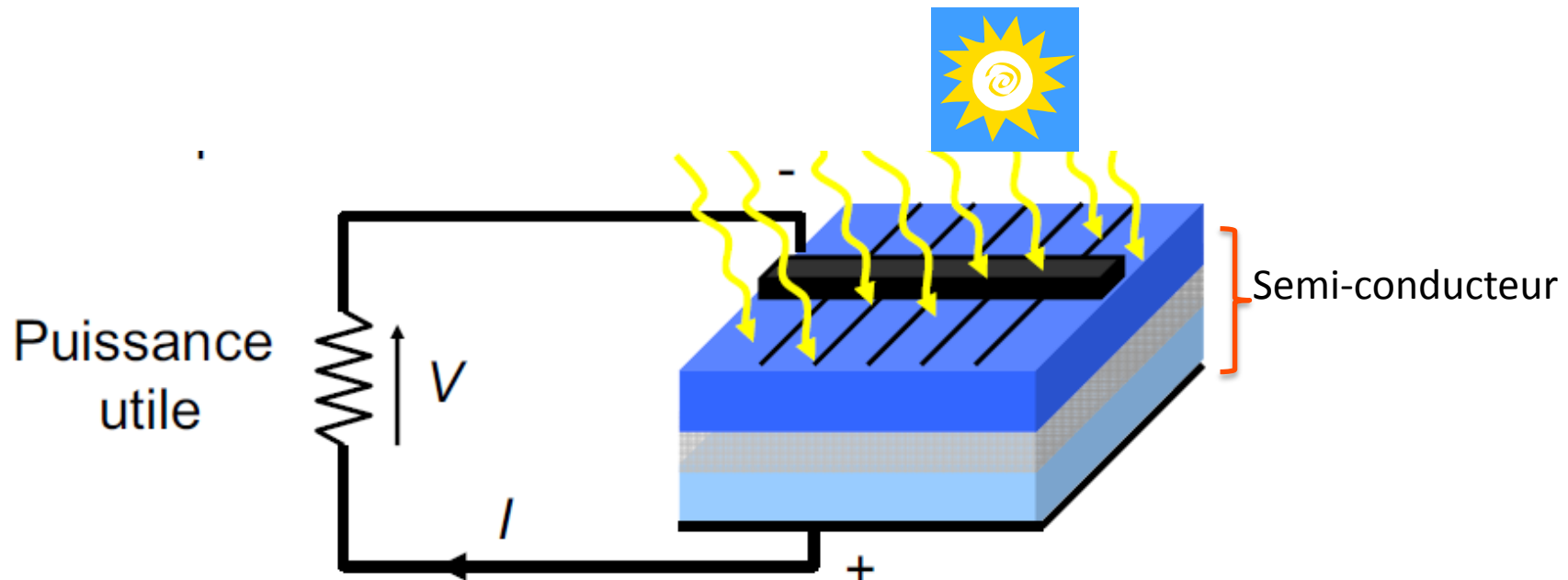
# Solaire photovoltaïque: principe

L'effet photovoltaïque consiste en 4 étapes:

- Absorption de photons par un matériau semi-conducteur
- Formation des paires electron-trou
- Dissociation des paires e-t via la jonction (inorganique), via les interfaces (organique)
- Circulation des porteurs dans la charge

Voc

Isc

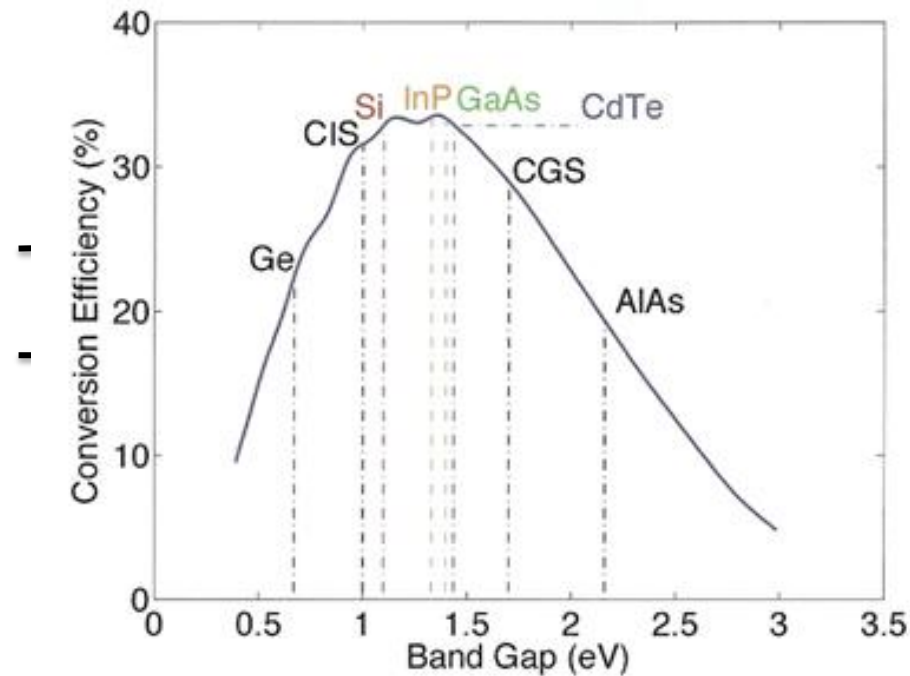
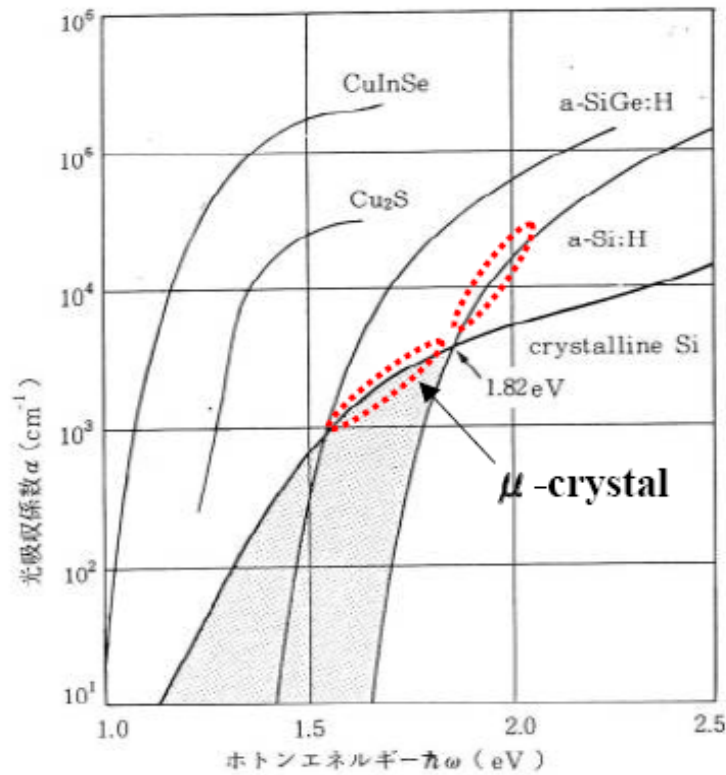


# Solaire photovoltaïque: rendement de conversion

Exigences essentielles sur les SC:

*Eg: largeur de Bande interdite adequate avec le spectre solaire*

*Absorption élevée ( $\alpha$ ) et longueur de diffusion des porteurs ( $L$ )  $\gg 1/\alpha$*

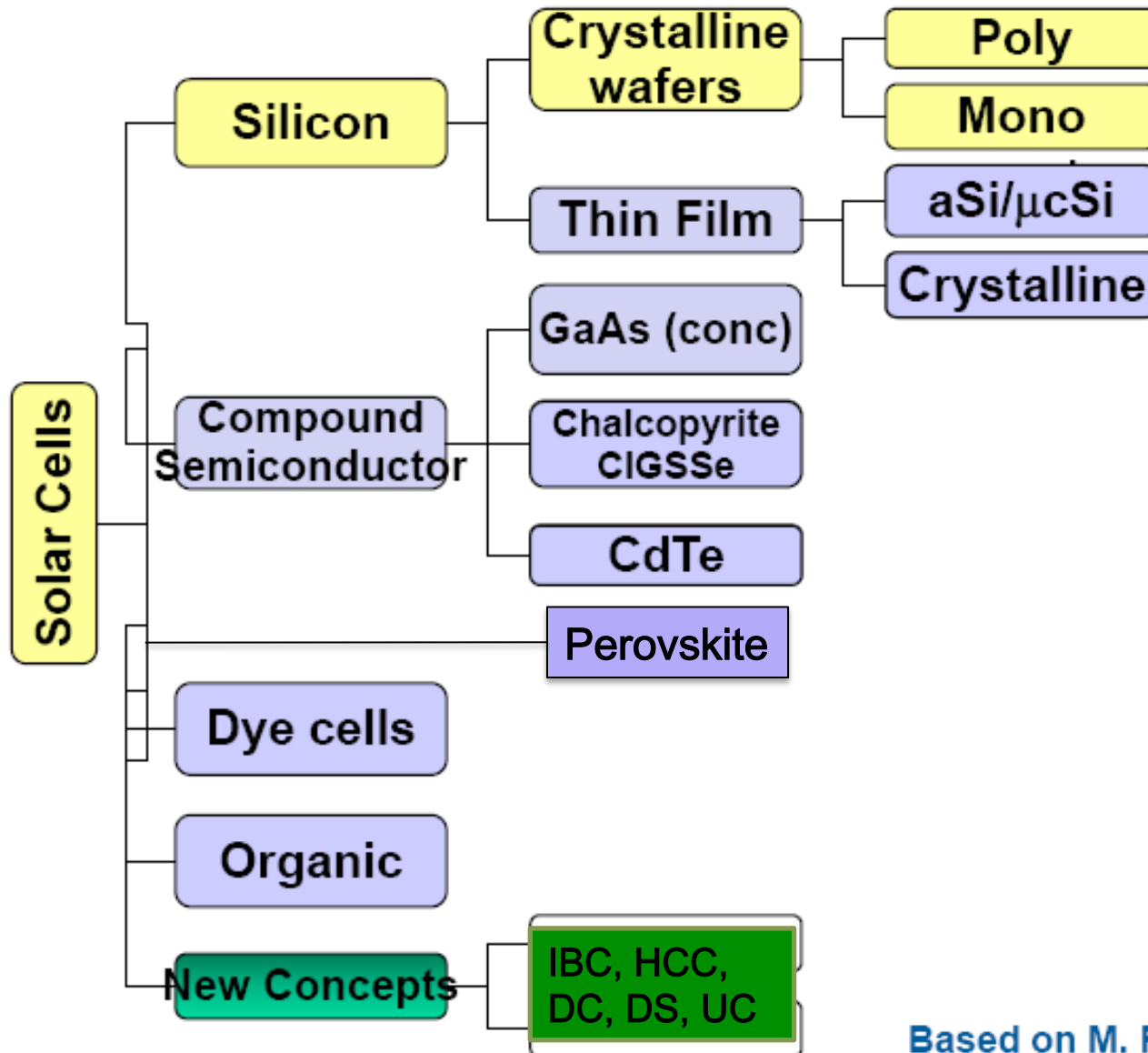


faible  
: élevé



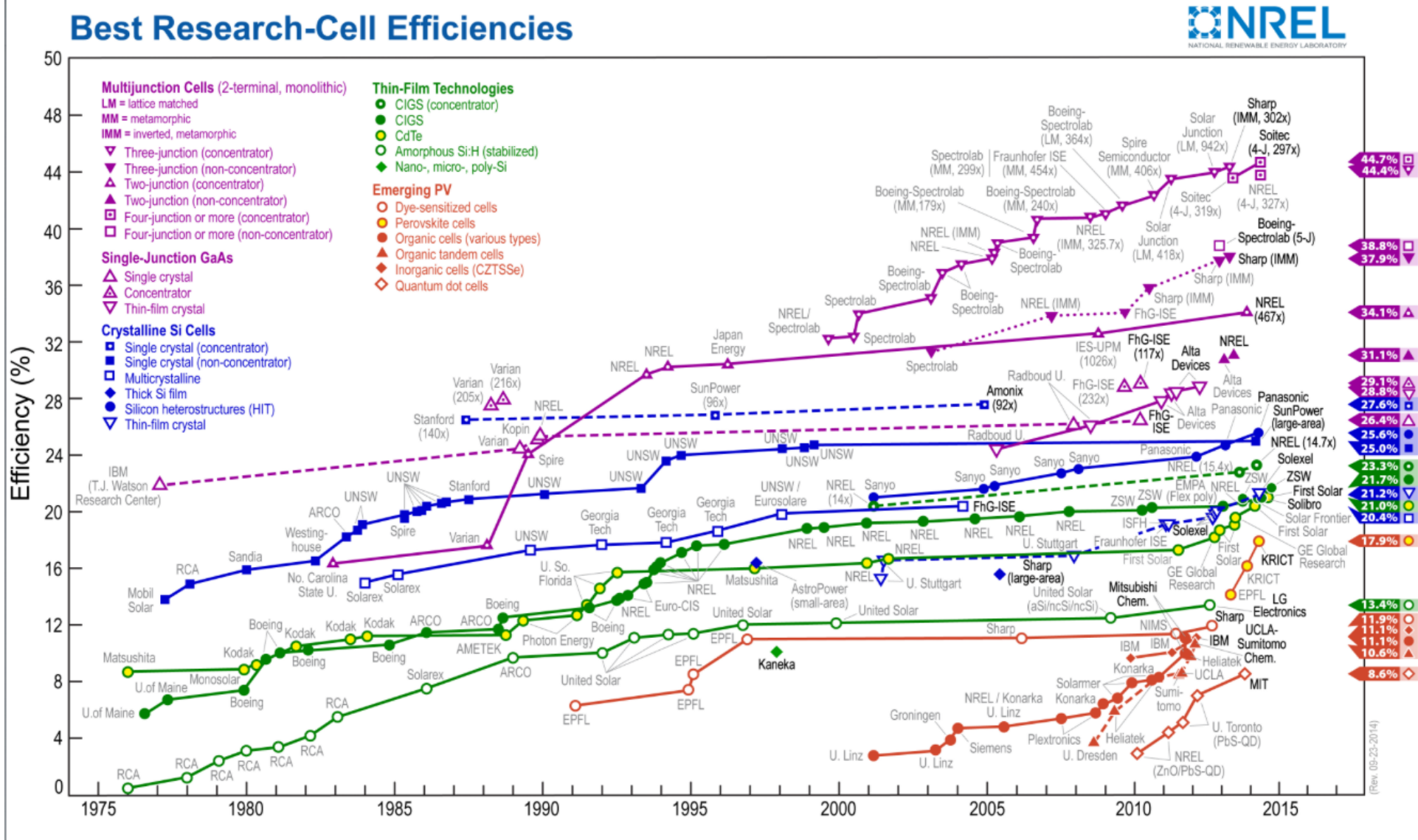
Si, GaAs, CIGS, CZTS, CdTe...

# Matériaux et Technologie pour PV



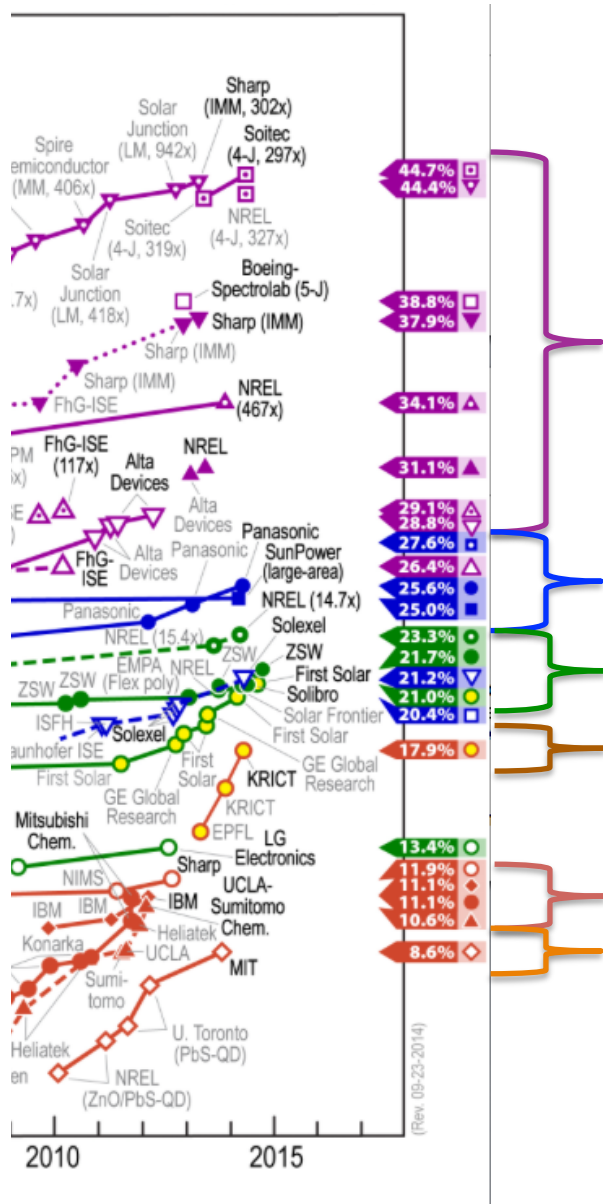
Based on M. Powalla, ZSW

# Matériaux et Technologie pour PV



- ✓ Effort R&D continu sur plusieurs filières en parallèle
- ✓ Maturité demande du temps et des moyens; potentiels non encore atteints

# Matériaux et Technologie pour PV



Cellules III/V → potentiel 65%

Cellules Si → potentiel 30%

Cellules CIGS/CdTe/CIGS → potentiel 28%

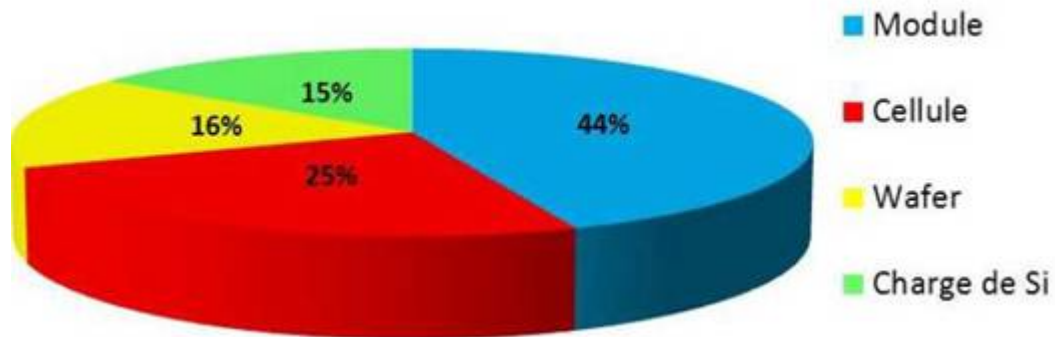
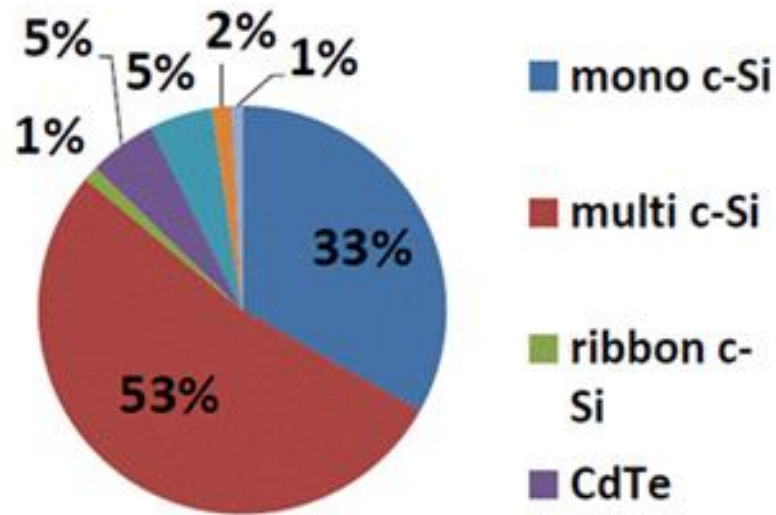
Cellules Perovskite → potentiel ??

Cellules organiques → potentiel 20%

Cellules « nano-dots » → potentiel 30%



# Matériaux et Technologie pour PV

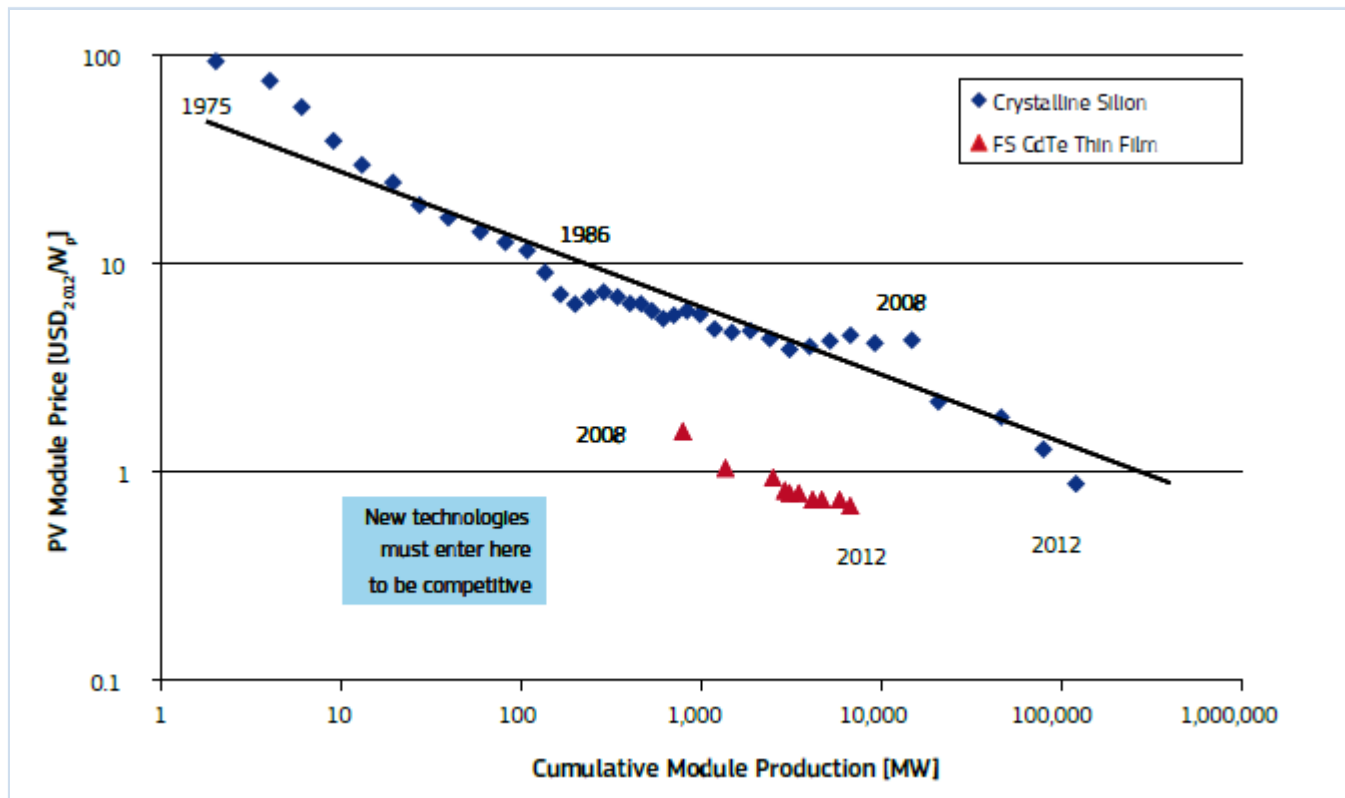


✓ 86% des modules PV vendus sont en **Si cristallin** (53% multi-Si ; 33% mono-Si)

✓ Réduction de coût à tous les niveaux de la production: *de la charge Si au module*

# Photovoltaics: Materials & Technologies

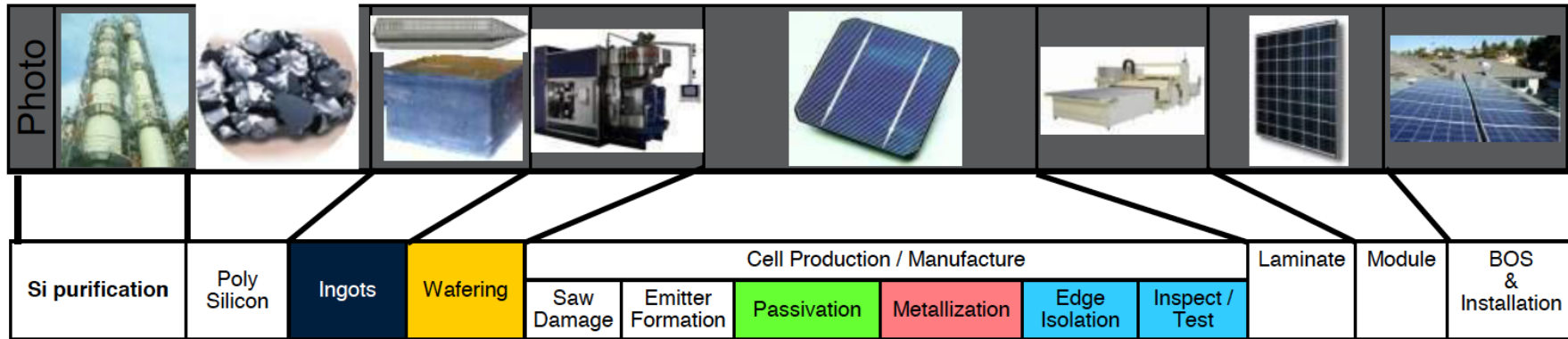
- Through the last years, the progress in **crystalline silicon (c-Si) technology** has surpassed all expectations
- The main advantages of c-Si is the large potential for further improvement of c-Si manufacturing costs and performances



*JRC Scientific and policy report - 2013*

# Matériaux et Technologie pour PV:

## La chaine de valeur pour le c-Si pour PV



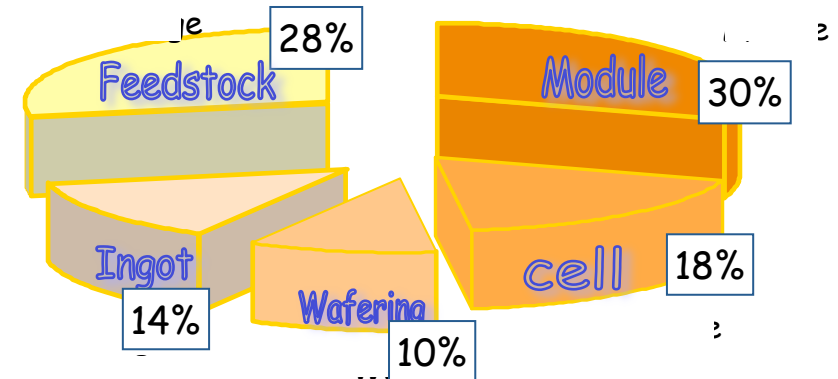
Courtesy of W. Hoffman, ASE

- Problèmes:

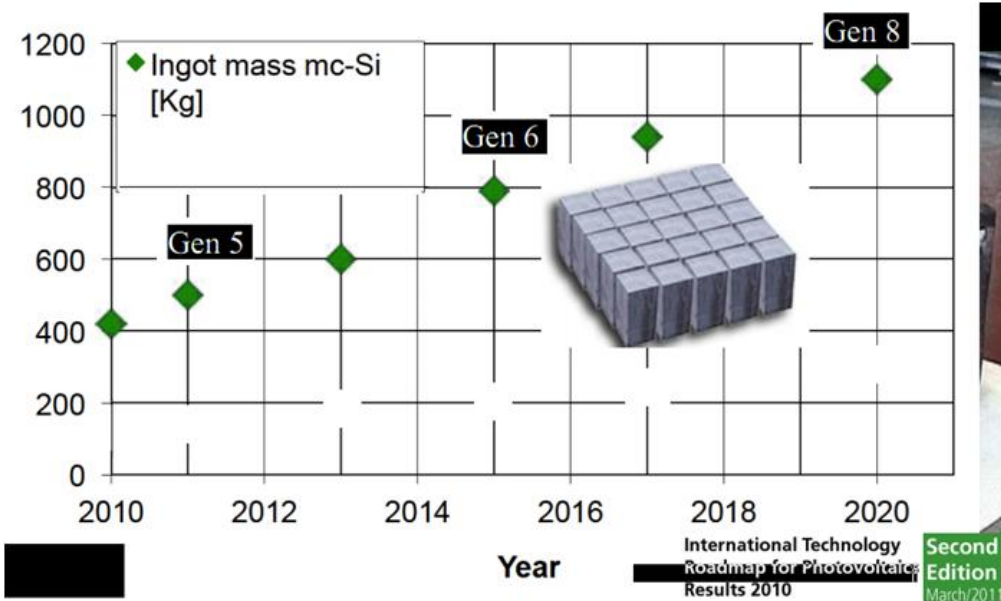
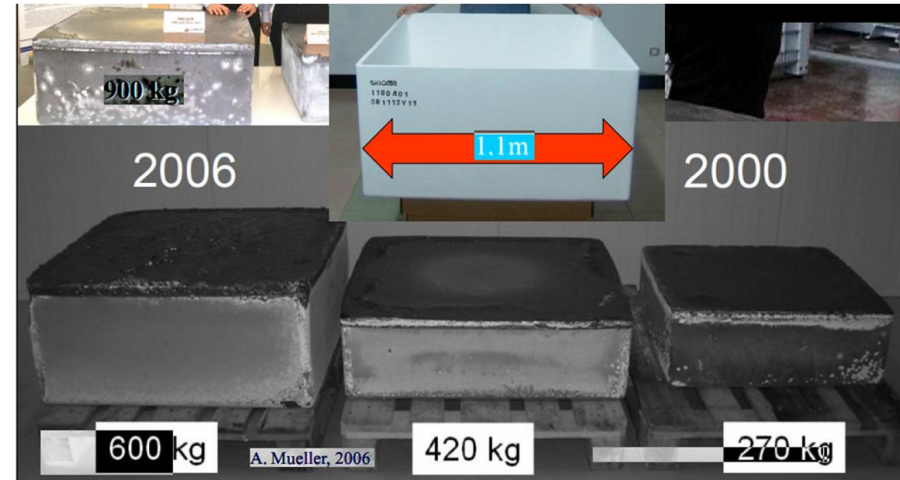
- Techno. Energivore
- Cout des lingots/découpe

- Alternatives:

- Grand lingots, Si Metalurgique
- plaquettes très mince + haut rendement
- Pas de découpe → ruban Si; TF-cSi



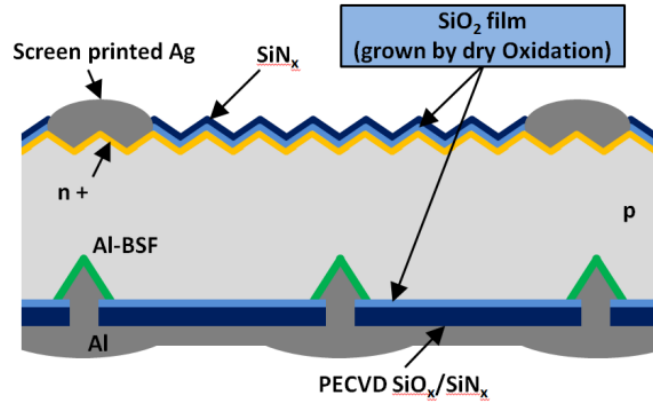
# Lingots Si Ultra large



# Cellules HR

## PERC technology

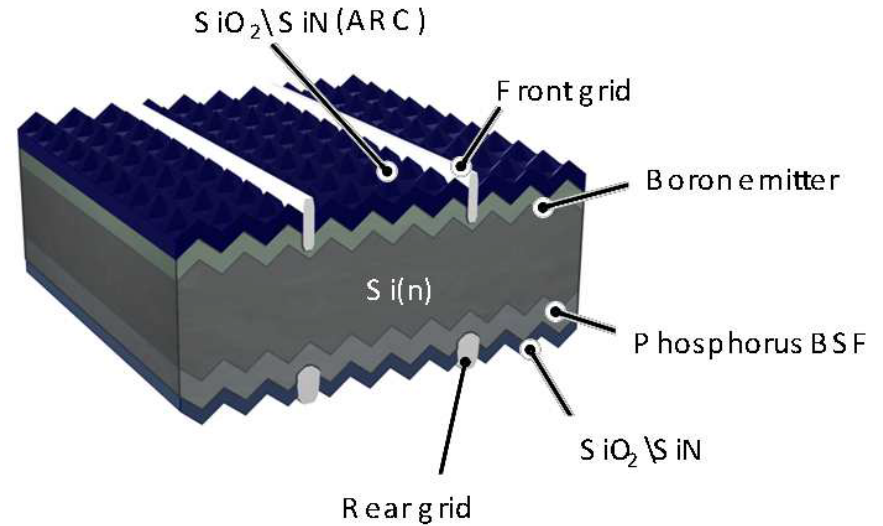
*Passivated Emitter Rear Cell*



*Courtesy of IMEC*

## PERT technology

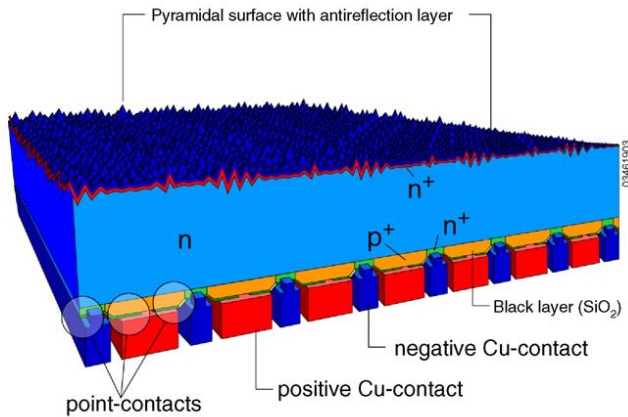
*Passivated Emitter Rear Totally Diffused*



*Courtesy of CEA-INES*

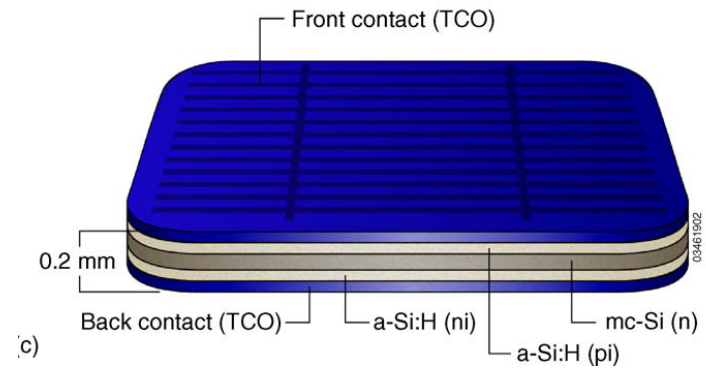
## IBC technology

*Interdigitated Back Contact*



*Courtesy of Sunpower*

## Heterojunction technology



*Courtesy of Sanyo-PANASONIC*

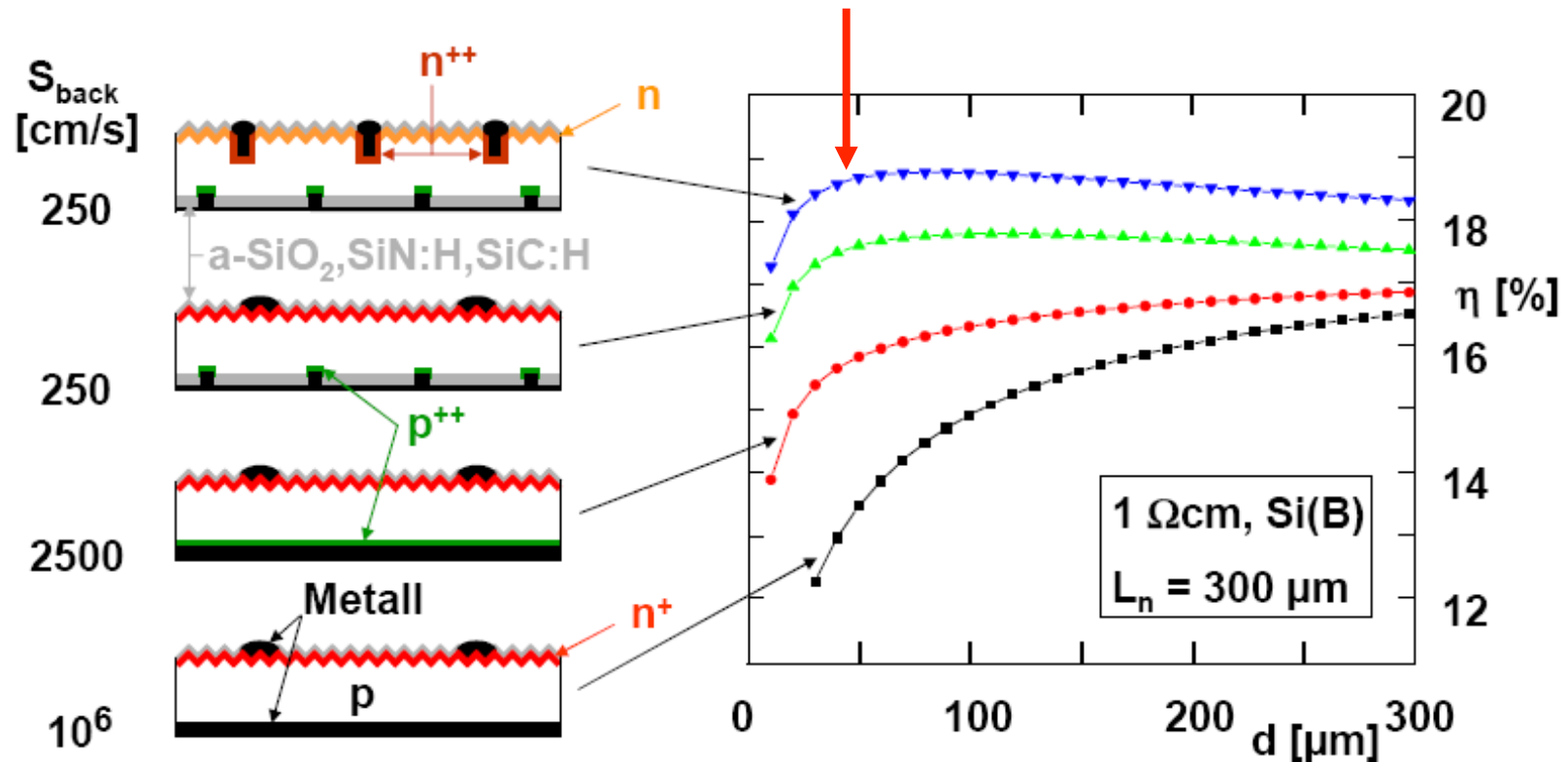
## Cellules HR

Institution	Technologie	Détail	eta [%]	Statut Production	Surface [cm <sup>2</sup> ]
IMEC	PERC - Si(p)	Cu plating	20.2	Labo	239
CSA	PERC - Si(p)	MWT	20.2	Pilote	239
YINGLI (PANDA)	PERT - Si(n)	Diffusion	19.5	Oui	239
LG	PERT - Si(n)	Implantation	20.5	Oui	239
BOSCH SOLAR	PERT- Si(n)	Implantation	20.5	pilote	239
ZEBRA	IBC - Si(n)	Diffusion - sérigraphie	21.3	Labo	240
BOSCH-ISFH	IBC - Si(n)	Implant - sputtering	22.1	Labo	239
SUNPOWER	IBC - Si(n)	Diffusion- Cuivre	24.2	Oui	155
PANASONIC	HET - Si(n)	Non communiqué	24.7	Labo	100
KANEKA	HET - Si(n)	ECD Cuivre	24.2	Labo	171
CHOSHU	HET - Si(n)	Emetteur inversé	22.3	Labo	240

### Axes d'amélioration:

- Augmentation des rendements
- Réduction de la consommation d'Ag
- Electrodes cuivre
- Nouveaux équipements (implantation)
- Simplification procédé
- Procédés sur substrat mince - automatisme

# Vers le très haut rendement des cellules Si (p): plaquettes très minces

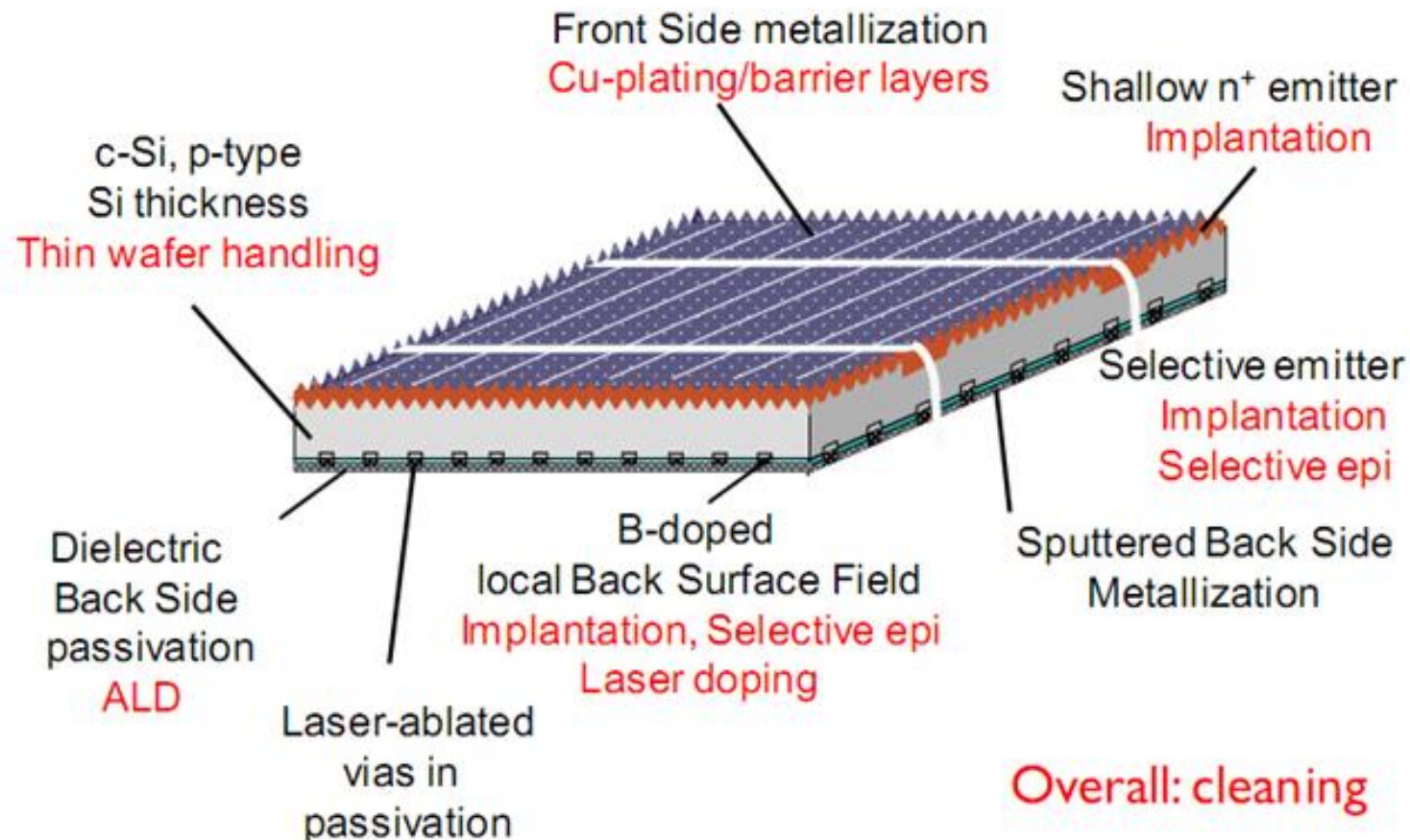


- réduction des pertes optiques (reflectance) et électriques (passivation des surfaces)
- Finesse des contacts métalliques et diminution des effets résistifs

# Vers le très haut rendement des cellules Si: Technologies avancées

## WHERE PV MEETS MICROELECTRONICS

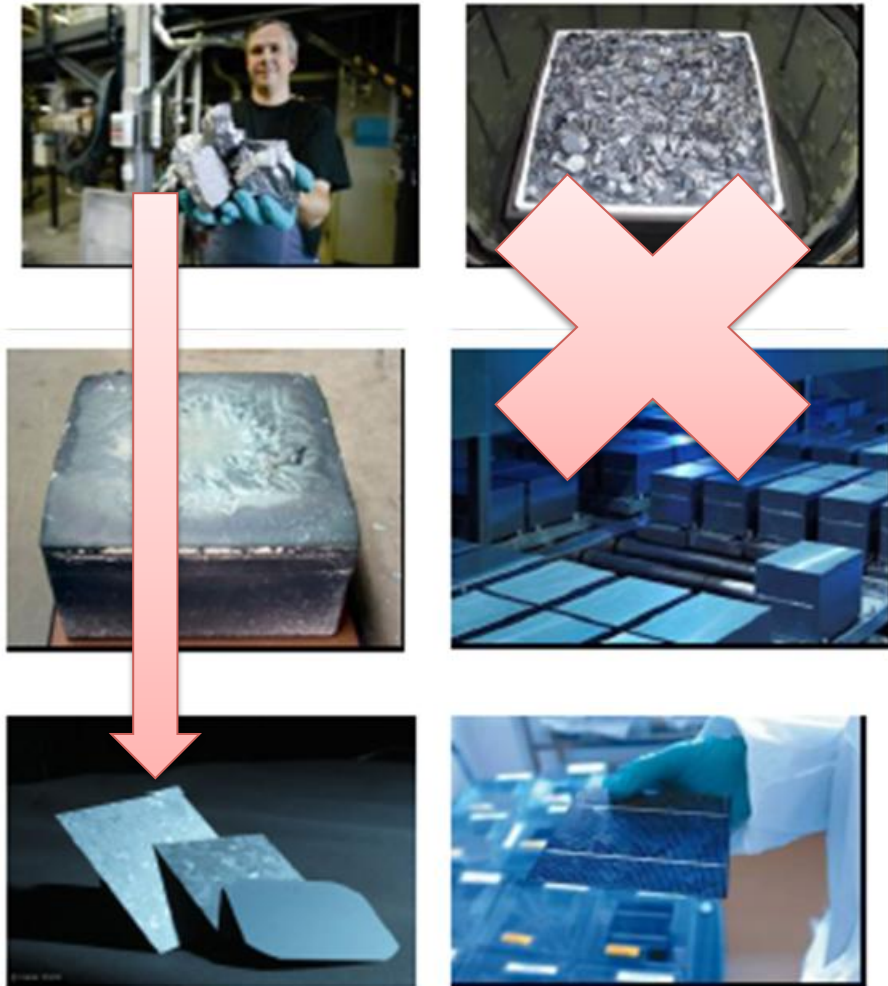
Process simplification  
Sustainability



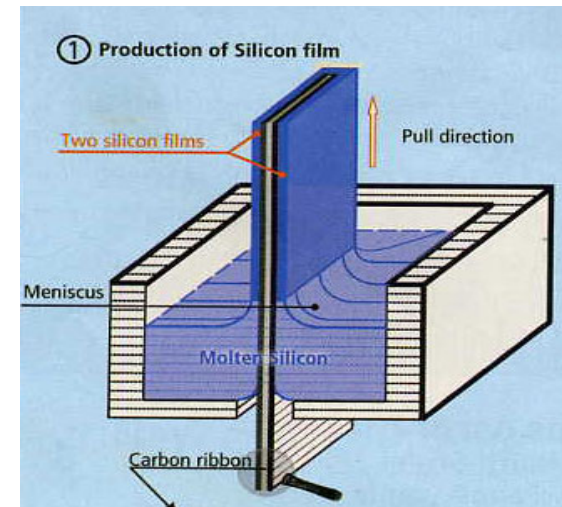


# Vers le Si très mince : Si ruban

Multicrystalline Si by casting



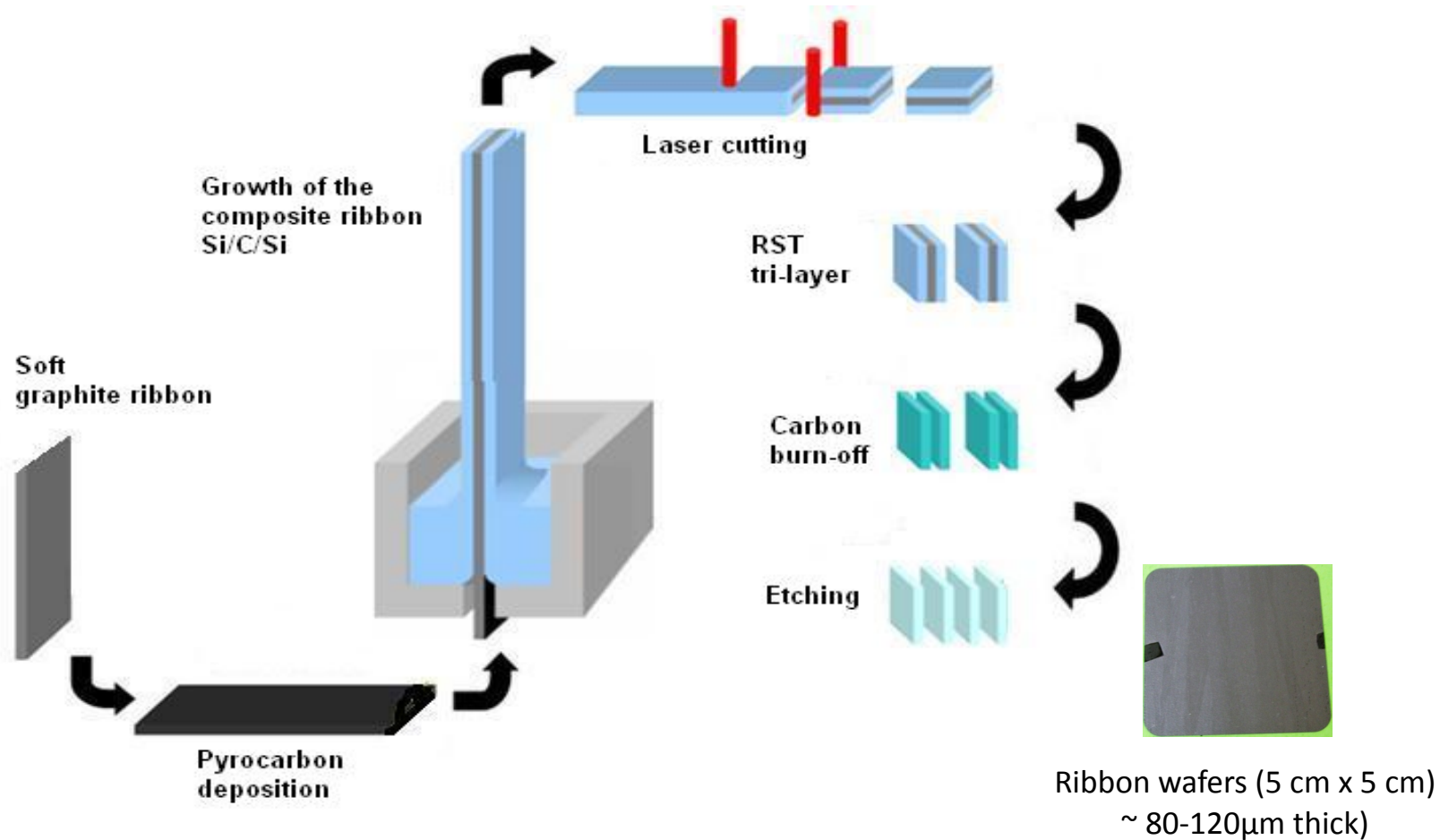
Si Ribbon growth



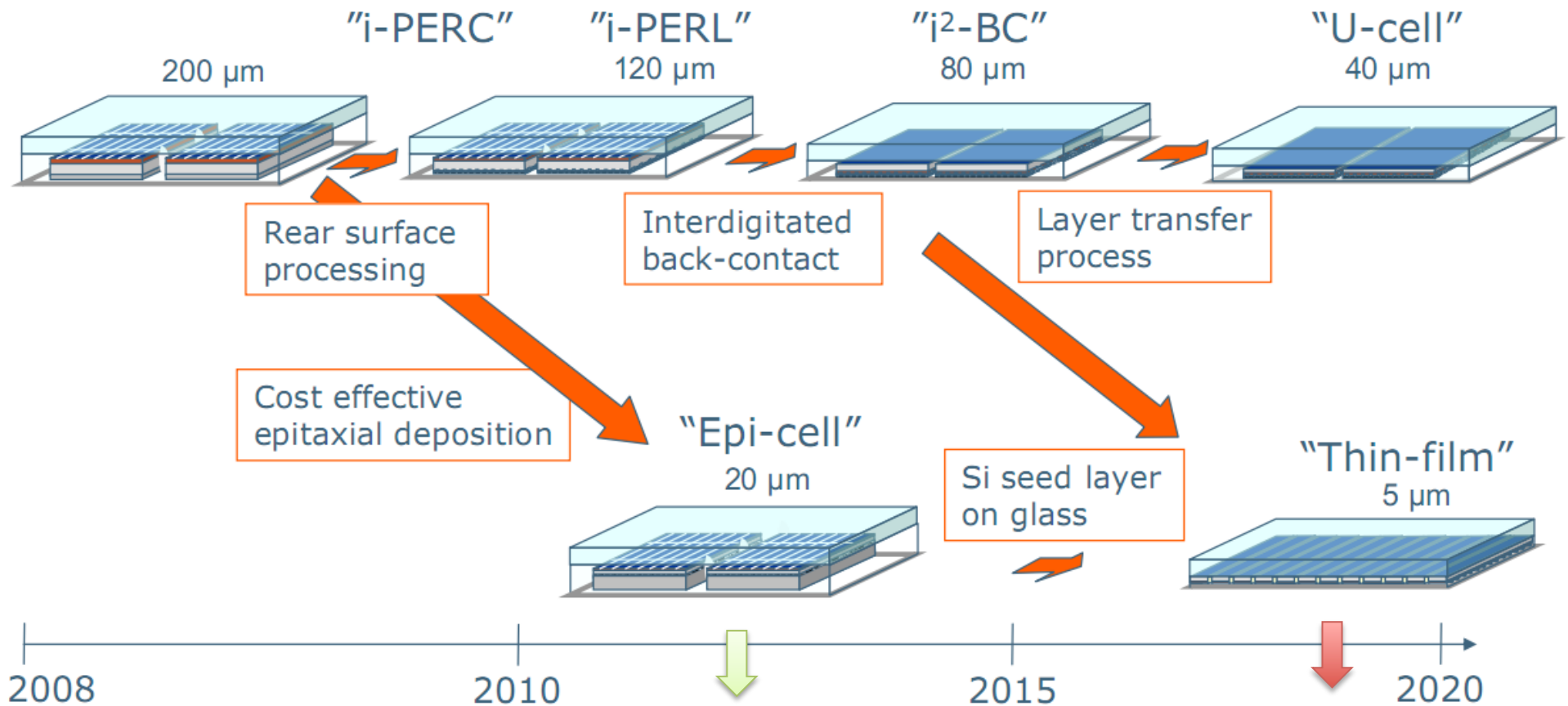
- Faible budget thermique
- Pas de découpe de lingot
- Gain de matière ( $Si < 90\mu m$ )

# Vers le Si très mince : Si ruban

RST : Ribbon on a Sacrificial Template



# Vers le Si cristallin ultramince

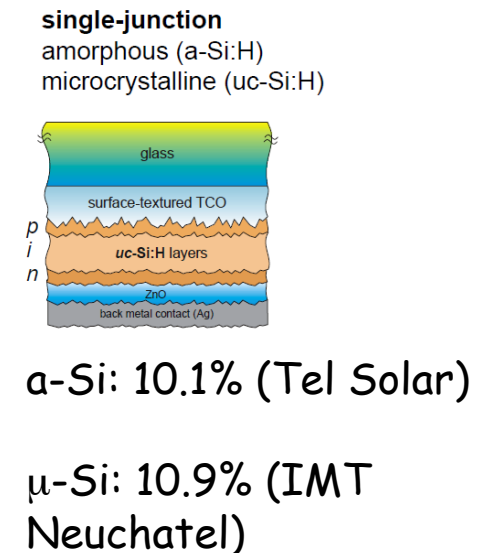
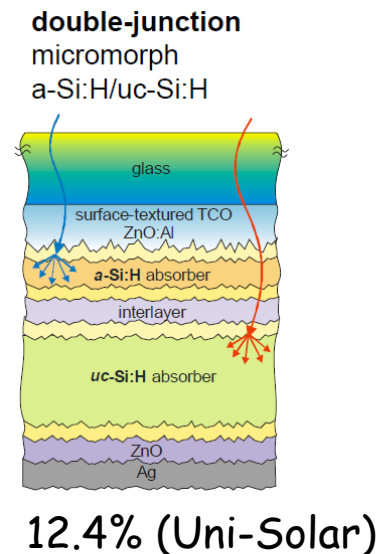
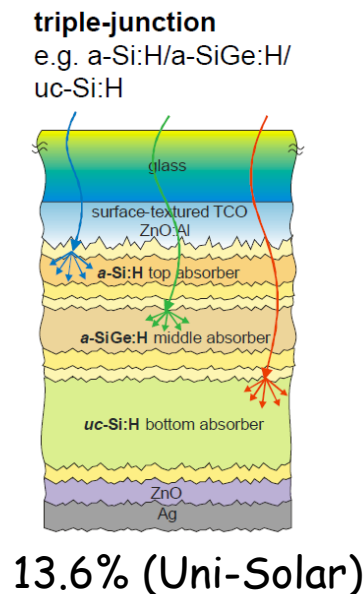


- Plasma enhanced CVD
- High temperature CVD
- Laser/e-beam crystallization

- Direct CVD
- Metal induced cryst.
- Laser induced cryst.

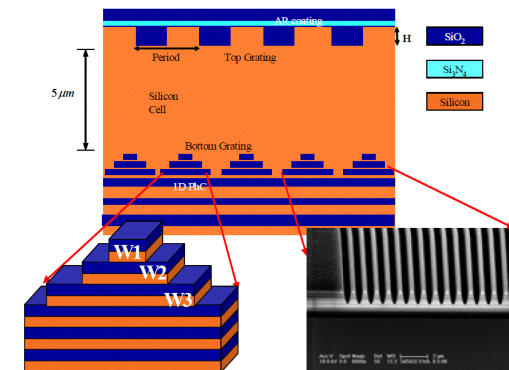
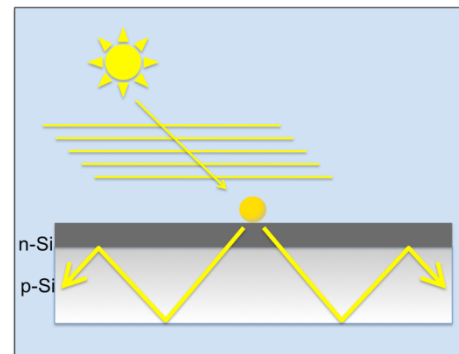
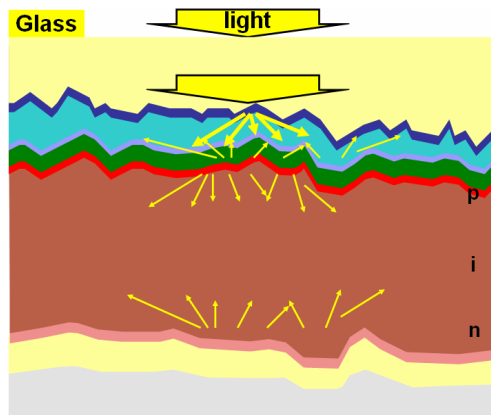
# Cellules en CM-Si: les challenges

- Augmenter le rendement de conversion
- Confinement optique (e.g. réflecteur intermédiaire, absorbeur nanostructuré 3D,...) pour réduire l'épaisseur de a-Si
- Améliorer la stabilité des cellules a-Si et mieux comprendre l'effet Staebler-Wronski
- Augmenter la vitesse de dépôt et la qualité de l'absorbeur
- ...



# Vers le Si cristallin ultramine: Challenges

- Elaboration des couches Si cristallin sur substrats souples par:
  - Synthèse de poly-Si par cristallisation induite par métaux, laser, lampes...
  - Dépôt direct dans réacteur MW-CVD
  - Encre Si
- Augmentation de l'absorption dans Si ultramine par Management optique
  - Couche interne reflectrice
  - Diffusion par nanoparticules métalliques (Ag, Al...)
  - Réseau photonique (ex: texturation /laser femtoseconde)



# Perspectives pour PV/Si cristallin

## Rendement de conversion > 20% pour modules p-type

- ▶ Diversifier les architectures: nouveaux procédés et nouveaux composants (e.g. PERC-cells, ...)
- ▶ Matériaux améliorés (e.g. printing pastes, ...)

## Augmentation de la part des cellules type n/cellules à contacts arrière

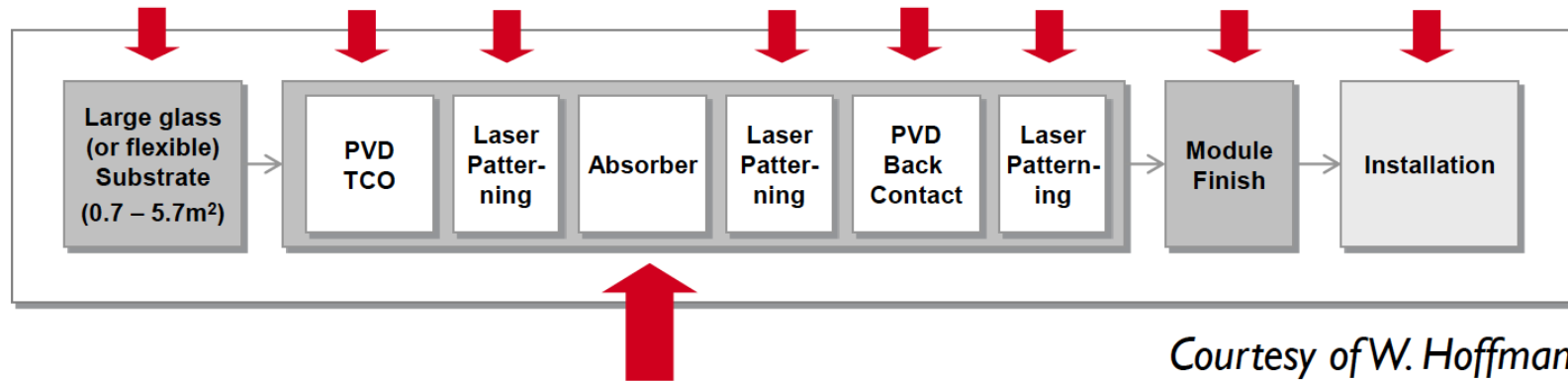
- ▶ Rendement industriel visé > 25%
- ▶ rendement simple jonction/laboratoire déjà à 25.6%

## Réduction des coûts des matériaux utilisés

- ▶ Cellules solaires Si plus minces, TF-cSi sur substrats
- ▶ Remplacement de Ag par Cu ou Al

# Les Couches minces pour le PV

Same/similar process steps with same/similar cost / m<sup>2</sup>



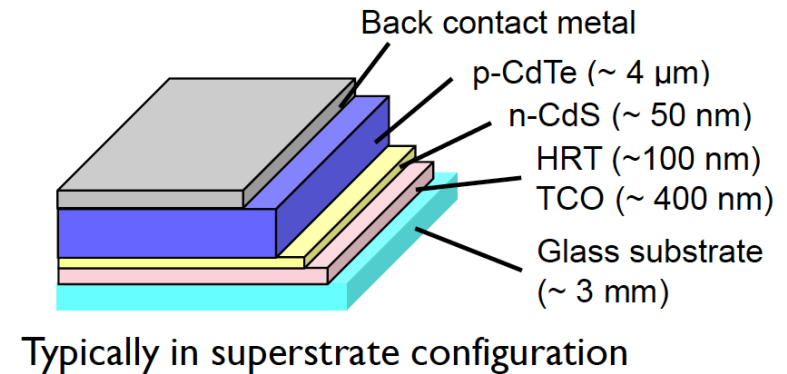
Courtesy of W. Hoffman, ASE

Principaux types de matériaux (inorganiques) absorbeurs:

- *Si amorphe/polymorphe/nanocristallin*
- *CdTe*
- *CIGS/CZTS*
- *Perovskite*
- *Organique*

# Cellules en CM-CdTe: Challenges

- Développement de nouvelles méthodes de dépôt de CdTe
- Traitement post-dépôt (e.g. traitement thermique sous CdCl<sub>2</sub>)
- Optimisation de l'architecture du composant (e.g. contact arrière, interface...)
- Preuve de la non-dangerosité des modules CdTe
- ...



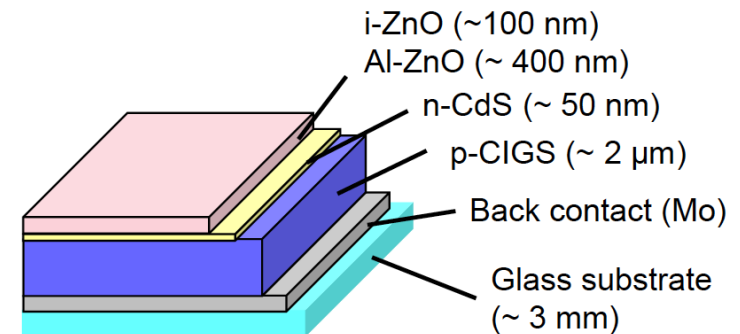
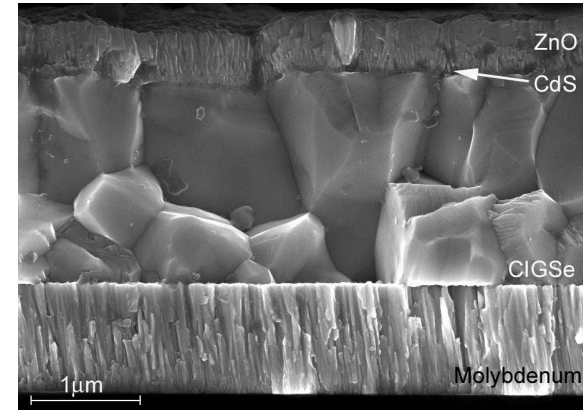
Meilleur rendement en laboratoire : 20.4%





# Cellules en CM-CIGS : Challenges

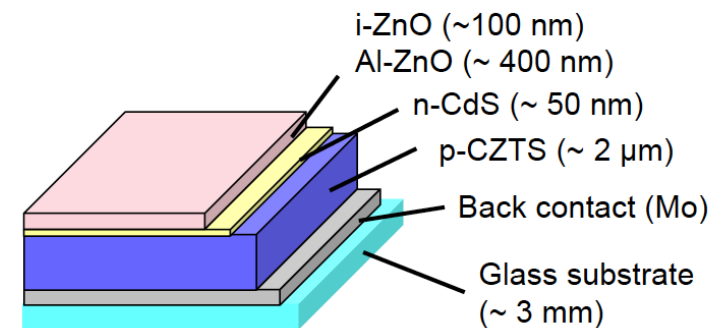
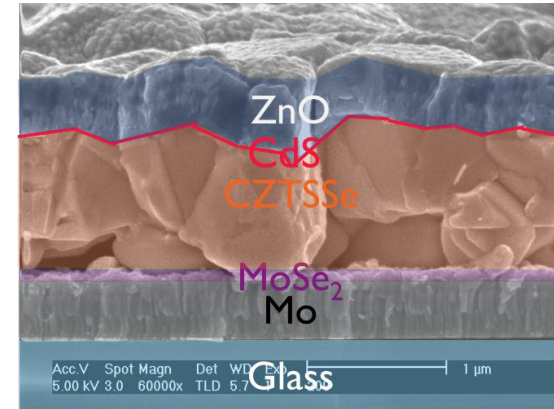
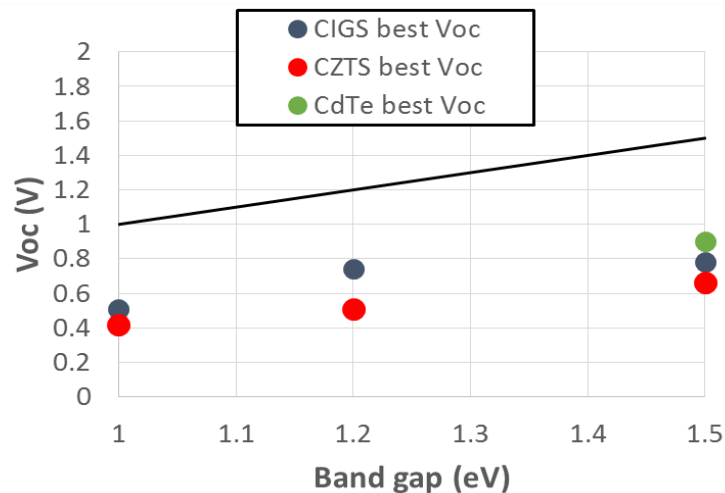
- Couches fenêtre « Cd-free »
- Couches absorbantes plus minces + confinement optique
- Elucidation du rôle exact de Na dans CIGS
- Réduire l'écart de rendement entre cell. Labo et industriels
- Problématique de la rareté de l'Indium



Meilleur rendement en laboratoire : 20.8% (ZSW)

# Cellules en CM-CZTS : Challenges

- Optimisation du dépôt des matériaux
- Control des phase secondaires pendant la croissance
- optimisation de l'architecture de la cellule (actuellement copie de CIGS cell)
- Balayage des différents composés et différents gap
- Augmenter des valeurs de Voc
- ...



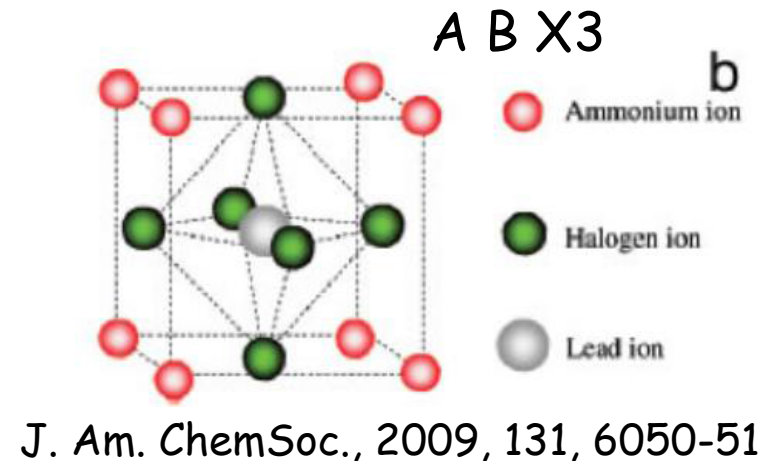
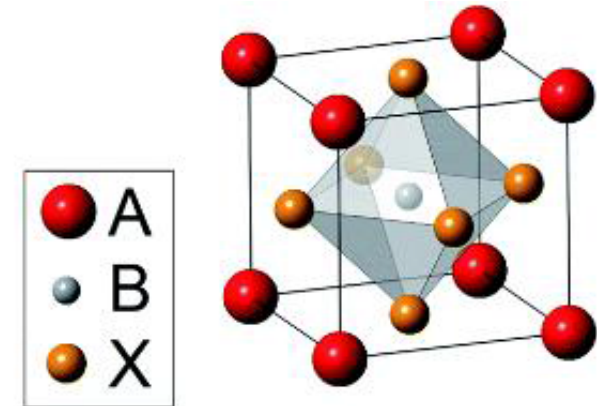
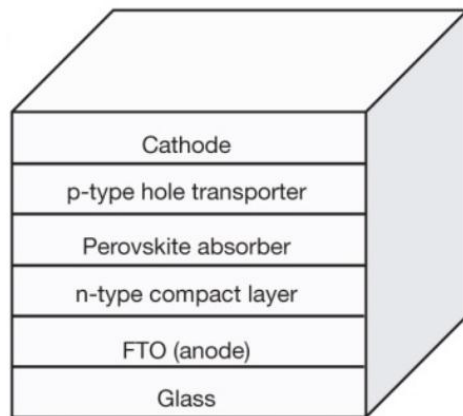
Meilleur rendement en laboratoire : 12,6% (ZSW)

# Cellules en PEROVSKITE : un nouvel arrivant

**Perovskites** = divers minéraux cristallins  
Dans PV depuis > 2009  
Rendement > 19% en lab.

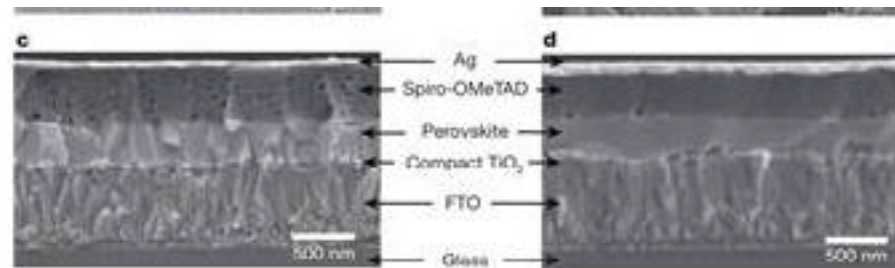
Dans PV:  $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{ M X}_3$  ou  $\text{M}=\text{Pb}$ ,  $\text{Sn}$  and  $\text{X}=\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$

- ▶ plus commun  $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{ PbI}_3$
- ▶ gap typiquement : 1.5-1.6 eV
- ▶ synthèse: chimique ou physique

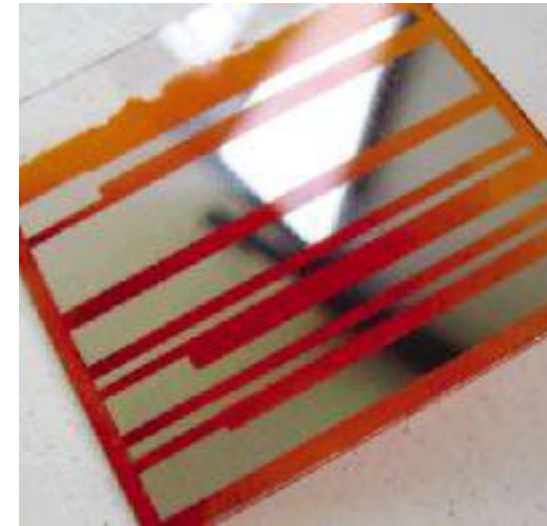
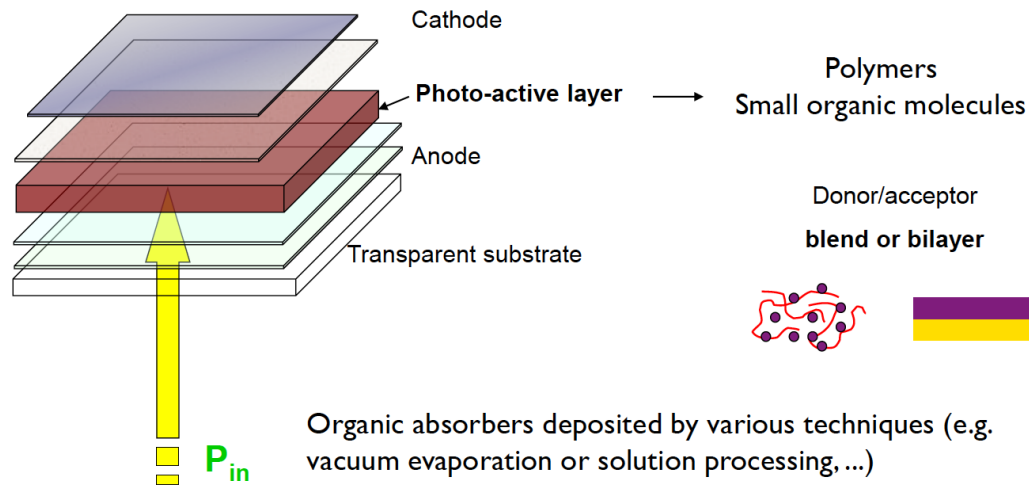


# Cellules en PEROVSKITE : Challenges

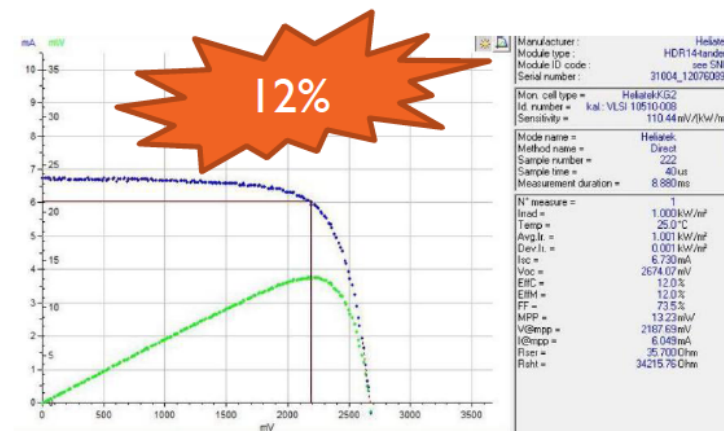
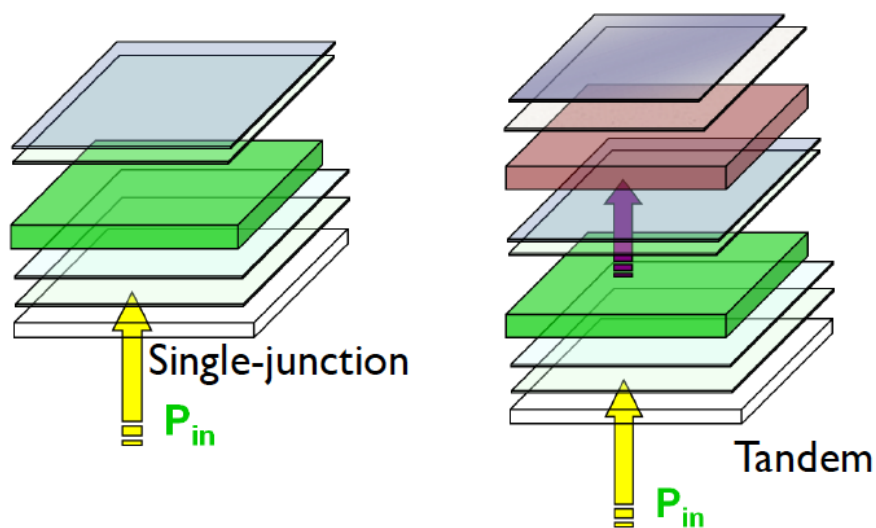
- Meilleure compréhension des propriétés des matériaux (e.g. énergie Urbach faible, effets ferro-électrique sur la séparation des charges, ...)
- Meilleure compréhension du transport de charges (mobilités, Durée de vie des porteurs, band offsets, ...)
- Remplacement de Pb par Sn
- Comprendre et améliorer la stabilité
- Trouver la technologie de dépôt la plus appropriée
- ...



# Cellules organiques: Etat de l'art et challenges



Augmenter rendement → tandem ou triple junctions

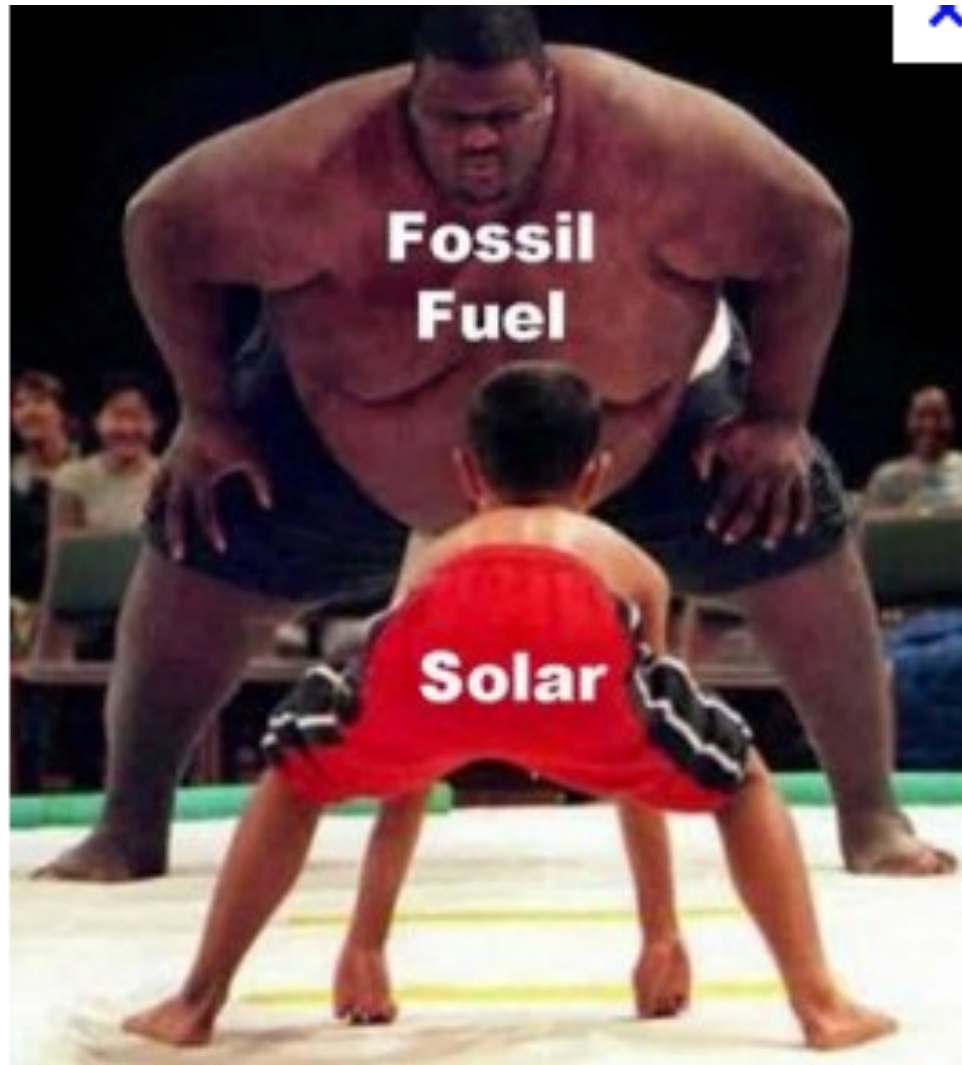


Heliatek, triple junction

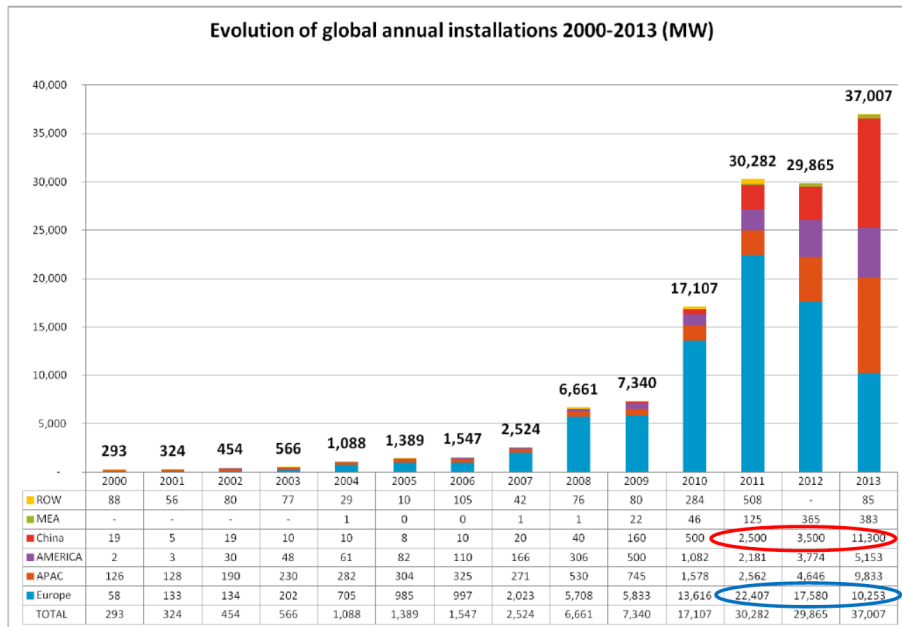
# Principaux challenges pour le PV organique

- Amélioration du rendement de conversion: *nouveau absorbeur à spectre large, objectif >15%*
- Amélioration de la stabilité: *couches « interface » pour stabiliser l'interaction entre la couche active et les electrodes*
- Réduction du coût: *procédés à fort rendement de fabrication, avec perte minimale en passant de la cellule au module*
- Convaincre le marché potentiel: *(e.g. BIPV: intégration façade); compatibilité, légèreté*
- ...

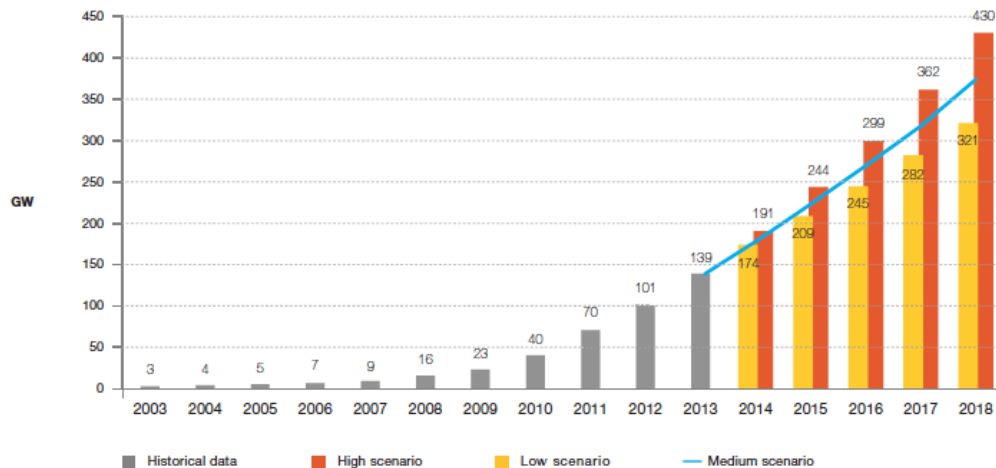
# Le Marché Photovoltaïque: la compétition !!



# Production Mondiale du Photovoltaïque



www.epia.org



✓ Installation PV mondiale a augmenté substantiellement en 2013: **37 GW**

✓ Progression moins rapide

✓ Chine = Europe

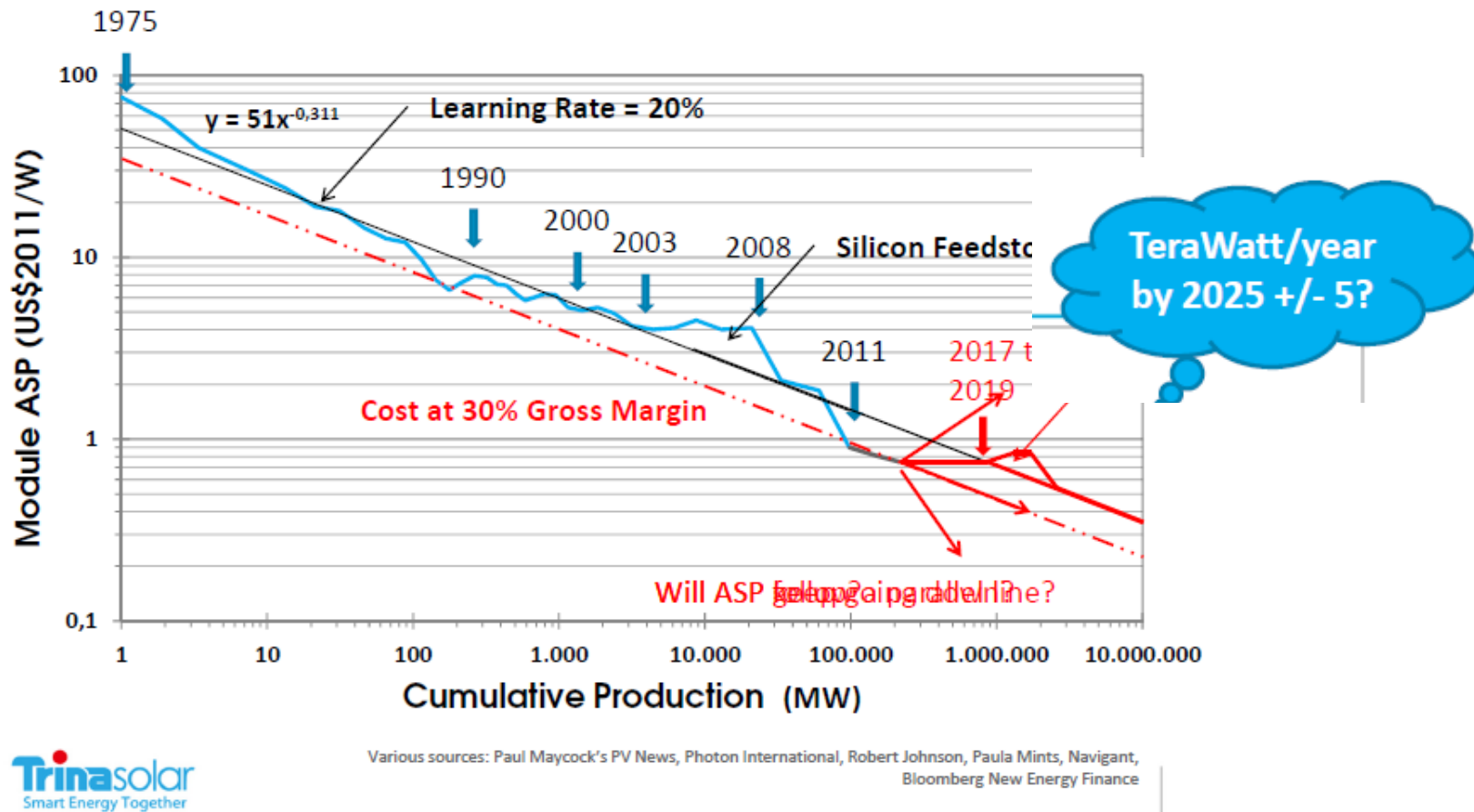
✓ Industrie PV a générée ~ **90 M€** revenue global en 2012

✓ Capacité installée cumulée mondiale pour l'énergie solaire PV ~ **139 GW** en 2013

✓ Capacité cumulée: ~ **320-430 GW** en 2018, suivant scénario

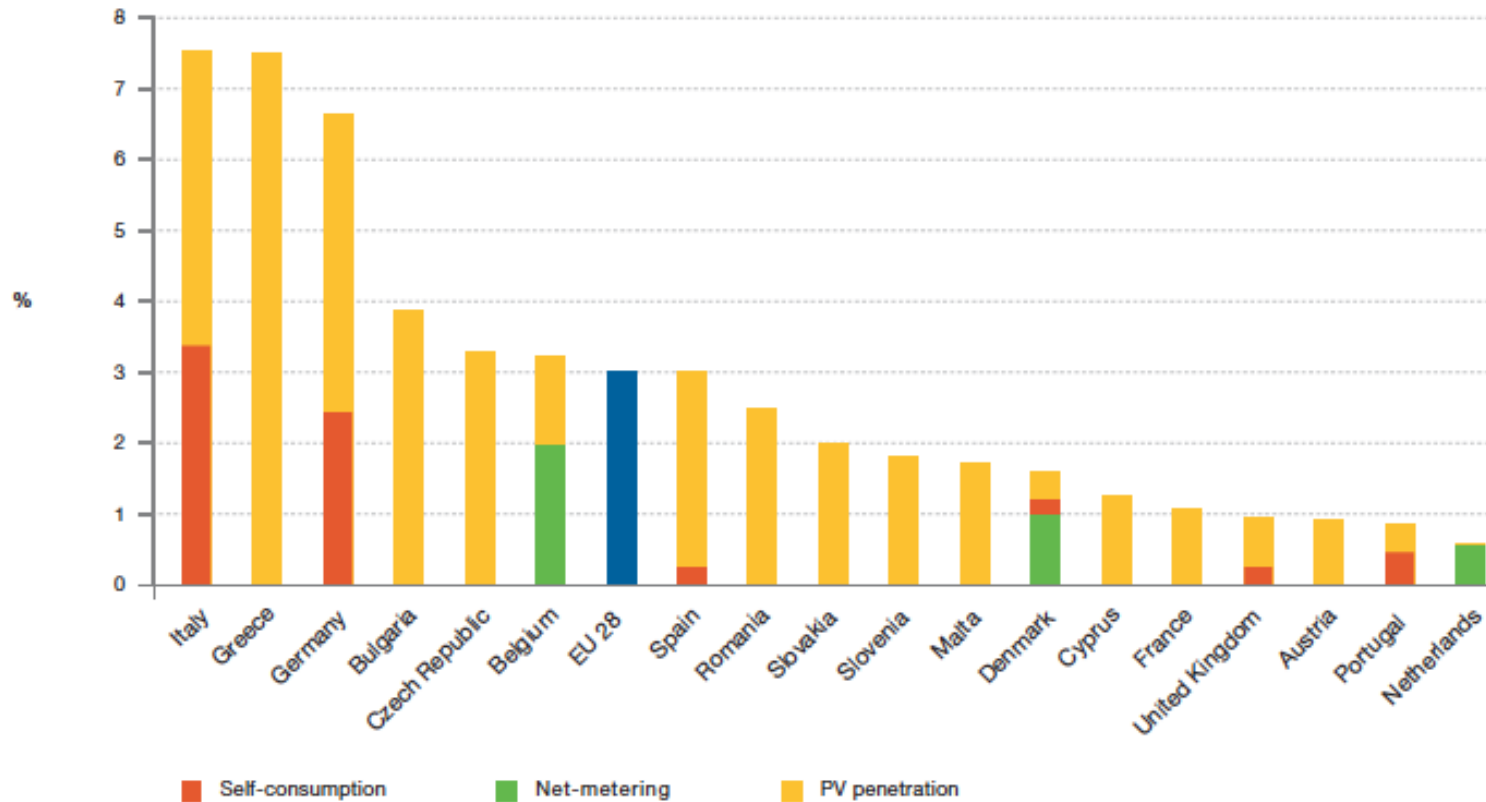


## 1975-2012 Module Prices (\$2011) *The “Great Price Decline” of PV is over*



- ***Absence de rentabilité dans le PV à l'heure actuelle***
- ***Désertion des capitaux car pas de retour sur investissement possible***
- ***Stabilisation des prix jusqu'au TW/an de capacité de production***
- ***Capacités de production (60 GW) en excès par rapport à la demande ( 32 GW)***

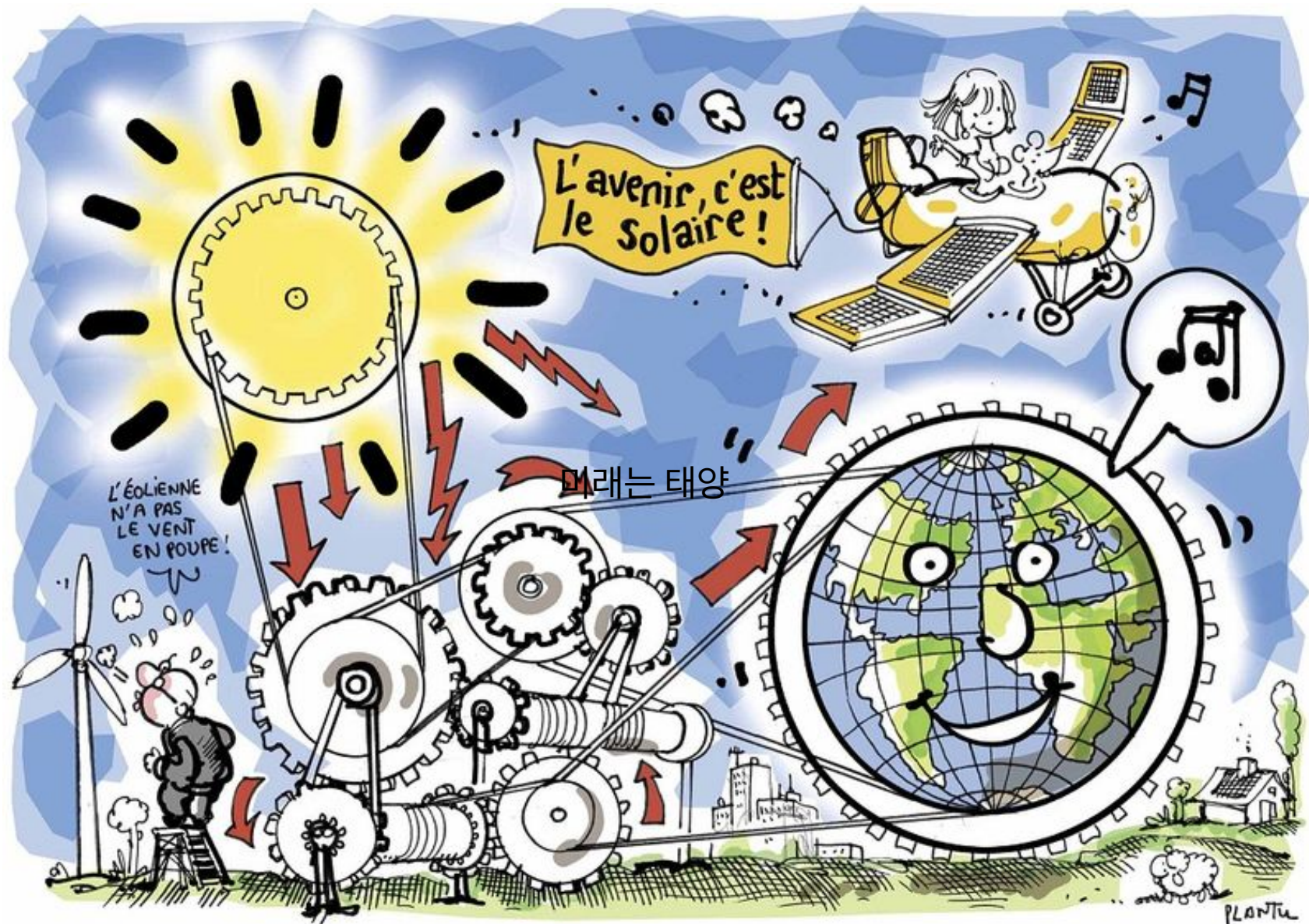
# contribution PV à la demande en Electricité dans EU 28 en 2013



- PV → 3% de la demande d'électricité en Europe (1.15 % en 2010)
- PV → réduit le pic « mi-journée », en compétitivité directe avec les autres générateurs d'électricité
- PV → fournit 6% de la demande électrique au « pic » en Europe (15% en Italie)

# Conclusions

- L'industrie PV a substantiellement progressée ces dernières décades grâce aux net progrès de R&D
- Excellente R&D est encore nécessaire pour réduire les coûts, augmenter le rendement et prolonger la durée d'utilisation des systèmes
- Cellules sur Si encore pour longtemps
- Plusieurs challenges restent encore à défier, en particulier vers les nouveaux concepts, les couches minces à base de matériaux économiquement viables (disponibilité, toxicité, recyclage...)



Merci pour votre attention