

## 11. L'énergie solaire

### 11.4 – *Les collecteurs photovoltaïques*

#### 11.4.3 *Technologies photovoltaïques*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Carlos Alberto Brandt Rodriguez

Ricardo Izquierdo, Ing., Ph.D.

Oumara Savagado

Valery J. Bouchard

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Principes et fonctionnement
- Caractéristiques
- Cellules-Modules-Panneaux (collecteurs)
- Cycle de vie et retour sur investissement
- ***Différentes technologies***
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

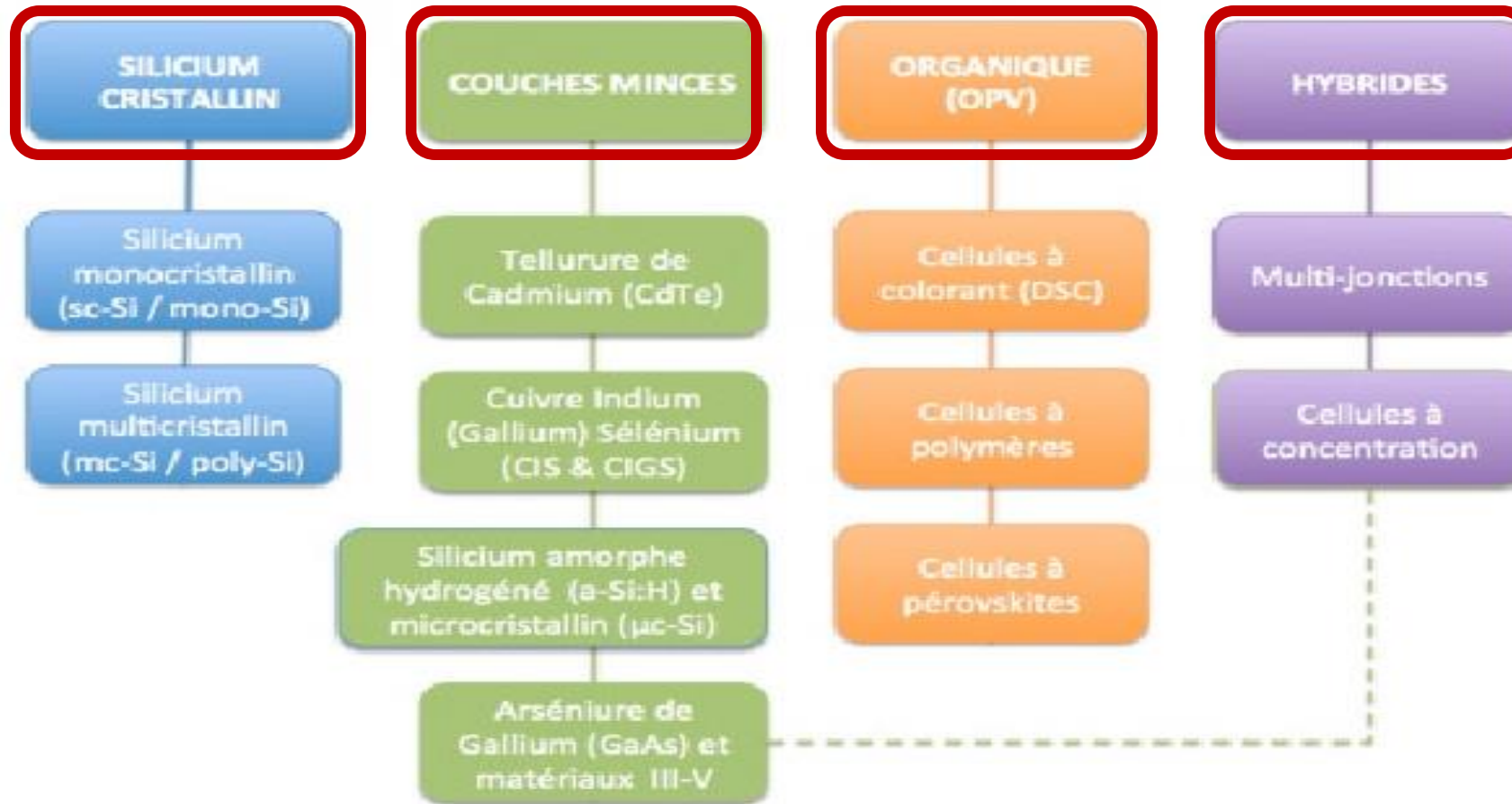
# Question



ENR2020

- Quelles sont les différentes technologies en cellules photovoltaïques ?
  - A. Silicium cristallin
  - B. Hybride
  - C. Couches minces
  - D. Organiques
  - E. Pérovskites

# Différentes technologies



Classification des principales technologies de cellules solaires PV (source :Hespul)

# Différentes technologies: silicium

- Les **cellules cristallines**, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n.
- La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pur, reste très énergivore et coûteuse.

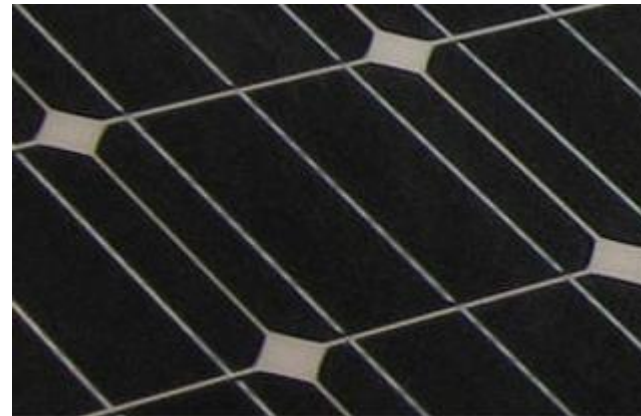


# Différentes technologies: silicium monocristallin

- Les **cellules monocristallines**

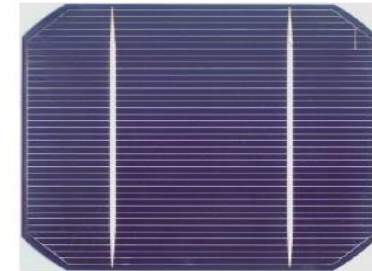
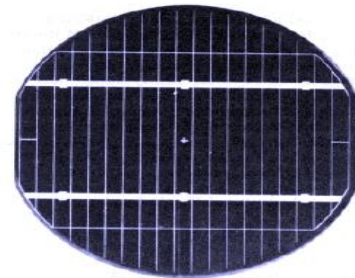
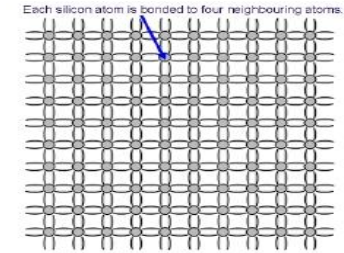
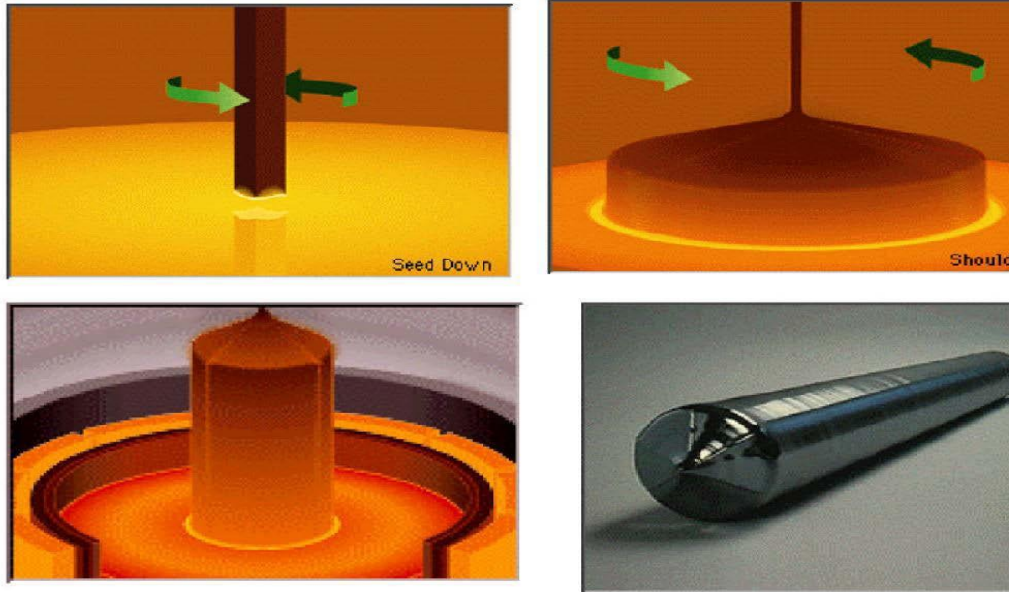
- Constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. Elles coûtent plus cher.

- Puissance unitaire :  
de 120 à 190 Wc/m<sup>2</sup>



# Différentes technologies: silicium monocristallin

## Principles of CZ growth process



© source unknown. All rights reserved. This content is excluded from our Creative Commons license. For more information, see <http://ocw.mit.edu/fairuse>.

Courtesy of [PVCDROM](#). Used with permission.

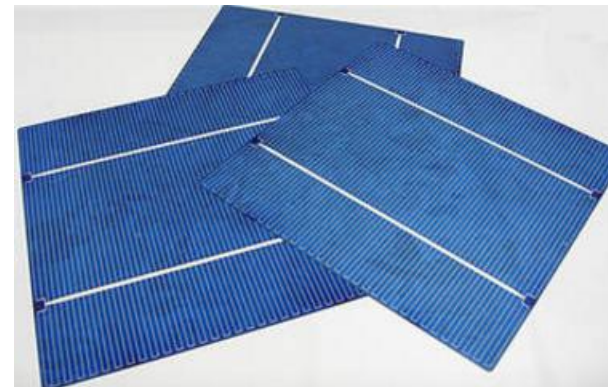
[https://www.youtube.com/watch?v=cYj\\_vqcyI78](https://www.youtube.com/watch?v=cYj_vqcyI78)

# Différentes technologies: silicium polycristallin

- Les **cellules polycristallines**

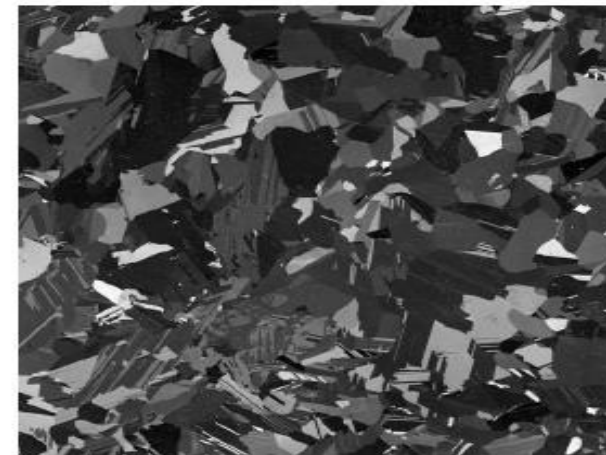
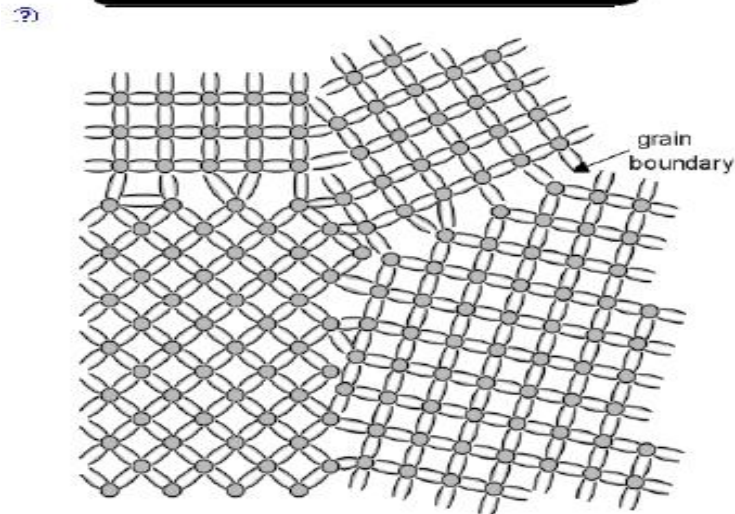
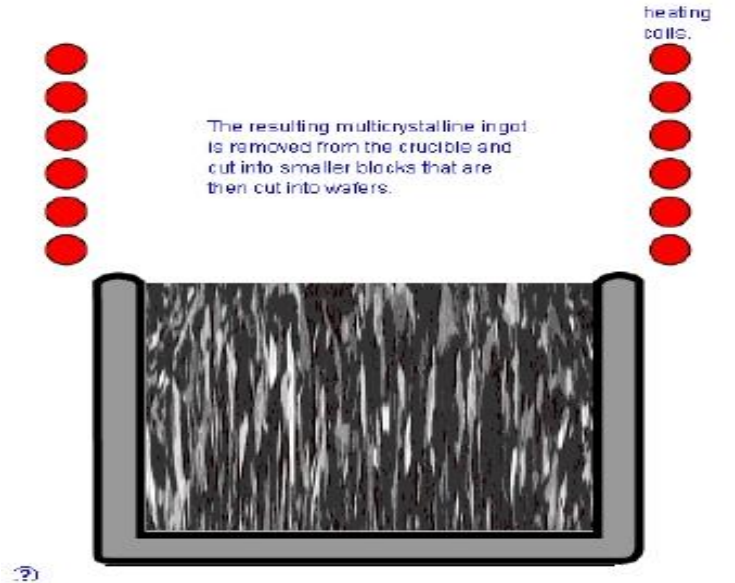
- Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

- Puissance unitaire :  
de 110 à 150 Wc/m<sup>2</sup>



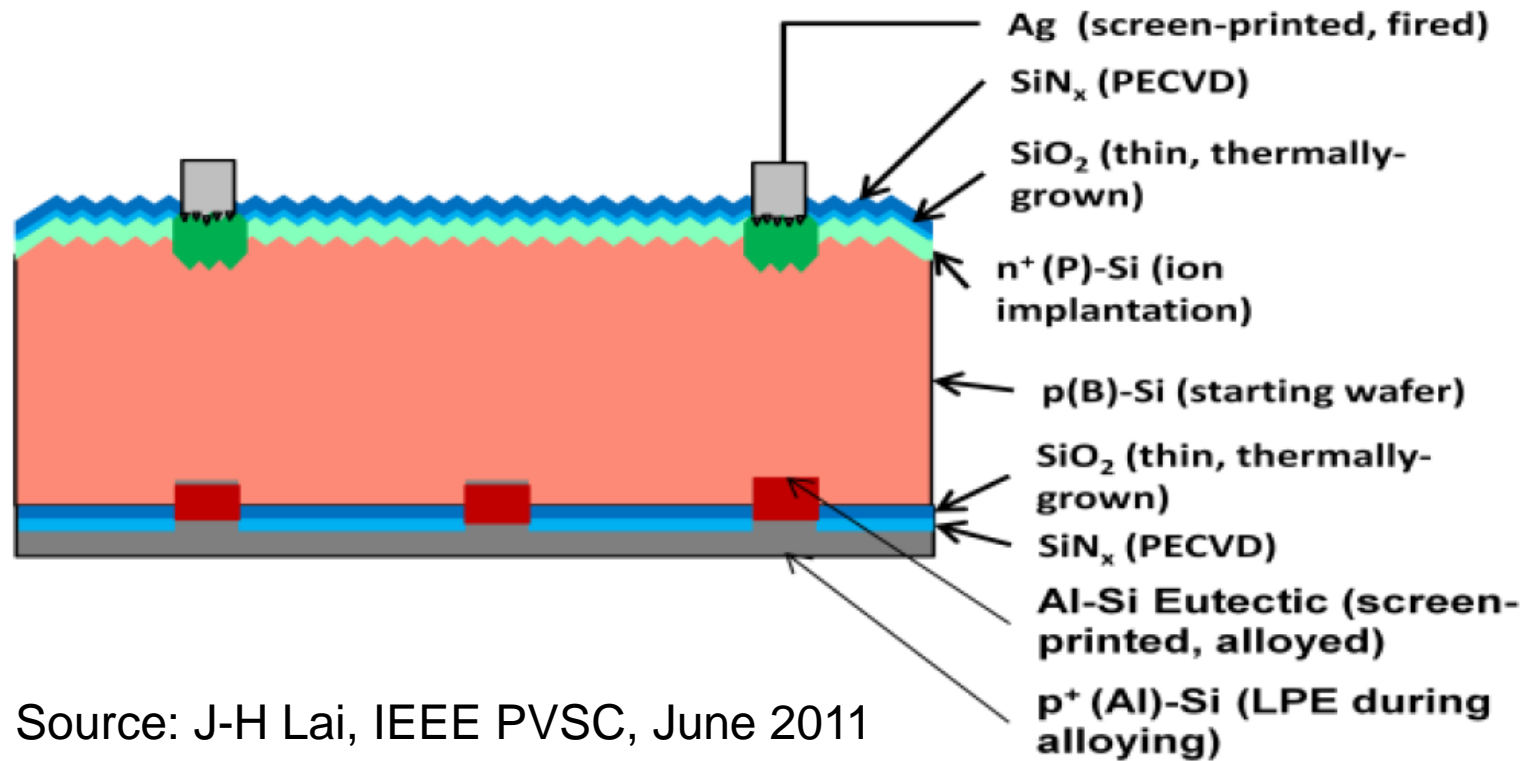


# Différentes technologies: silicium polycristallin



# Cellules solaires Si cristallin

- Exemple: cellule 19,6% d'efficacité sur du silicium CZ



Source: J-H Lai, IEEE PVSC, June 2011

# Les technologies en couche minces

- **Les couches minces**

- Le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple).
- Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération.
- Puissance unitaire (amorphe):  
de 60 à 70 Wc/m<sup>2</sup>

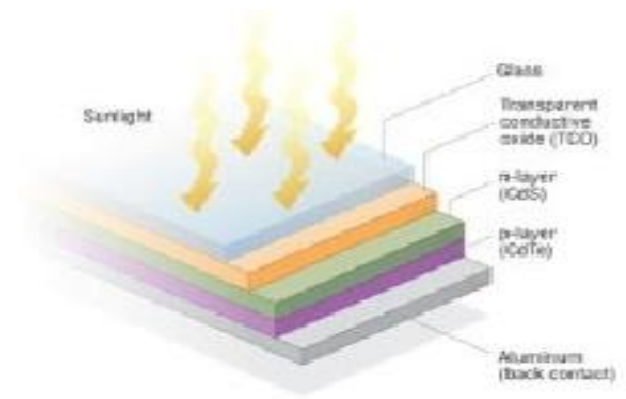


# Les technologies en couche minces

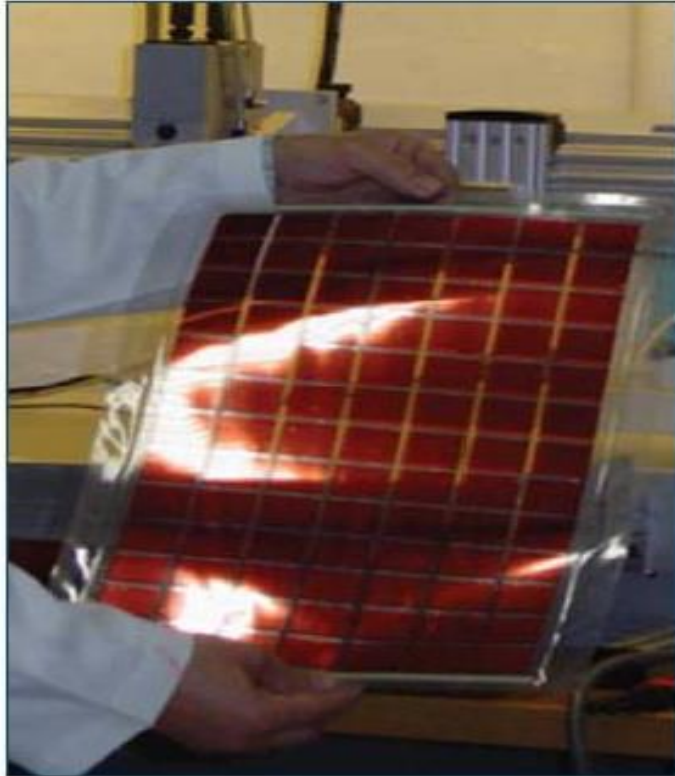
- Avantages:
  - Elles permettent de fabriquer des modules d'une surface plus importante (4 voire 6 m<sup>2</sup>), qui peuvent même être ensuite découpées;
  - Elles ne craignent pas l'échauffement, qui peut faire chuter le rendement des modules cristallins autour de 60°C, ce qui les rend plus aptes à l'intégration;
  - Elles captent mieux le rayonnement diffus, donc mieux adaptées à certains sites;
  - En phase industrielle, leur coût de fabrication est en principe moindre.
- Inconvénients:
  - Industrialisation moins avancée;
  - Matière première limitée et en concurrence avec d'autres usages;
  - Recyclage plus complexe.

# Le tellure de cadmium (CdTe)

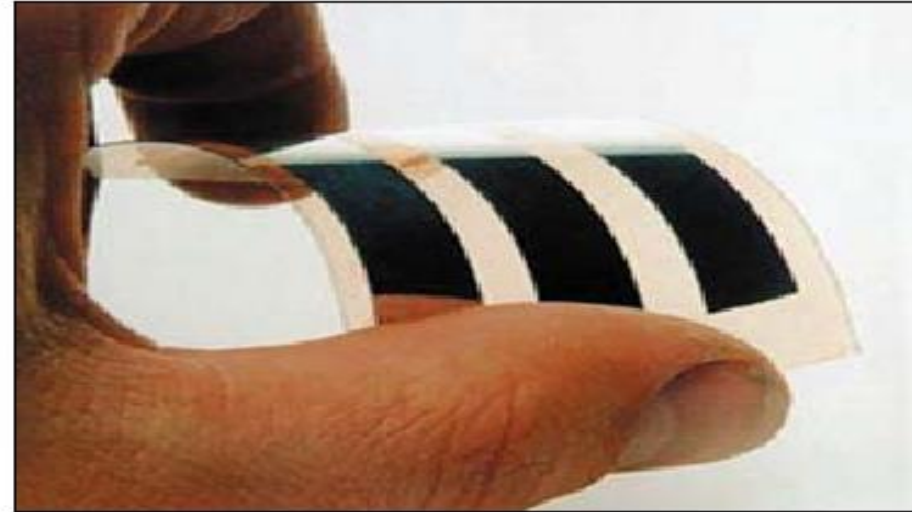
- Caractéristiques
  - Substrat : verre (face avant)
  - Fabrication : dépôt d'une couche conductrice transparente (ex: oxyde d'étain dopé à l'indium),
  - Dépôt d'une mince couche fenêtre en CdS puis de la couche d'absorption en CdTe et recristallisation par chauffage, dépôt du contact face arrière
  - Épaisseur :  $5\mu\text{m}$
  - Rendement moyen : 9-17%



# Cellules PV flexibles



Cellule photovoltaïque polymère  
Riso National Lab, Roskilde, Danemark



Cellule photovoltaïque polymère  
flexible sur PET+ITO, Univ de Linz



# Le silicium amorphe

- Caractéristiques

- Substrat : verre face avant ou verre, polymère ou métal face arrière
- Fabrication : gravure du verre frontale, dépôt du contact frontal (ZnO ou SnO<sub>2</sub> ou ITO), dépôt chimique en phase gazeuse de trois couches de silicium amorphe à partir de gaz précurseurs
  - (ex :SiH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>) :dopé bore, non dopé et dopé phosphore, dépôt du contact métallique face arrière (ex :Ag ouAl/Ni), structuration en tuile par rayure laser après chaque étape de dépôt (remarque :dépôt basse température 200°C environ)

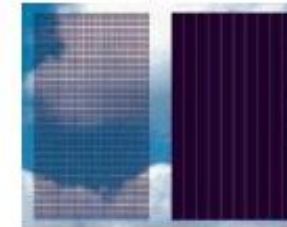
# Le silicium amorphe

- Caractéristiques
  - Épaisseur: 1  $\mu\text{m}$  dont 0,3  $\mu\text{m}$  de silicium amorphe
  - Taille de cellule: selon le substrat
  - Rendement moyen cellule: 4 – 10 % (module 5 – 7% stabilisé)
  - Aspect: brun-rougeâtre à bleu-violet
  - Transparence: par micro-gravure

**Module Unisolar de United Ovonic**



**Modules AsiThru et Asi Opak de Schott Solar**



**Modules translucides au silicium amorphe (crédit :Nexpower)**



Crédit Dr. Riad Nechache



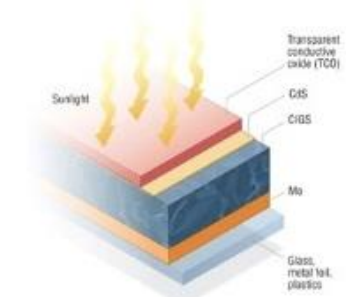
# Le Cuivre Indium Gallium (di) Selenium (CIGS)

- Caractéristiques:
  - Substrat: verre, métal ou polymère (face arrière)
  - Fabrication: dépôt du contact face arrière molybdène, dépôt par co-évaporation de cuivre, indium, gallium et disélénium, dépôt d'une fenêtre de CdS en bain chimique puis dépôt de ZnO dopé aluminium par pulvérisation cathodique, anti-refletsemiconducteur à structure chalcopyrite  $\text{CuInGaSe}_2$ , couche mince polycristalline, hétérojonction CIGS/CdS/ZnO.

# Le Cuivre Indium Gallium (di) Selenium (CIGS)

- Caractéristiques :
  - Epaisseur : 1,5 - 3,5  $\mu\text{m}$
  - Taille de cellule : selon le substrat
  - Rendement moyen cellule : 11 – 18 % (max 21,7%)
  - Aspect : uni gris foncé à noir,
  - Transparence : par micro-gravure

Structure d'une cellule CIGS (crédit : NREL)



Module PowerFLEX de Global Solar (crédit : Hanergy)

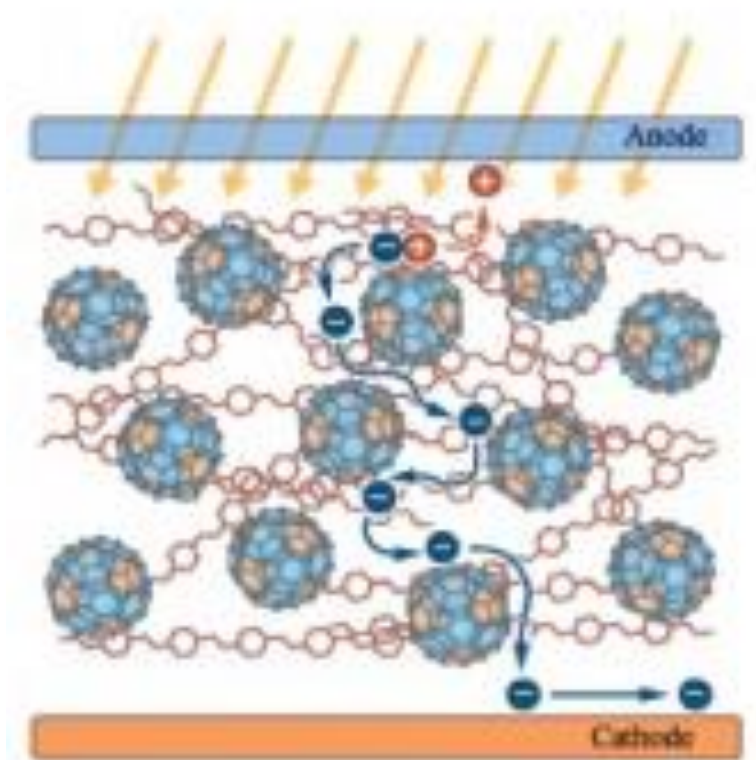


Modules de rendement 14,6 % (crédit : ManzAG)



# Cellules polymères

- Caractéristiques: Le matériau absorbeur (ou donneur d'électrons) peut être:
  - soit de petites molécules organiques comme des phtalocyanines, des polyacenes, ou des squarènes combinées avec des perylenes ou des fullerènes comme accepteurs.
  - soit des molécules à longue chaîne (ex: polymères de type P3HT, MDMO-PPV, PEDOT: PSS, PET, etc.) combinées avec des dérivés des fullerènes comme accepteurs



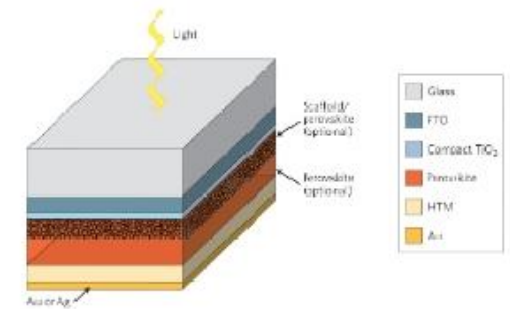
Principe d'une cellule en matière plastique (crédit :DGS)

# Cellules polymères

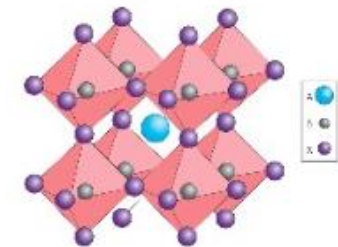
- Caractéristiques:
  - Substrat: verre
  - Fabrication: dépôt d'un oxyde conducteur transparent (TCO) sur le verre avant, dépôt d'un mélange de polymère ou d'oligomère et d'une masse de remplissage, dépôt du contact arrière
  - Épaisseur: 400nm
  - Taille de la cellule: celle de substrat
  - Rendement moyen: 8-10% (module 3-5%)
  - Couleur: selon le colorant
  - Transparence: oui

# Cellules à pérovskites

- Caractéristiques:
  - La cellule la plus répandue est à base de iodure de plomb méthylammonium:  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$
  - Substrat: verre
  - Épaisseur:  $1\mu\text{m}$
  - Taille: selon le substrat (stade R&D à ce jour)
  - Rendement moyen: 11-18% (max: 25,2%, 20,1 en 2017)
  - Couleur: brun, jaune, rouge
  - Transparence: oui



Structure d'une cellule à pérovskite  
(crédit :Martin Green etAl / Nature Photonics)

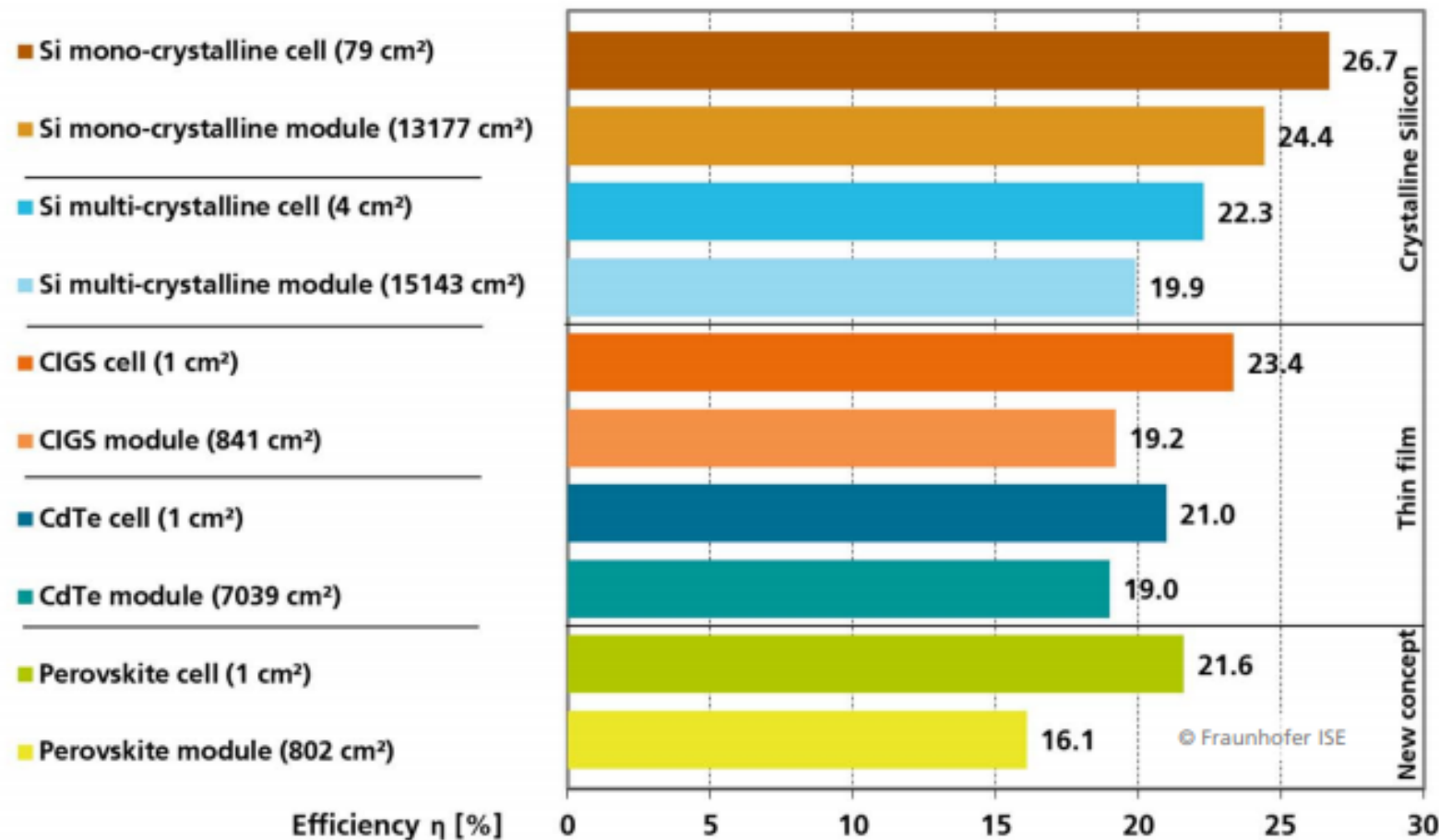


Structure d'un cristal de pérovskite générique  $\text{ABX}_3$  (crédit :Martin Green etAl / Nature Photonics)

# Cellules à pérovskites

- Caractéristiques:
  - Stabilité: très instable lorsqu'on dépasse 35% d'humidité pour une température inférieure à 45°C et au delà de 500h, baisse d'efficacité inférieure à 20%
  - Fabrication: dépôt de TiO<sub>2</sub> par couches atomiques, revêtement par centrifugation de la couche de la Perovskite, dépôt de la couche de transport de trou en CuSCN par revêtement, par centrifugation ou en solution.
  - Dépôt du contact arrière en argent ou par évaporation

# Technologies: Efficacité Cellules-Modules

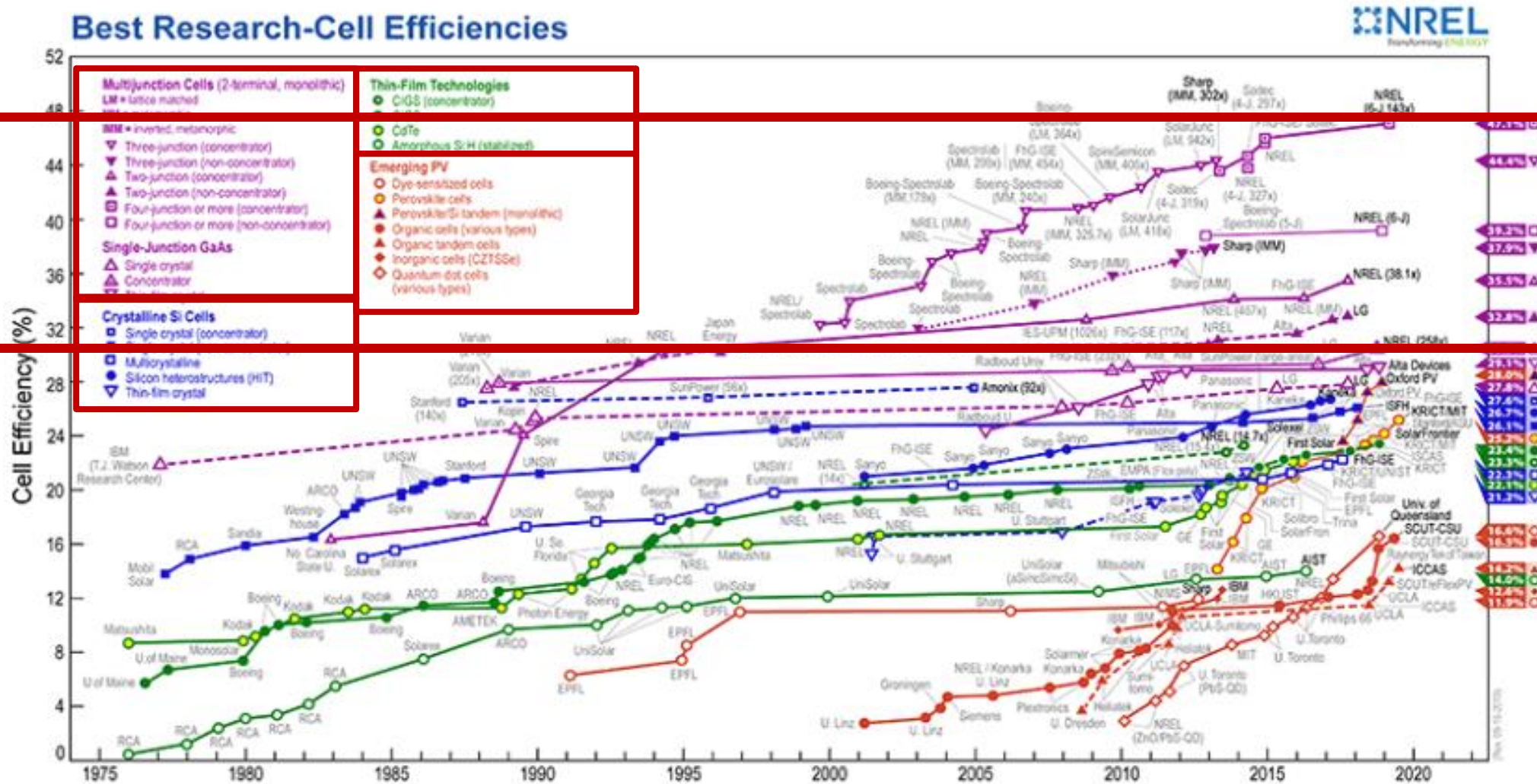


Data: Green et al.: Solar Cell Efficiency Tables (Version 55), Progress in PV: Research and Applications 2019. Graph: PSE Projects GmbH 2020

©Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 23 June 2020

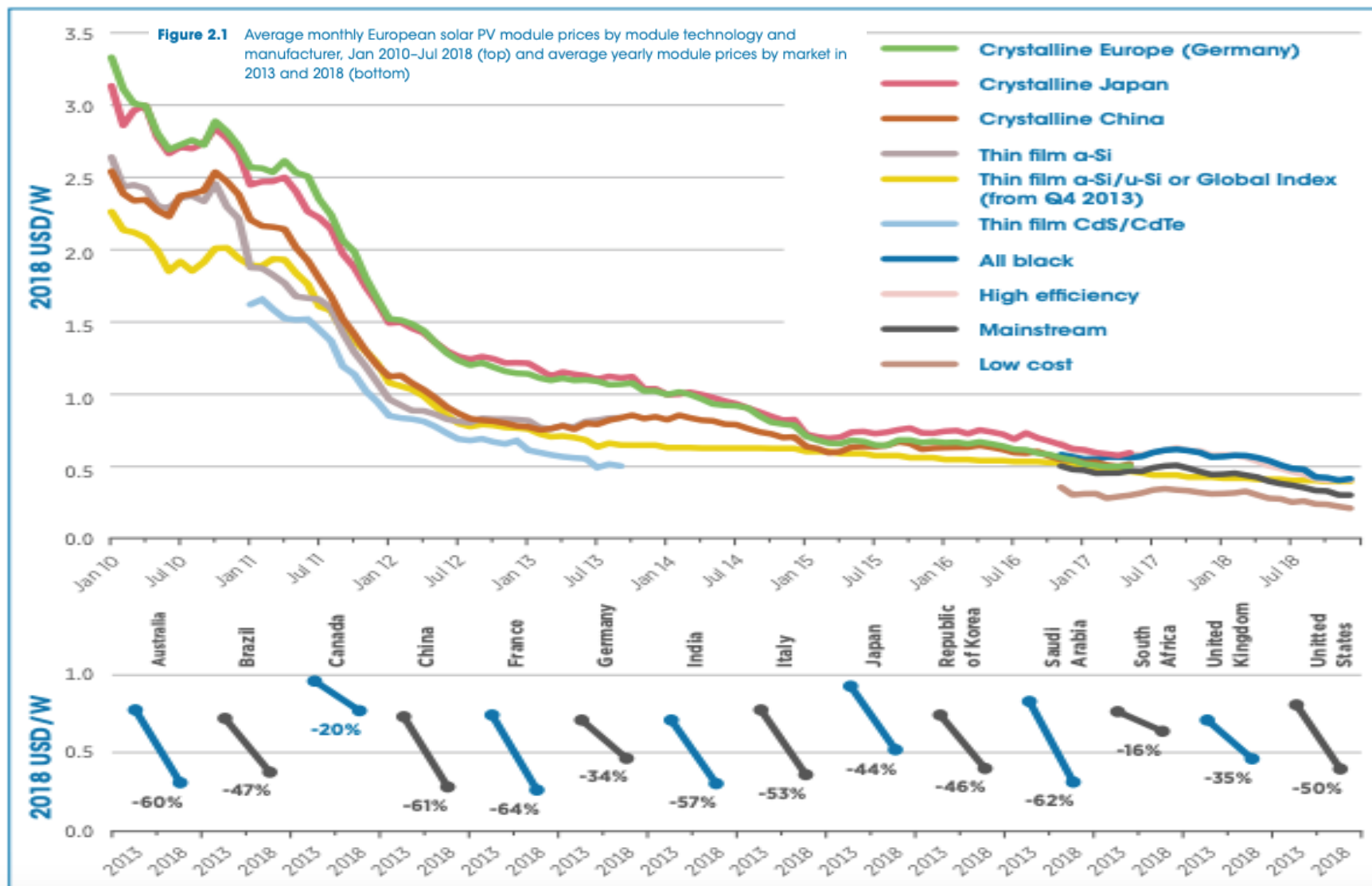


# Technologies: Efficacité Cellules



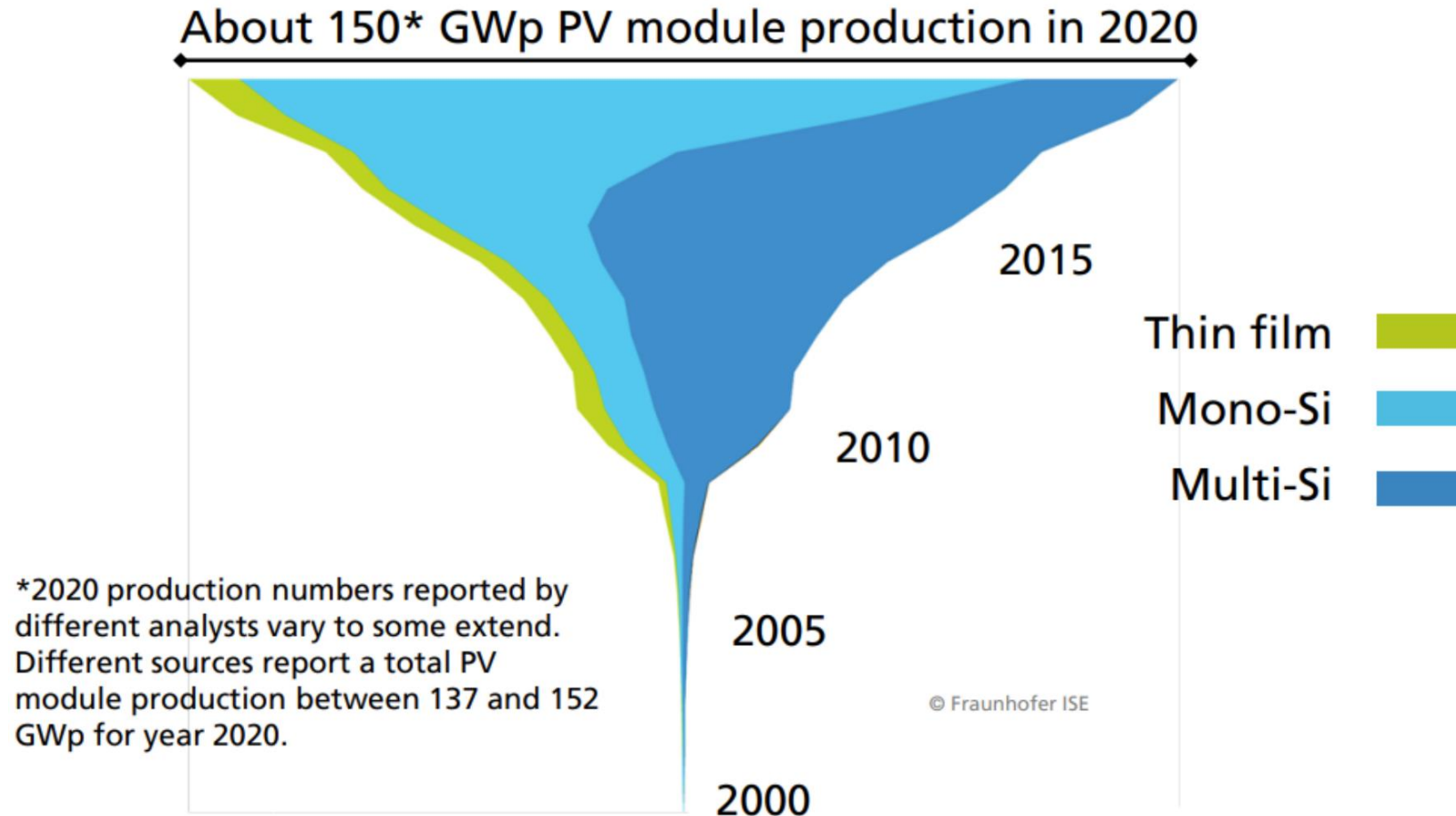


# Technologies: variation des coûts (Europe)



# Technologies répartition de l'usage

- Technologies silicium cristallin et couches fines prédominantes





**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

