

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

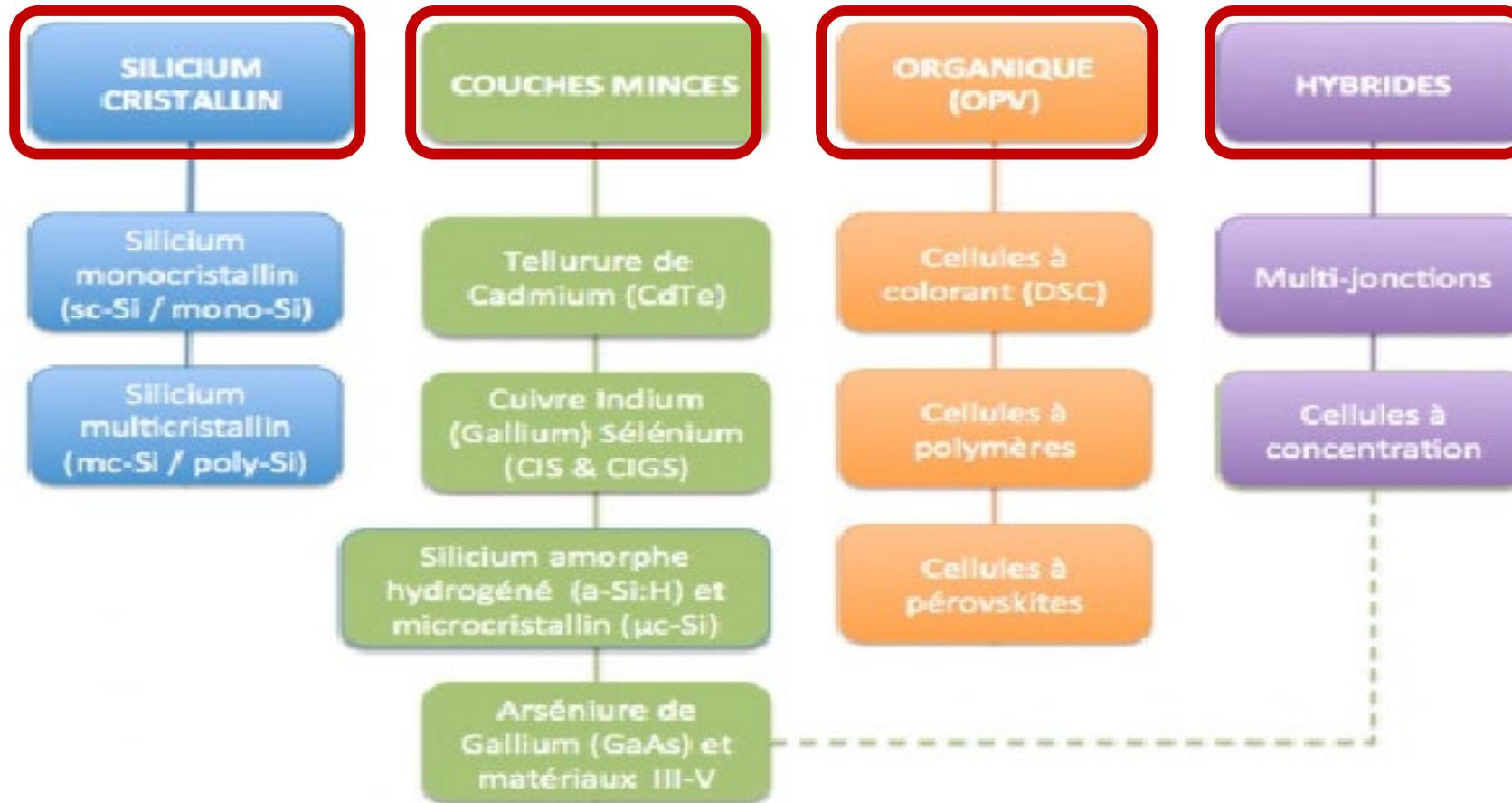
Question



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.

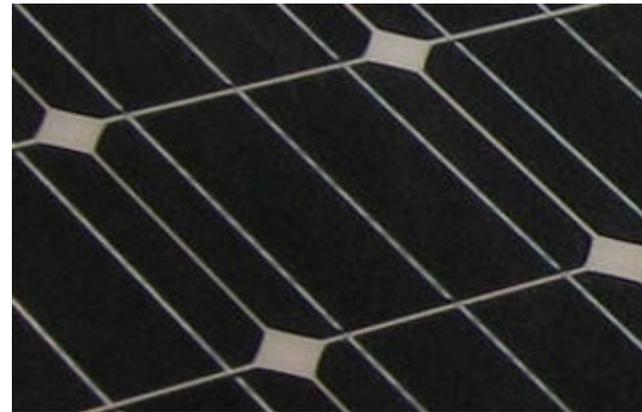


Différentes technologies: silicium monocristallin

- Les **cellules monocristallines**

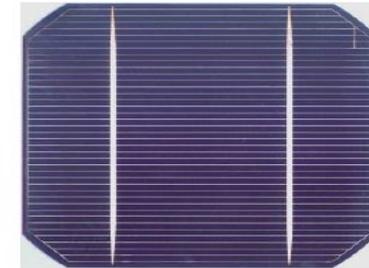
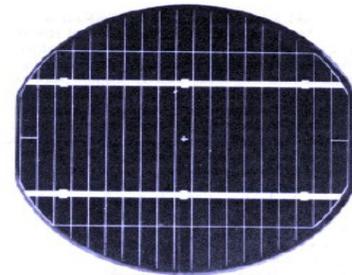
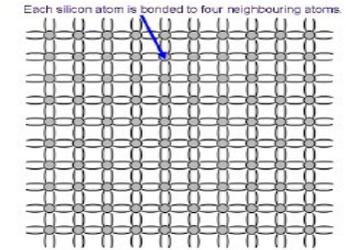
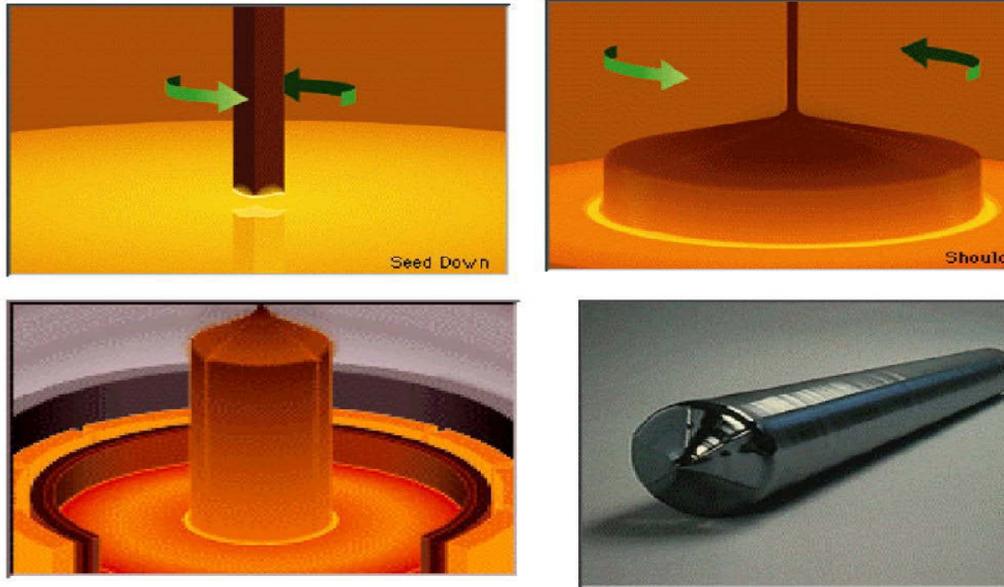
- Constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. Elles coûtent plus cher.

- Puissance unitaire :
de 120 à 190 Wc/m²



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

Différentes technologies: silicium polycristallin

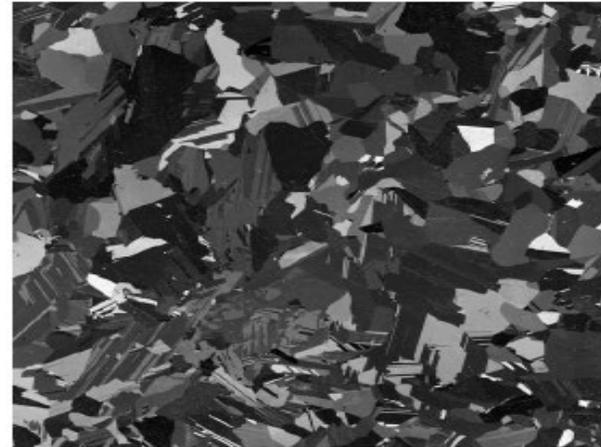
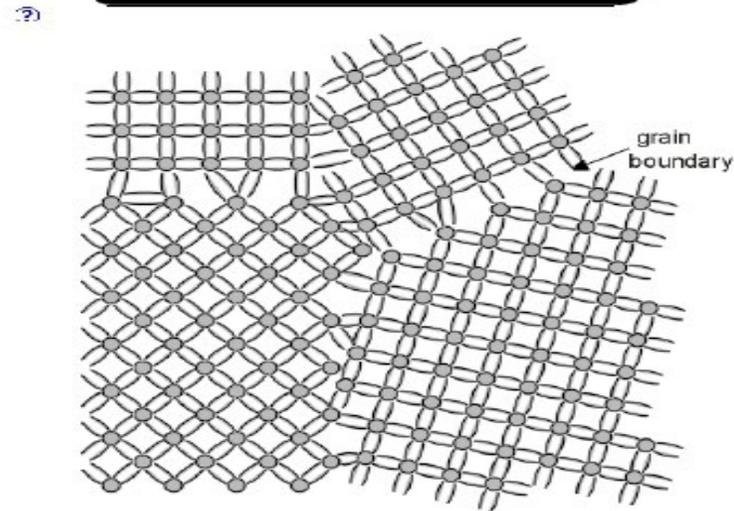
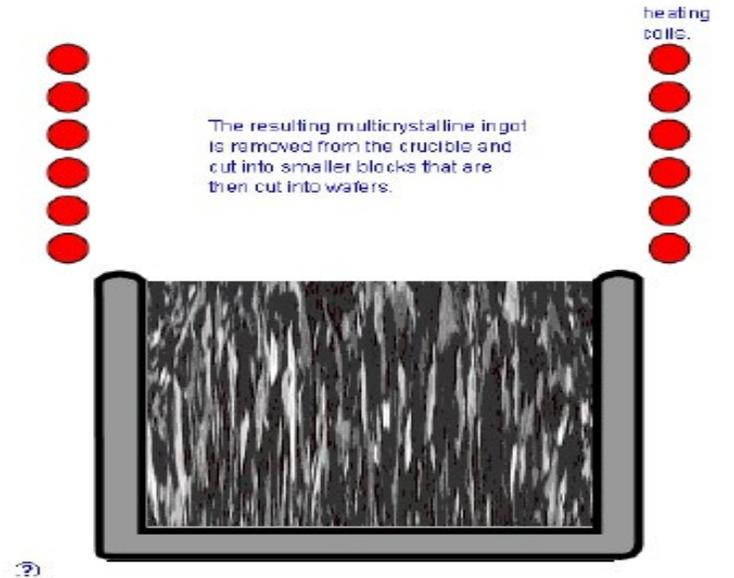
- Les **cellules polycristallines**

- 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/m²

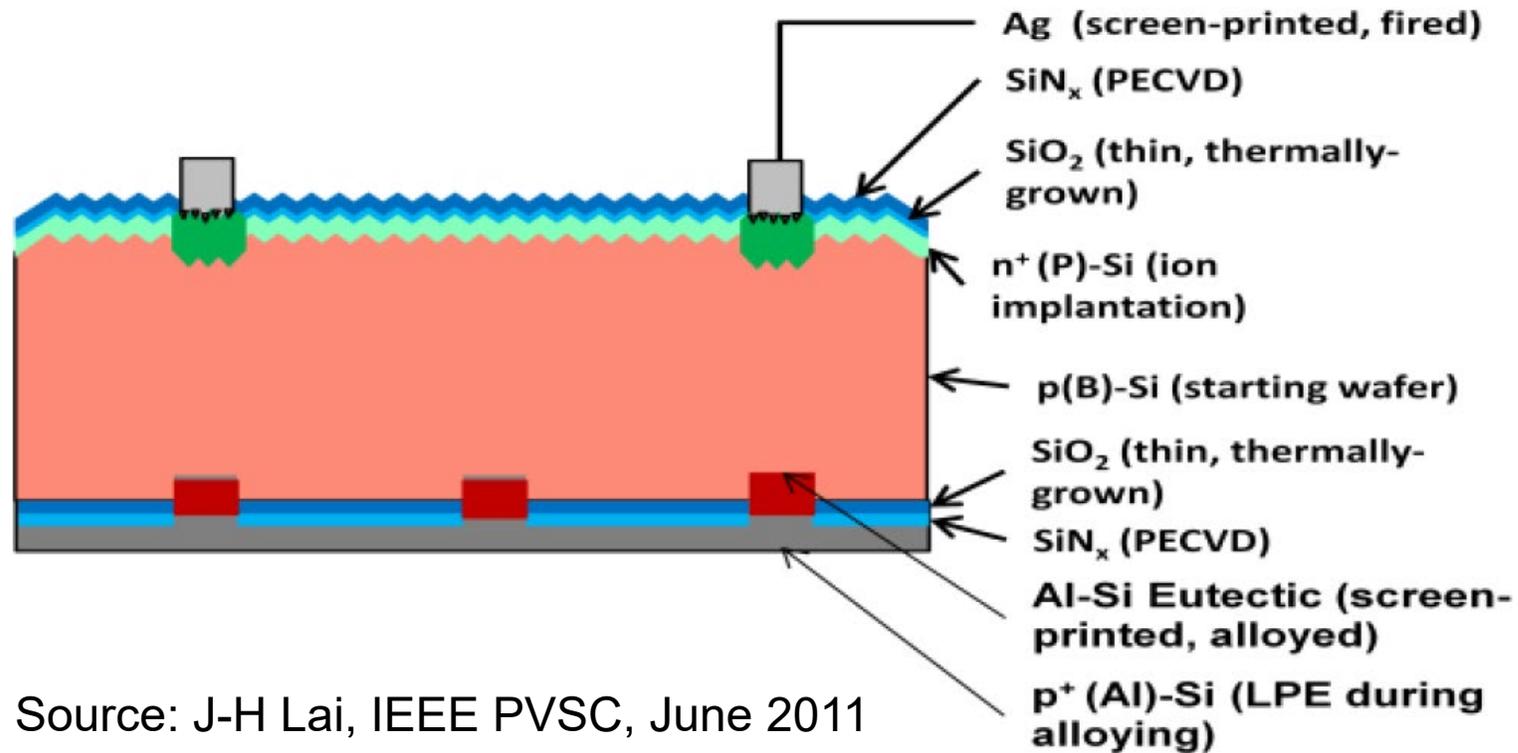


Différentes technologies: silicium polycristallin



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/m²

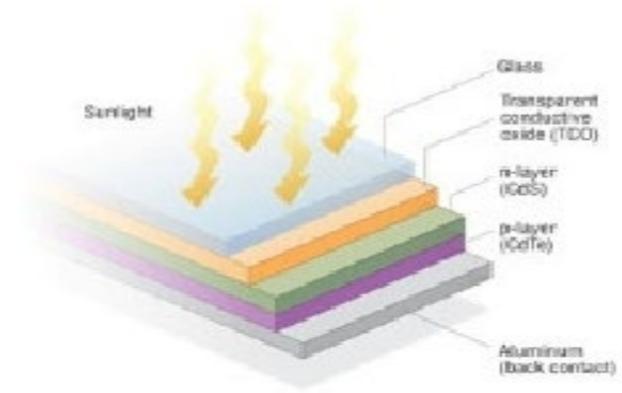


Les technologies en couche minces

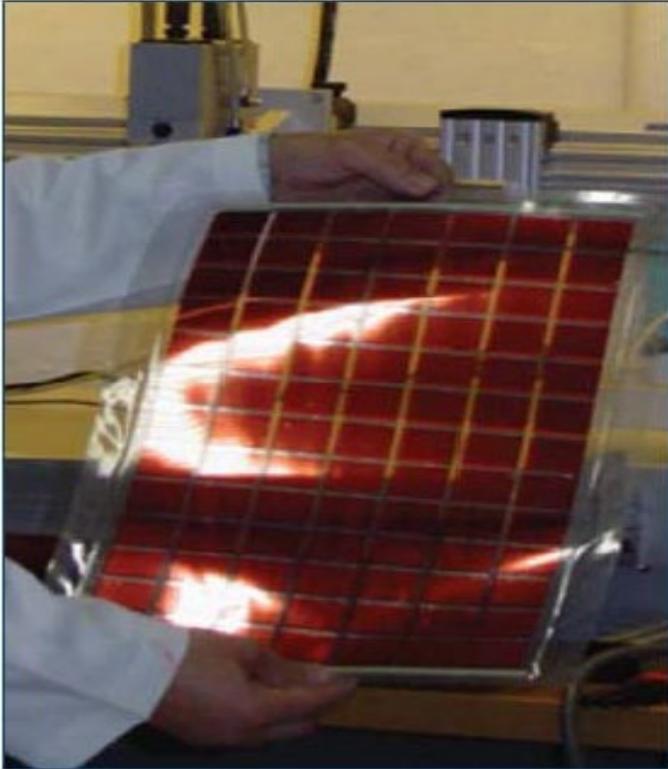
- Avantages:
 - Elles permettent de fabriquer des modules d'une surface plus importante (4 voire 6 m²), qui peuvent même être ensuite découpées;
 - Elles ne craignent pas l'échauffement, qui peut faire chuter le rendement des modules cristallins autour de 60°C, ce qui les rend plus aptes à l'intégration;
 - 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)

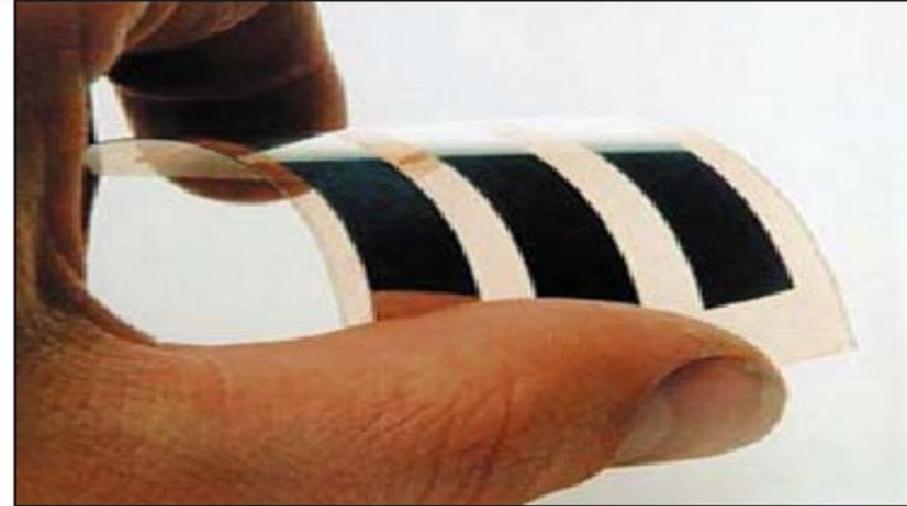
- Caractéristiques
 - Substrat : verre (face avant)
 - Fabrication : dépôt d'une couche conductrice transparente (ex: oxyde d'étain dopé à l'indium),
 - Dépôt d'une mince couche fenêtre en CdS puis de la couche d'absorption en CdTe et recristallisation par chauffage, dépôt du contact face arrière
 - 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 SnO₂ ou ITO), dépôt chimique en phase gazeuse de trois couches de silicium amorphe à partir de gaz précurseurs
 - (ex :SiH₄ et H₂) :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)

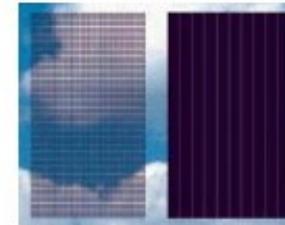
Le silicium amorphe

- Caractéristiques
 - Épaisseur: 1 μm dont 0,3 μm 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

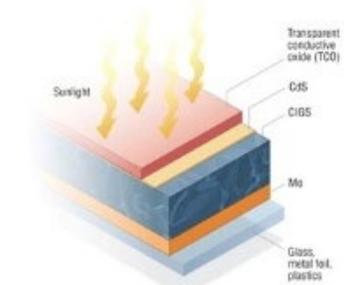
Le Cuivre Indium Gallium (di) Selenium (CIGS)

- 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 CuInGaSe_2 , couche mince polycristalline, hétérojonction CIGS/CdS/ZnO.

Le Cuivre Indium Gallium (di) Selenium (CIGS)

- Caractéristiques :
 - Epaisseur : 1,5 - 3,5 μm
 - 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)

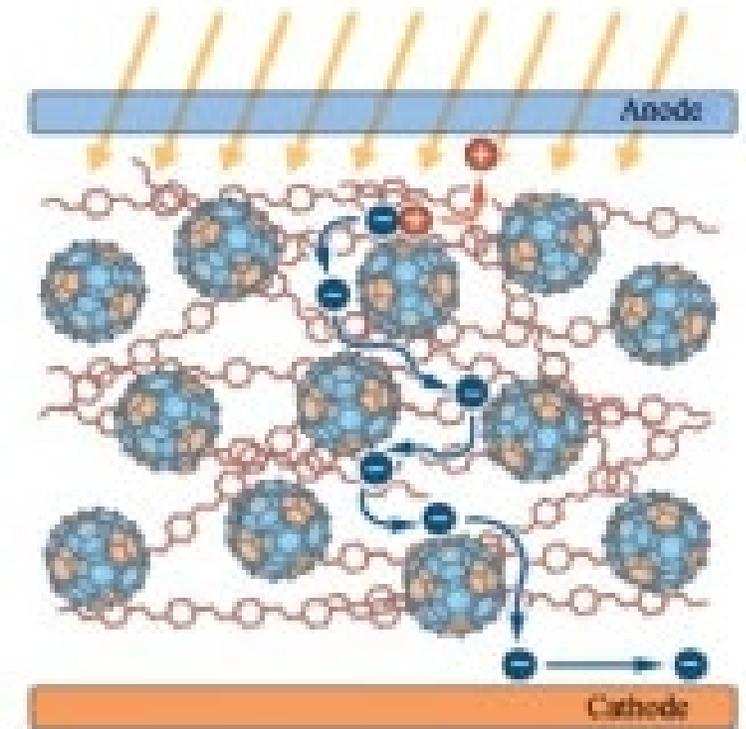


Modules de rendement 14,6 % (crédit : ManzAG)



Cellules polymères

- Caractéristiques: Le matériau absorbeur (ou donneur d'électrons) peut être:
 - soit de petites molécules organiques comme des phtalocyanines, des polyacenes, ou des squarenes 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



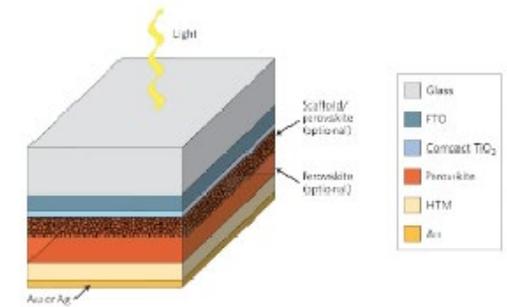
Principe d'une cellule en matière plastique (crédit :DGS)

Cellules polymères

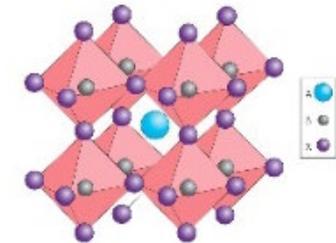
- Caractéristiques:
 - Substrat: verre
 - Fabrication: dépôt d'un oxyde conducteur transparent (TCO) sur le verre avant, dépôt d'un mélange de polymère ou d'oligomère et d'une masse de remplissage, dépôt du contact arrière
 - Épaisseur: 400nm
 - Taille de la cellule: celle de substrat
 - Rendement moyen: 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 et al / Nature Photonics)

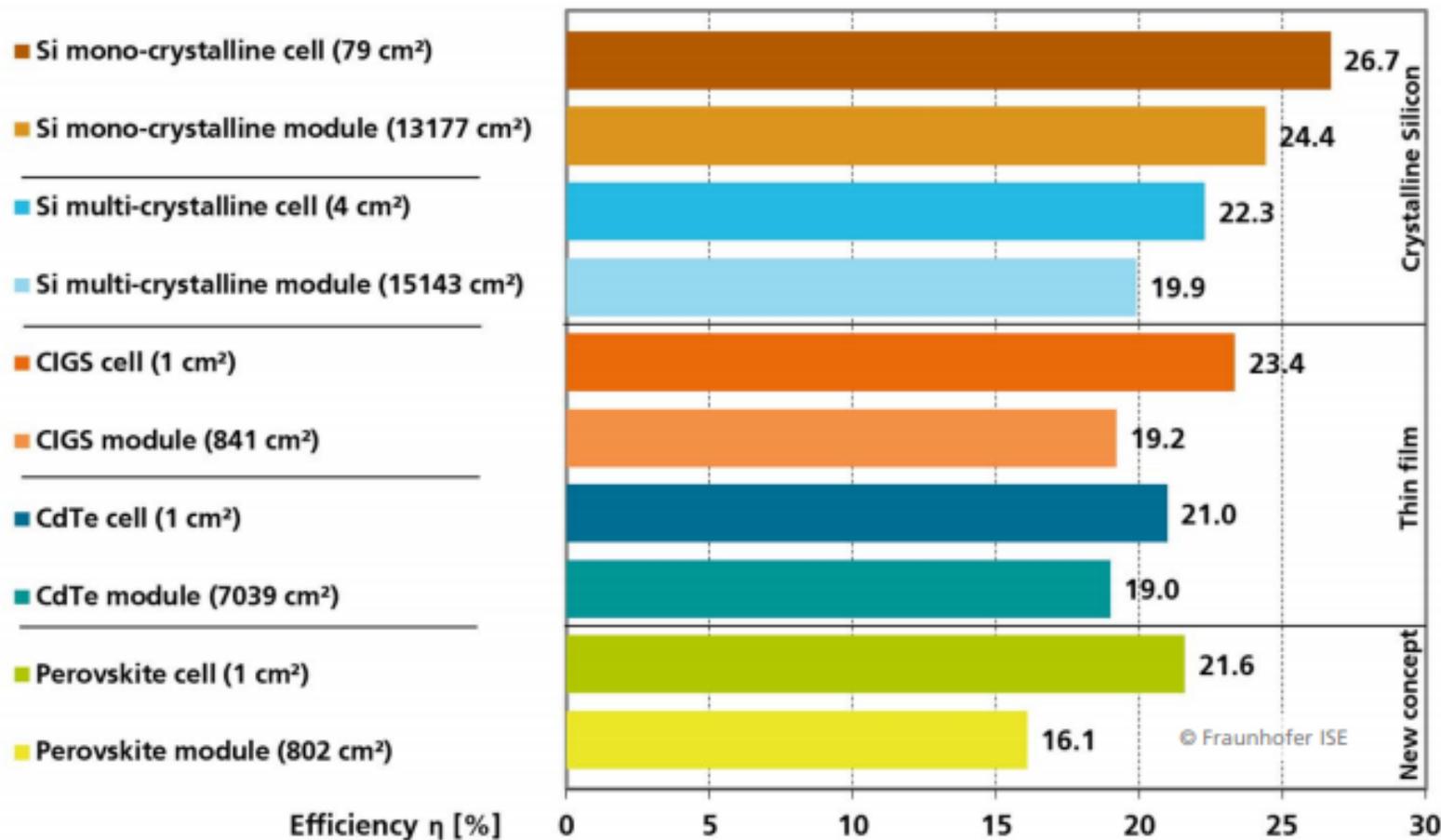


Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX_3 (crédit : Martin Green et al / Nature Photonics)

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 TiO₂ 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

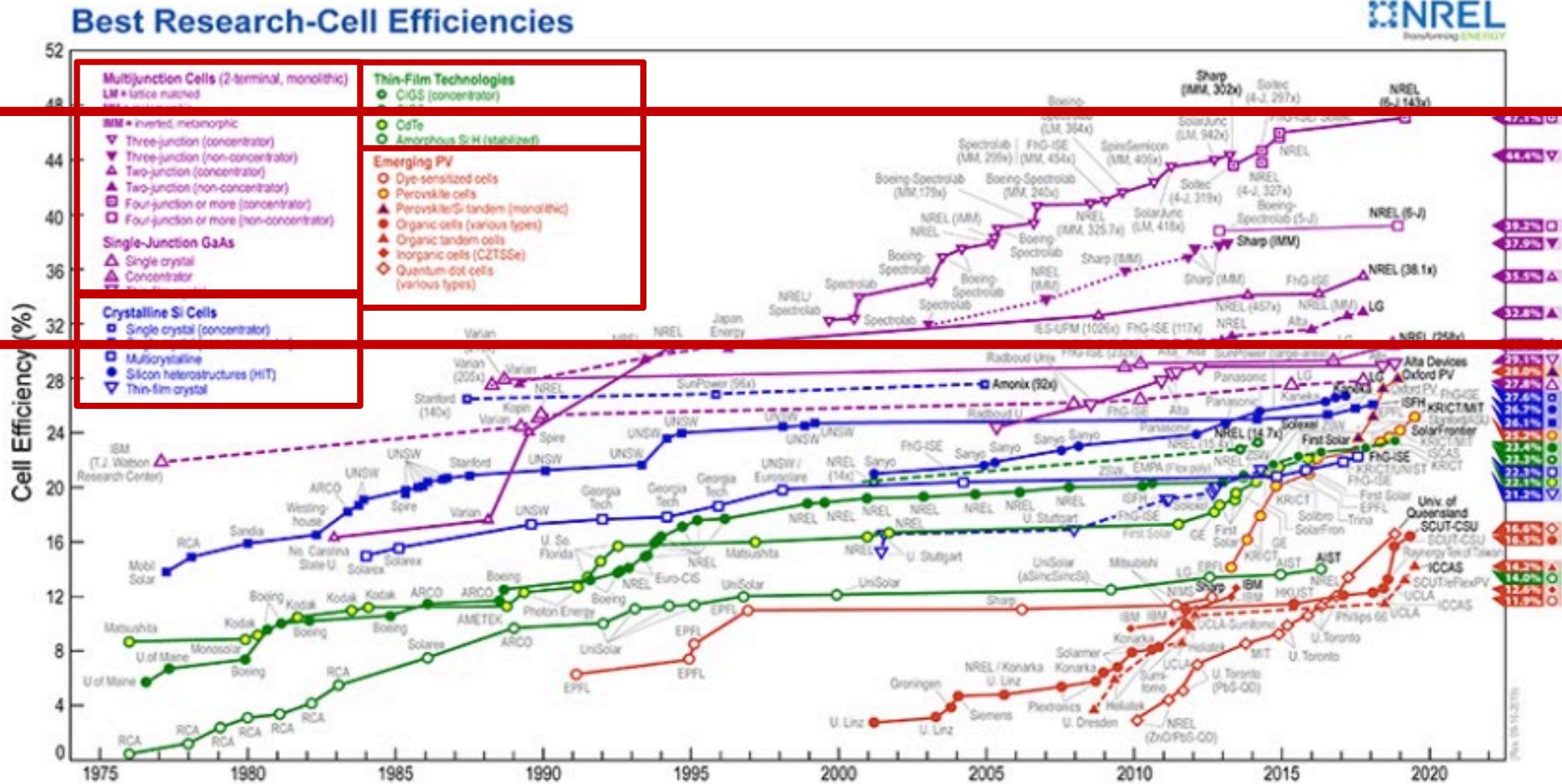
Technologies: Efficacité Cellules-Modules



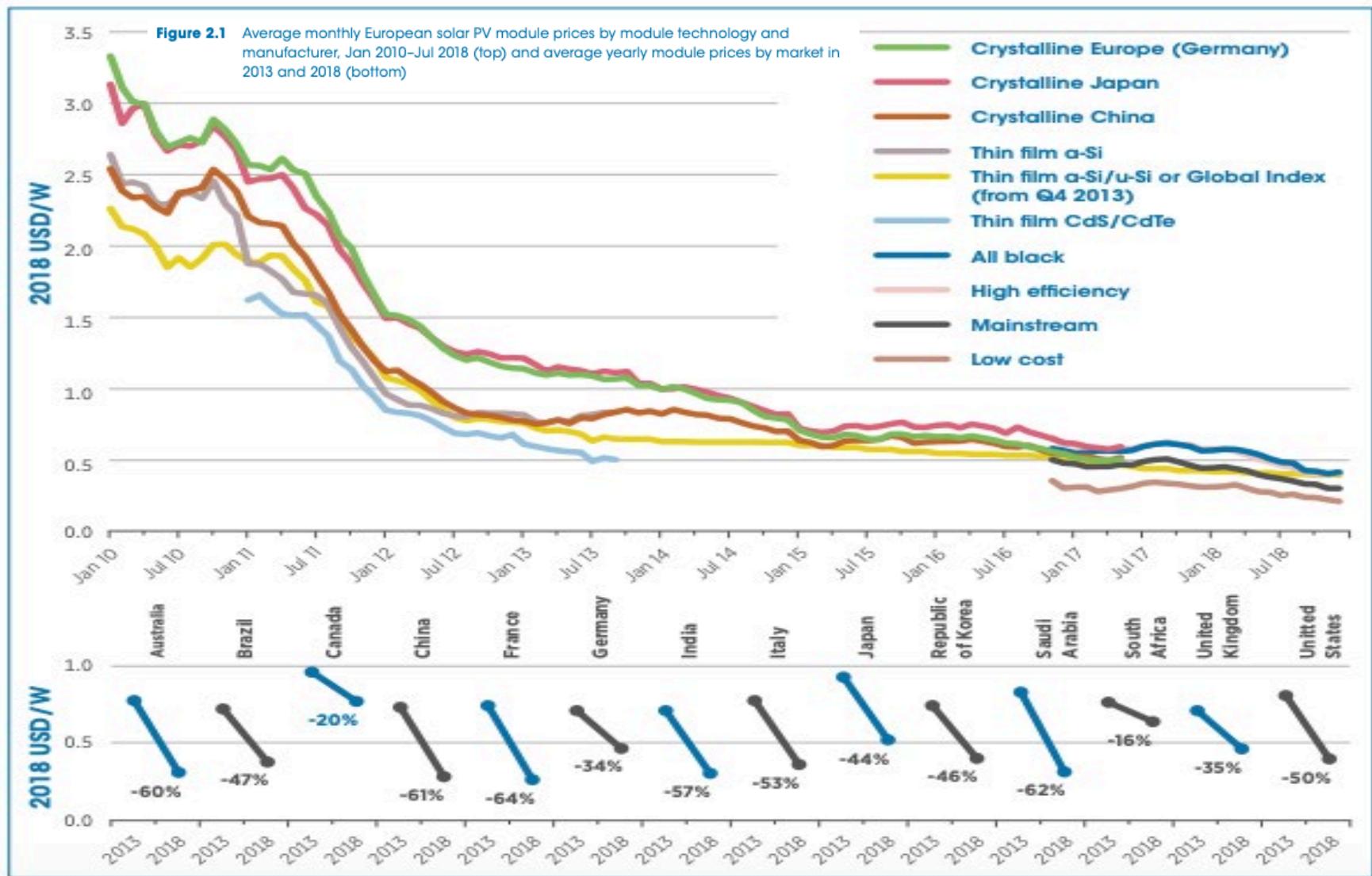
Data: Green et al.: Solar Cell Efficiency Tables (Version 55), Progress in PV: Research and Applications 2019. Graph: PSE Projects GmbH 2020

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

Technologies: Efficacité Cellules



Technologies: variation des coûts (Europe)





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

