

Formation Internationale en Solaire Photovoltaïque 2023 – Togo



CARGA TECH



**Société Française
de Physique**

**Commission
Physique et Optique Sans
Frontières**



Société Française d'Optique



**UNIVERSITE
DE KARA**





DARGATECH

Technologies de cellules solaires photovoltaïques

Arouna DARGA

Enseignant chercheur Sorbonne-Université & fondateur de DARGATECH SARL

Au menu

- Du concept à la technologie
 - Brève historique
 - État des lieux
 - Effet photovoltaïque
- Technologie à base de silicium



Brève histoire du photovoltaïque



1839: découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond Becquerel

redécouvert en ~1880 par Smith, Adams & Day, Fritts

Cellule en selenium, 1 % de rendement environ

1946: brevet de Ohl « pour un dispositif électrique photo-sensible »

1954: Chapin, Fuller & Persan : première cellule à 6% de rendement

Application commerciale dès 1956 (échec)

1958: Cellules solaire sur le premier satellite américain Vanguard-1

Amélioration des procédés, gain en rendement, baisse des coûts

1970': Approvisionnement silicium: rebus de la microélectronique

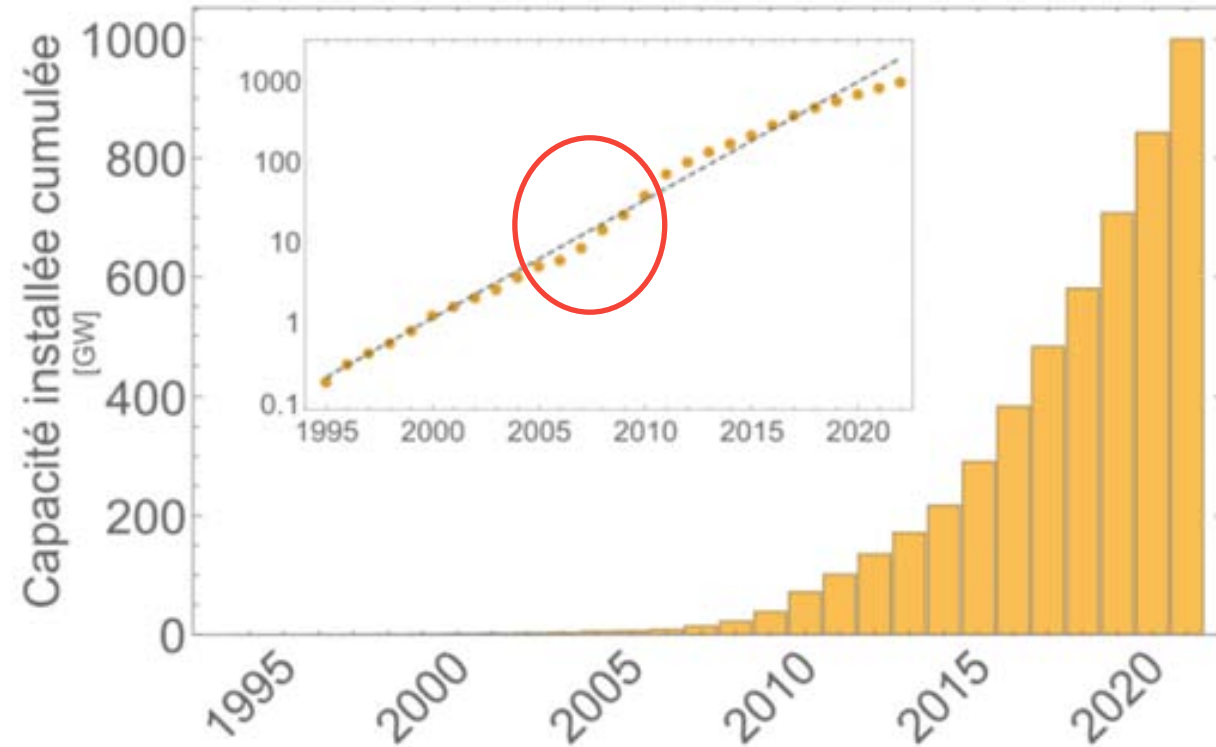
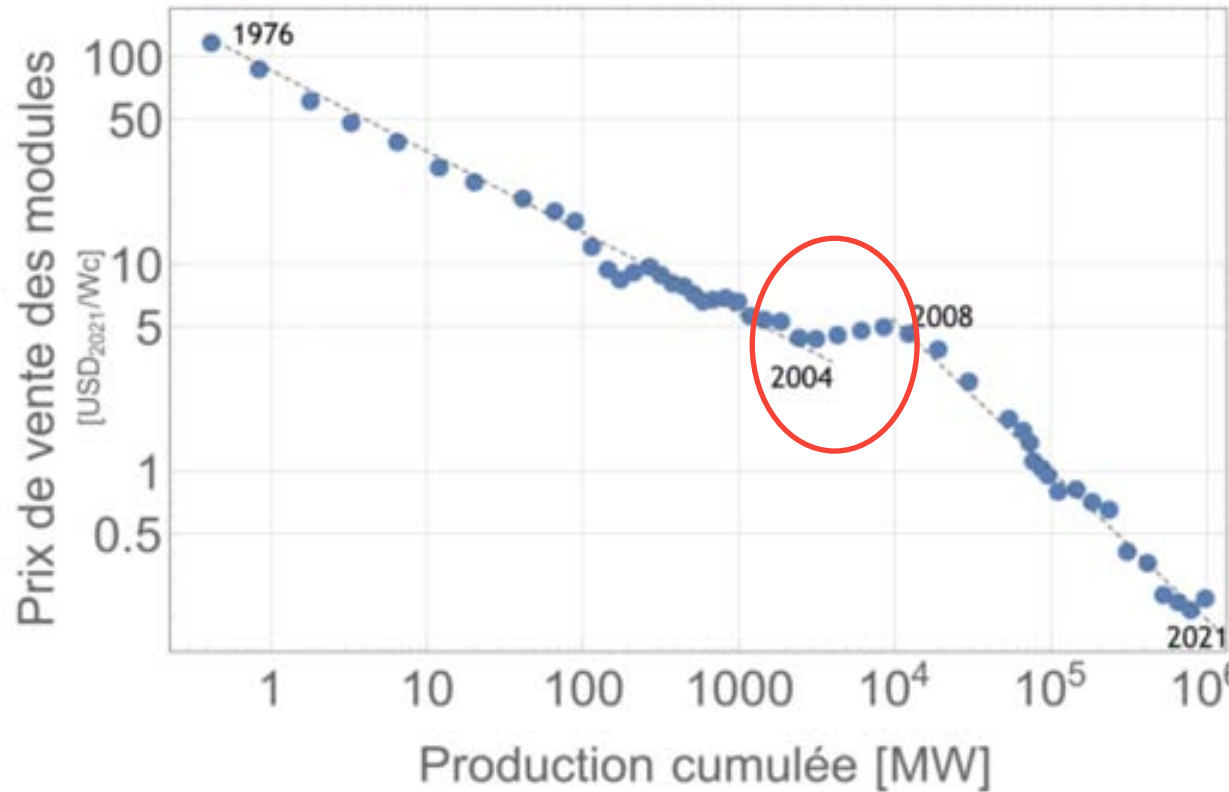
Développement du photovoltaïque terrestre

2006: tension sur le silicium. Création d'une filière dédiée (Chine)

Développement du photovoltaïque terrestre



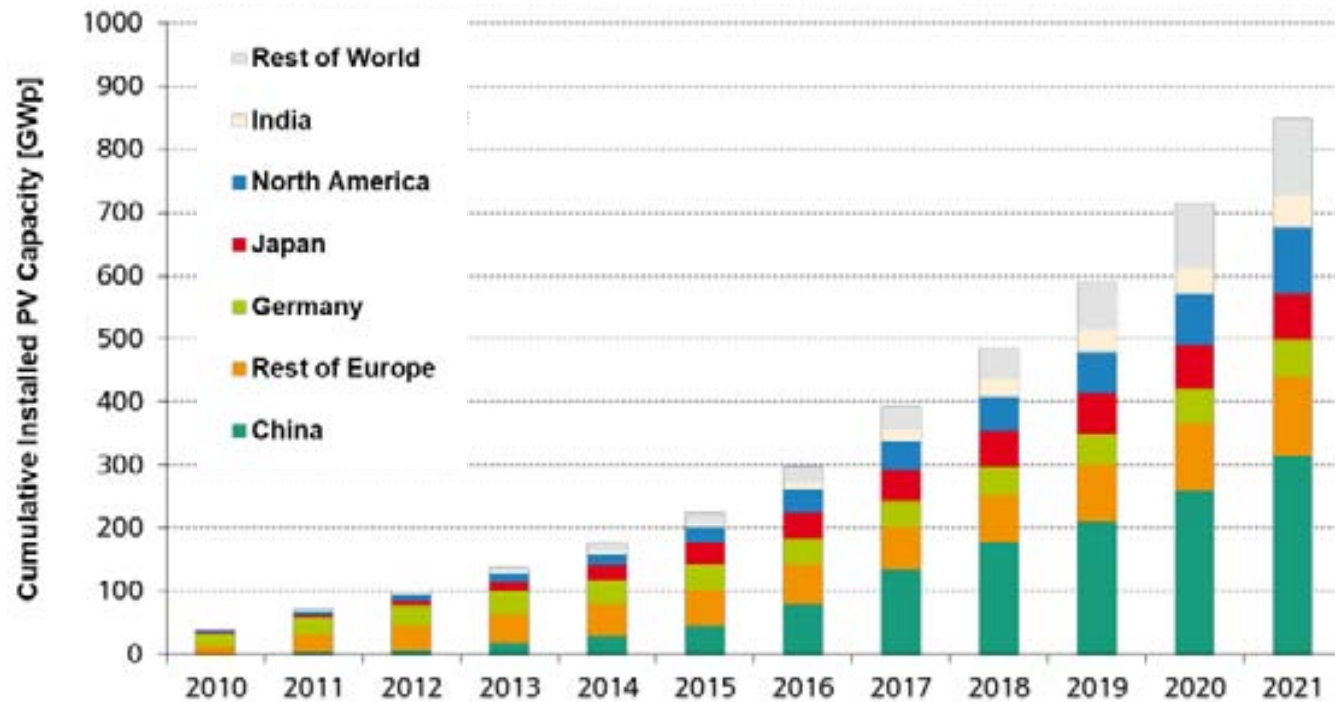
Brève histoire du photovoltaïque



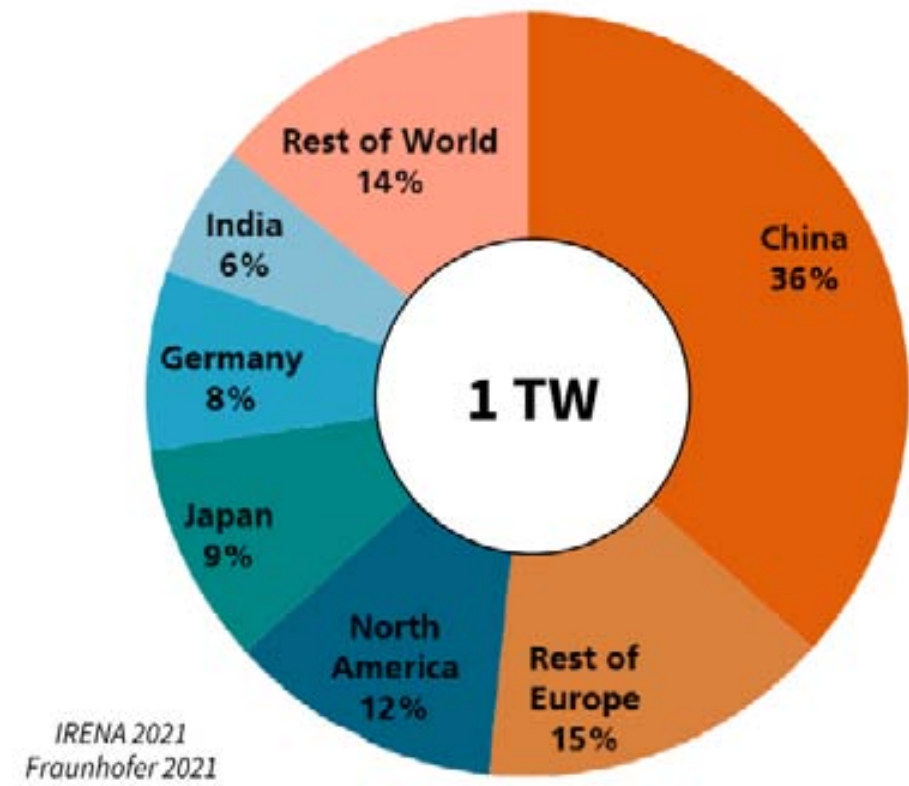
- Tension sur le silicium. Création d'une filière dédiée (Chine)
- Crise mondiale sur le solaire PV – fermeture d'usines en Europe



État des lieux



Data: IRENA 2022. Graph: PSE 2022. Date of data: Apr-2022



IRENA 2021
Fraunhofer 2021

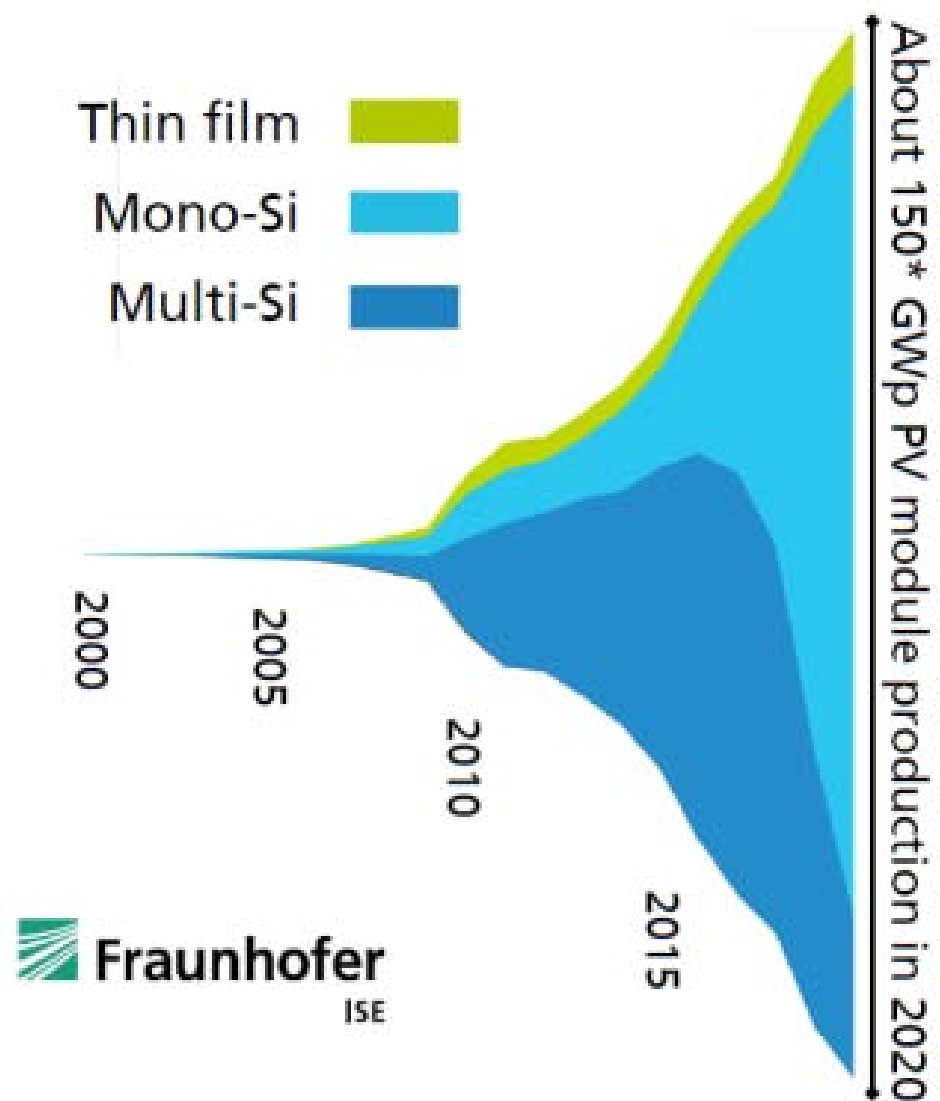
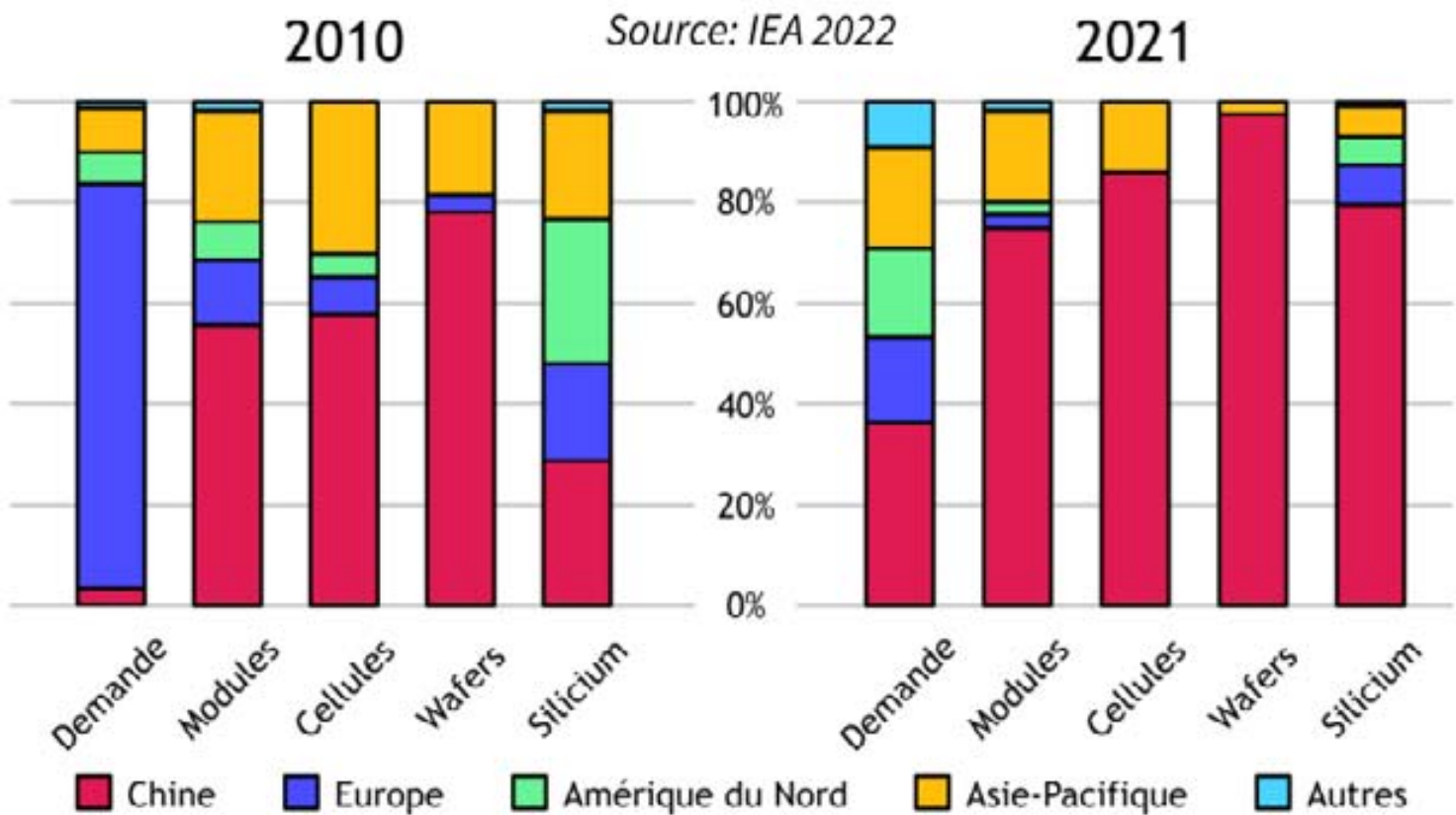
Capacité installée fin 2021
Monde: 840 GW (+ 170 GW par rapport à 2020)

Electricité produite sur l'année 2021
Monde: 1000 TWh (=3.7% du total)

Facteur de charge
12-15%



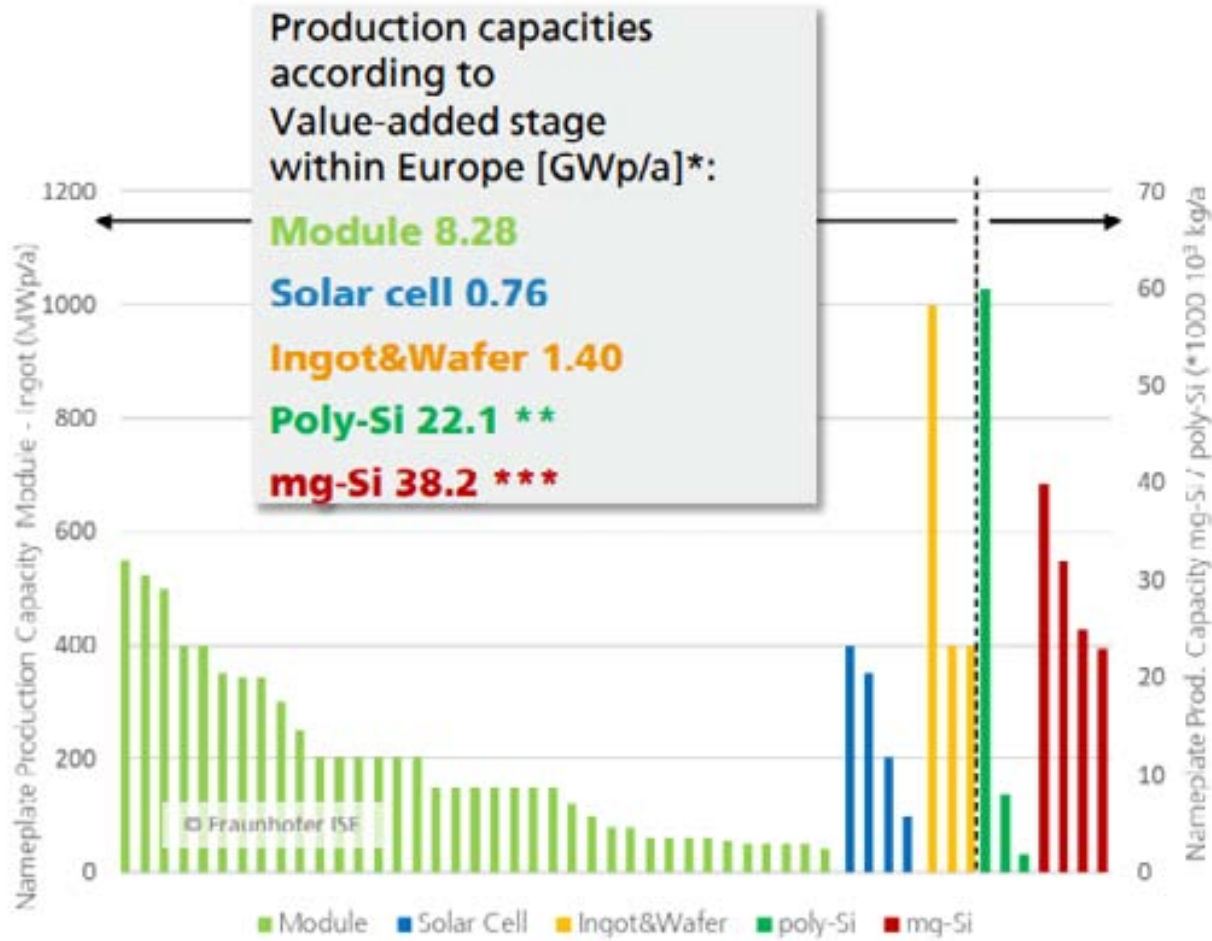
État des lieux



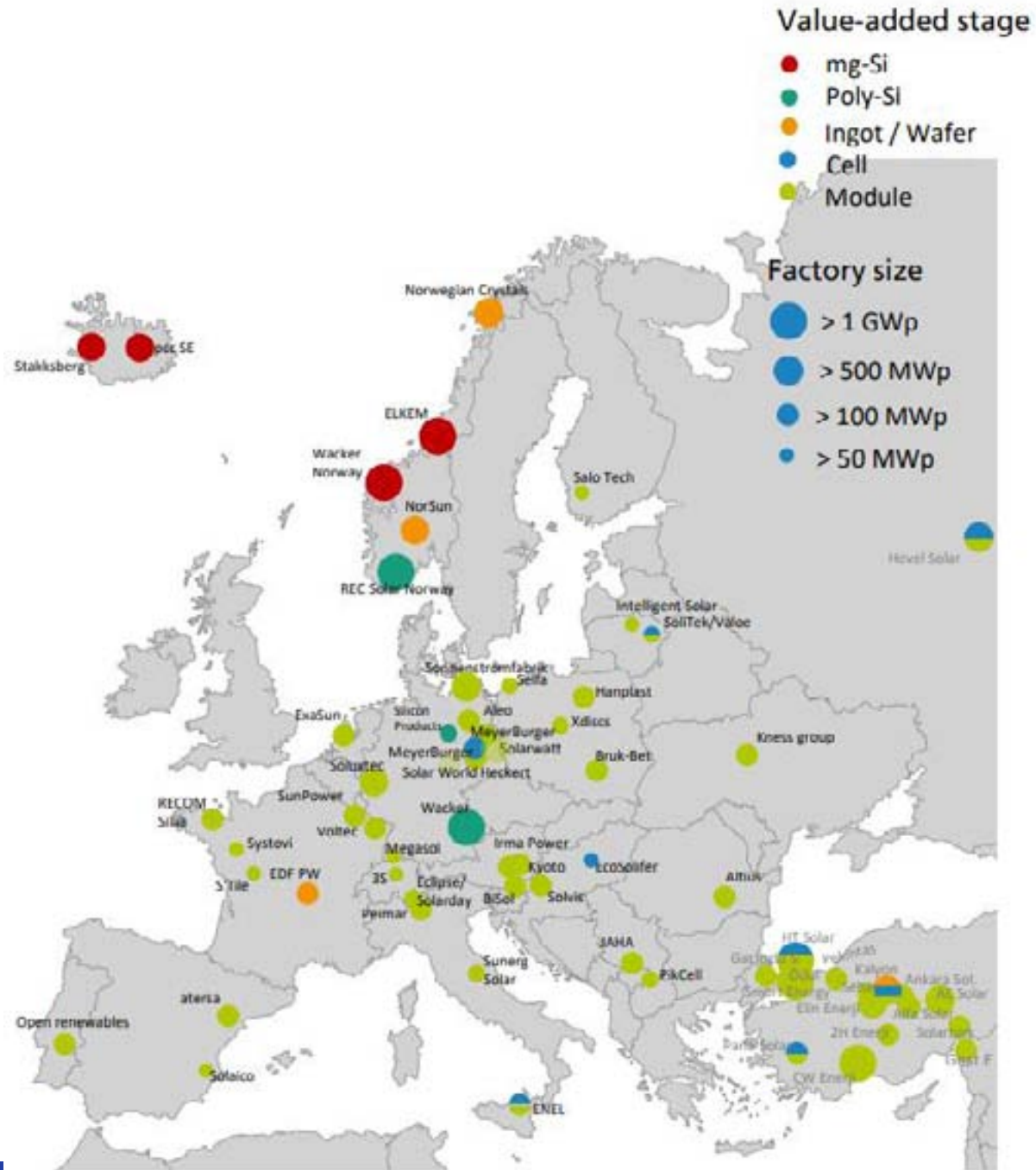
Technologie solaire:

- Silicium cristallin (95%)
- Fabriqué en Chine (80-97%)

État des lieux

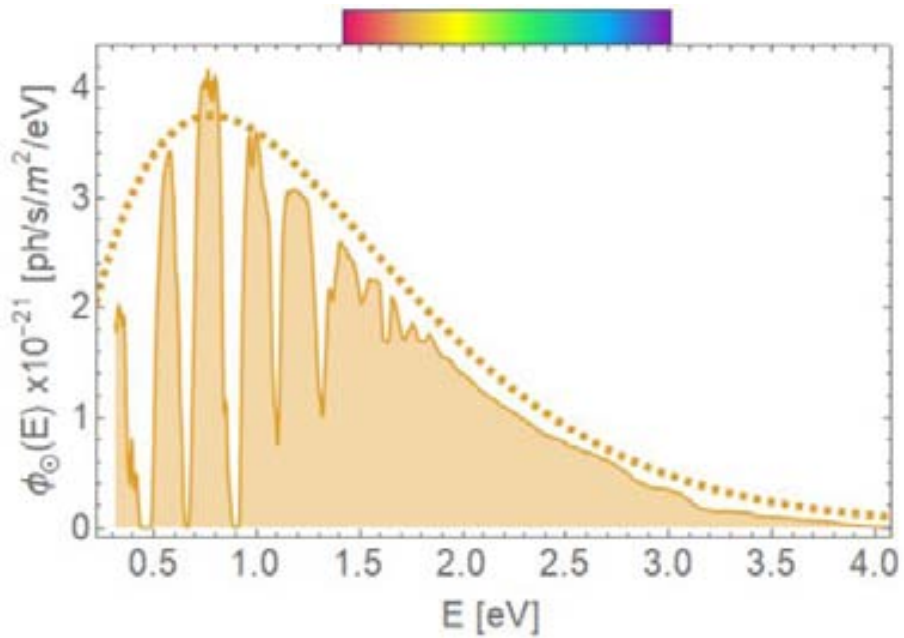


Data and Graph: Jochen Rentsch, Fraunhofer ISE 2022; last update: 23.08.2022



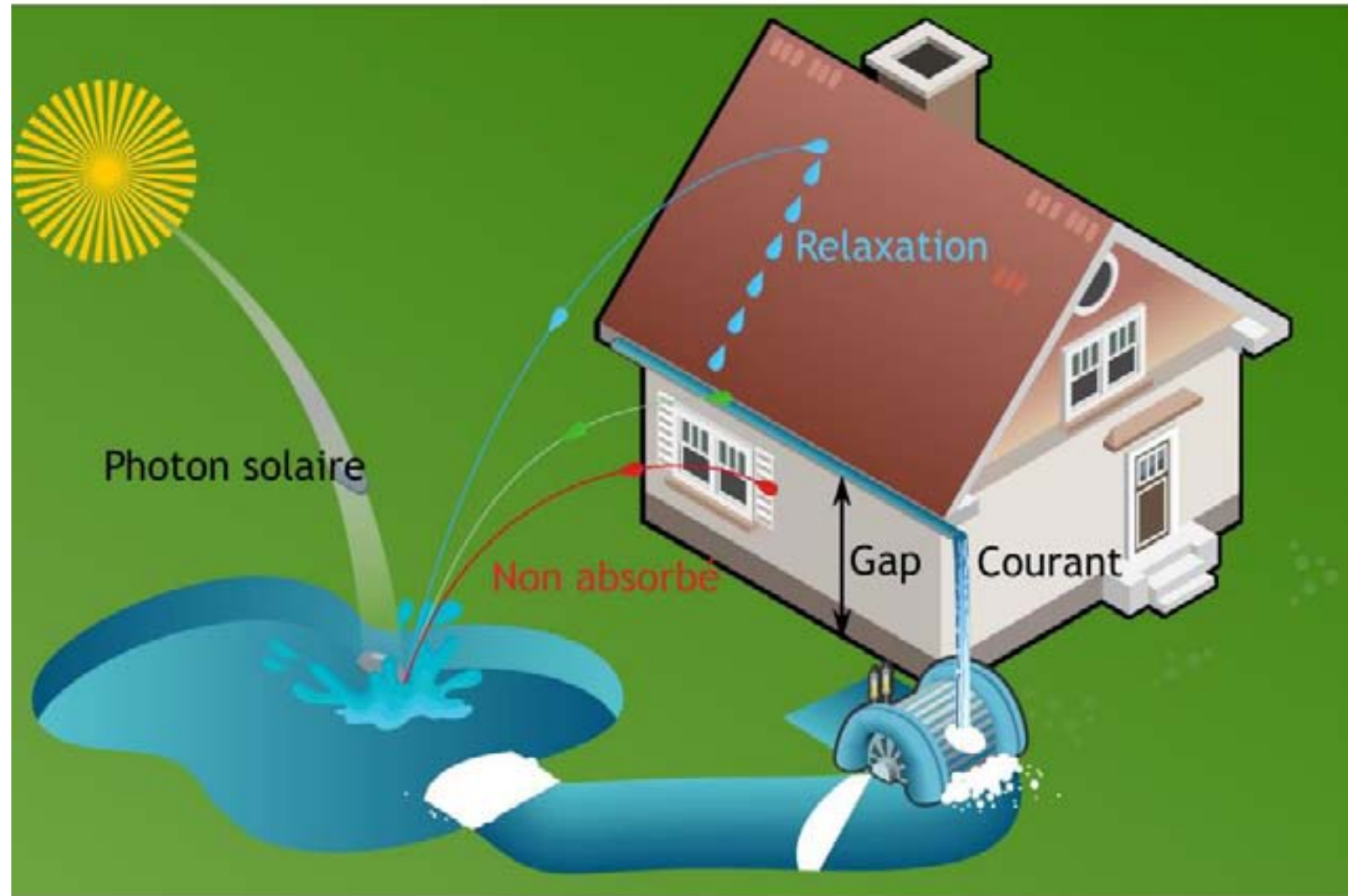
Chaîne de valeur de solaire PV en Europe

L'effet photovoltaïque



$$P \propto E_g \times \int_{E_g}^{+\infty} \phi_{\odot}(E) dE$$

Maximal pour un gap ni trop grand, ni trop petit



Crédit : Sébastien Ceste (CPM Polytechnique)

L'effet photovoltaïque

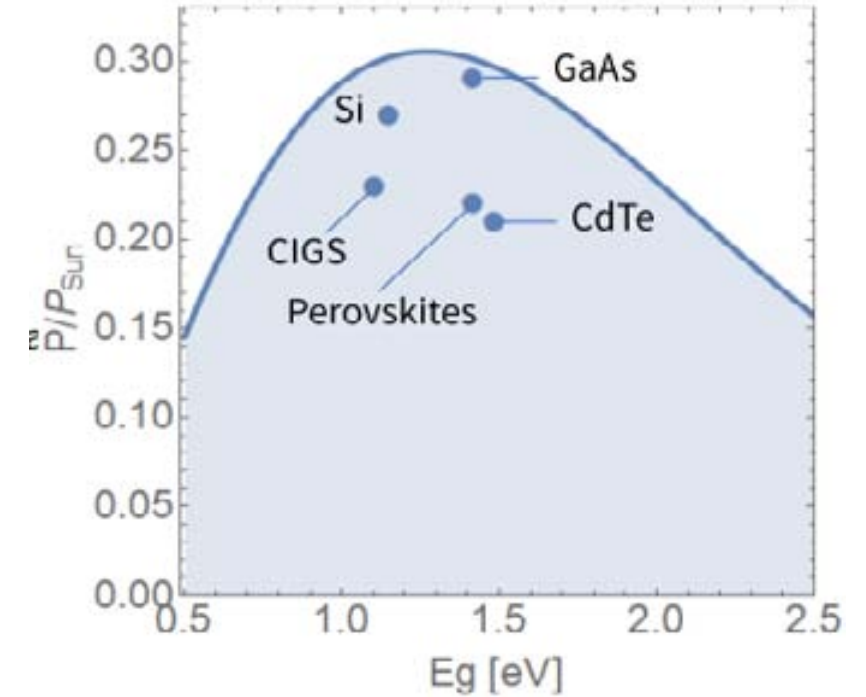
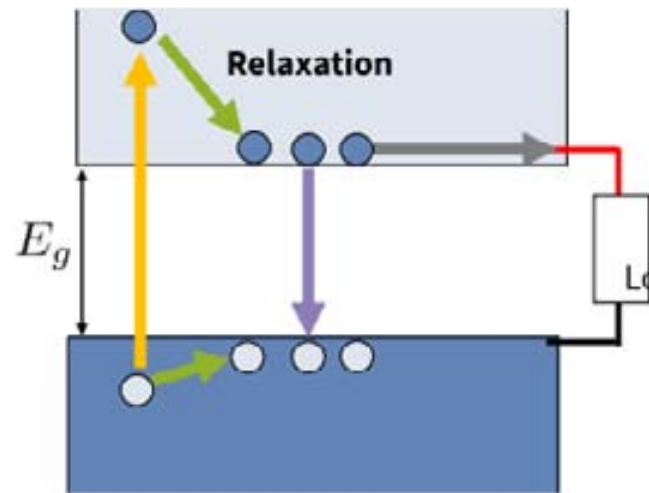
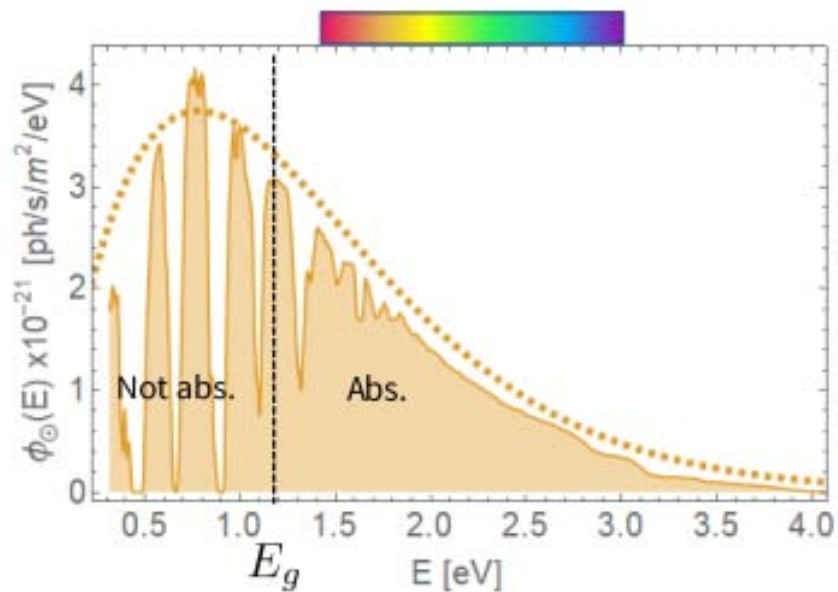
4 fonctions indispensables à la conversion photovoltaïque

Transporter les électrons jusqu'aux contacts

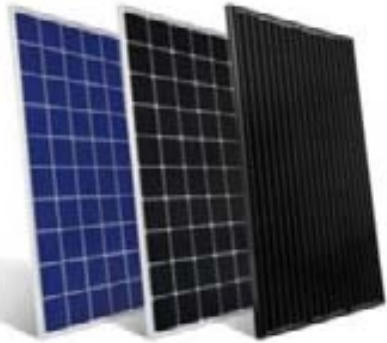
Absorber la lumière

Garder les électrons excités

Permettre une extraction sélective



Efficacité de conversion

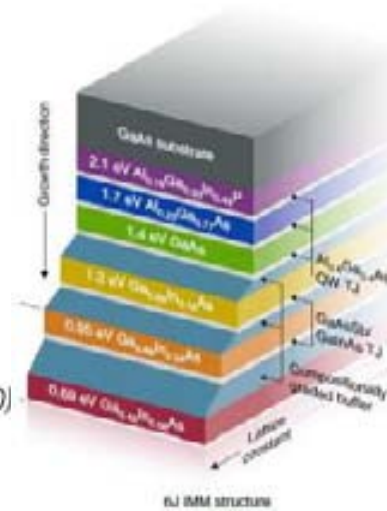


Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%

Kenta Yoshikawa*, Hayato Kawasaki, Wataru Yoshida, Toru Irie, Kazumori Kimishi, Kazuhiko Nakano, Toshihiko Uto, Daisuke Adachi, Masanori Kanematsu, Hisashi Uzu and Kenji Yamamoto

Record
cellule silicium
(Yoshikawa et al., Nature Energy (2017))

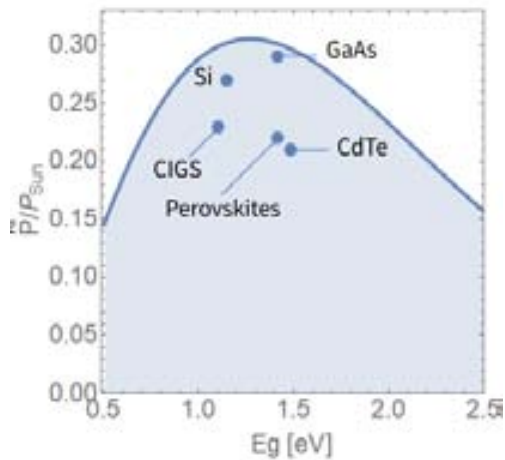
Record actuel
(multijonction)
(Geisz JF, Nature Energy (2020))



Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration

John F. Geisz*, Ryan M. France, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Andrew G. Norman, Harvey L. Guthrey, Matthew R. Young, Tao Song and Thomas Moriarty

Systèmes
commerciaux



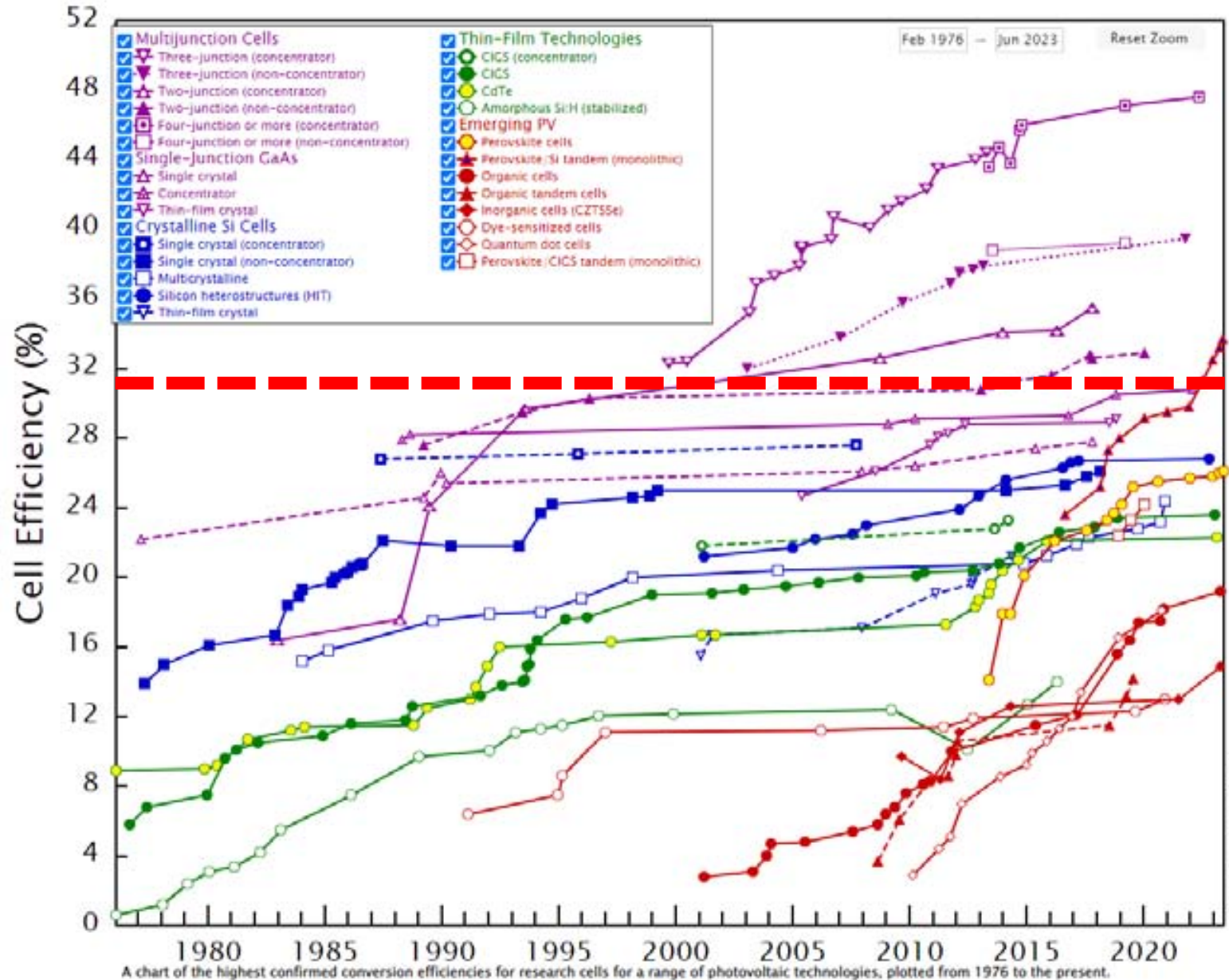
Maximum théorique
des cellules simples
(limite de Shockley Queisser)

Rendement
thermodynamique



DARGA TECH

Plusieurs technologies en développement



A chart of the highest confirmed conversion efficiencies for research cells for a range of photovoltaic technologies, plotted from 1976 to the present.

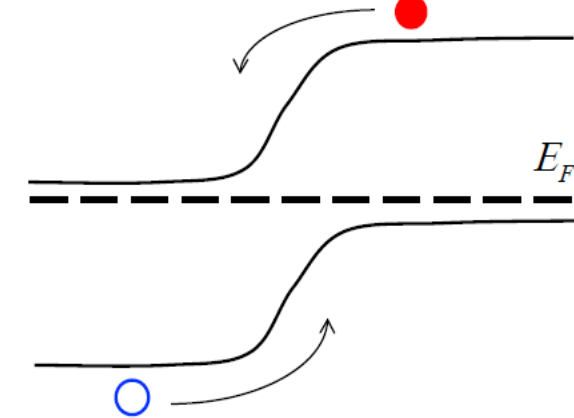
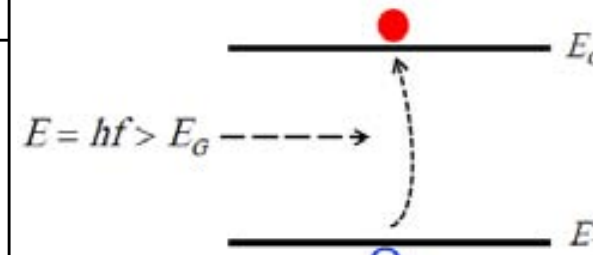
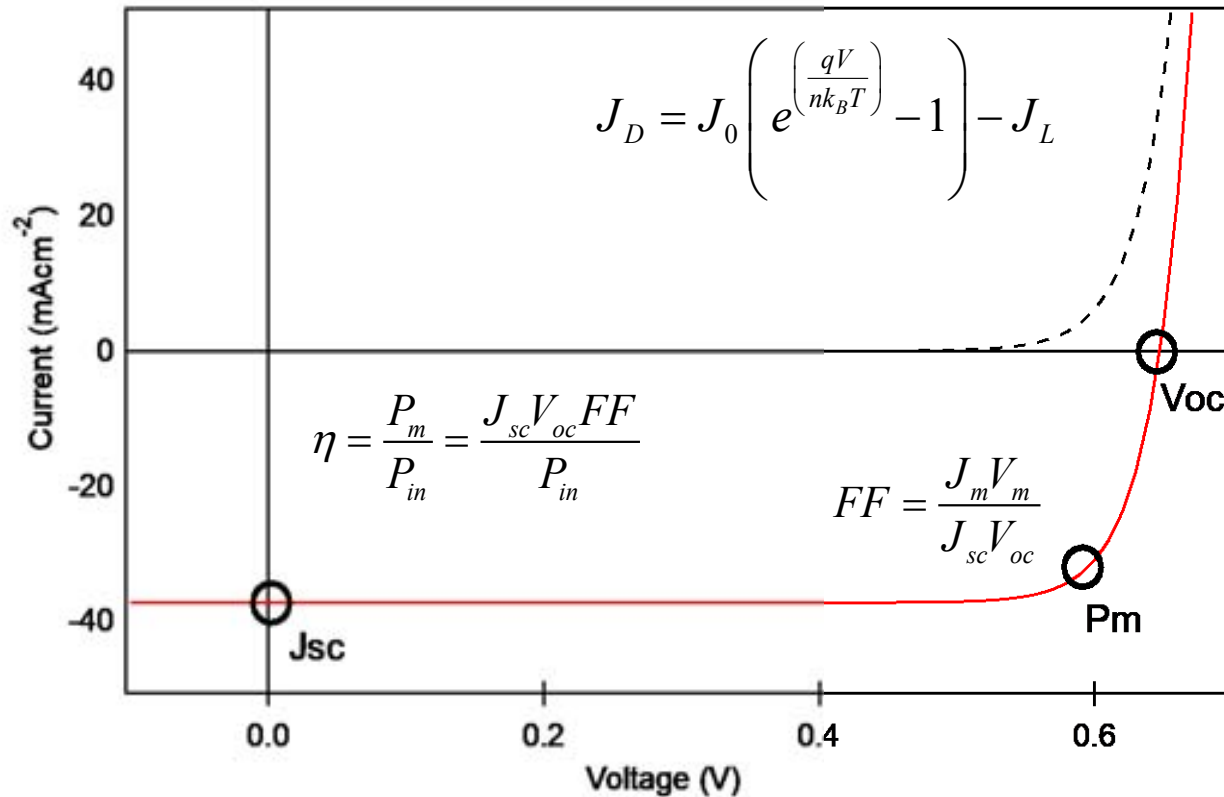
(Rev. 07-30-2023)



DARGA TECH

L'effet photovoltaïque

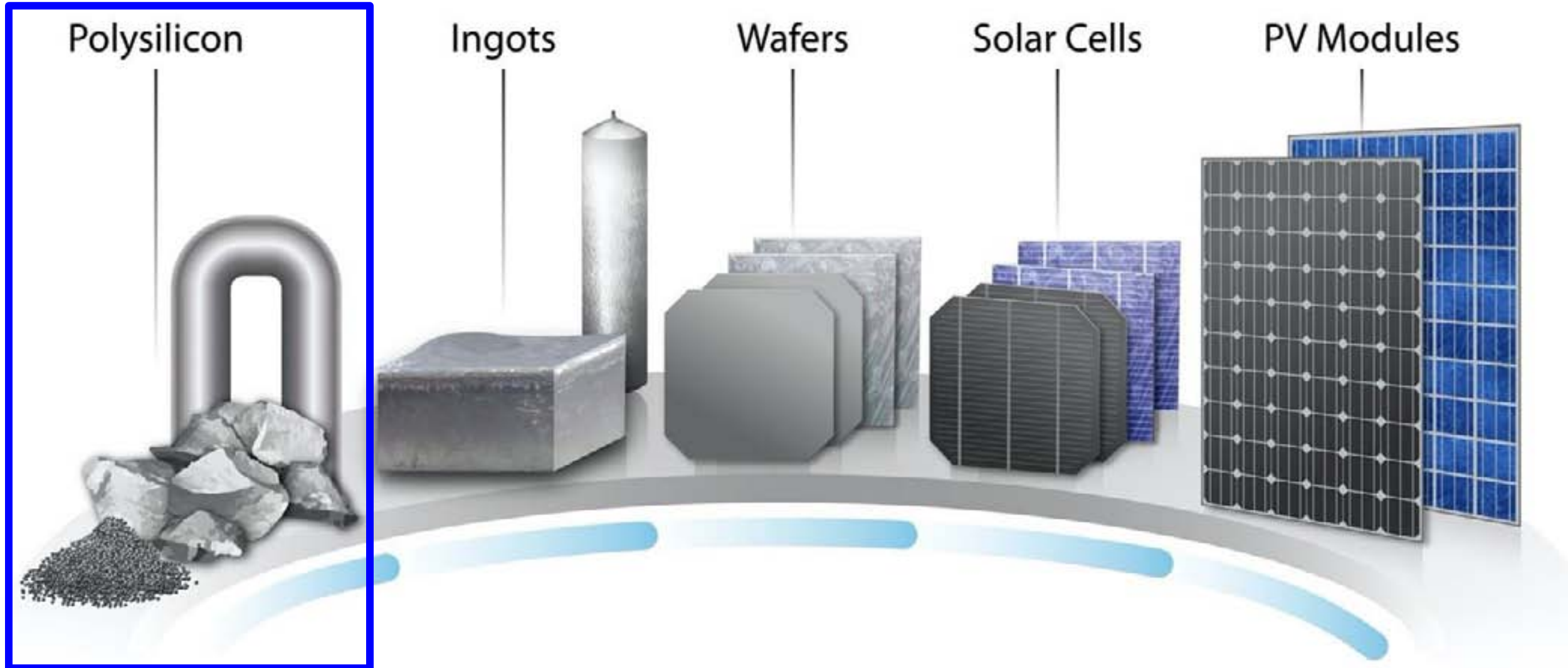
La cellule photovoltaïque – la cellule à base de semi-conducteurs



TECHNOLOGIE À BASE DE SILICIUM



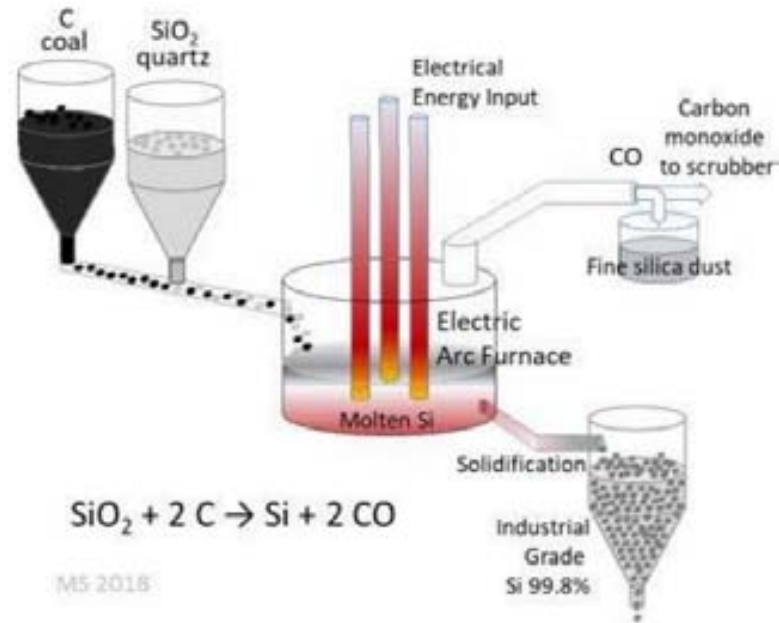
Du matériau au système



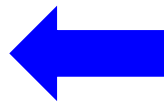
Du matériau au système



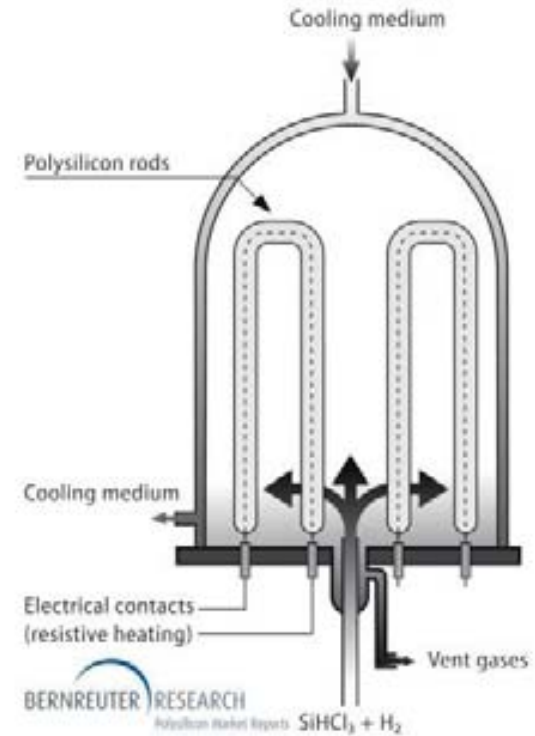
SiO₂ - quartzite



Aluminium
Steel
Silicone



Metallurgic
grade
98.5-99.5%



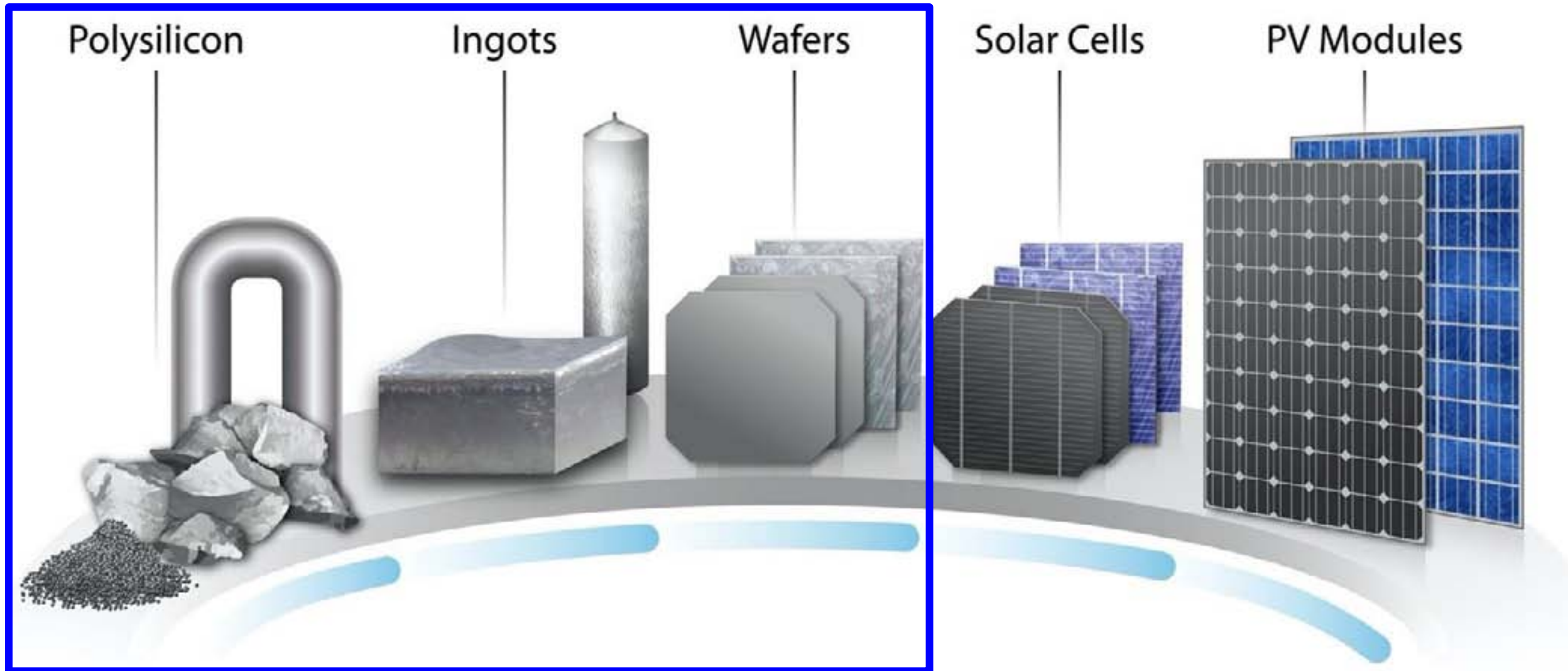
Solar grade poly-Si
(7N) 99.99999%



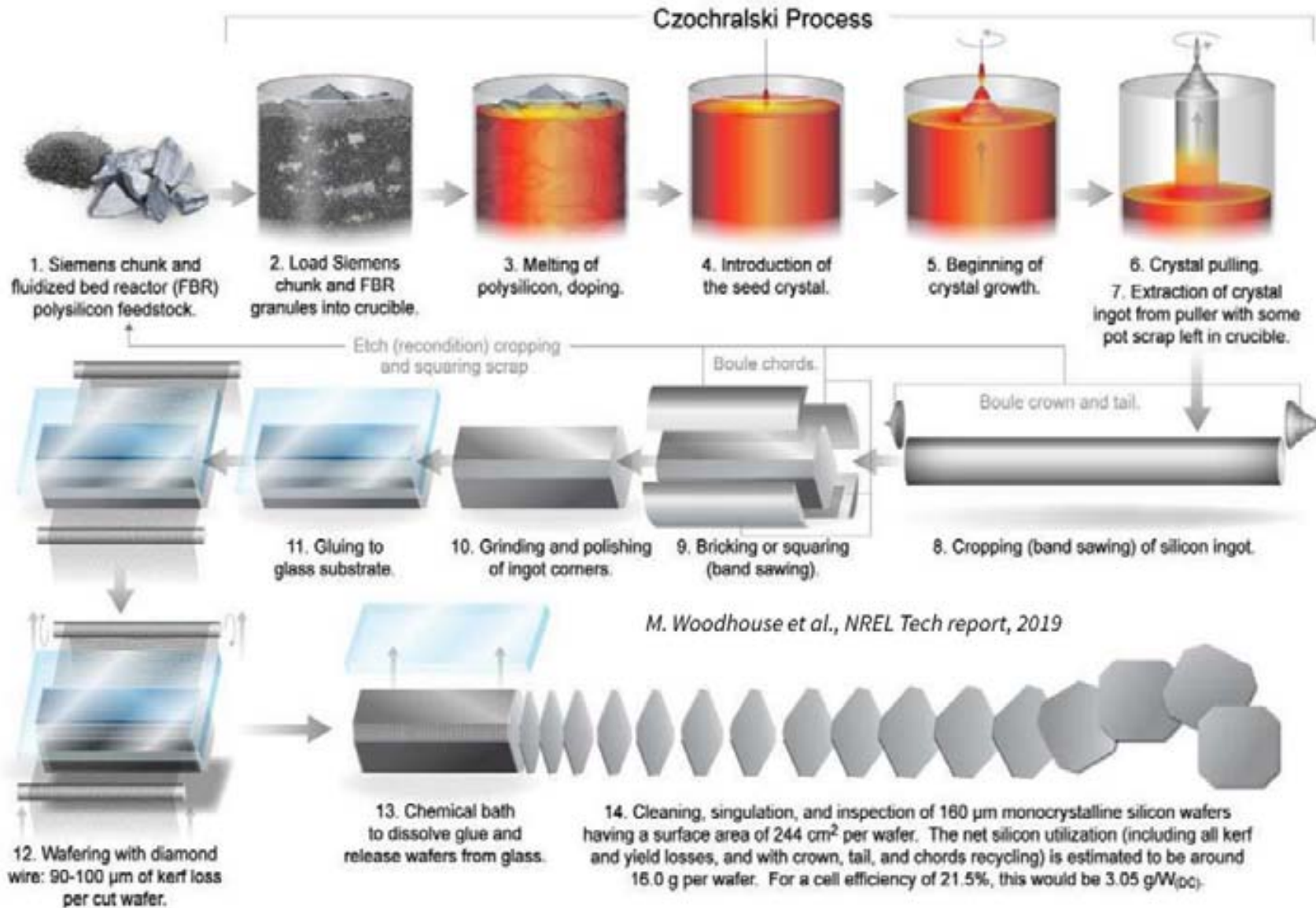
Electronics
Solar cells



Du (poly)silicium au wafer

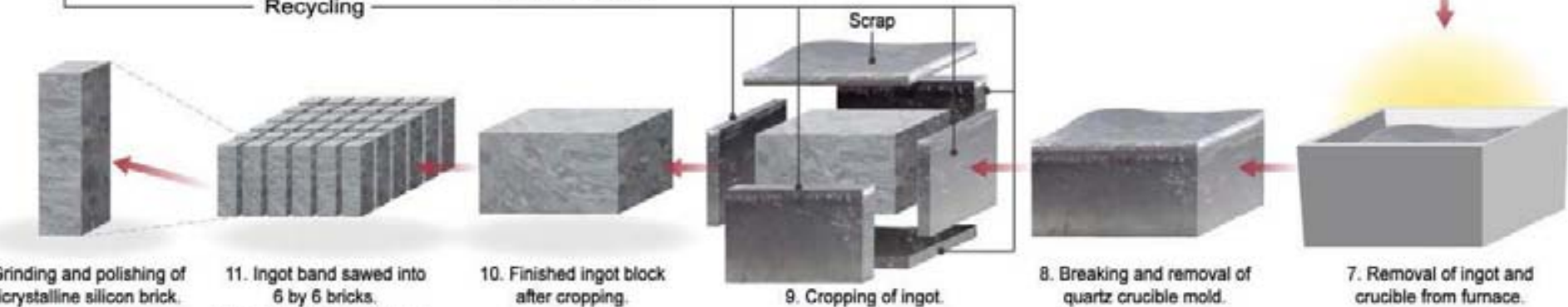
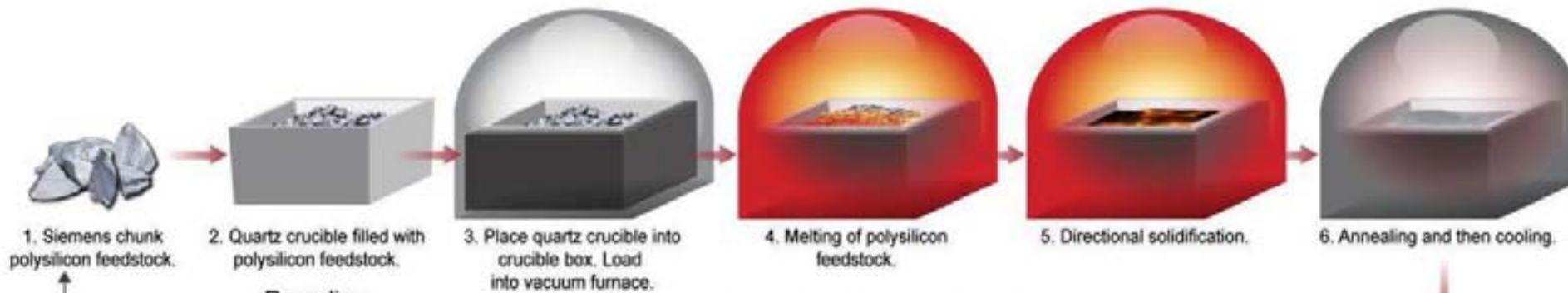


Du (poly)silicium au wafer monocristallin

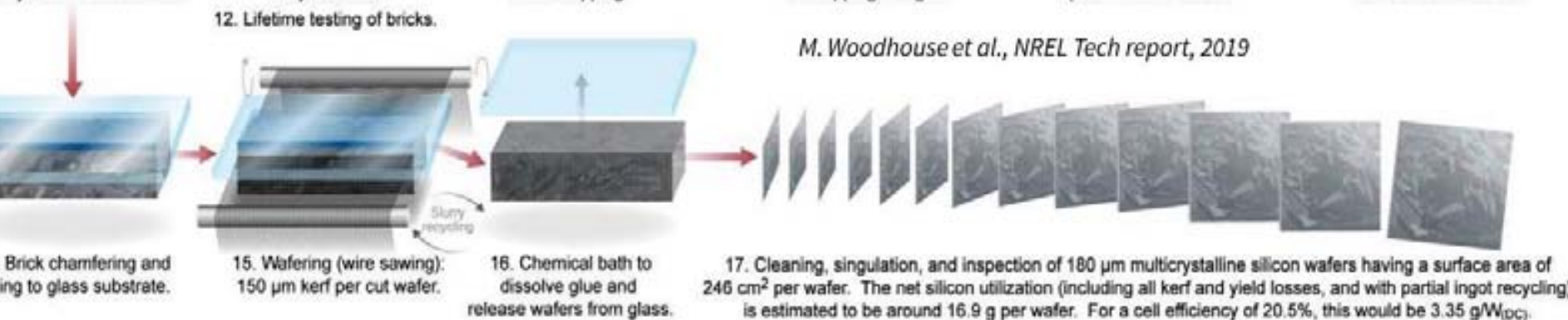


G. Müller, J. Friedrich, Crystal Growth, Bulk: Methods (2005) **CPFGA TECH**

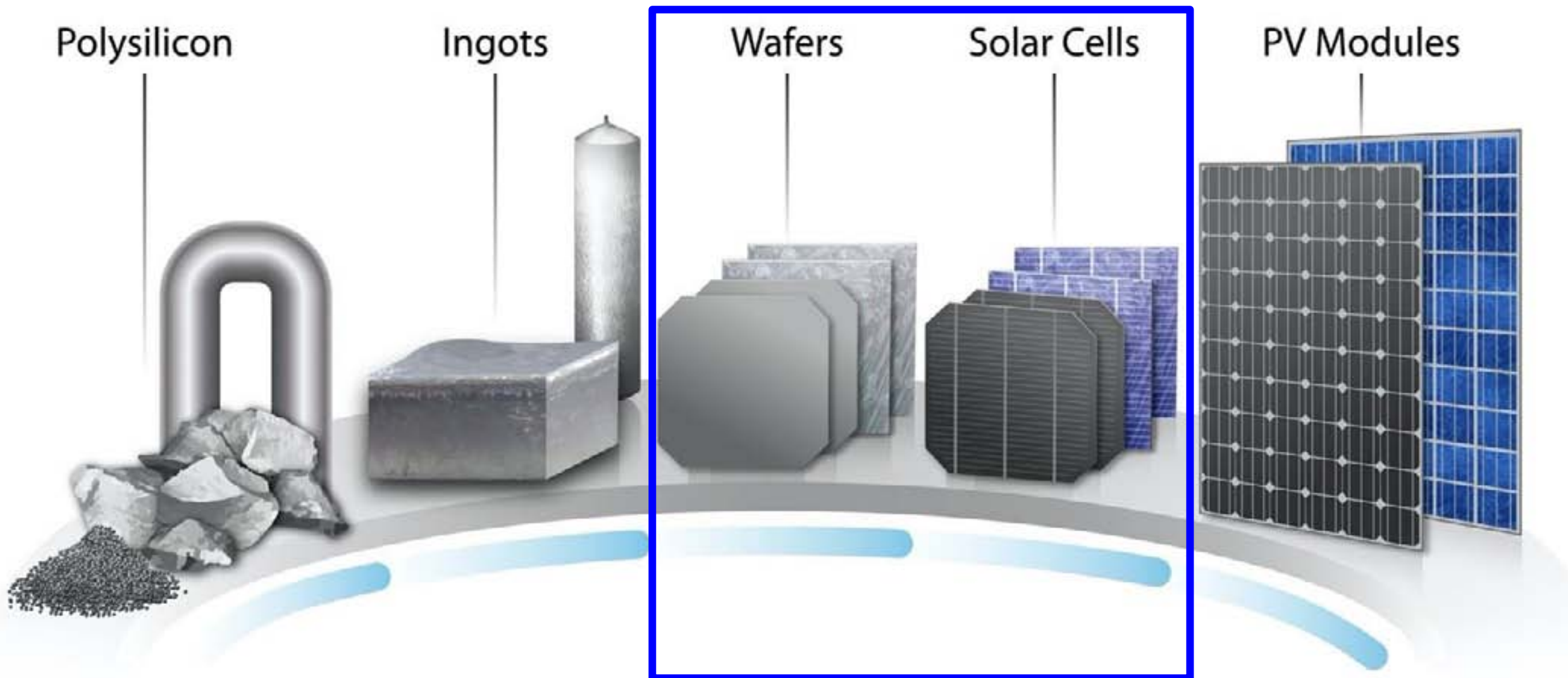
Du (poly)silicium au wafer multicristallin



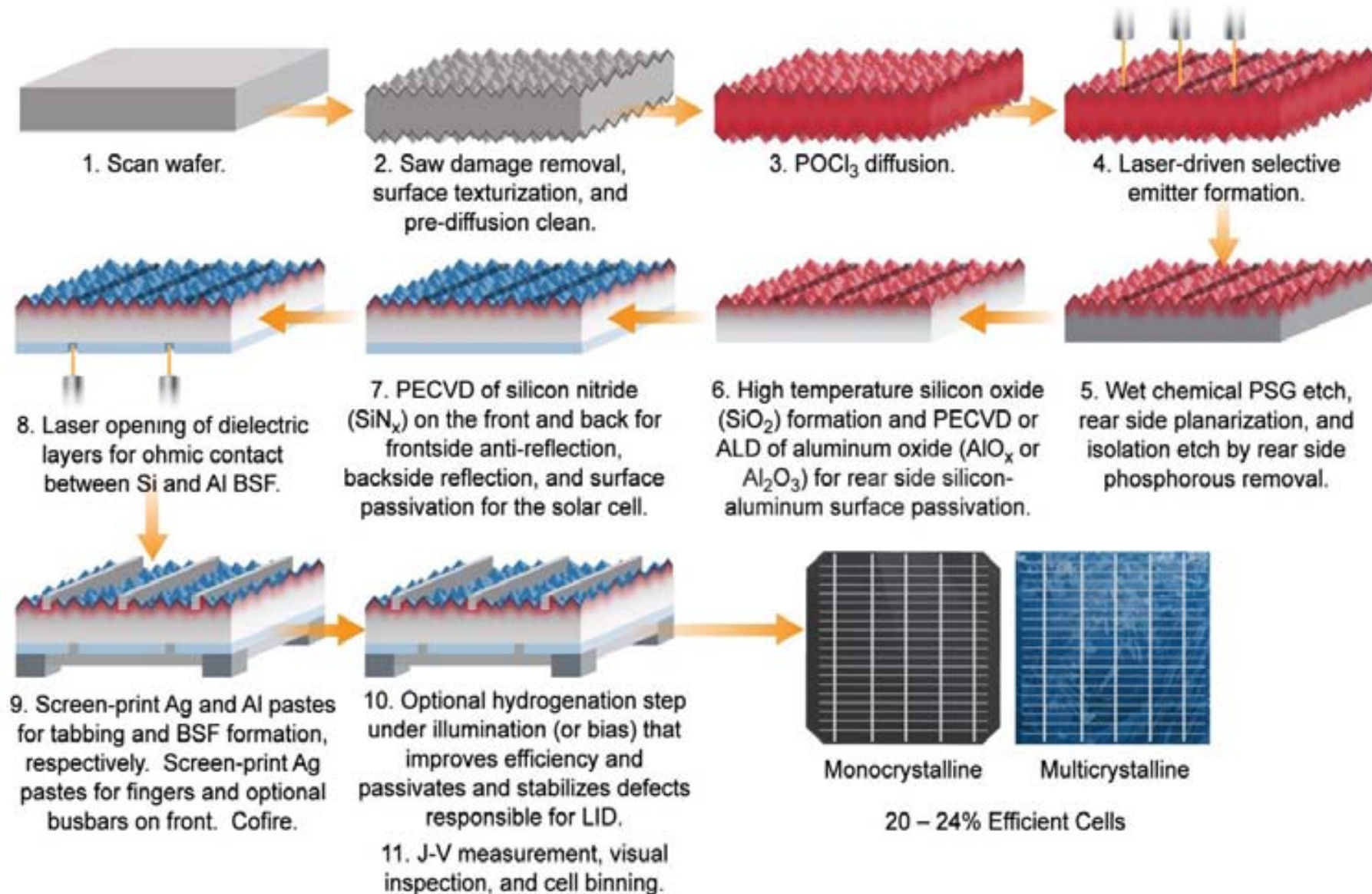
M. Woodhouse et al., NREL Tech report, 2019



Du wafer à la cellule

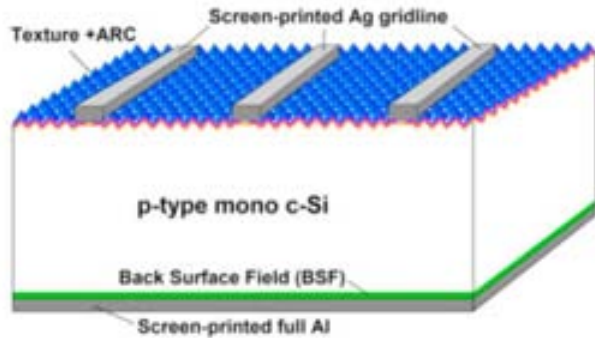


Du wafer à la cellule

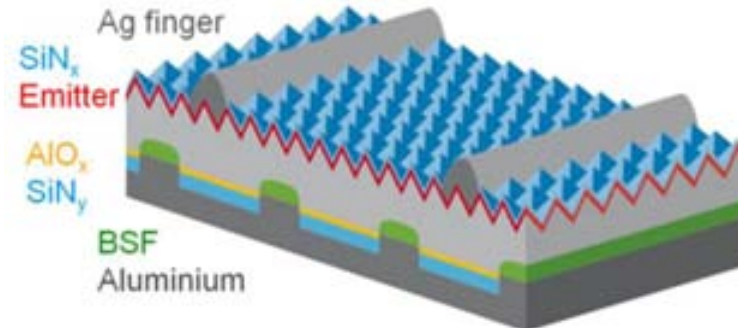


Du wafer à la cellule

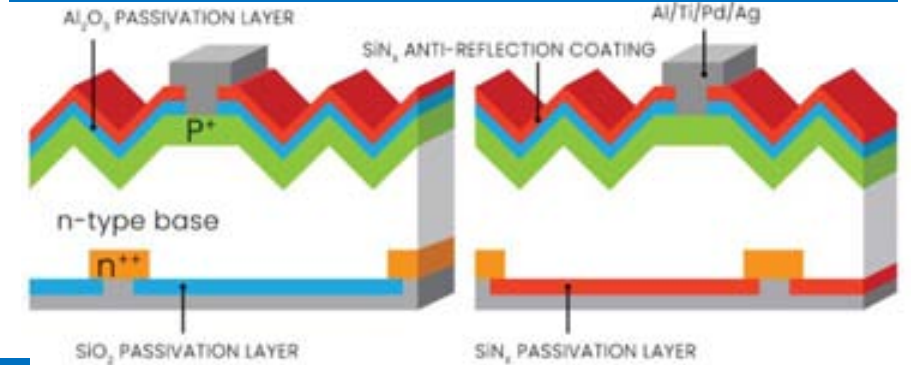
cellule solaire Back Surface Field (BSF)



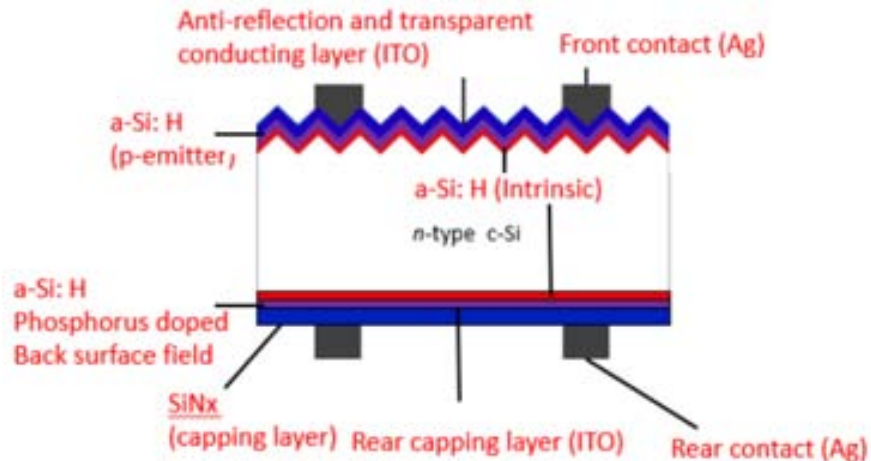
Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)



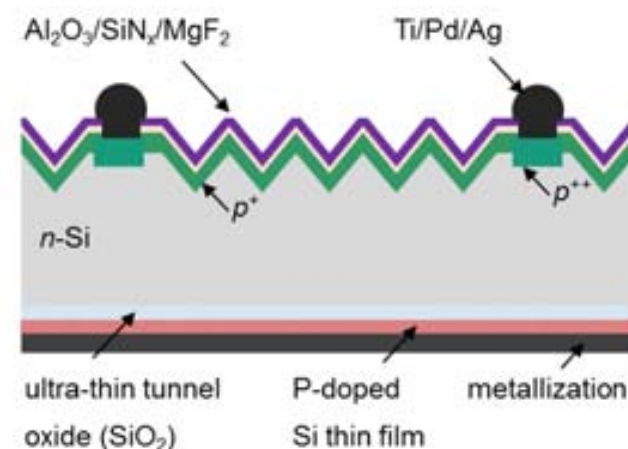
Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé par Diffusion Locale (PERL)



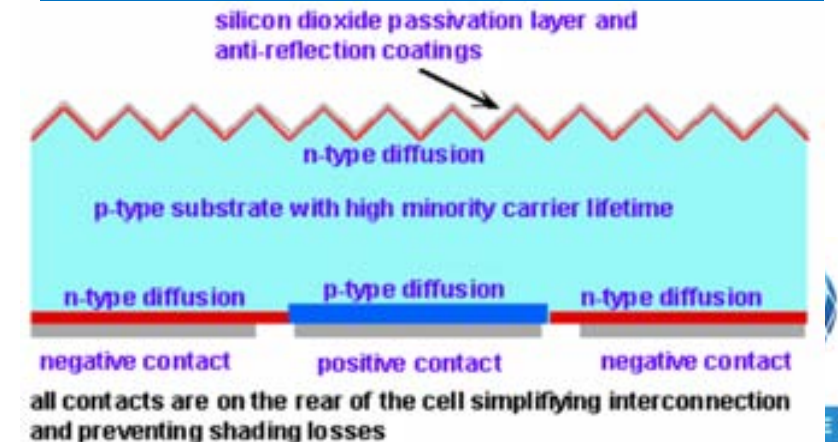
Cellule Solaire à Hétérojonction de Silicium (HJT)



Cellule Solaire à technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

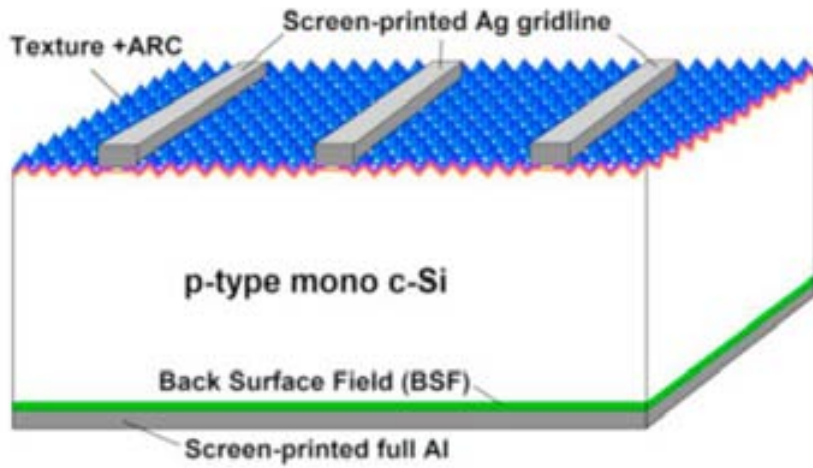


Cellule Solaire à contacts arrière interdigités (IBC)



Du wafer à la cellule

cellule solaire Back Surface Field (BSF)

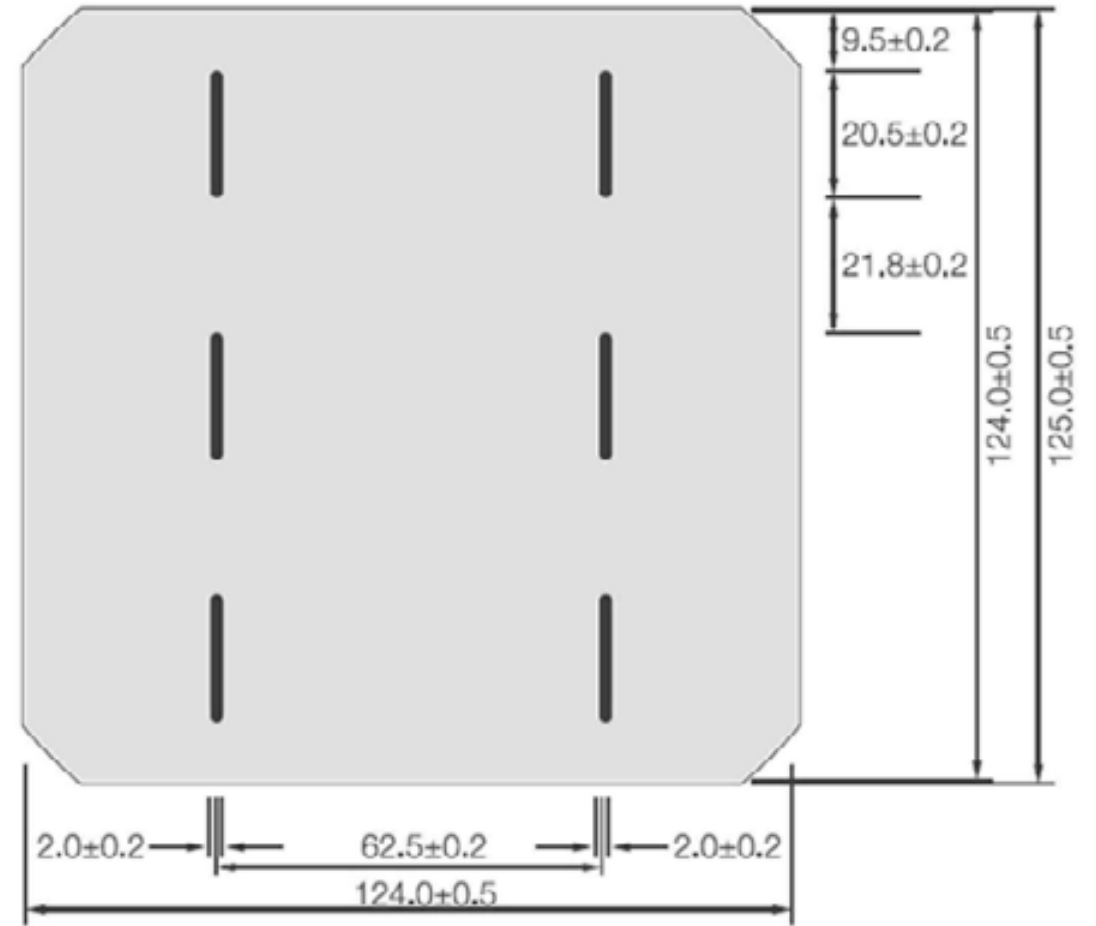
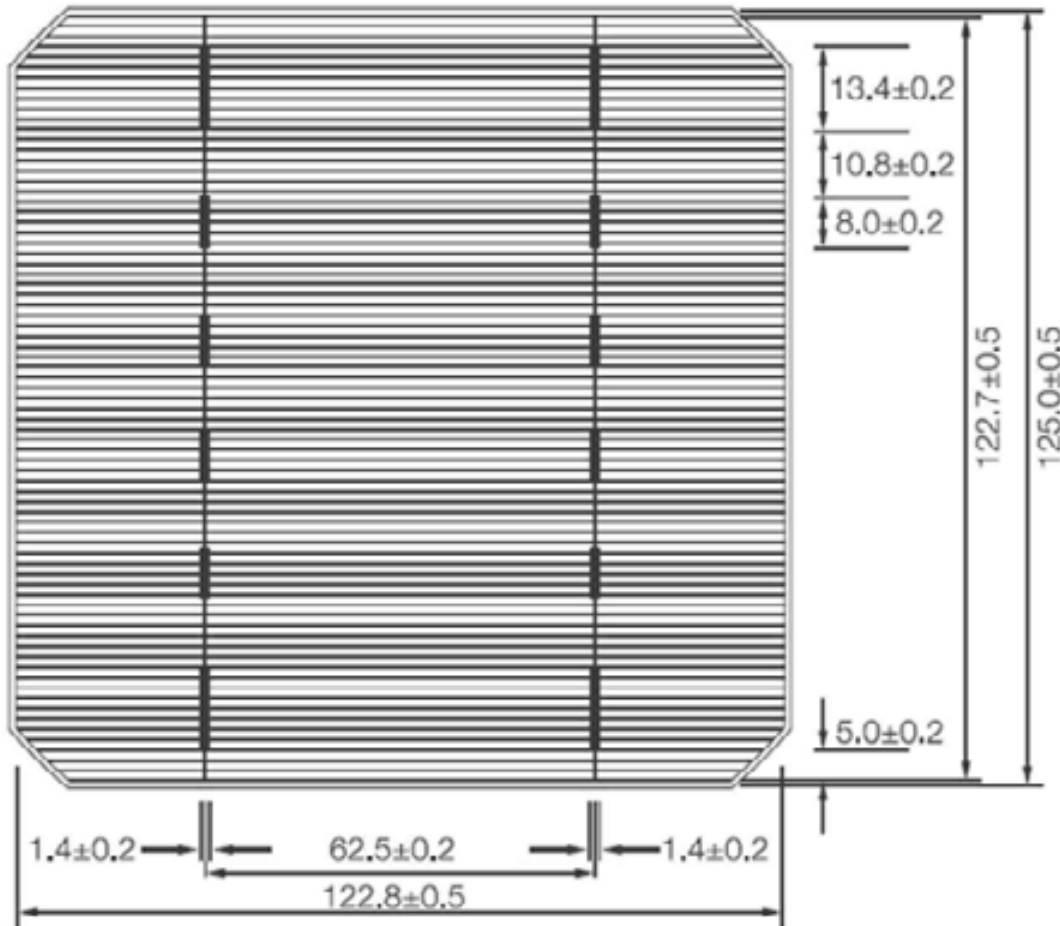


Du wafer à la cellule

cellule solaire Back Surface Field (BSF)

https://fr.ensolar.com/pv/cell-datasheet/2091?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directory&utm_content=57513

Exemple de cellule 2 Bus Barres (2BB)



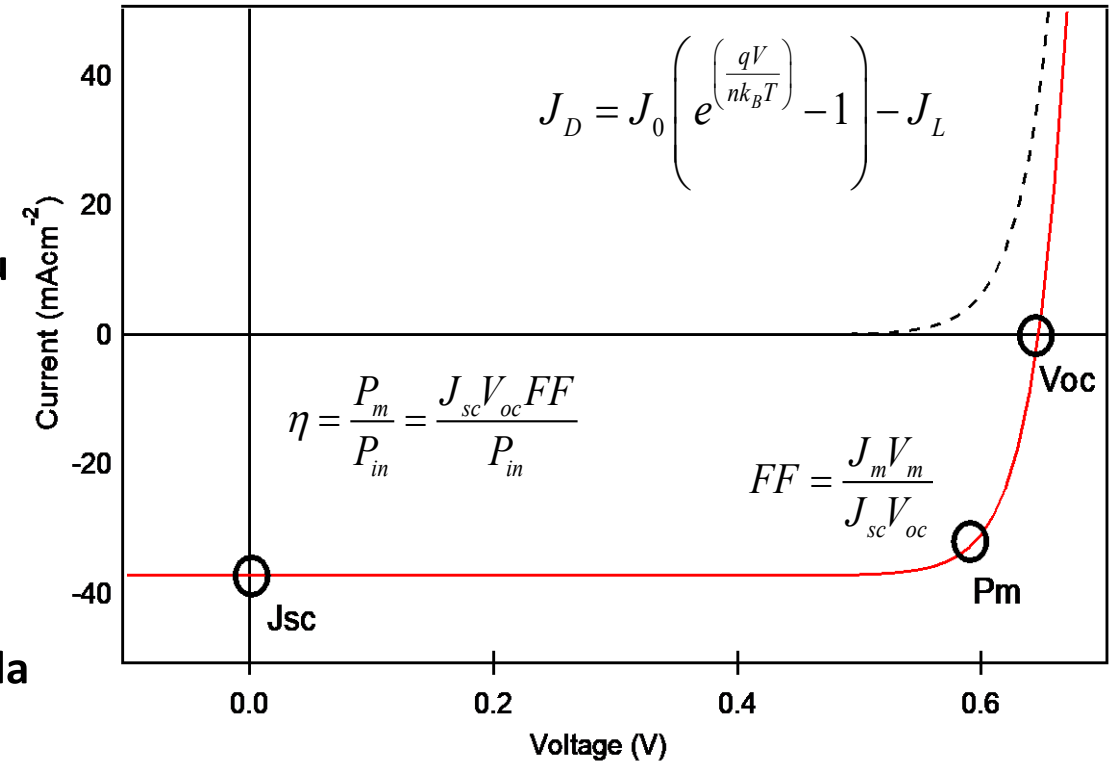
Du wafer à la cellule

cellule solaire Back Surface Field (BSF)

Exercice 1 :

Avec la documentation technique fournie déterminer:

- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- La nature de l'anti-reflet et des bus barres
- En mm la largeur du bus barre du **contact positif** et de celle du **contact négatif**
- En mm surface de la cellule
- Pour la cellule avec **Pmpp = 2,96 W** donner les valeurs de la **tension** et de **l'intensité de courant au point de puissance maximale**; **l'intensité du courant de court-circuit** et la **tension de circuit ouvert**
- Les coefficients de température pour la tension, le courant et la puissance



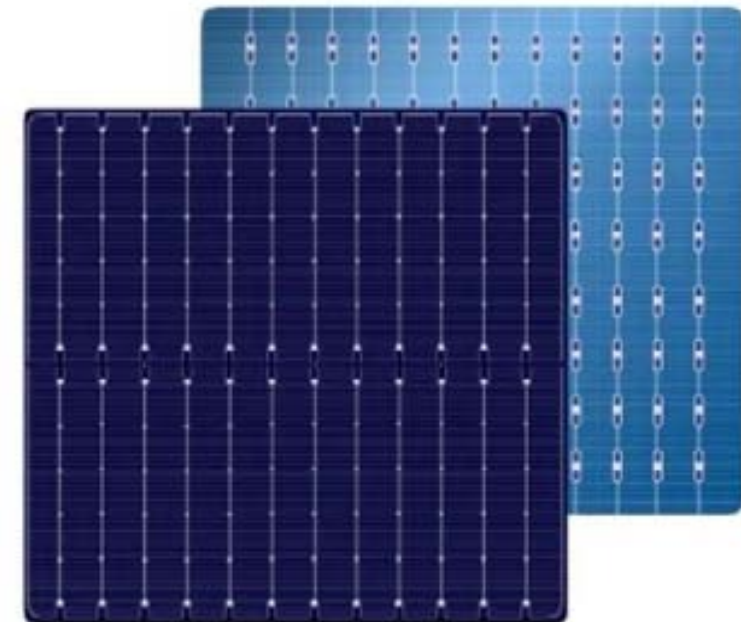
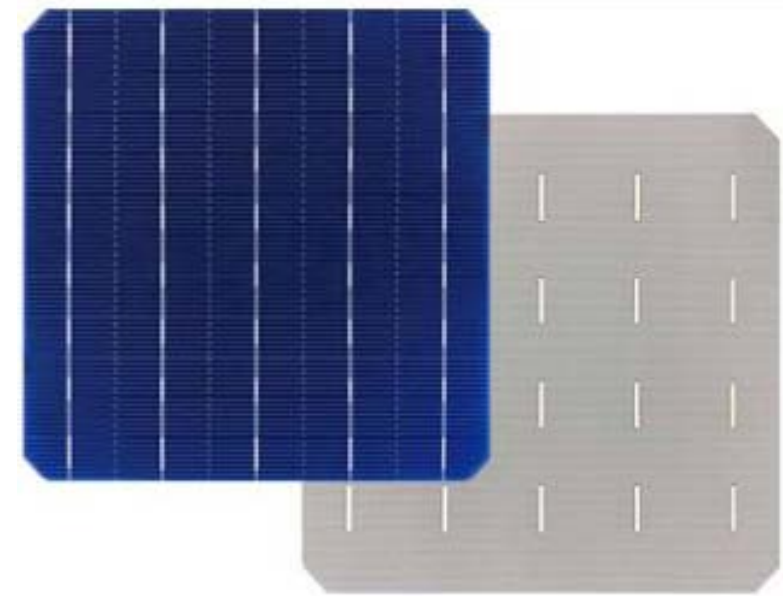
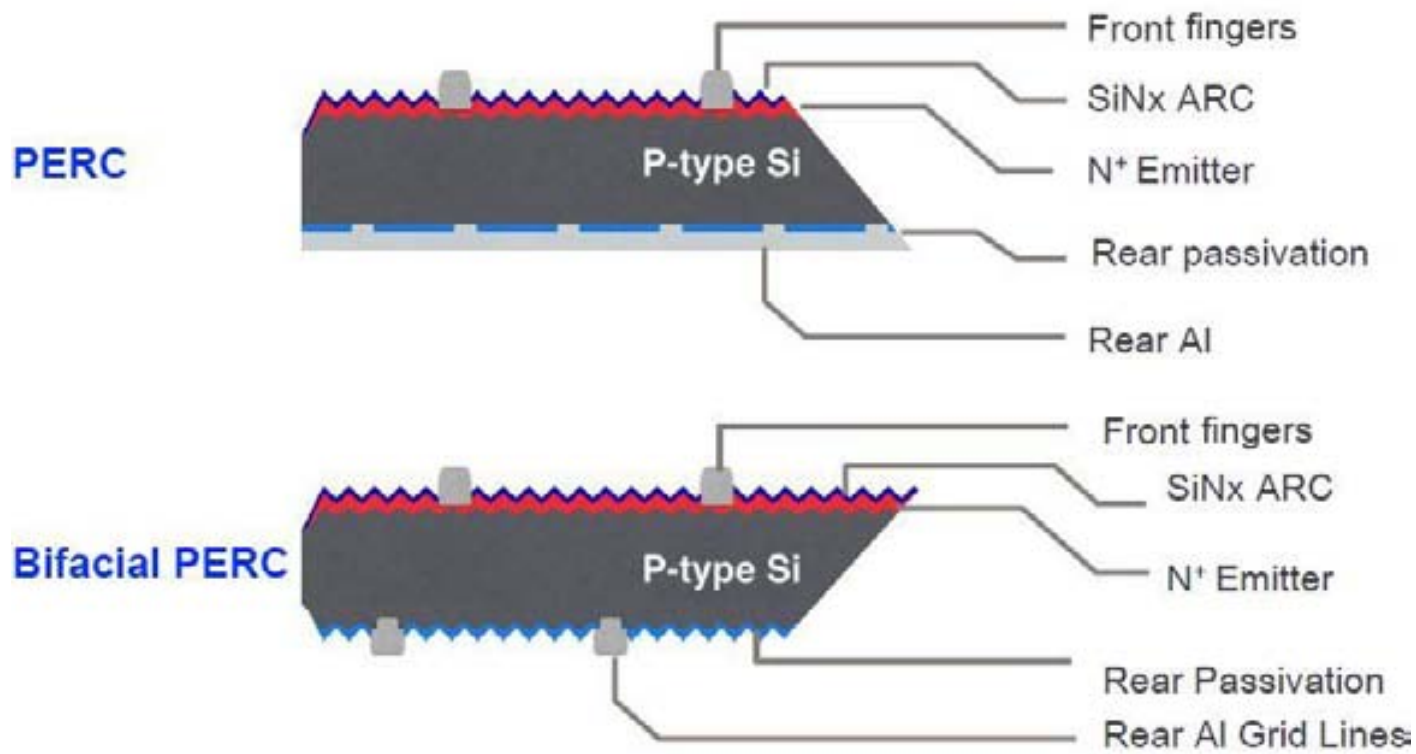
https://fr.ensolar.com/pv/cell-datasheet/2091?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directory&utm_content=57513



CARTECH

Du wafer à la cellule

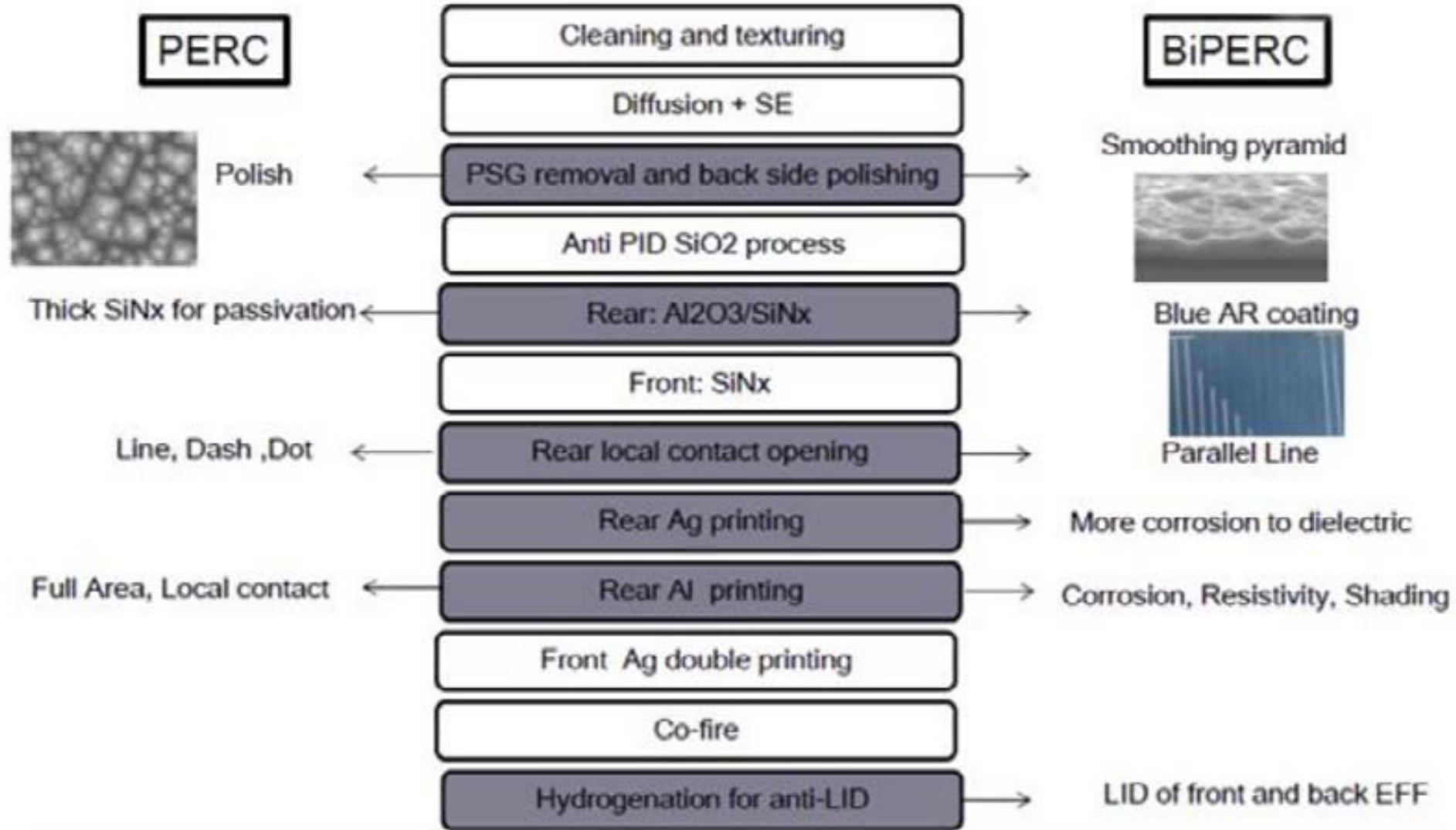
Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)

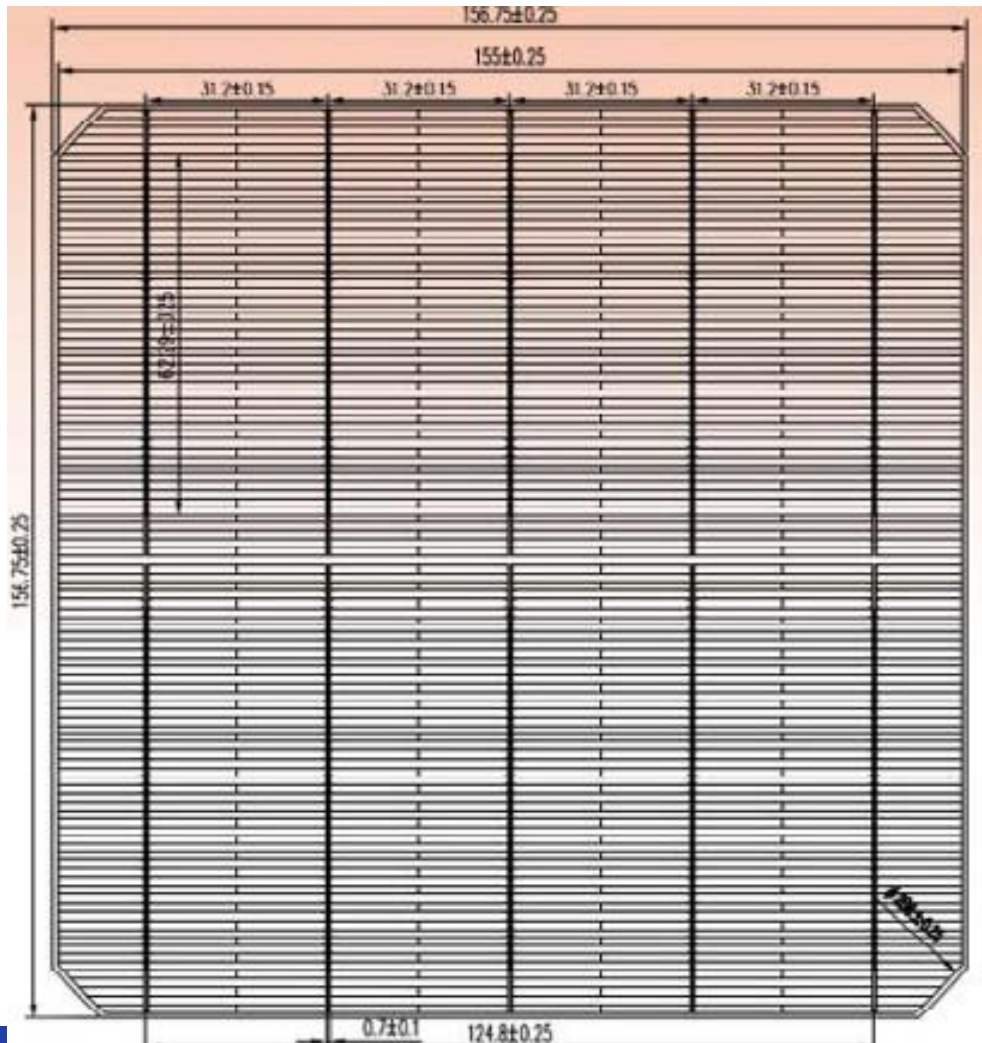
<https://www.dsneg.com/solar-cells/p-type/bifacial-210mm-m12-monocrystalline-perc-solar.html>



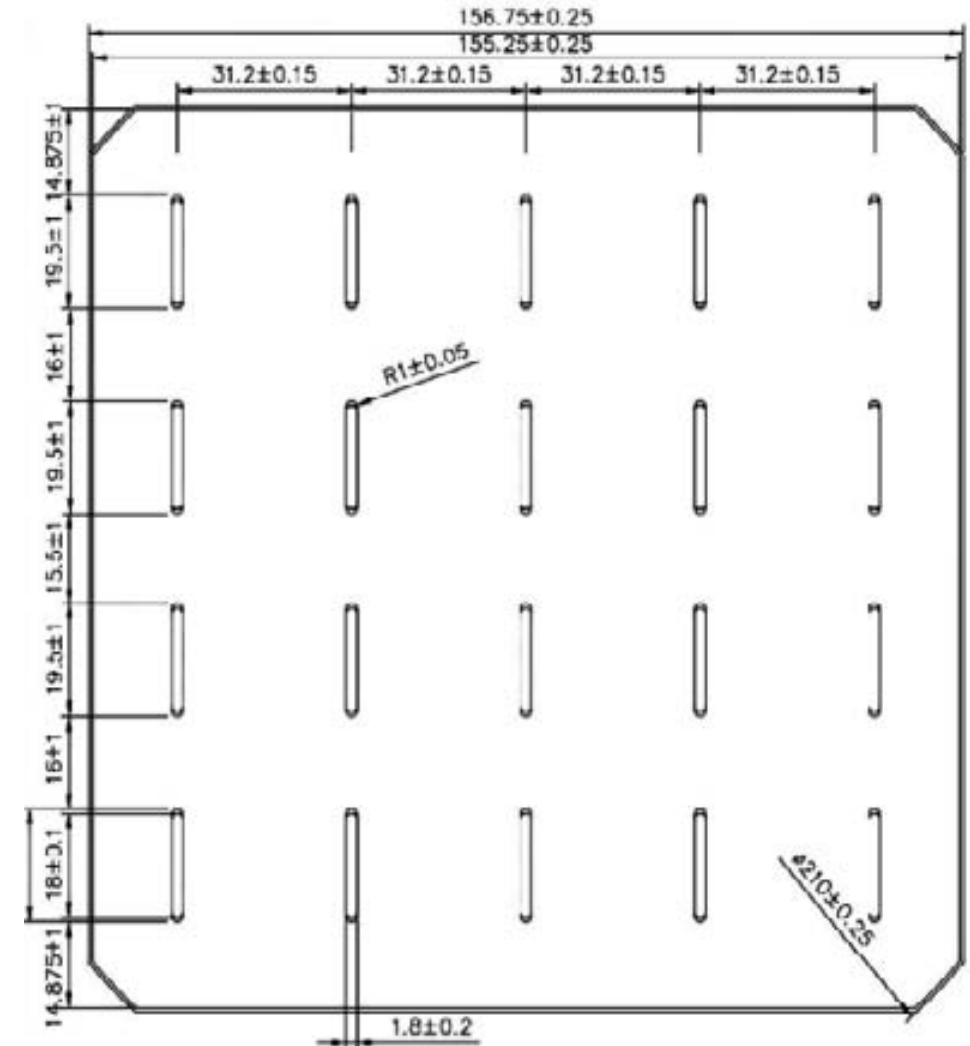
Du wafer à la cellule

Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)

Exemple de cellule 5 Bus Barres (5 BB)



https://www.enfsolar.com/pv/cell-datasheet/2750?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directo ry&utm_content=135072



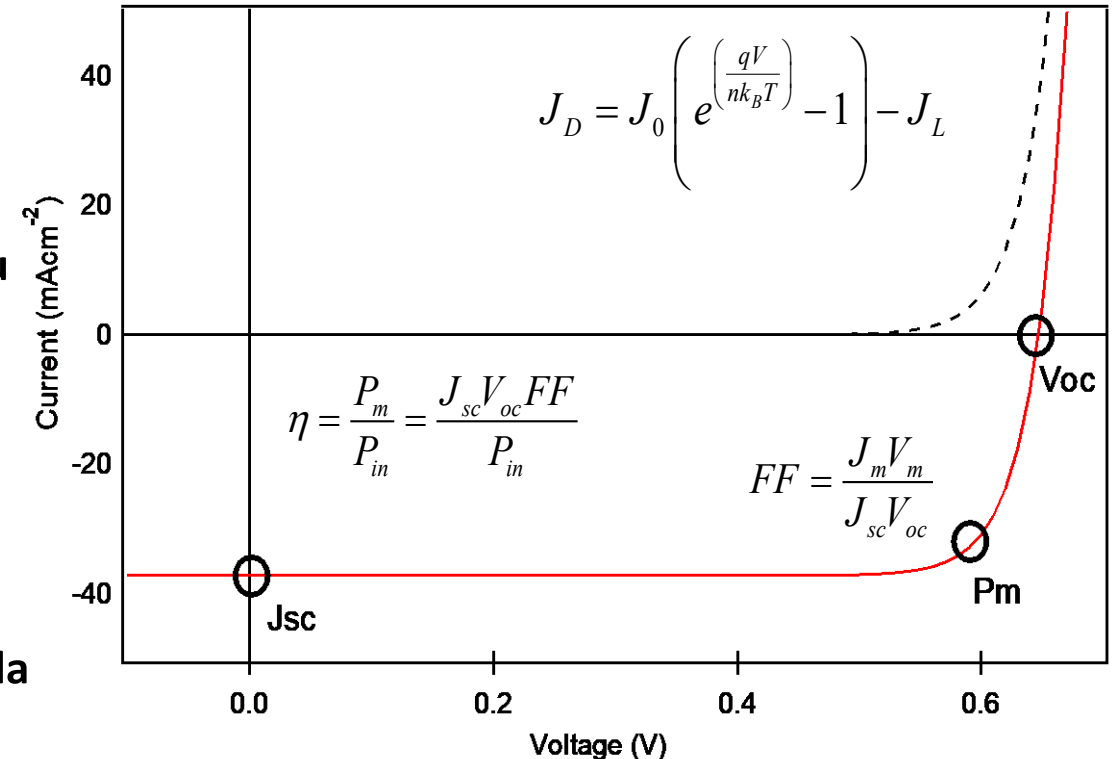
Du wafer à la cellule

Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)

Exercice 2 :

Avec la documentation technique fournie déterminer:

- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- La nature de l'anti-reflet et des bus barres
- En mm la largeur du bus barre du **contact positif** et de celle du **contact négatif**
- En mm surface de la cellule
- Pour la cellule avec **Pmpp = 5,47 W** donner les valeurs de la **tension** et de **l'intensité de courant au point de puissance maximale**; **l'intensité du courant de court-circuit** et la **tension de circuit ouvert**
- Les **coefficients de température** pour la tension, le courant et la puissance



https://www.ensolar.com/pv/cell-datasheet/2750?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directory&utm_content=135072



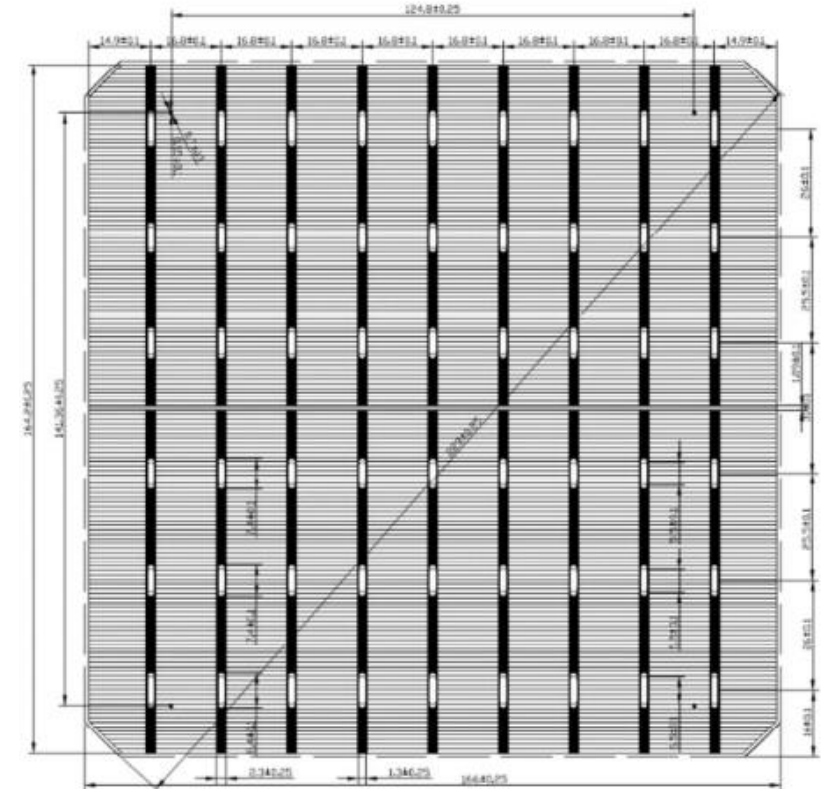
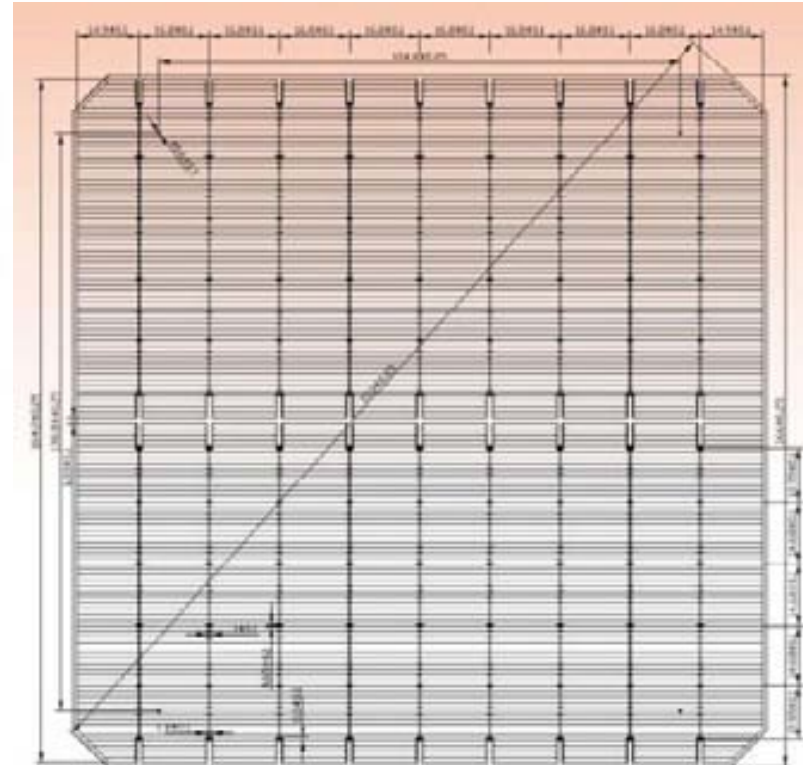
DARGA TECH

Du wafer à la cellule

Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)

Exemple de cellule bifaciale 9 Bus Barres (9 BB)

https://www.enfsolar.com/pv/cell-datasheet/2761?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directory&utm_content=135072



DARGA TECH

Du wafer à la cellule

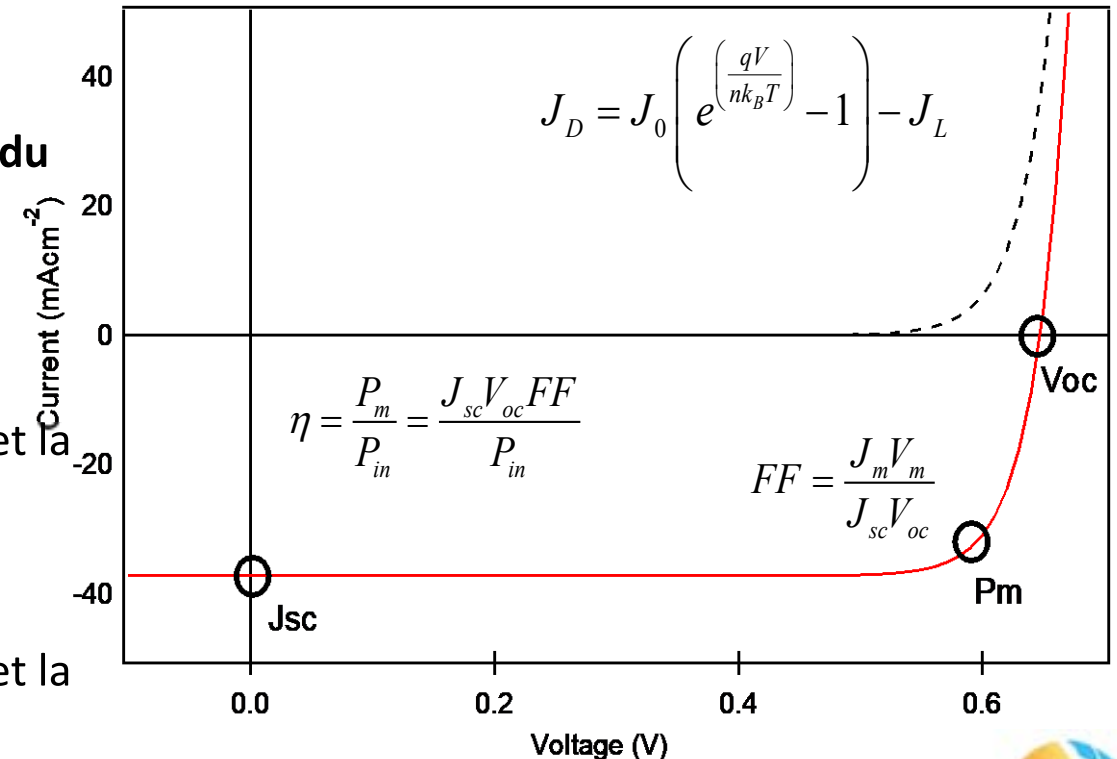
Cellule Solaire À Contact Arrière et Emetteur Passivé (PERC)

Exercice 3 :

Avec la documentation technique fournie déterminer:

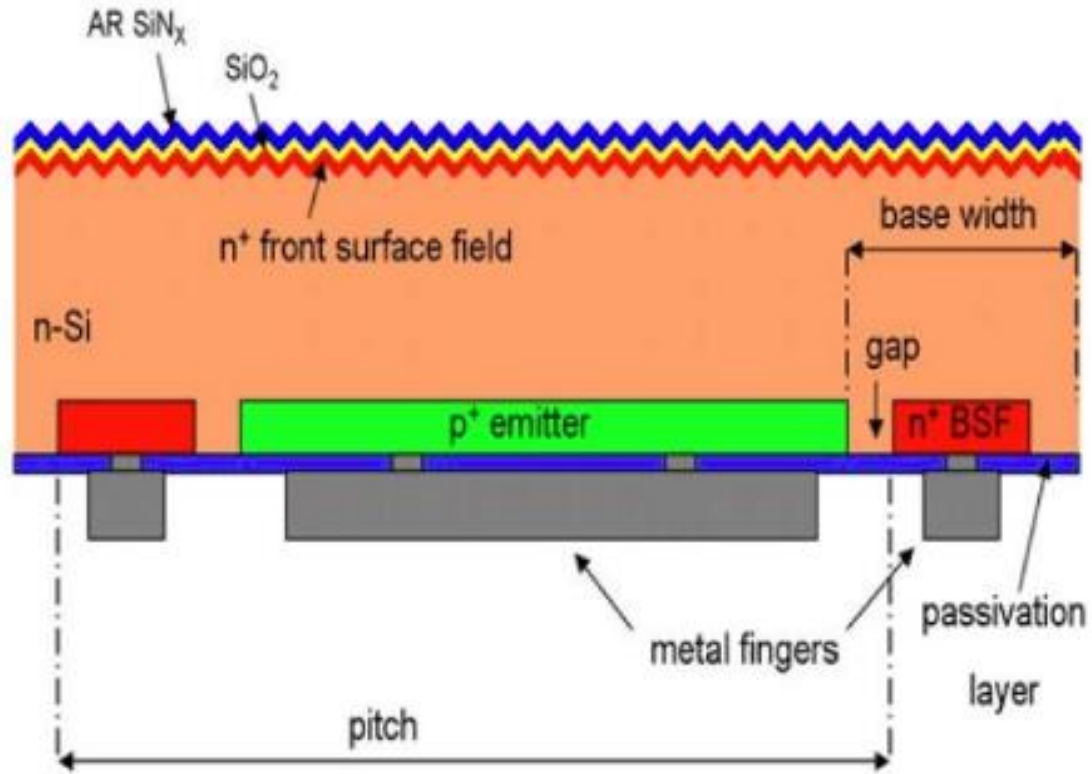
- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- La nature de l'anti-reflet et des bus barres
- En **mm** la largeur du bus barre du **contact positif** et de celle du **contact négatif**
- En **mm** surface de la cellule
- Pour la cellule (face avant) avec **Pmpp = 6,28 W** donner les valeurs de la **tension et de l'intensité de courant au point de puissance maximale; l'intensité du courant de court-circuit et tension de circuit ouvert**
- Pour la cellule (face arrière) avec **Pmpp = 4,30 W** donner les valeurs de la **tension et de l'intensité de courant au point de puissance maximale; l'intensité du courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert**
- Les coefficients de température pour la tension, le courant et la puissance

Voir doc pdf fournir



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à contacts arrière interdigités (IBC)



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à contacts arrière interdigités (IBC)



1. Polishing of as-cut CZ wafers



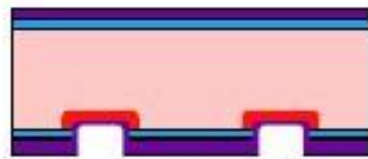
2. BBr3 diffusion



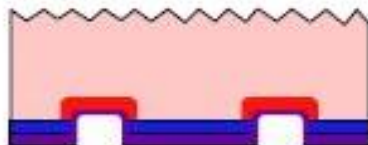
3. Thermal oxidation



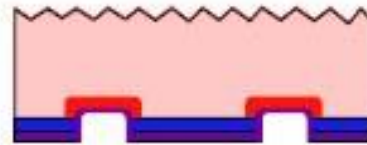
4. Patterning



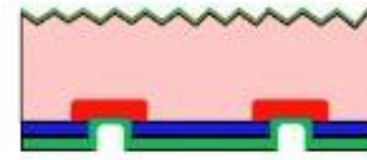
5. POCl3 BSF diffusion



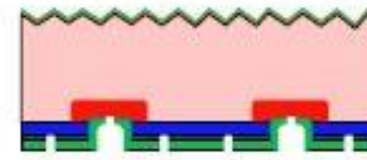
6. Texturization



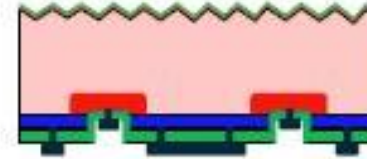
7. POCl3 FSF diffusion



8. PECVD ARC deposition



9. Contact point opening

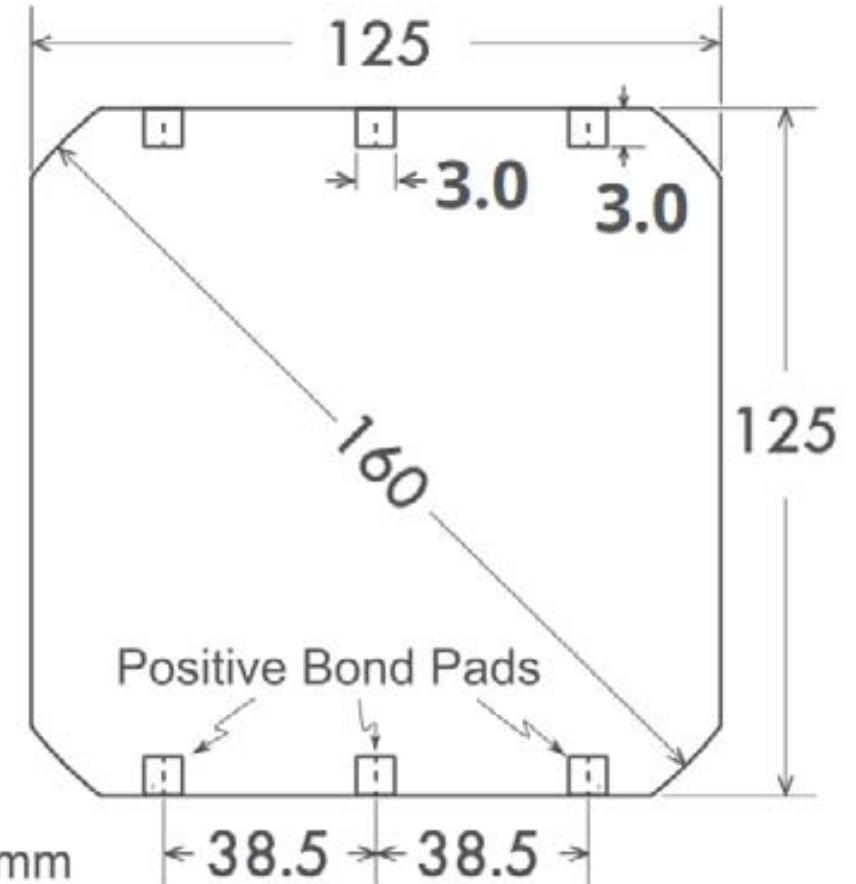
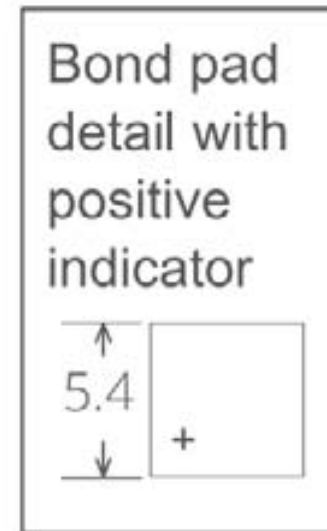
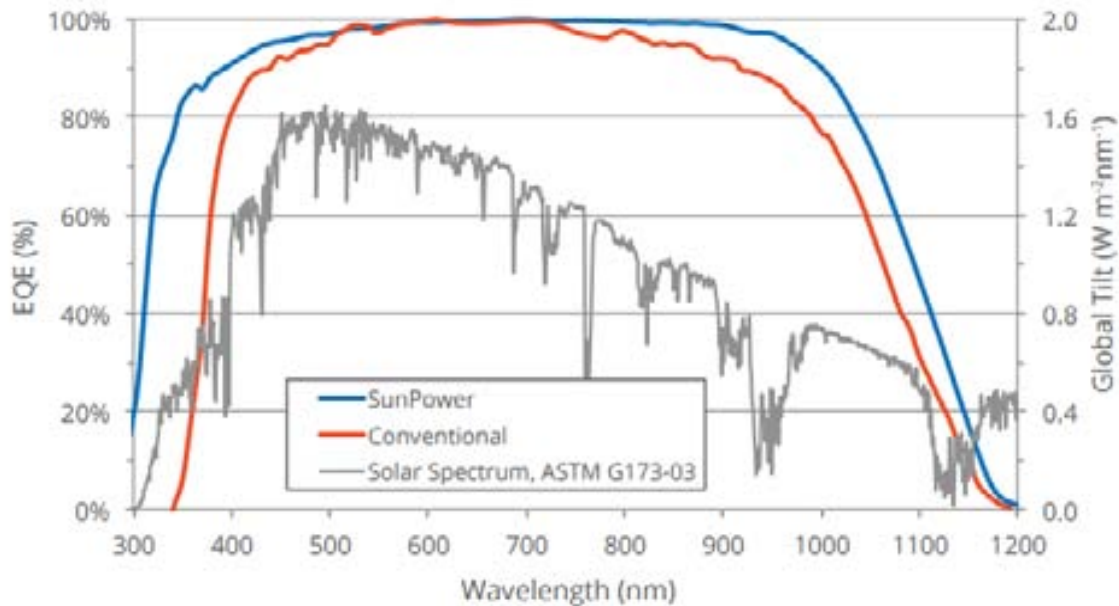


10. Metallization

Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à contacts arrière interdigités (IBC)

Exemple de cellule Sunpower



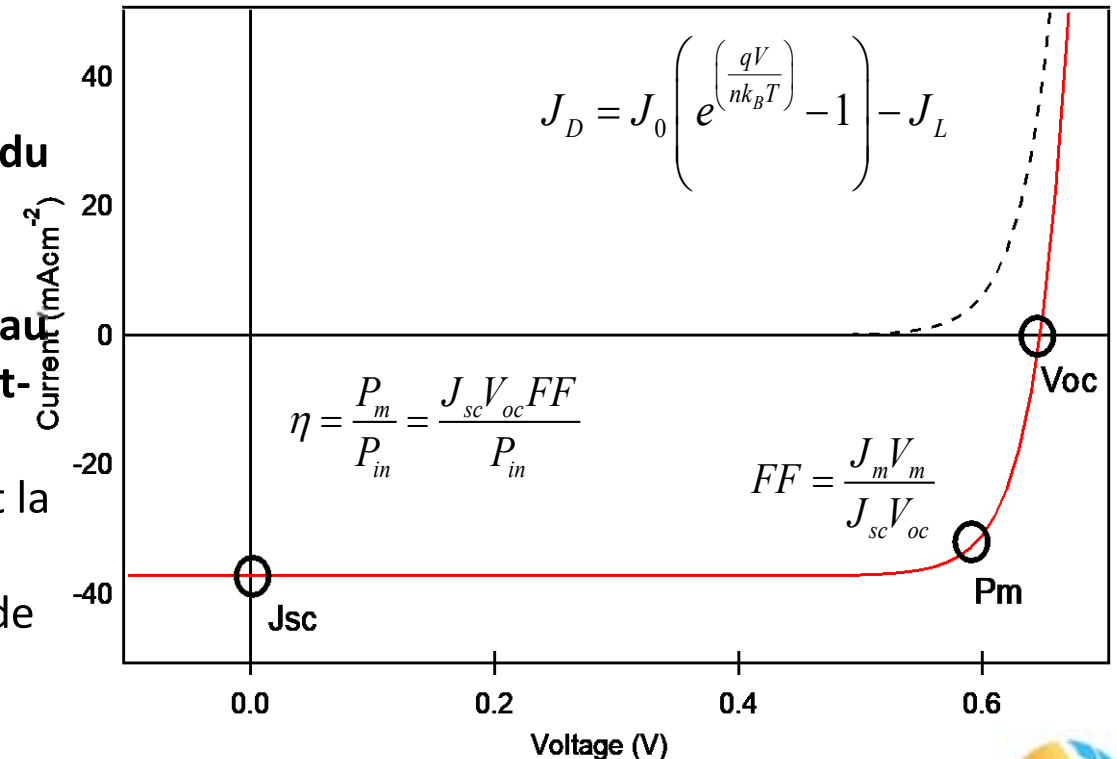
Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à contacts arrière interdigités (IBC)

Exercice 4 :

Avec la documentation technique fournie déterminer:

- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- La nature de l'anti-reflet
- En **mm** la largeur du bus barre du **contact positif** et de celle du **contact négatif**
- En **mm** surface de la cellule
- Donner les valeurs de la **tension** et de l'**intensité de courant au point de puissance maximale**; l'**intensité du courant de court-circuit** et la **tension de circuit ouvert**
- Les coefficients de température pour la tension, le courant et la puissance des modules
- Citez au moins 2 avantages indiqués dans la documentation de cette technologie

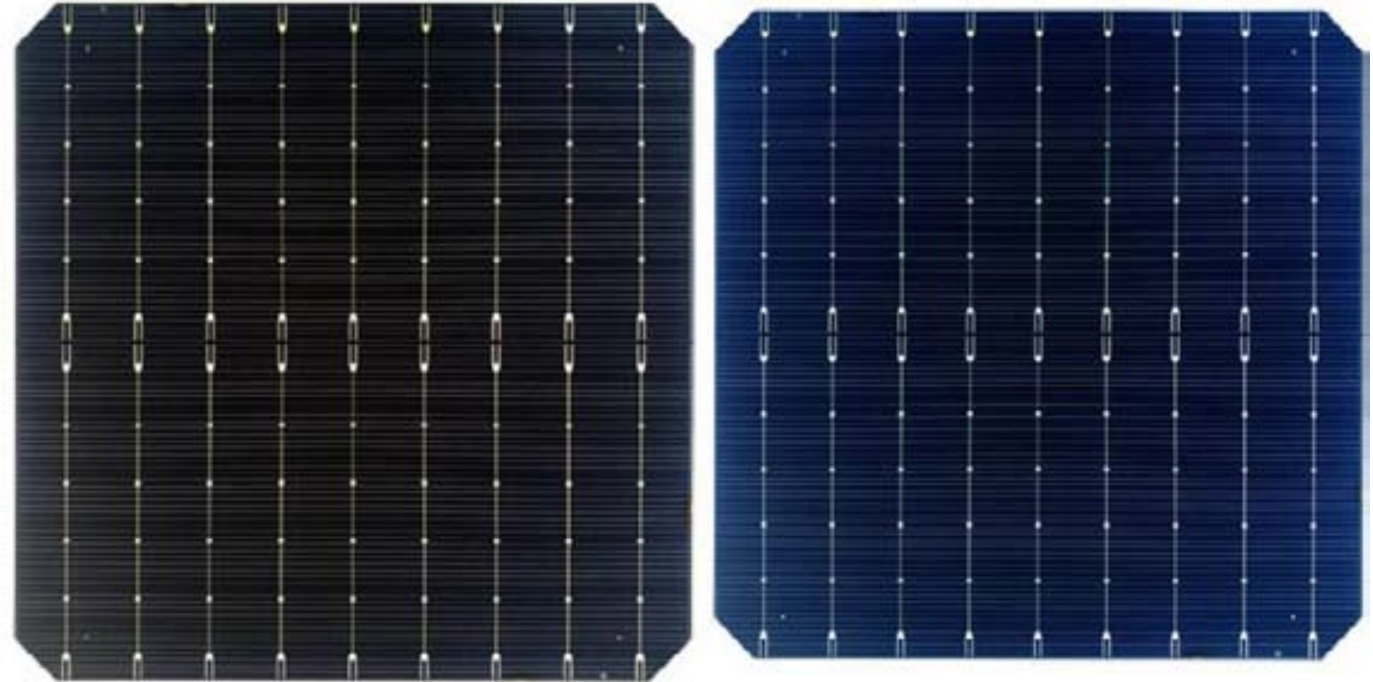
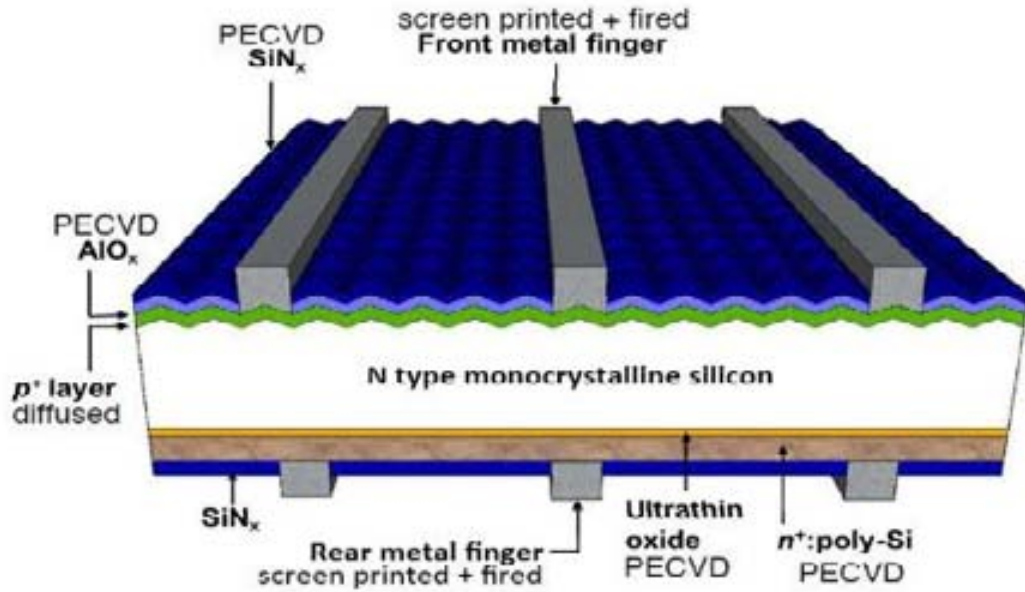


https://www.ensolar.com/pv/cell-datasheet/2761?utm_source=ENF&utm_medium=cell_list&utm_campaign=enquiry_product_directory&utm_content=135072



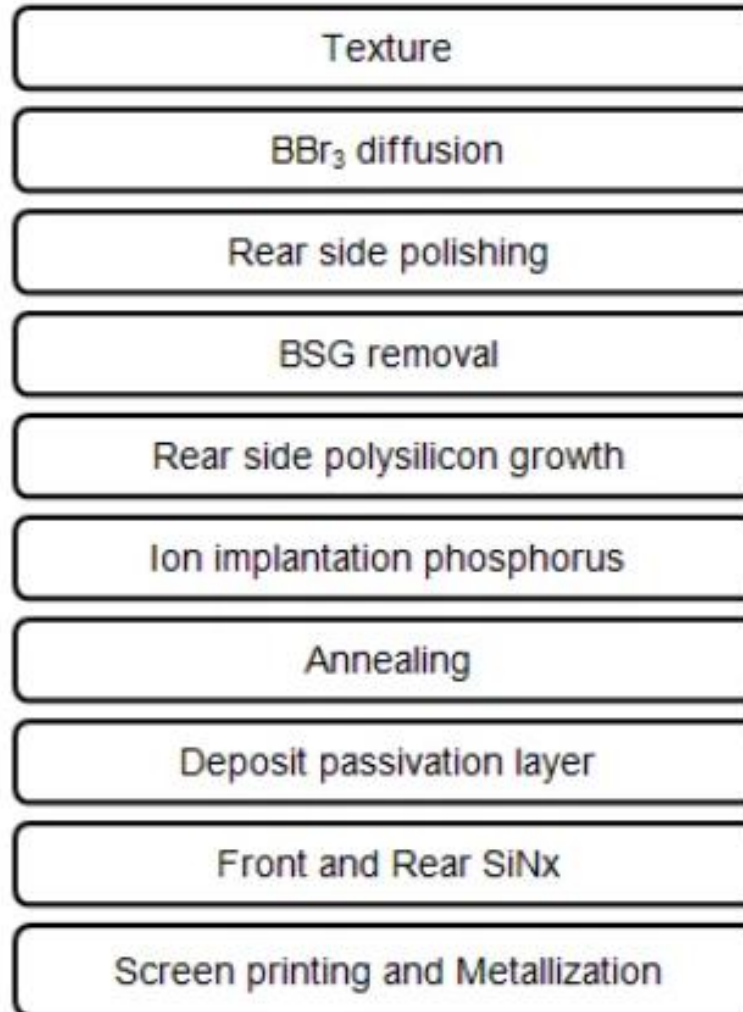
Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

Exemple de cellule avec 12 Bus barre – bifaciale

PRODUCT CHARACTERISTICS



HIGH CONVERSION EFFICIENCY WITH HIGH RELIABILITY



NO LIGHT-INDUCED DEGRADATION



STABLE MANUFACTURING PROCESS, UNIFORM ELECTRICAL PERFORMANCE



HIGH BIFACIALITY GUARANTEES MORE ELECTRICITY GENERATION



LOW HOT SPOT EFFECT



LOW MISMATCH OF CELL PERFORMANCE DURING ENCAPSULATION



EXCELLENT POWER GENERATION PERFORMANCE UNDER LOW IRRADIATION



Du wafer à la cellule

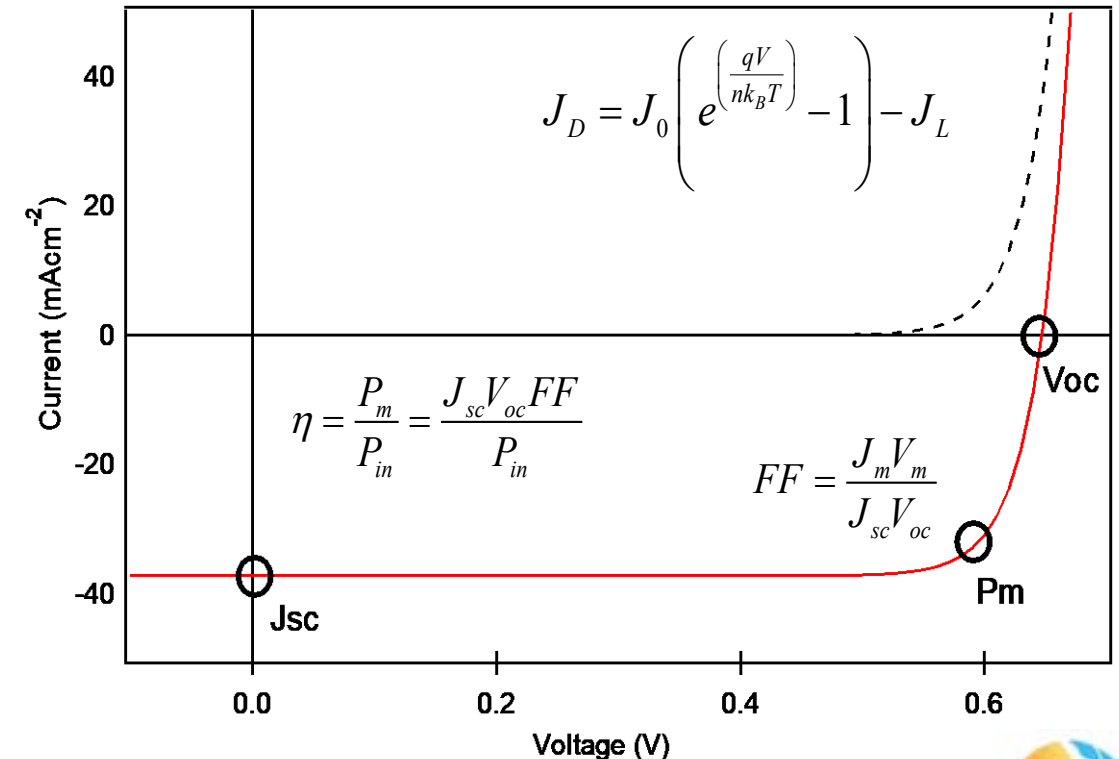
Cellule Solaire à technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

Exemple de cellule – bifaciale

Exercice 5 :

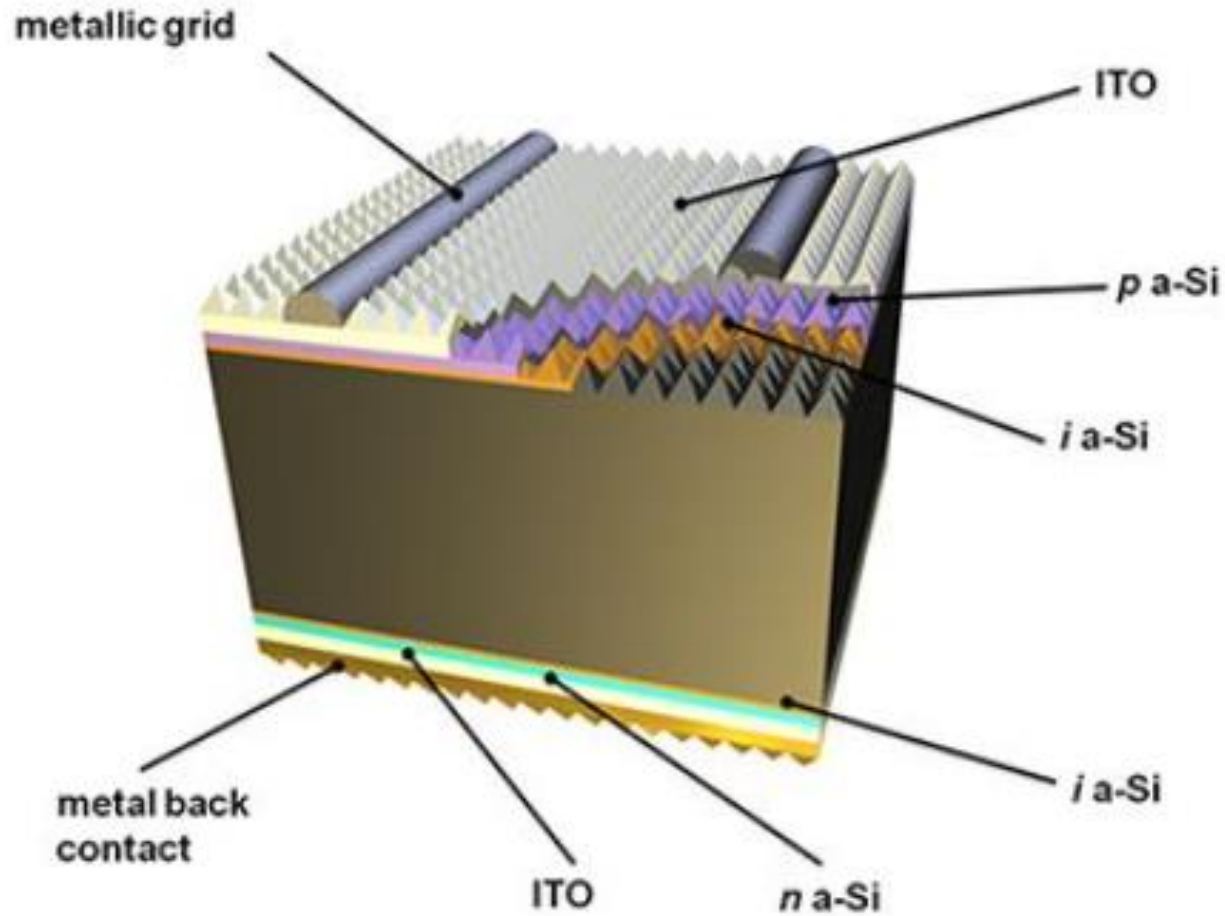
Avec la documentation technique fournie déterminer:

- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- Le nombre de bus barre
- La nature de l'anti-reflet
- En **mm** surface de la cellule
- Donner les valeurs de la **tension et de l'intensité de courant au point de puissance maximale; l'intensité du courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert**
- Les coefficients de température pour la tension, le courant et la puissance des modules
- Citez au moins 2 avantages indiqués dans la documentation de cette technologie

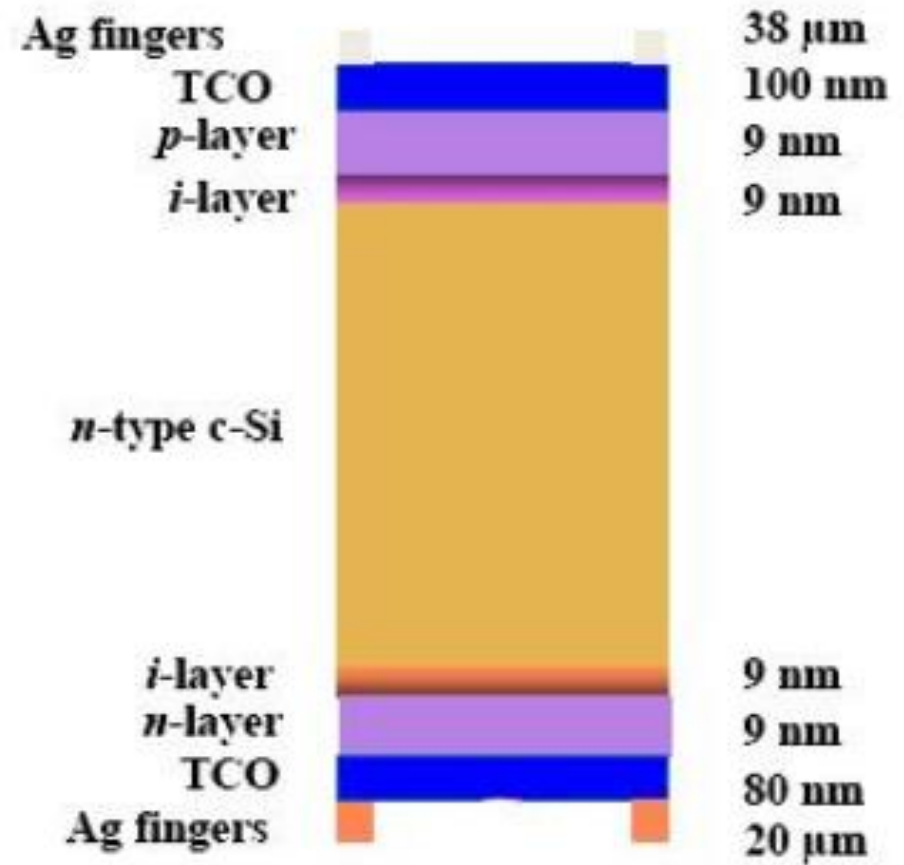


Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à Hétérojonction de Silicium (HJT)



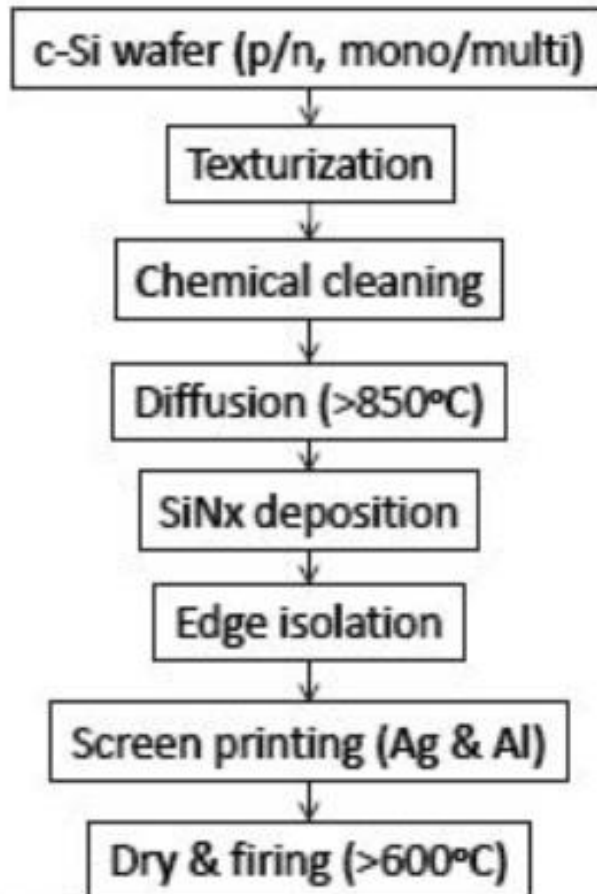
a-Si/c-Si Heterojunction



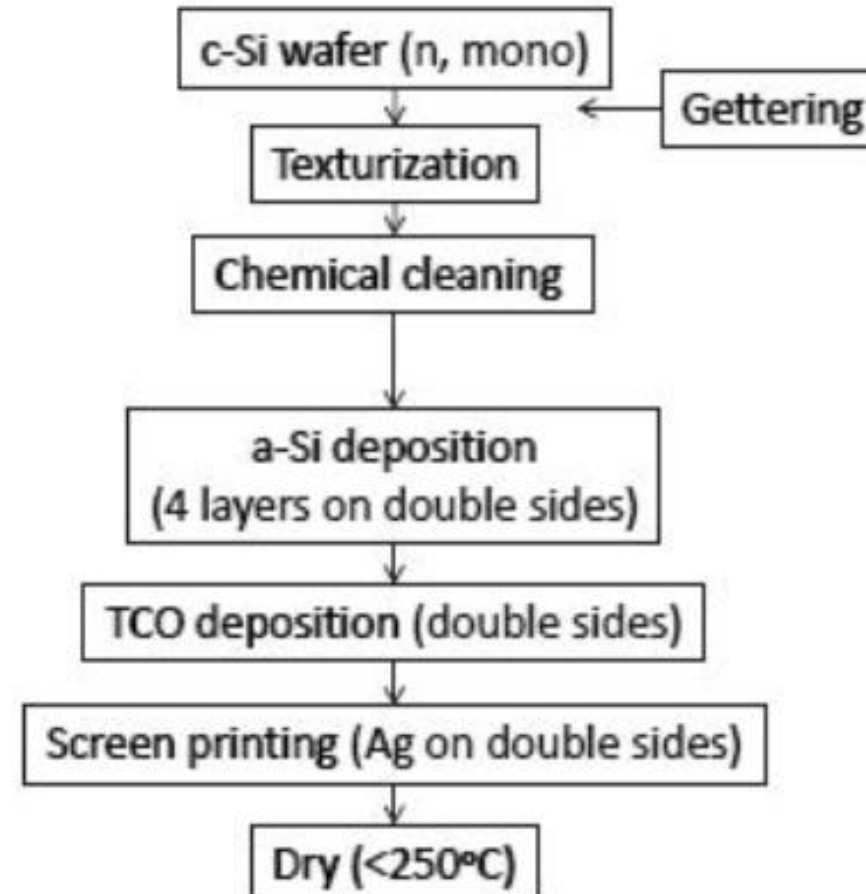
Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à Hétérojonction de Silicium (HJT)

Conventional c-Si solar cell



HIT solar cell



Du wafer à la cellule

Cellule Solaire à Hétérojonction de Silicium (HJT)

Exemple de cellule avec 12 Bus barre – bifaciale

HJT solar cell is a new generation superior bifacial solar cell made out of N-type wafer, which combines merits of crystalline silicon and thin-film technology to form a single composite structure. As one of the most effective cell passivation technology in the market, HJT ensures that solar cells deliver high efficiency and great power even in hot climate.

Higher Cell Efficiency

- Bifacial constructure ensures more sunlight captured and converted into power on the back side.
- Ultra-low temperature coefficient ensures more power output in high temperature environment.
- No LID, No PID, lead to zero degradation.

Maximum Module Power

- 12-busbar technology combines half-cell design to deliver higher energy output for maximum cost savings.
- excellent weak light performance ensure higher output in lower light environment
- Extreme low LID and PID supports reliability and longevity.
- Lower LCOE cost by HJT solar system



Du wafer à la cellule

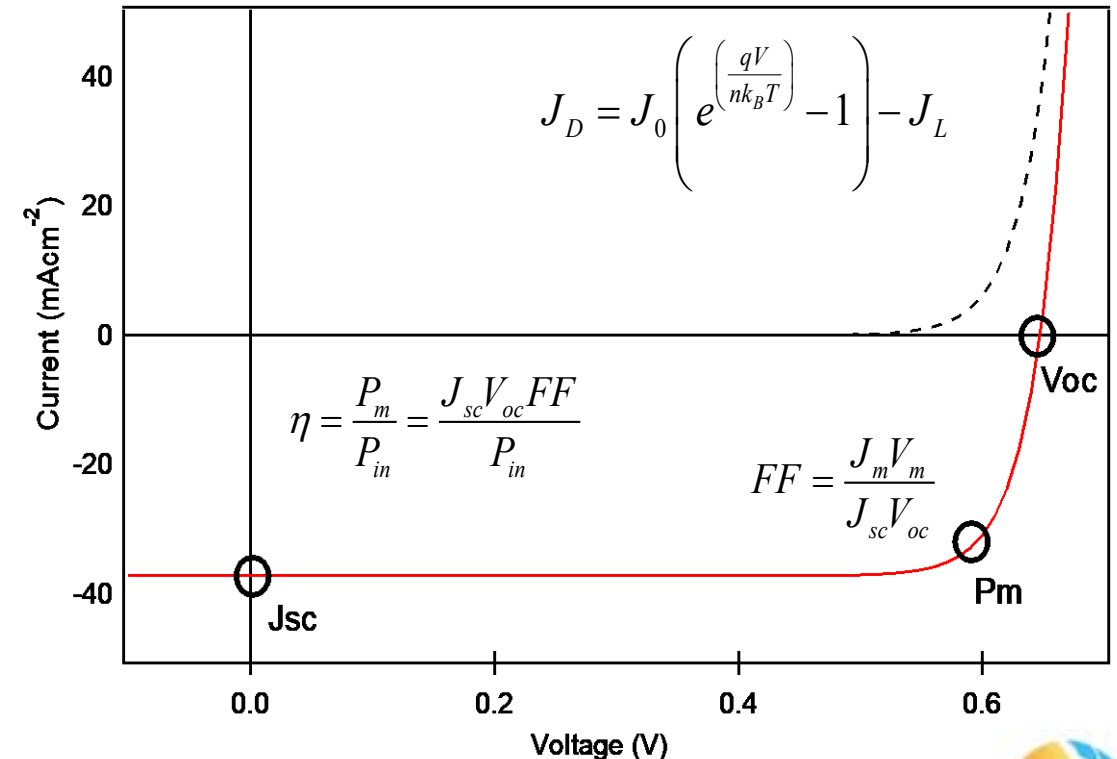
Cellule Solaire à Hétérojonction de Silicium (HJT)

Exemple de cellule – bifaciale

Exercice 6 :

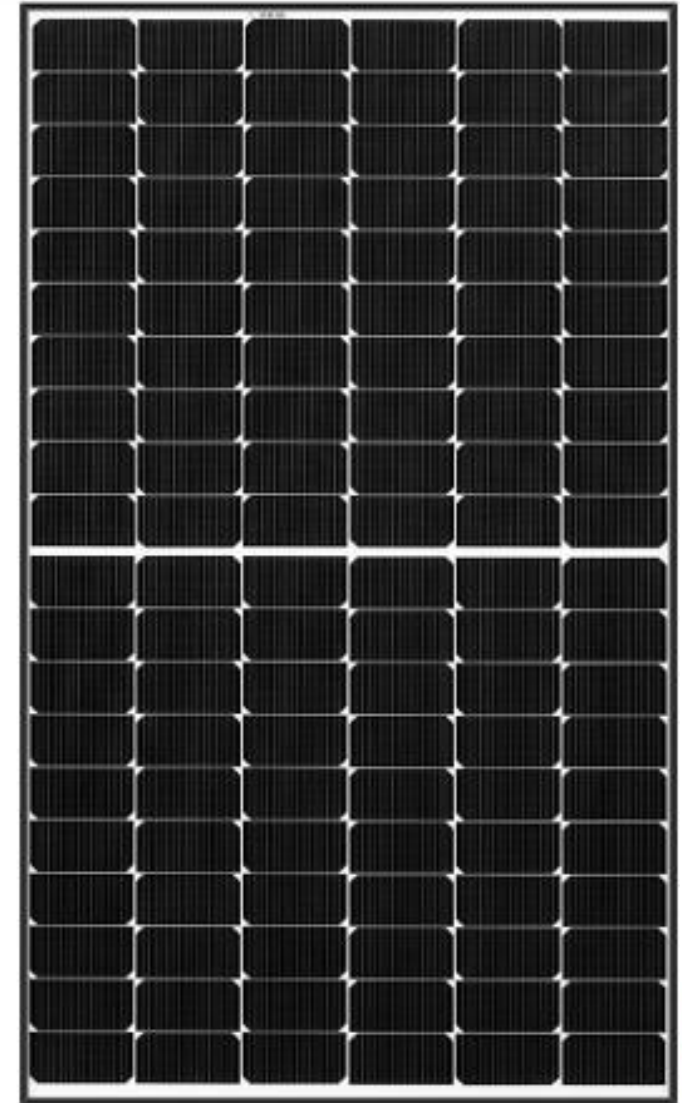
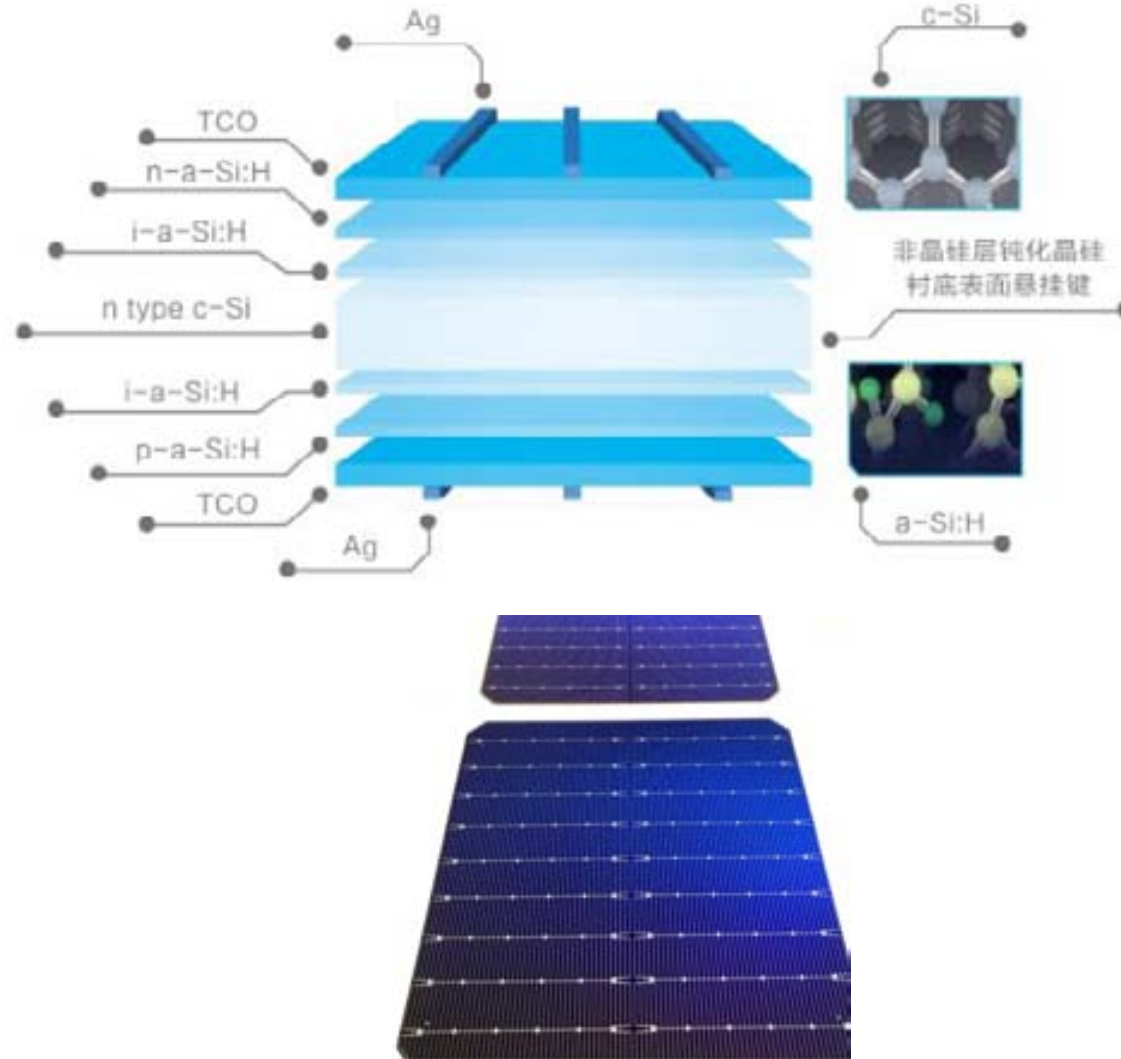
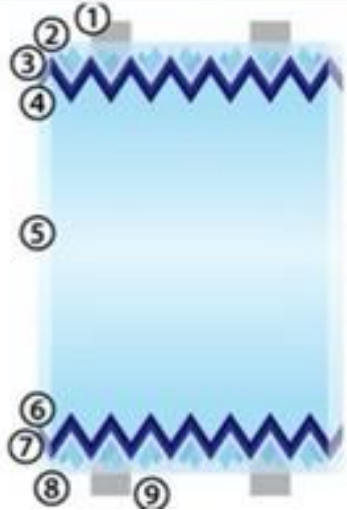
Avec la documentation technique fournie déterminer:

- L'épaisseur de la cellule en micromètre
- La nature de l'anti-reflet
- En **mm** surface de la cellule
- Donner les valeurs de la **tension et de l'intensité de courant au point de puissance maximale**; l'intensité du courant de court-circuit et la **tension de circuit ouvert**
- Les coefficients de température pour la tension, le courant et la puissance des modules
- Citez au moins 2 avantages indiqués dans la documentation de cette technologie



Du wafer à la cellule

SHJ
23-25% cell efficiency



Les principaux fabricants – les 10 premiers

Rank	Company	Capacity (MW)	Country
1	LONGi Green Energy Technology Co., Ltd.	60000	China
2	Trina Solar Co., Ltd.	50000	China
3	JinkoSolar Holding Co., Ltd.	45000	China
4	JA Solar Holdings Co., Ltd.	40000	China
5	Canadian Solar Inc.	14500	Canada
6	Hanwha Q CELLS Co., Ltd.	12400	South Korea
7	Risen Energy Co., Ltd	8100	China
8	Astronergy Co., Ltd. (CHINT SOLAR)	8000	China
9	First Solar, Inc.	7900	USA
10	< Suntech Power Holdings Co., Ltd.	4430	China