

# Technologie des cellules solaires à hétérojonction: Du labo à l'industrie

N. Wyrsh

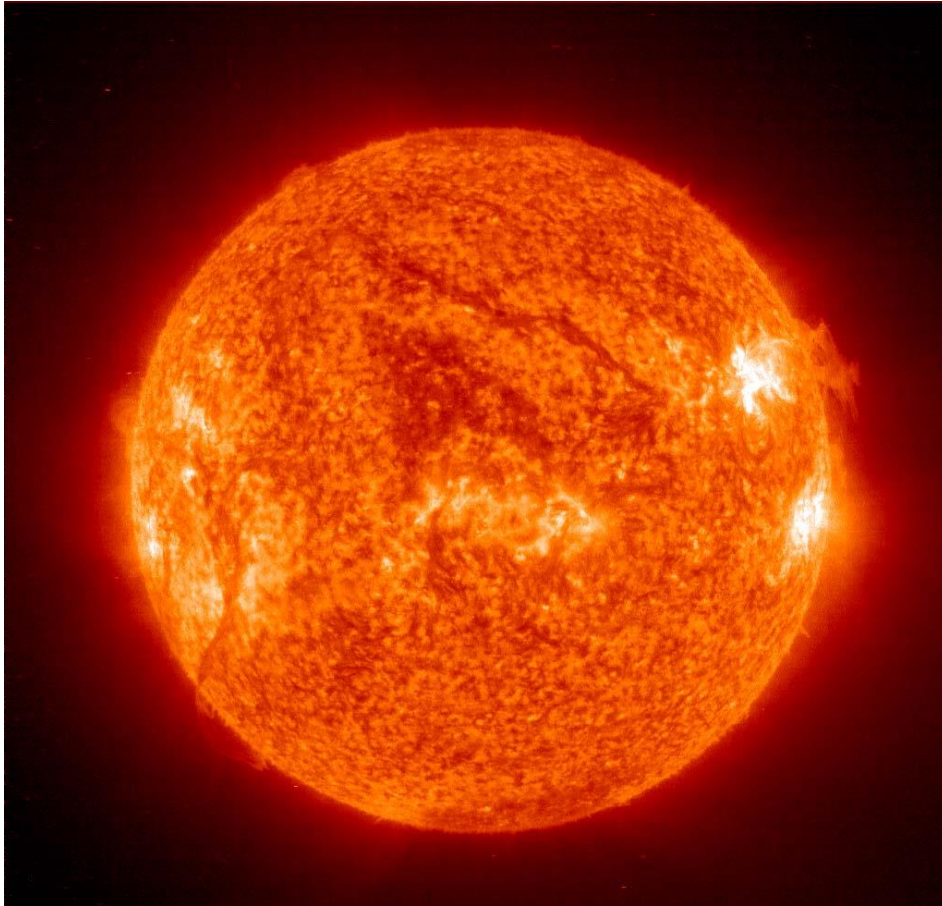
**Laboratoire de photovoltaïque  
IMT-Neuchâtel, EPFL**



# Bref historique du PV

- 1839 : Effet photovoltaïque découvert par Becquerel en 1839
- 1883 : Première cellule solaire en selenium (Fritts efficacité < 1%)
- 1941 : Fabrication des premières cellules en silicium (Ohl)
- 1953 : Cellule en Si avec une efficacité de 5% (Bell Laboratories)
- Années 60-70, importants progrès dus aux applications spatiales
- 1973 : Embargo pétrolier, démarrage de programmes de recherches importants
- Fin des années 70 : Début de la production de masse pour le marché découplé du réseau
- 2015 :
  - Production annuelle de > 40 GW<sub>p</sub>, (en très grand partie c-Si)
  - PV installé : 200 GW
  - PV couvre > 1% de la consommation mondiale d'électricité (> 1.5% en CH)
  - Efficacité record des cellule en c-Si : 25.6% (commerciales en c-Si : >22%)
  - Efficacité record pour une cellule PV : 46%

# Énergie solaire disponible



- L'énergie solaire incidente sur la surface de la Terre  $\approx 10'000$  x la consommation mondiale d'énergie
- Une heure d'irradiation solaire sur la surface terrestre  $\approx$  consommation annuelle mondiale d'énergie

# Fillières technologiques sur le marché



## Si cristallin

Multi Mono

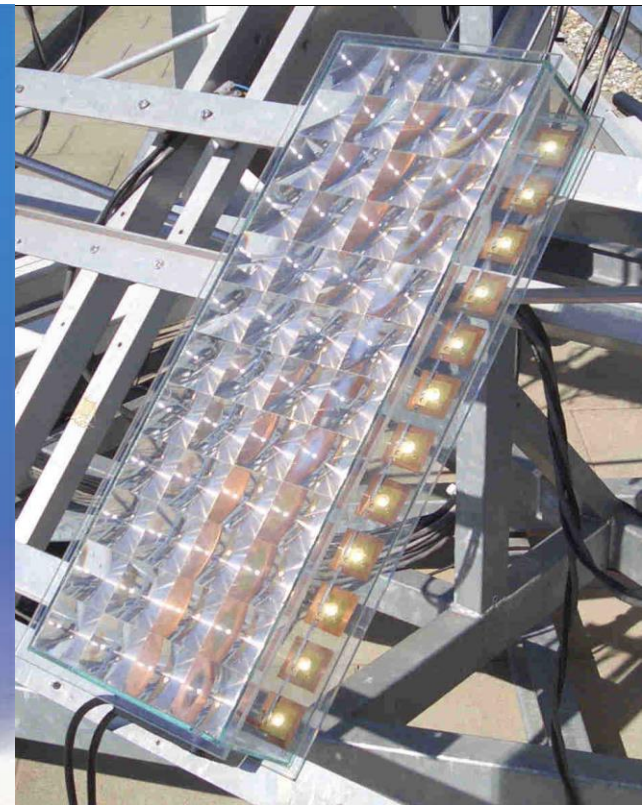
Efficacité 12-21%  
Potentiel 20-26%



## Couches minces

CIGS, a-Si /  $\mu\text{c-Si}$ , CdTe

6-14%  
12-20%

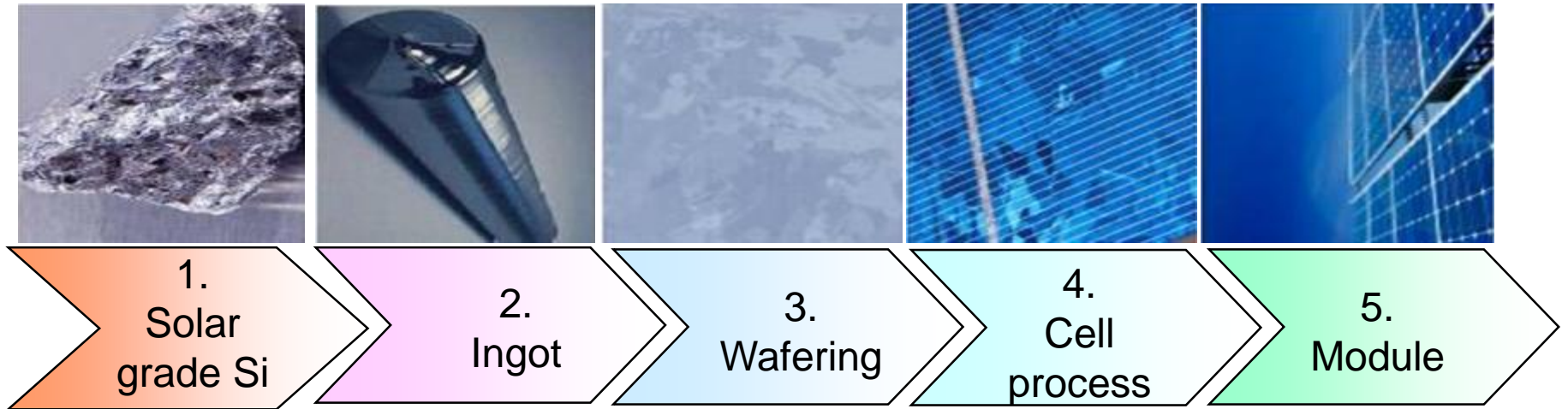


## Concentration

Semicond. III-V

25-34%  
30-50%

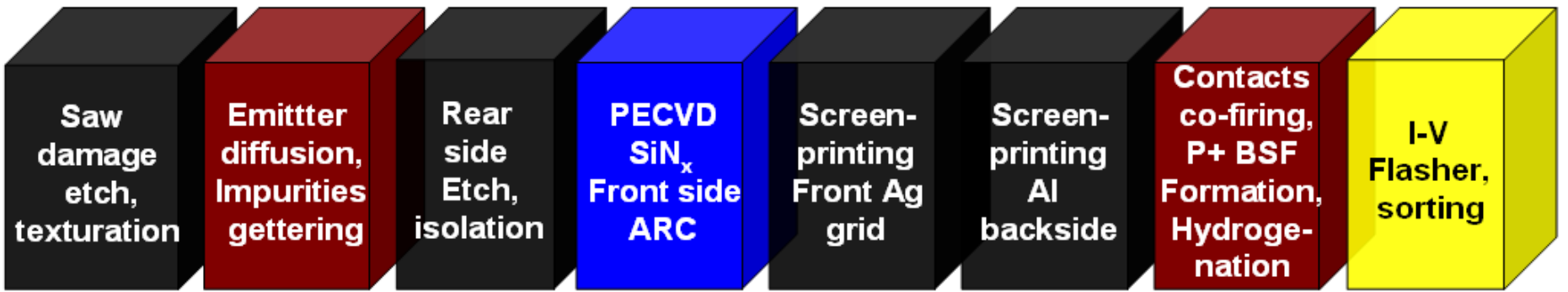
# Fabrication de cellule en Si cristallin



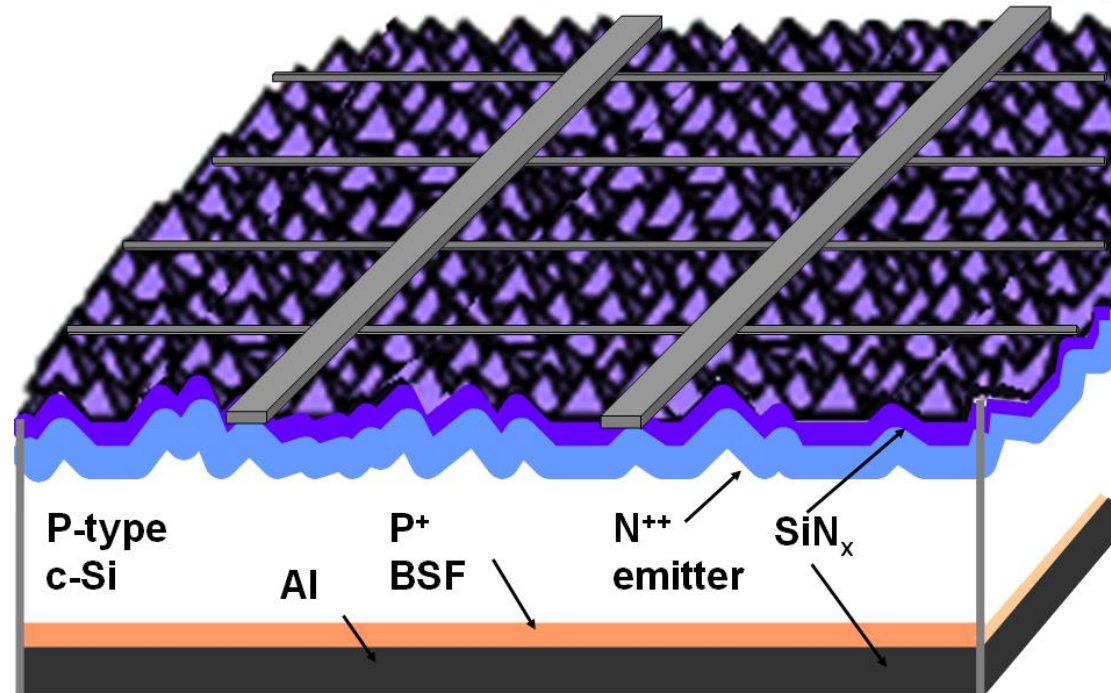
Coût de production :  
0.7-1.2  $\$/W_p$  en 2013  
(50-200  $\$/m^2$ )

# Du wafer à la cellule

4.  
Cell  
process



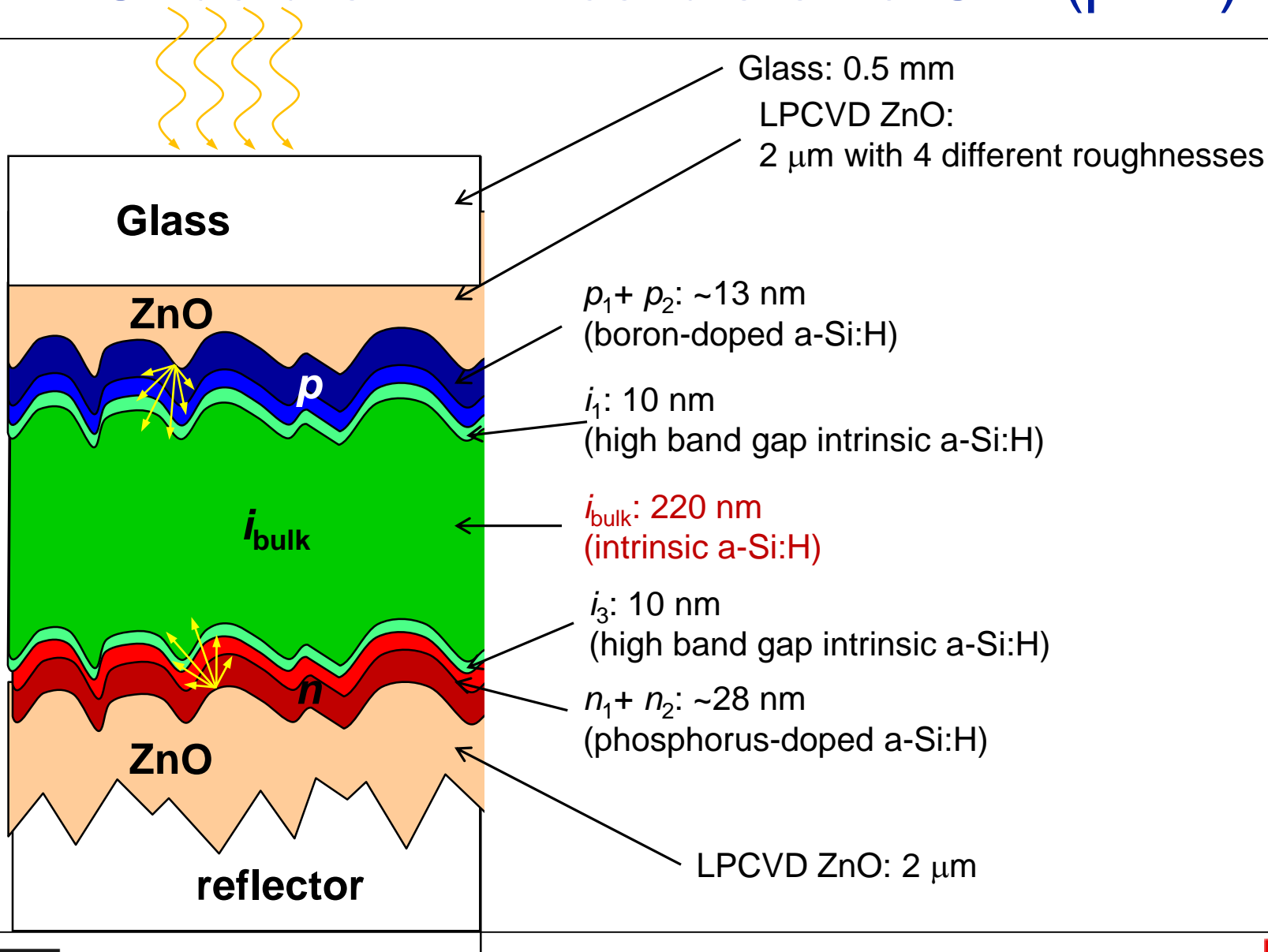
Cellule PV standard



# Développement des hétérojonctions au PV-LAB

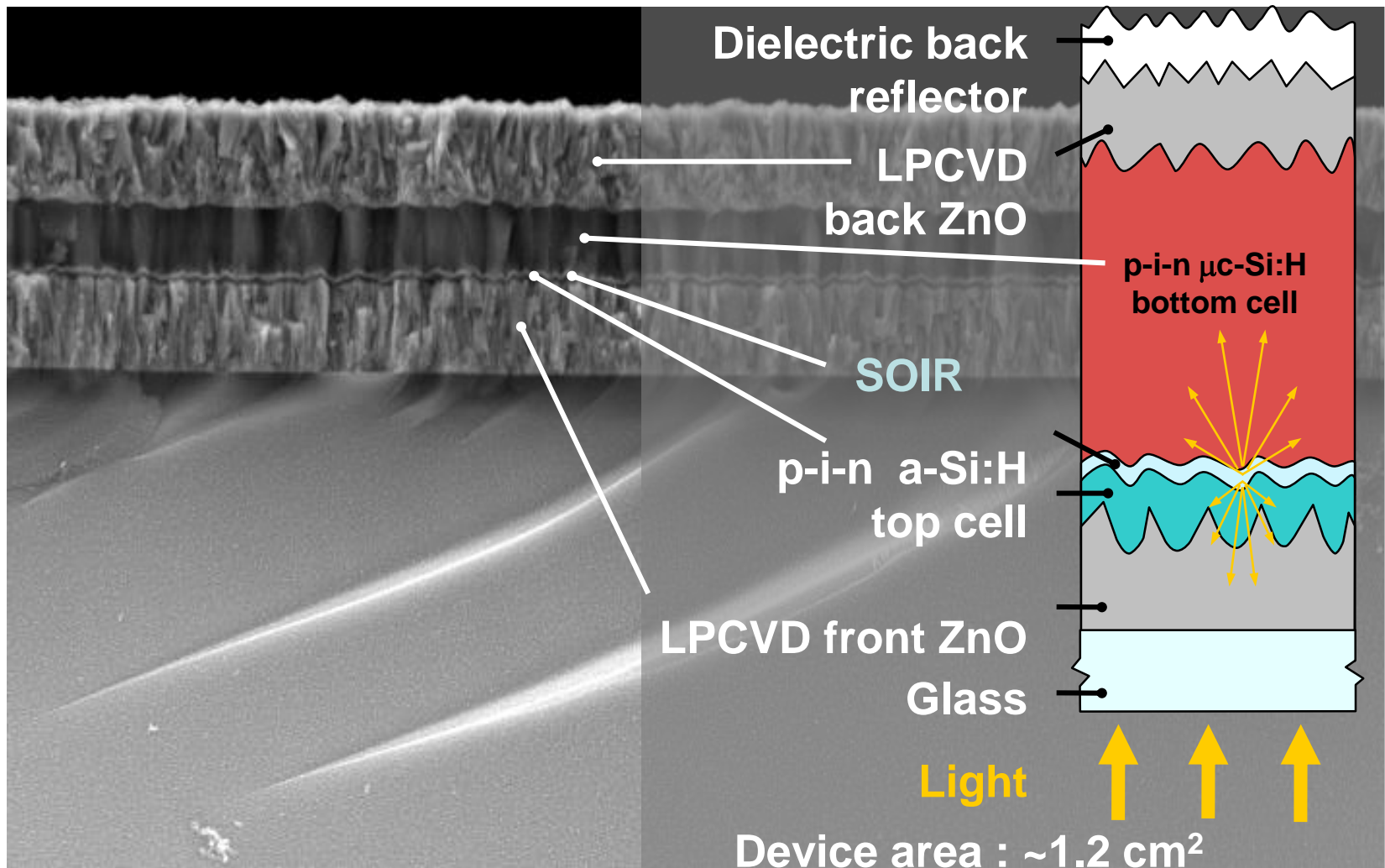
- 1979 : Création de la chair d'électronique (Prof. A. Shah)
- 1985 : Début des activités PV (financées par l'OFEN), couches minces basées sur le Si
- 1993 : Recherches liées aux hétérojonctions (P.Torres, Dr. H. Keppner) et dépôt d'un brevet, efficacité de >11% obtenue.
- 2004 : Reprise de la direction du PV-LAB par le Prof. C. Ballif
- 2006 : Reprise des activités sur les hétérojonctions (financées par FNS)
- 2007 : Prix «Swisslectric research» obtenus par S. Olibet, efficacité de 19% atteinte.
- 2008 : Début de la collaboration entre R&R et le PV-LAB avec la création de R&R Switzerland (labos partagés avec le PV-LAB)
- 2009 : Reprise de l'IMT par l'EPFL
- 2013 : Création du PV-Center du CSEM
- 2014 : Installation de la ligne pilote de R&R à Hauterive

# Structure d'une cellule en a-Si:H(p-i-n)



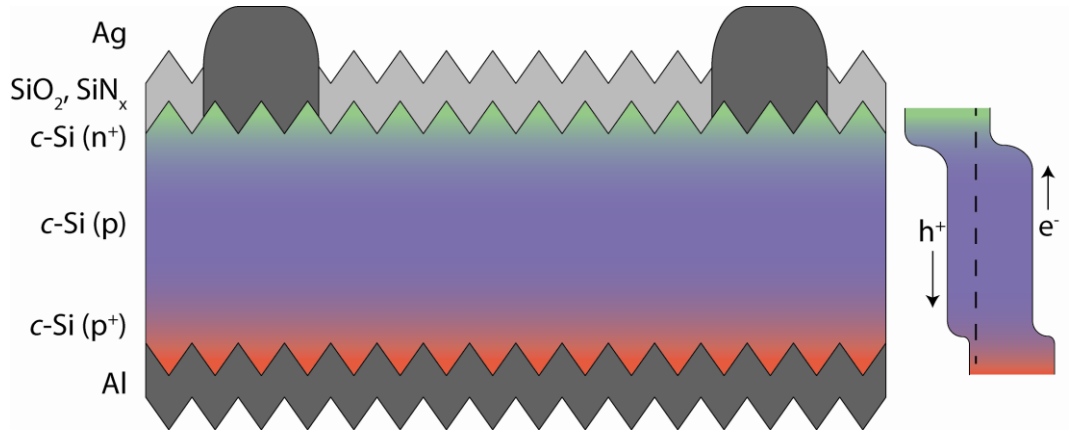


# Cellule solaire p-i-n “micromorphe”



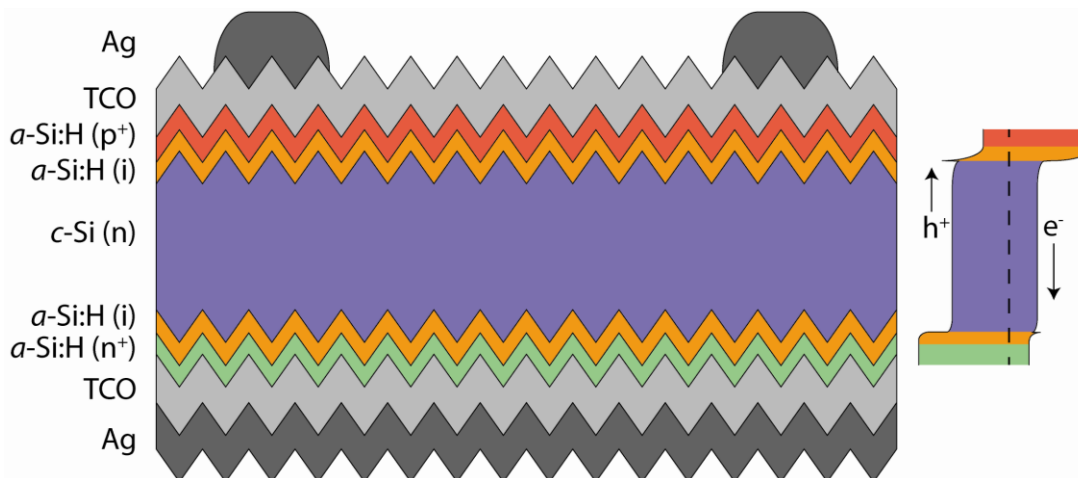
# Cellules à homo- et hétérojonction

## Cellule standard (homojonction)



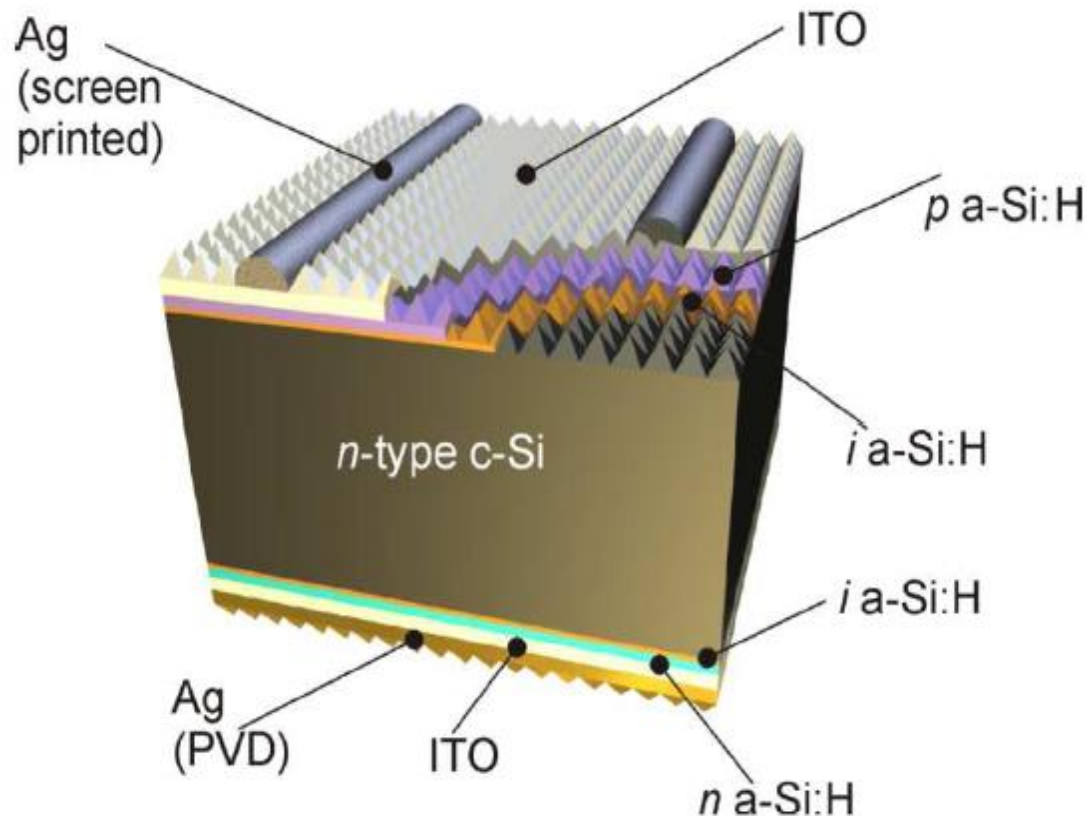
Contact direct entre  
absorbeur et métal  
=  
Recombination aux contactx  
→ Bas  $V_{oc}$

## Cellule à hétérojonction



Fine couche semi-conductrice  
entre absorbeur et métal  
=  
Contacts passivants  
→ Haut  $V_{oc}$

# Avantages de la structure à hétérojonction



- Excellente passivation avec les couches en a-Si
- Fabrication à basse température
  - compatible avec des wafers fins
- Coefficient de température de l'efficacité faible
  - Meilleur rendement énergétique (plus de kWh par kW<sub>p</sub>)
- Sanyo pionnier

# Séquence de fabrication

Saw damage etch / texturing / cleaning

*i-p* a-Si:H deposition by PECVD (15 nm)

*i-n* a-Si:H deposition by PECVD (15 nm)

Front ITO DC sputtering (80 nm)

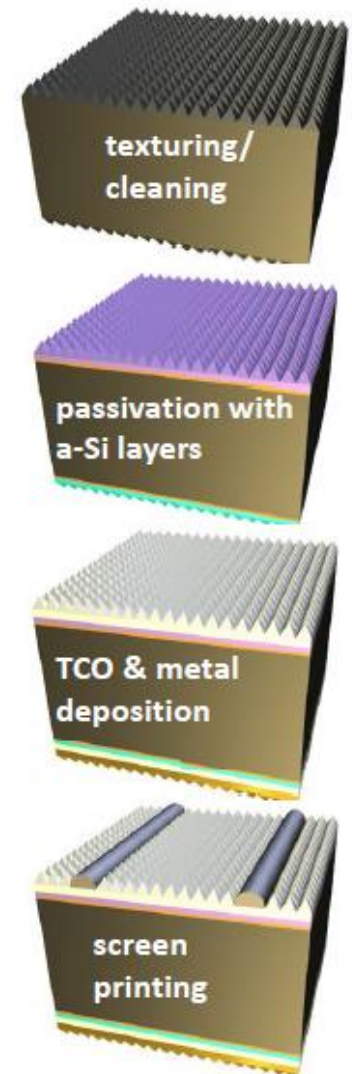
Back ITO / Ag DC sputtering

Edge isolation

Screen-printing front contact

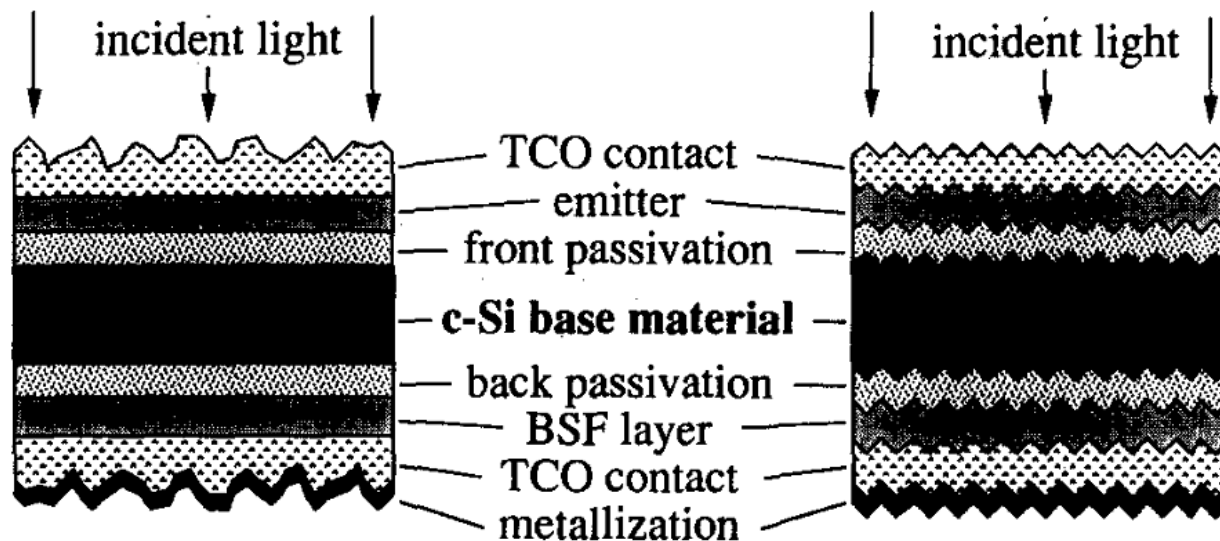
Low temperature annealing

**8 étapes (<200° C)**



# Premiers développements (1993-1994)

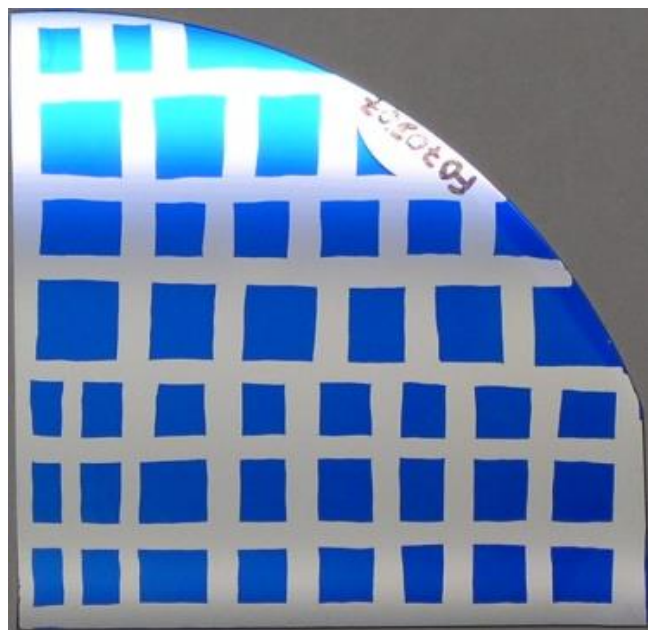
- BAP (Both Sides Amorphous Passivated) cell



- Efficacité de 11.6% et tension  $V_{oc}$  de 635 mV sur wafer type <p>

*H. Keppner et al., SOLMAT 34 (1994) 201*

# Premiers dispositifs à haute efficacité (2006-2007)



- 0.5 x 0.5cm<sup>2</sup>
- Sur wafer plat
- Pas de grille de contact

Wafer Type	$V_{oc}$ (mV)	FF	Eff (%)
n phosphorus 1 $\Omega$ cm	713	74.1	16.9
n phosphorus 1 $\Omega$ cm	682	82.1	19.1
p boron 0.5 $\Omega$ cm	690	73.7	16.5

*L. Fesquet, S. Olibet, Proc 22<sup>nd</sup> EUPVSC, 2007*

# Collaboration EPFL / R&R

**ROTH  
&RAU**

**EPFL/IMT**

(EPFL, Neuchatel  
Switzerland)

**RRS**

(Subsidiary of  
R&R in Neuchatel)

**R&R**

(Roth & Rau AG,  
Germany)

Recherche de base  
Coopération avec  
EPFL/IMT en place  
dès 2008

Transfert sur des  
équipements de R&D  
industriels

Equipe de recherche  
de R&R à Neuchatel,  
dès 2009

Equipments dans les  
labos de l'IMT/PV-  
LAB

Transfert pour la  
production de masse

Equipe de développement  
d'équipements de  
production

Ligne pilote

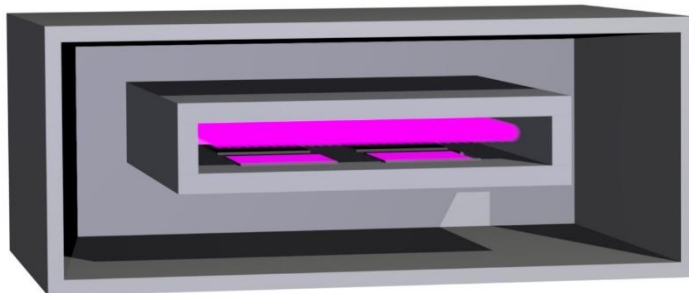


# Outils de R&D de RRS



**Etape humide :** Préparation des wafers, texturation

**Dépôt par plasma PECVD :** Réacteur S-cube breveté par R&R pour le dépôt des couches  $\alpha$ -Si:H layers





# Outils de R&D de RRS



**Outils de dépôt par pulvérisation PVD** : Système en ligne spécialement développé par R&R pour le dépôt de TCOs

**Sérigraphie (Essemsolar)** :  
Dépôt de la grille métallique



# Outils de production à Hohenstein-Ernstthal (DE)

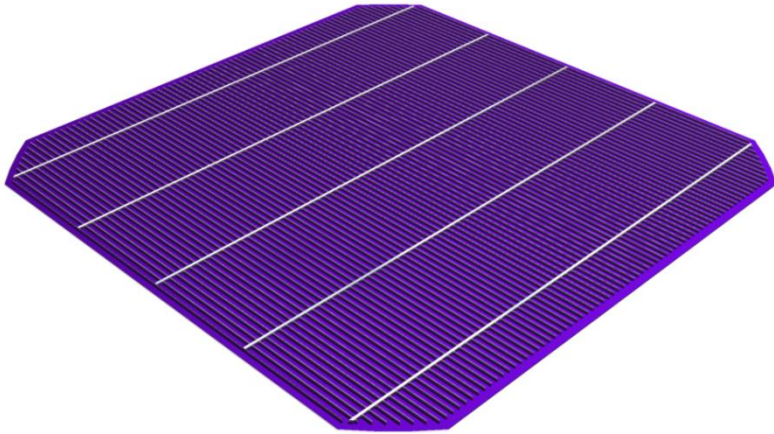
**ROTH  
&RAU**

Développement  
de système de  
production PE-  
CVD à haut débit

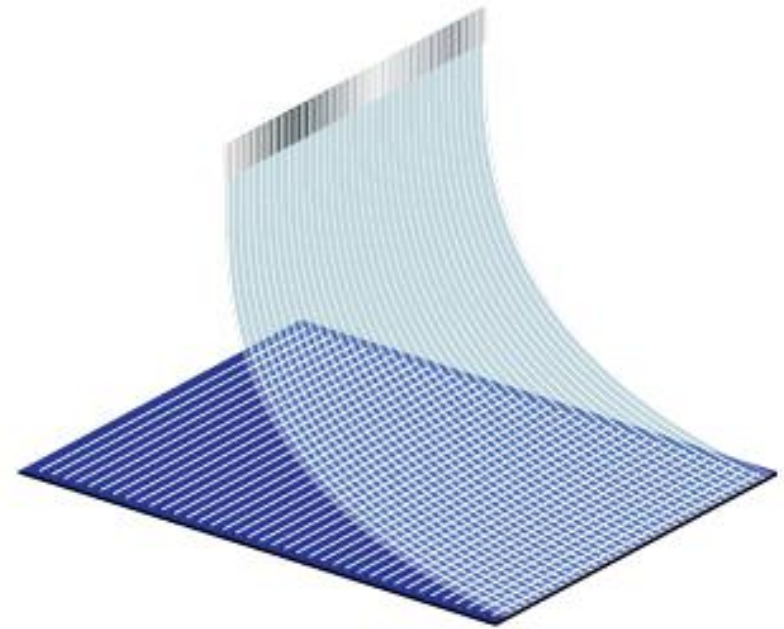


- Défis: Uniformité (effet de bord, épaisseur et nature de couche), contamination, productivité
- Capacité : 56 wafers (156x156 mm<sup>2</sup>) par charge

# Contacts optimisés et technologie module



**Multi (Narrow) Bus Bar Solution**



**DAY 4 Energy Electrode**

- Minimisation des pertes d'efficacité lors du passage d'une petite cellule au module.
- Réduction des pertes optiques et réduction de l'utilisation d'Ag

# Etat-de-l'art chez R&R

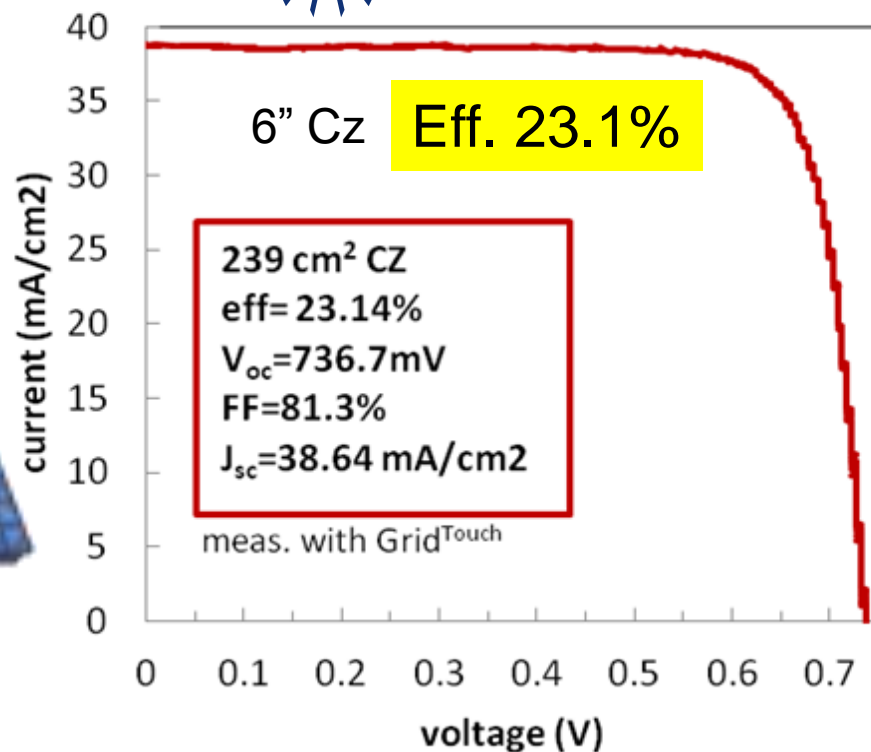
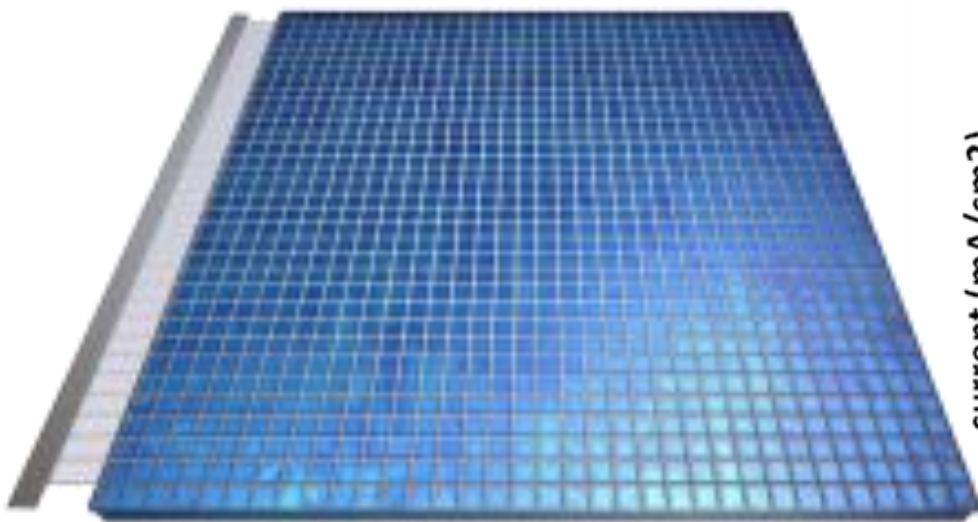


MEYER BURGER



ROTH & RAU

CELL & COATING SYSTEMS



WO5392-24

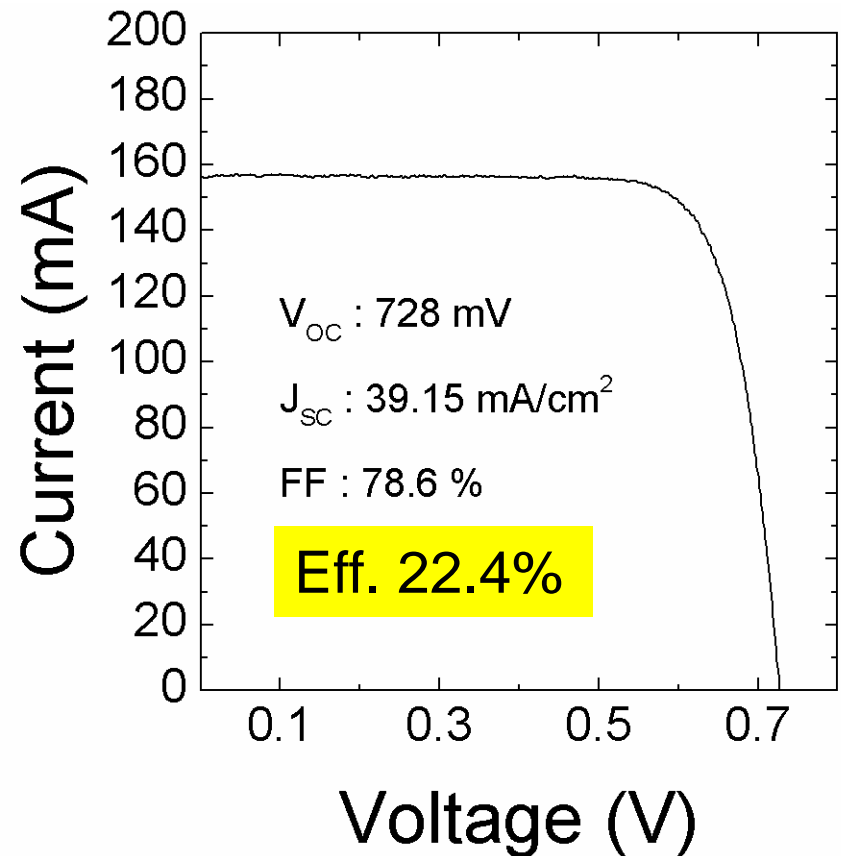
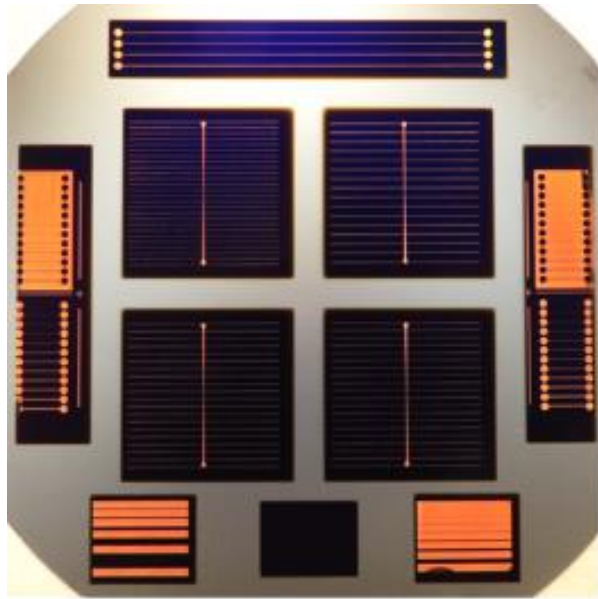
- Esthétique
- Usage d'Ag minimal (< 40 mg/cellule)
- Potentiel pour des modules de 20% à 80 €/m<sup>2</sup>...
- Premiers outils de production vendus par Meyer Burger/Roth and Rau

*De Roth & Rau Research, fourni par Dr. B. Strahm*

# Etat-de-l'art au PV-LAB

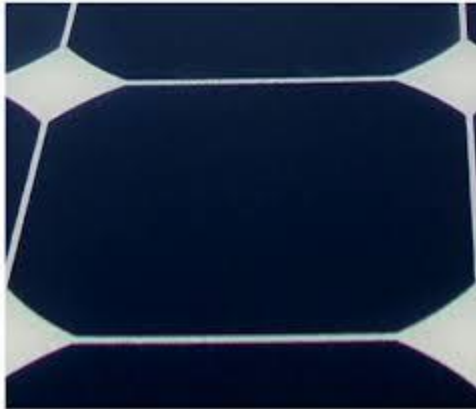
## Record EPFL PV-Lab

- Surface : 4 cm<sup>2</sup>
- TCO frontal en IO:H-ITO + AR
- Contacts plaqués en Cu (sans Ag)

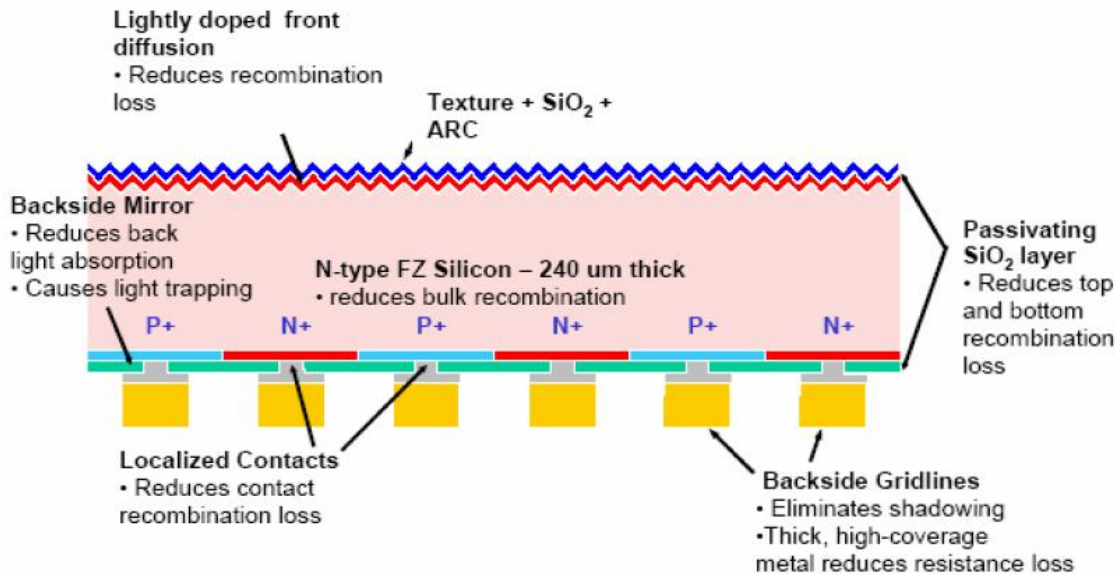


*J. Geissbuehler et al. IEEE JPV 4, 1055 (2014)*

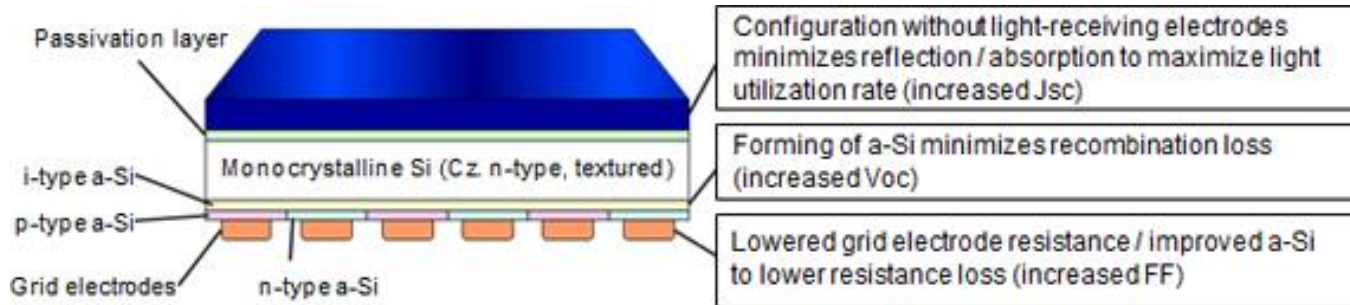
# Cellules c-Si à haute efficacité



- Cellules Sunpower avec contacts arrières
  - Efficacité de 24.2%
  - Equipe l'avion Solar Impulse

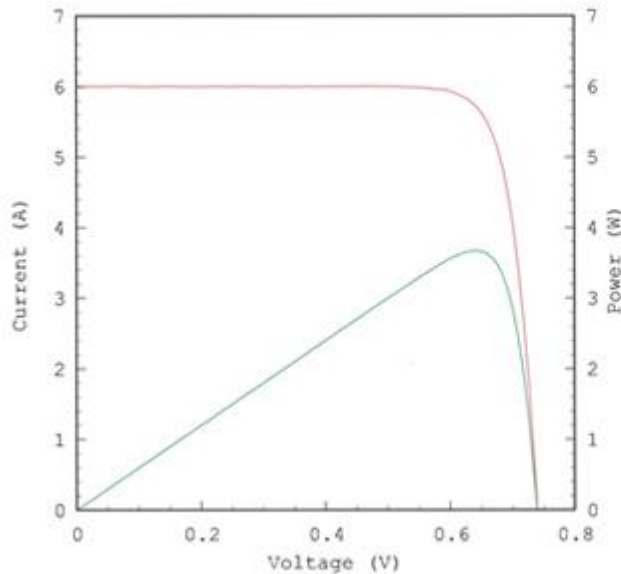


# Efficacité record pour les cellules c-Si



I-V CURVE

IEC60904-3Ed.2 143.7cm<sup>2</sup> (designated area) WXS-220S-20



Date : 14 Feb 2014  
 Data No : V11287-02  
 Sample No : V11287  
 Repeat Times : 9

Isc 6.01 A  
 Voc 0.740 V  
 Pmax 3.674 W  
 Ipmx 5.72 A  
 Vpmx 0.643 V  
 F.F. 82.7 %  
 Eff (da) 25.57 %  
 DTemp. 25.0 °C  
 MTemp. 25.0 °C  
 DIrr. 100.0 mW/cm<sup>2</sup>  
 MIrr. 100.1 mW/cm<sup>2</sup>

Ref. Device No 036-2002  
 Cal. Val. of Ref. 125.83 [mA at 100mW/cm<sup>2</sup>]  
 Scan Mode Isc to Voc



# Panasonic®

- HJT-IBC
  - Hétérojonction (HJT)
  - Contacts arrières Interdigitées (IBC)

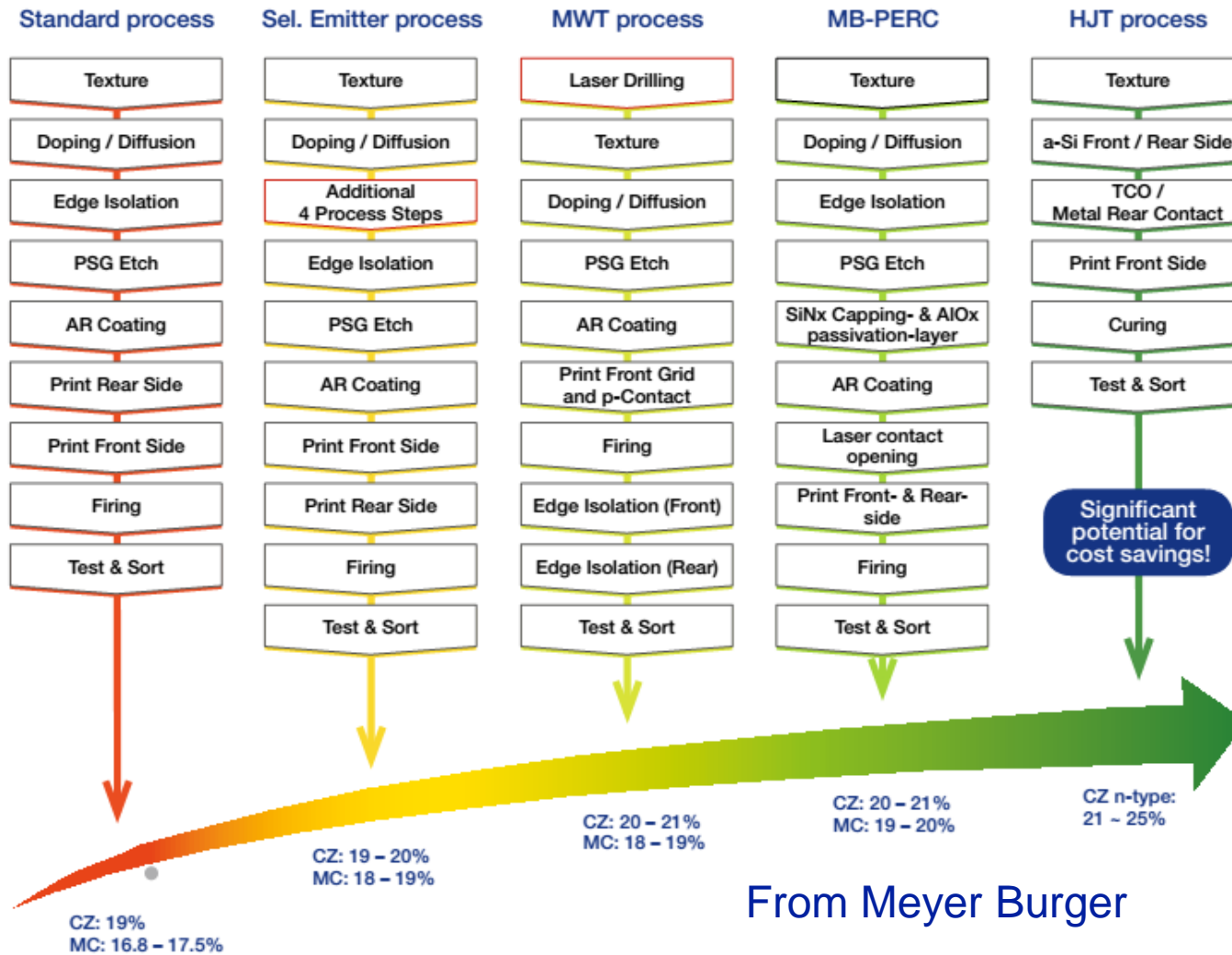
• Efficacité de 25.6%

# Merci de votre attention





# Etapes de fabrication pour les filières c-Si



From Meyer Burger