

Conversion Photovoltaïque

Sylvain Le Gall

Maitre de Conférences – Univ. Paris-Saclay

Laboratoire GeePs (UMR-CNRS, Paris-Saclay, Centralesupelec, Sorbonne Univ)

Courriel: sylvain.le-gall@u-psud.fr

EcoClim 2023

14 Juin 2023 IJC Lab

**université
PARIS-SACLAY**

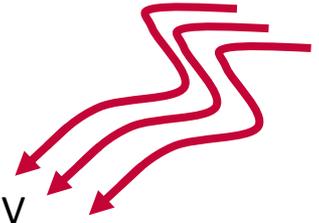
**FACULTÉ
DES SCIENCES
D'ORSAY**



Intro PV : Principe de base

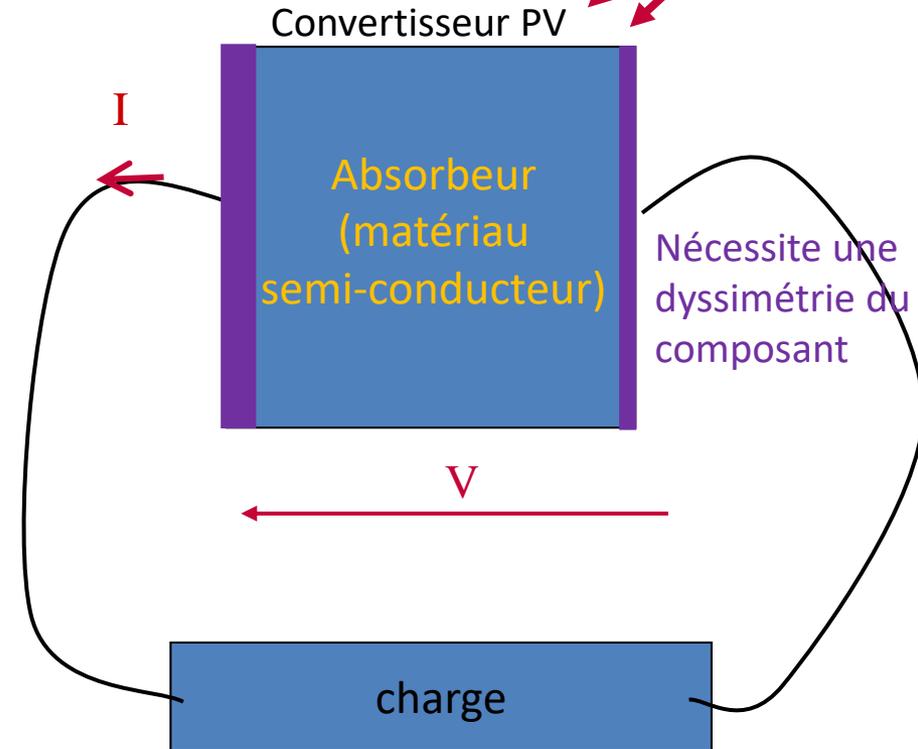
Conversion **énergie lumineuse** en **énergie électrique**

Puissance lumineuse P_{lum}



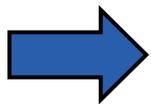
Caractéristique du « convertisseur » pour avoir un effet PV :

1. Absorbante aux longueurs émises par le soleil (visible)
→ matériaux semi-conducteurs
2. Avoir une asymétrie spatiale/électrique pour le transport de charge.
→ jonction PN et/ou contacts sélectifs
3. Optimiser pour limiter pertes (optique et électrique) lors de l'absorption des photons et collecte des charges.
→ choix matériaux, épaisseurs couches, contacts...



Puissance électrique : $P_e = I \times V$

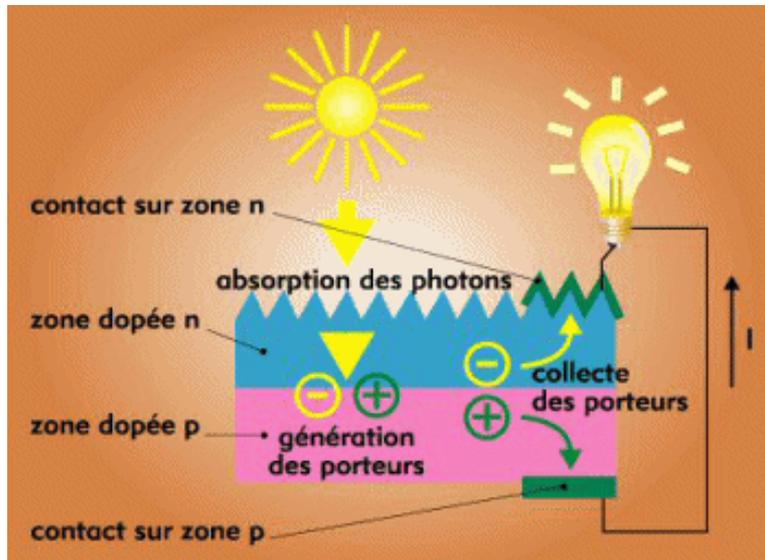
Rendement de conversion d'énergie : $\eta = P_e / P_{lum}$



Design de la cellule PV

Intro PV : Principe de base

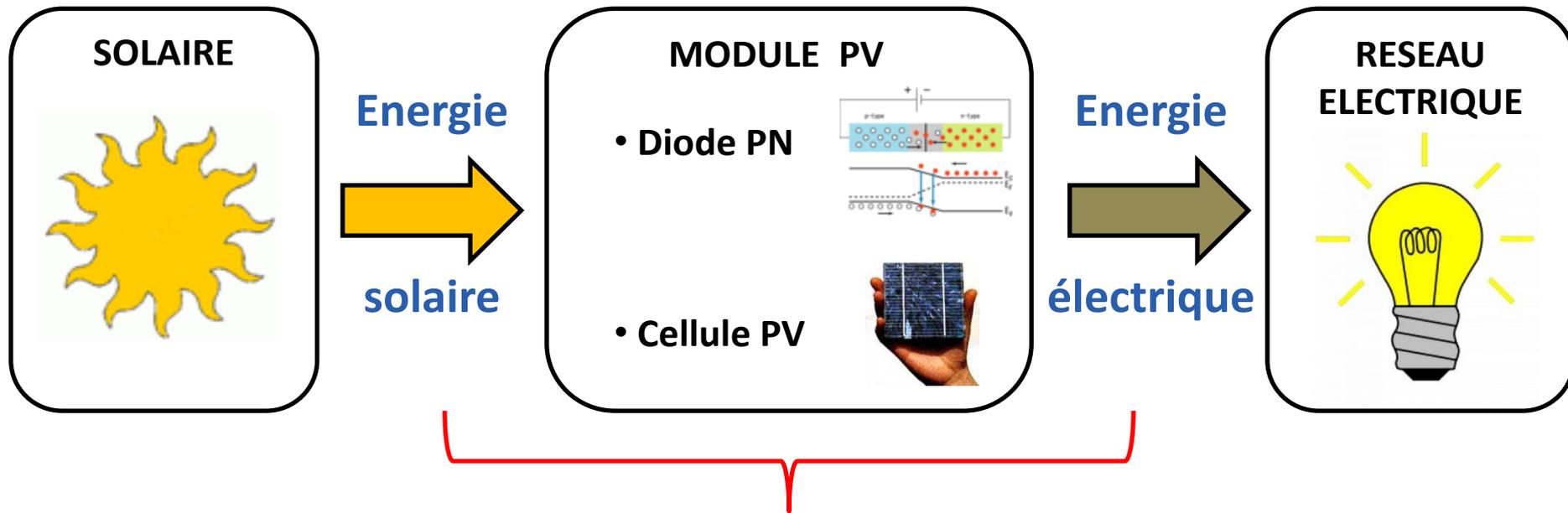
Conversion **énergie lumineuse** en **énergie électrique**



Etapes pour avoir une conversion PV :

1. Absorption des photons du visible émis par le soleil
2. Génération des porteurs de charge
3. Séparations de charges
4. Collections des charges

Vue globale de la conversion photovoltaïque



Cellule solaire :

Fonctionnement de la cellule solaire (Physique)

Technologies utilisées (Matériaux)

Plan

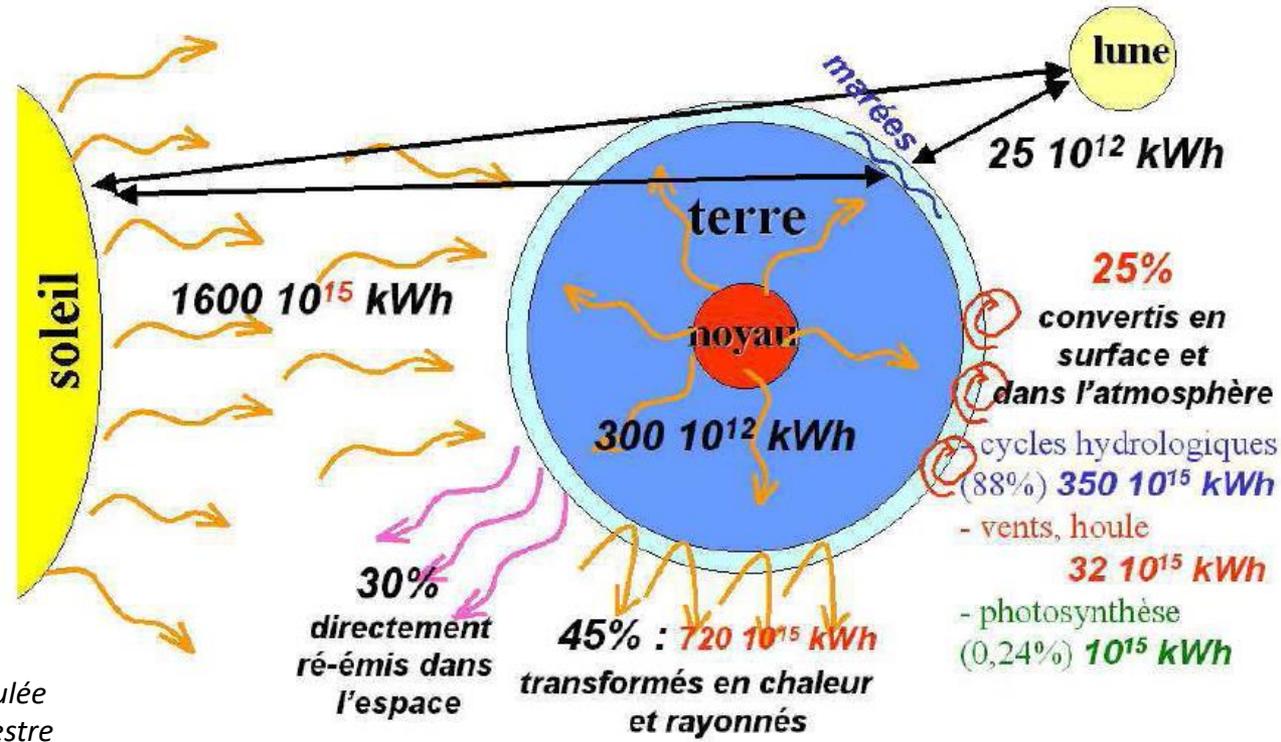
I. Energie Solaire

II. Physique des semi-conducteurs

III. Fonctionnement de la cellule solaire

IV. Les technologies PV

L'énergie solaire



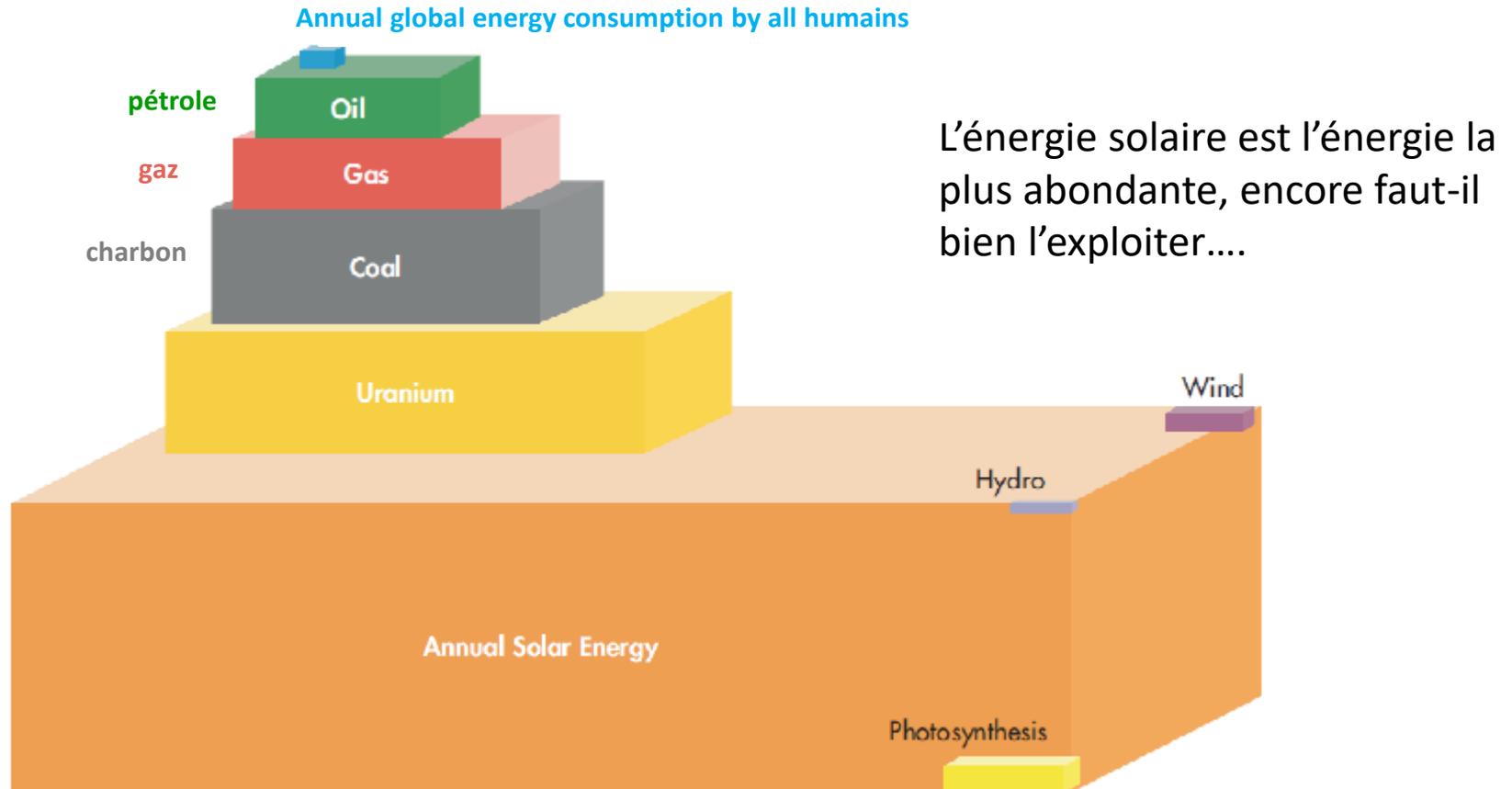
Energie en kWh calculée pour une année terrestre

En 1 an sur Terre, on reçoit une **énergie phénoménale provenant du soleil**. Cette énergie solaire est produite dans son cœur par réaction thermonucléaire (fusion nucléaire) qui transforme l'hydrogène en hélium.

Sur Terre, cette énergie est :

- 30% réfléchi directement dans l'espace
- 45% transformée en chaleur et rayonnée
- 25% convertie en surface et dans l'atmosphère (vent, houle....)

Energie Solaire : une énergie abondante ?



Source: National Petroleum Council, 2007 after Craig, Cunningham and Saigo.

Spectre électromagnétique, photon et longueur d'onde

Le rayonnement solaire, c'est de l'énergie :

$$1 \text{ eV} \rightarrow 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (q \text{ charge électronique})$$

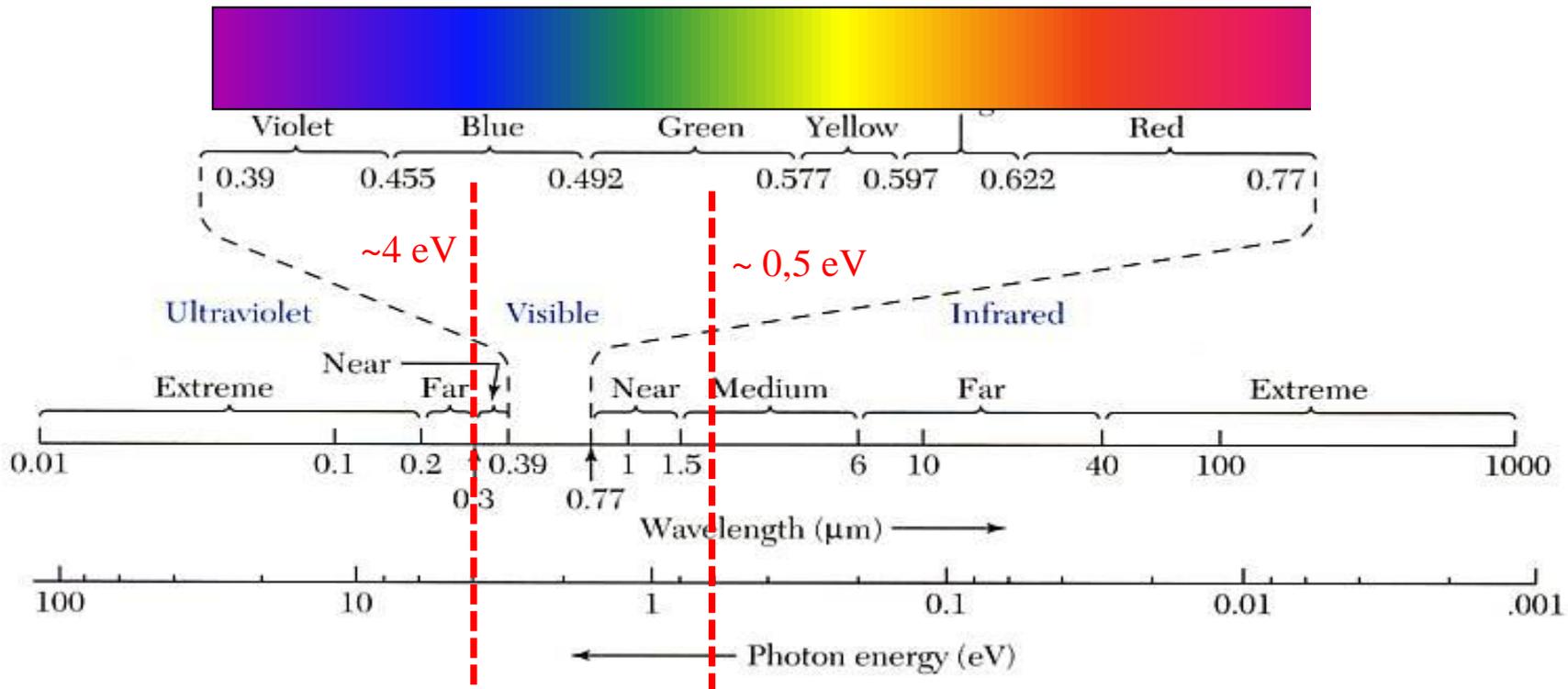
$$E \text{ (eV)} = 1,24 / \lambda \text{ (\mu m)}$$

Pour lumière visible étendue (proche IR & UV):
 $0,5 \text{ eV} < E < 4 \text{ eV}$

Fréquence de l'onde (en Hz ou s⁻¹) Vitesse de la lumière 3.10⁸ m/s

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

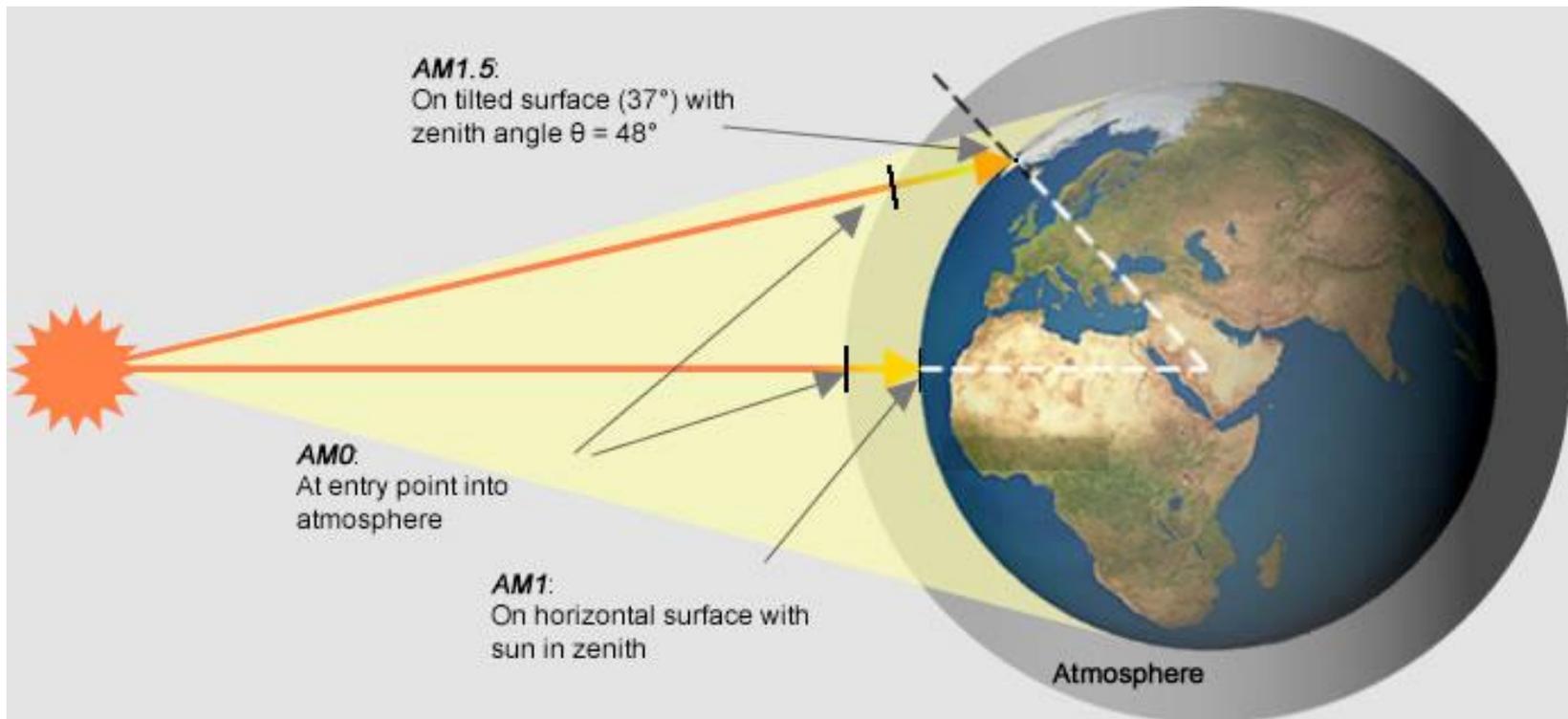
Cte de Planck : 6,62 × 10⁻³⁴ J s Longueur d'onde (en m)



Les grandeurs liées à l'illumination solaire

Par définition:

- AM0 = rayonnement solaire direct au-dessus de l'atmosphère (extraterrestre)
Trajet optique nul
- AM1 : soleil au zénith au niveau de la mer (régions tropicales et équatoriales)
- AM1.5 : élévation de $41,81^\circ$ (angle zénithal de $48,19^\circ$) (régions tempérées)



Les grandeurs liées à l'illumination solaire

Par définition:

- AM0 = rayonnement solaire direct au-dessus de l'atmosphère (extraterrestre)
Trajet optique nul
- AM1 : soleil au zénith au niveau de la mer (régions tropicales et équatoriales)
- AM1.5 : élévation de $41,81^\circ$ (angle zénithal de $48,19^\circ$) (régions tempérées)

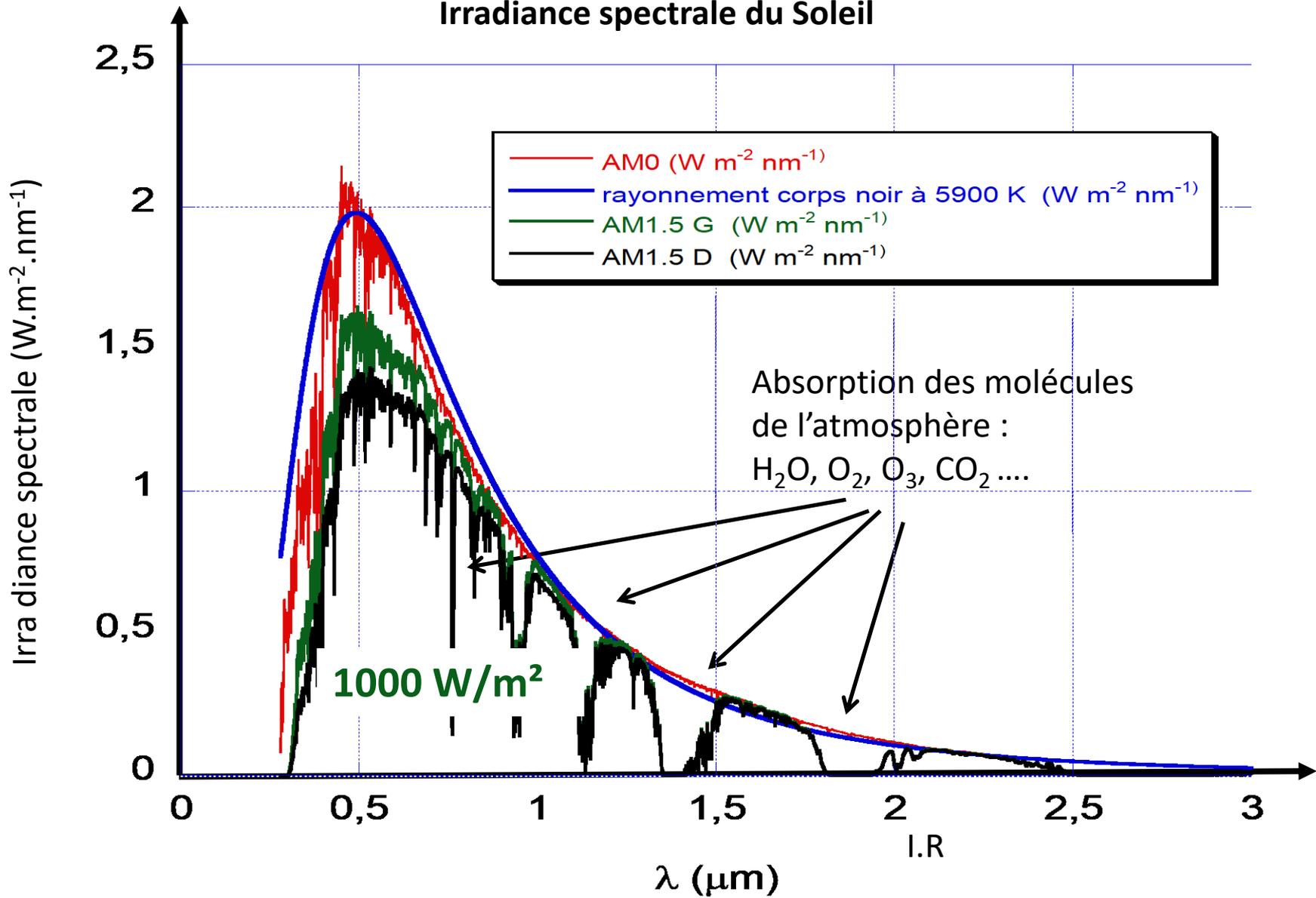
Les standards de rayonnement sont définis par :

- AM0 = 1367 W/m^2 (à la distance de 1 Unité Astronomique)
- AM1 = 1000 W/m^2
- AM1.5D (rayonnement direct) = $768,3 \text{ W/m}^2$
- AM1.5G (rayonnement global = direct + diffus + albédo) pour une surface inclinée à 37° face au sud, sous une élévation de $41,81^\circ$, un albédo de 0,3, une turbidité de 0,29 et une température de 25°C .

➔ **AM1.5G = 1000 W/m^2** pour CIE (Comité International d'éclairage)

Standard de rayonnement utilisée pour calculer le rendement des cellules PV

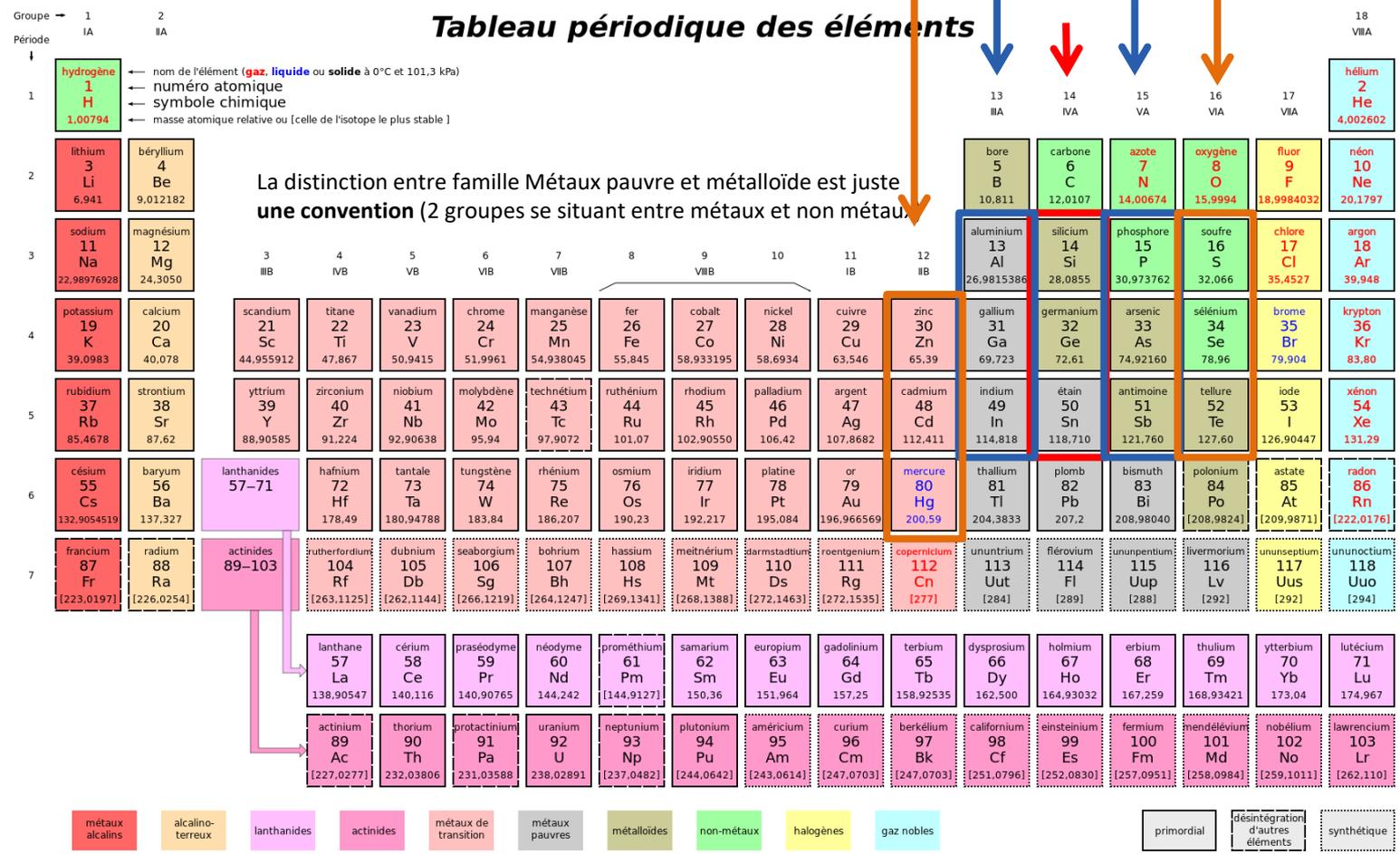
Irradiance spectrale du Soleil



97% du spectre du rayonnement solaire est compris entre 300 nm et 3 μm

II - Physique des semi-conducteurs

Éléments « semi-conducteur »



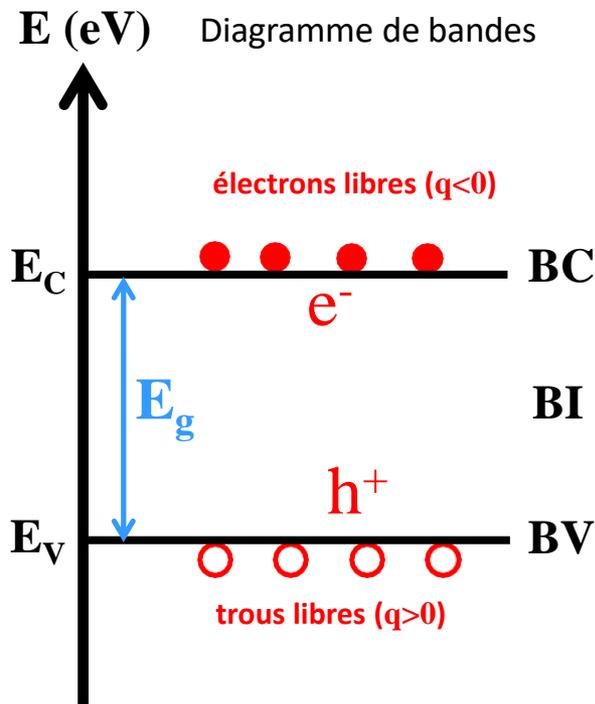
Les éléments **semi-conducteurs** sont : (semi-conducteur fait référence à une classe de matériaux, métalloïde et métaux pauvre sont des classes d'élément du tableau)

- Corps simples : **Élément colonne IV : Si, Ge, Sn**
- Composés binaires : **III-V : GaAs, InP, InSb...** et **II-VI : ZnS, CdTe...**
- Composés ternaires, quaternaires : $Al_xGa_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$

Diagramme de bandes d'un semi-conducteur

Niveaux d'énergies accessibles pour les électrons dans un semi-conducteur :

Possède une **bande interdite (BI=gap)** entre la bande de valence (BV) et bande de conduction (BC)



Dans la BC : présence de porteurs libres de type électron e^- qui peuvent se mouvoir

→ **Courant d'électron** = contribution des e^- de la BC

Dans le Gap : pas d'états disponibles et donc pas de porteur libre (sauf si présence de défauts)

Dans la BV : présence de porteurs libres de type trou h^+ qui peuvent se mouvoir

→ **Courant de trou** = contribution des e^- de la BV

courant total = courant e^- + courant h^+

Trou : particule fictive représentant la contribution au courant d'une bande pleine à laquelle on a retiré 1 électron.

Dopage dans les semi-conducteurs

Semi-conducteur intrinsèque possède autant d'électron que de trou :
(intrinsèque car sans défauts ponctuels)

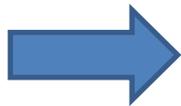
$$n = p = n_i \quad \text{ou } n_i \text{ est la concentration de porteurs intrinsèques}$$

n → concentration d'électron
p → concentration de trou
(unité : porteurs/m³)

On a aussi : $n \times p = n_i^2$ Loi action-masse

Exemple pour Si à T=300K, $n_i \approx 1.10^{10}$ électrons/cm³

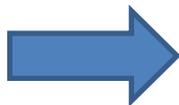
Ce nombre de porteurs intrinsèques est très faible par rapport au nb d'électrons dans un métal
(de l'ordre de $n \approx 1.10^{23}$ électrons/cm³).



Un semi-conducteur intrinsèque
conduit très peu le courant

Les semi-conducteurs intrinsèques ne sont donc pas très intéressants pour les applications
électroniques, optroniques ... (Il faut au moins $n \approx 1.10^{15}$ électrons/cm³)

Donc nécessité d'introduire des porteurs de façon intentionnelle et de manière contrôlé :



Technique du dopage



Dopage dans les semi-conducteurs

Dopage : Technique qui consiste à introduire volontairement des impuretés de manière contrôlée dans un semi-conducteur (purifié)

Il existe deux types de dopage :

$h^+ \rightarrow$ majoritaire
 $e^- \rightarrow$ minoritaire

type P

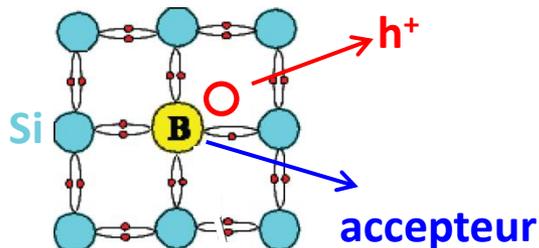
Nb de trou p augmente



introduction d'atomes de **type accepteur** en substitution d'atomes du réseau de départ de **valence inférieure** à celle des atomes du réseau



Introduction de **N_a atomes** supplémentaires
(taux de dopage accepteur)



$e^- \rightarrow$ majoritaire
 $h^+ \rightarrow$ minoritaire

type N

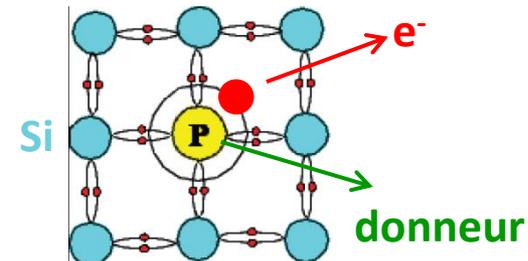
Nb d'électron n augmente



introduction d'atomes de **type donneur** en substitution d'atomes du réseau de départ de **valence supérieure** à celle des atomes du réseau



Introduction de **N_d atomes** supplémentaires
(taux de dopage donneur)



Génération de paires électron-trou

• Lors de la transition d'un électron de la BV vers la BC :

→ Création d'une paire **électron-trou**

Cette transition s'effectue grâce à **l'apport d'énergie**, par exemple à l'aide **d'un photon** d'énergie $h\nu$.

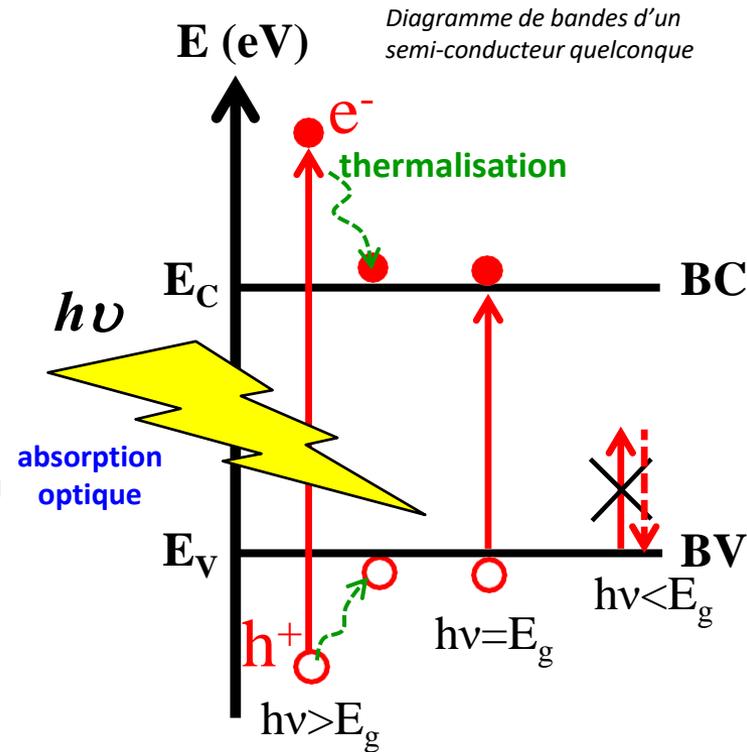
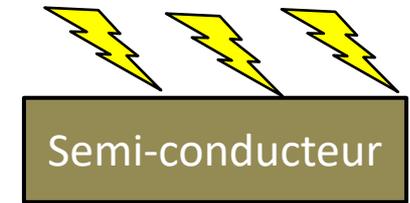
- Si $h\nu < E_g$: l'énergie fournie au système n'est pas suffisante pour avoir promotion d'un électron vers la BC.

→ **Pas d'absorption** dans le semi-conducteur (transparent)

- Si $h\nu > E_g$: l'énergie fournie au système est suffisante pour avoir promotion d'un électron vers la BC et création d'une paire électron-trou

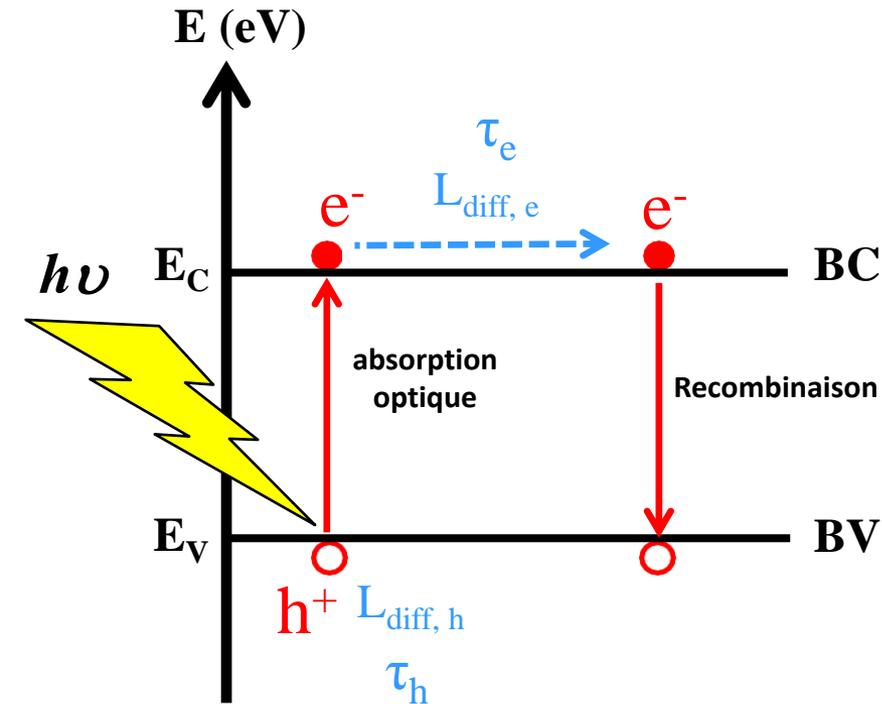
→ **Absorption optique**

Lumière → électron + trou



Si semi-conducteur **possède un gap direct** (GaAs, III-V en général) **l'absorption optique sera plus efficace** que ceux possédant un gap indirect (Silicium, Germanium par exemple)

La Génération – Recombinaison



Un porteur photogénéré aura une certaine durée de vie τ ainsi qu'une longueur de diffusion L_{diff} avant de se recombinaison

$$L_{\text{diff}, e} = (D_e \times \tau_e)^{1/2}$$

$$L_{\text{diff}, h} = (D_h \times \tau_h)^{1/2}$$

L_{diff} : et τ ne sont pas des paramètres intrinsèques au matériau (dépendent de la qualité de celui-ci)

Les différents mécanismes de recombinaison :

Les 4 mécanismes ci-dessous sont présents (chacun avec une durée de vie spécifique τ) dans tous les matériaux mais certains sont dominant selon la spécificité du matériau (dopage, gap, qualité etc...)

- 1) Recombinaison directe (radiative)
- 2) Recombinaison indirecte SRH (non rad)
- 3) Recombinaison Auger (directe non rad)
- 4) Recombinaison surface

vont **limiter l'efficacité de la collection des e^- et h^+** et donc limité l'efficacité des cellules solaires

Problématique de la séparation de charges pour conversion PV

Etapas pour avoir une conversion PV :

1. **Absorption des photons du visible émis par le soleil**
2. **Génération des porteurs de charge**
3. **Séparations de charges**



un matériau semi-conducteur
(type i, n ou p) peut le faire

Problématique de la séparation de charges pour conversion PV

Etapas pour avoir une conversion PV :

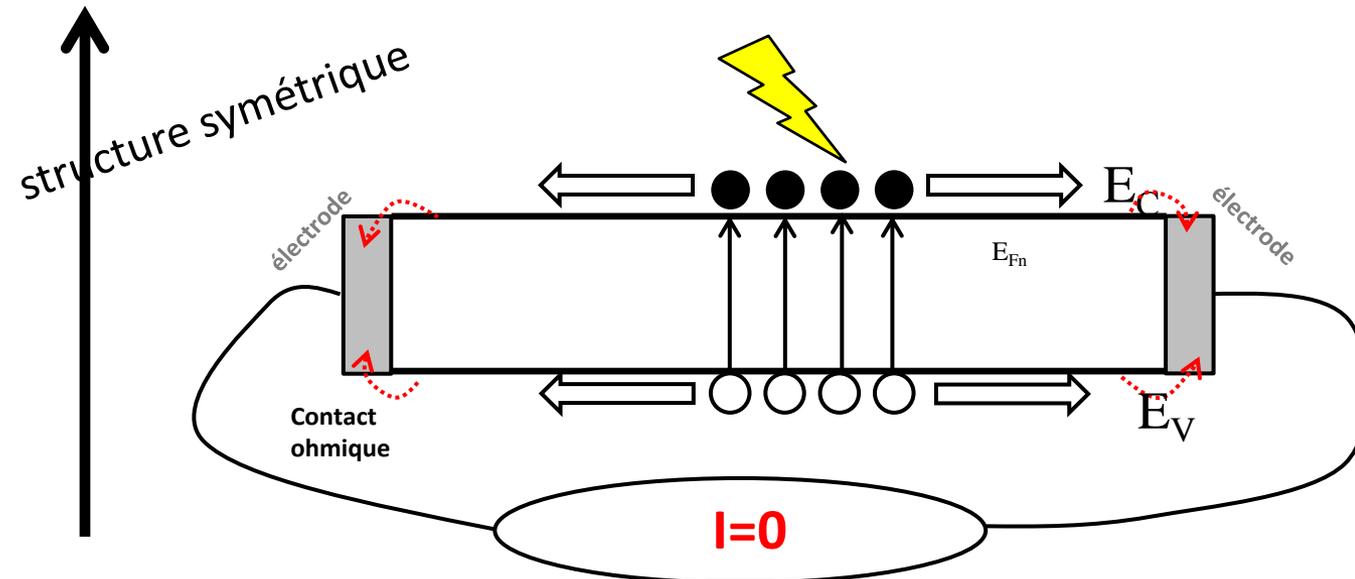
1. Absorption des photons du visible émis par le soleil
2. Génération des porteurs de charge
3. Séparations de charges

} un matériau semi-conducteur (type i, n ou p) peut le faire

- Si utilisation d'un seul semi-conducteur (type p ou n ou i) : pas de séparation de charges, les e^- et h^+ peuvent aller vers les 2 électrodes

→ **courant nul ($I=0$) à 0V et pas d'effet PV**

E (eV)

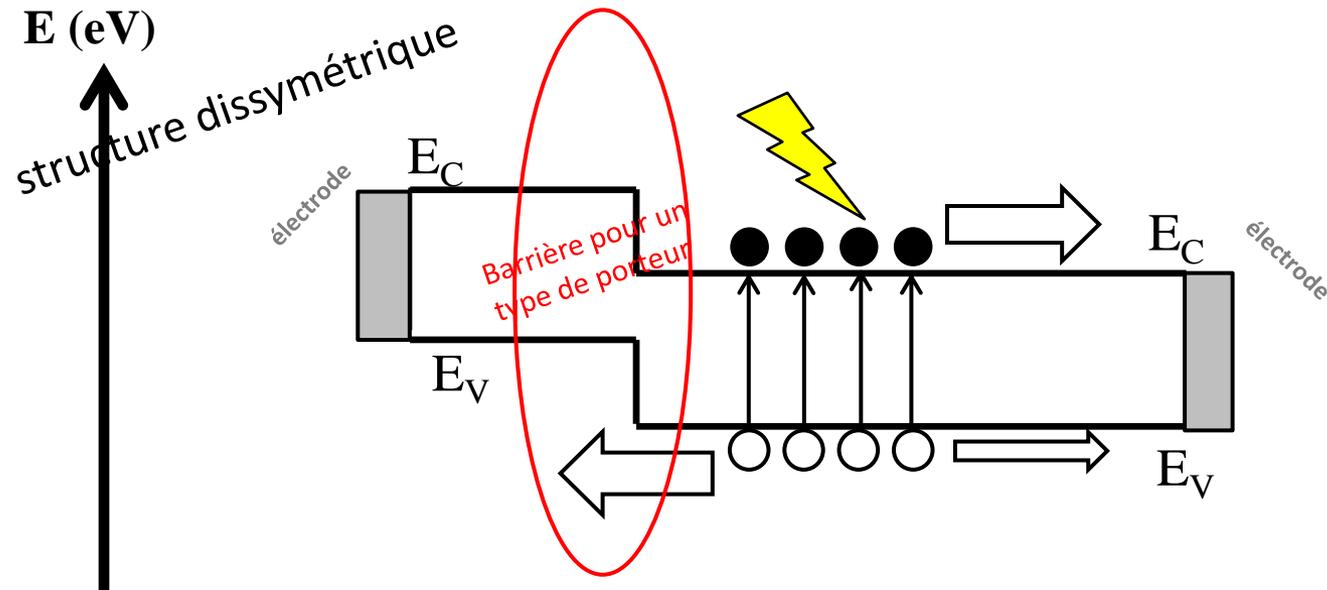


Problématique de la séparation de charges pour conversion PV

Etapas pour avoir une conversion PV :

1. Absorption des photons du visible émis par le soleil
2. Génération des porteurs de charge
3. Séparations de charges

} un matériau semi-conducteur
(type i, n ou p) peut le faire



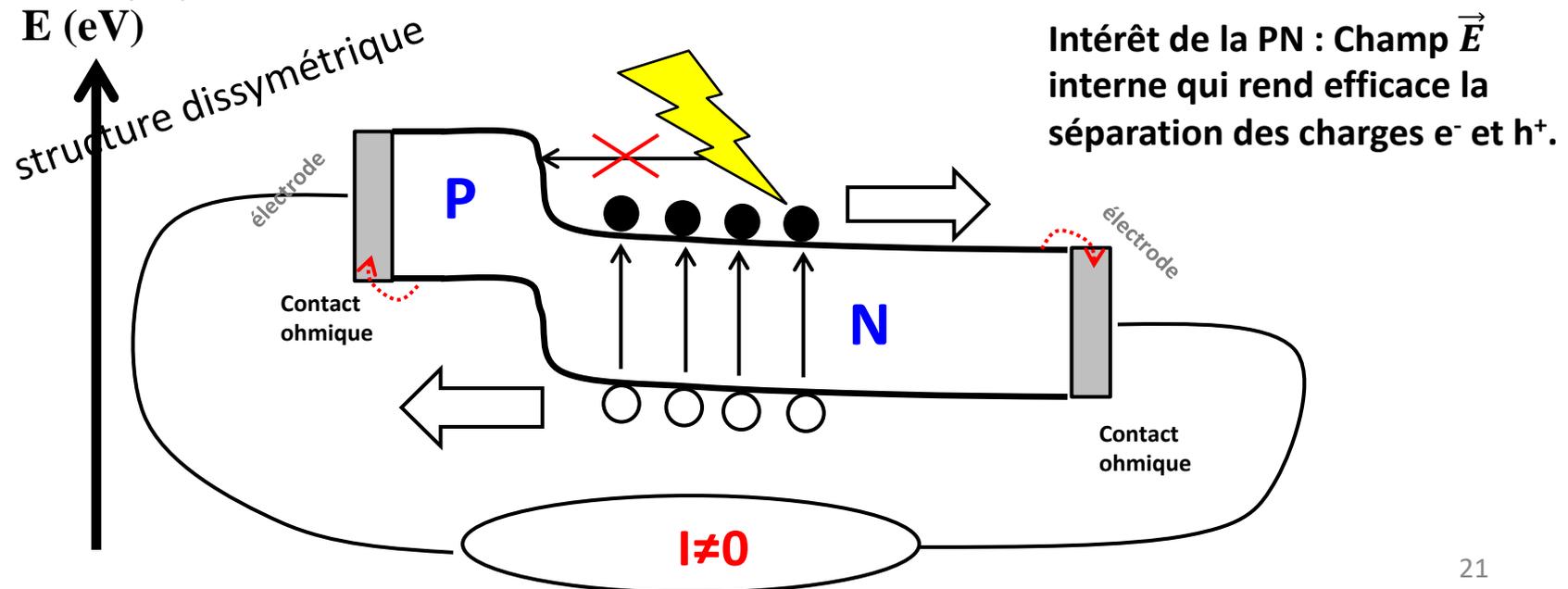
Problématique de la séparation de charges pour conversion PV

Etapas pour avoir une conversion PV :

1. Absorption des photons du visible émis par le soleil
2. Génération des porteurs de charge
3. Séparations de charges

un matériau semi-conducteur
(type i, n ou p) peut le faire

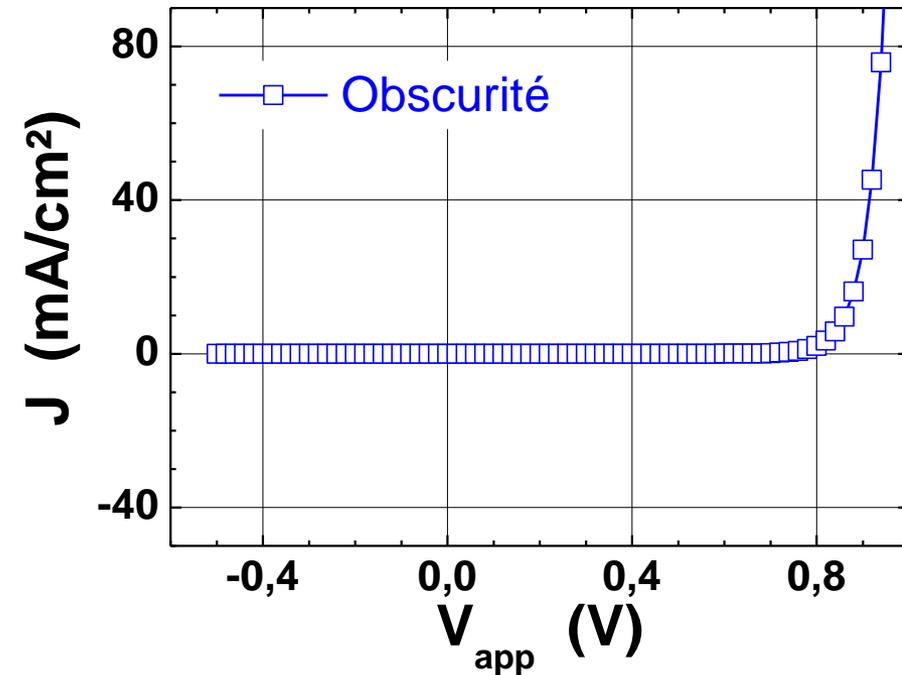
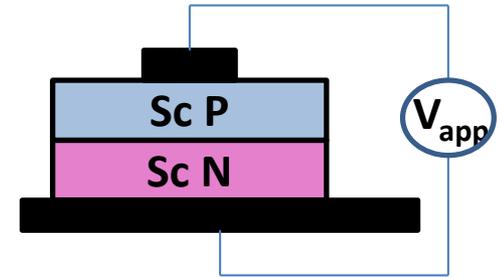
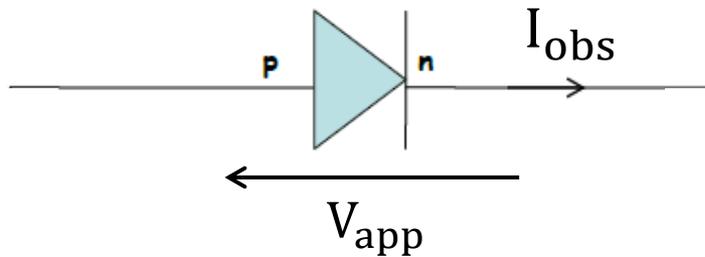
- Si utilisation d'une jonction avec **2 semi-conducteurs P et N** : présence d'un champ électrique interne à 0V (ou barrière de potentiel) qui rend efficace la séparation des e^- et h^+ qui vont aller vers électrodes opposées
- **courant non nul ($I \neq 0$) à 0V et effet PV**



Caractéristique Courant-Tension sous illumination

❖ Représentation électrique d'une **jonction PN idéale** :

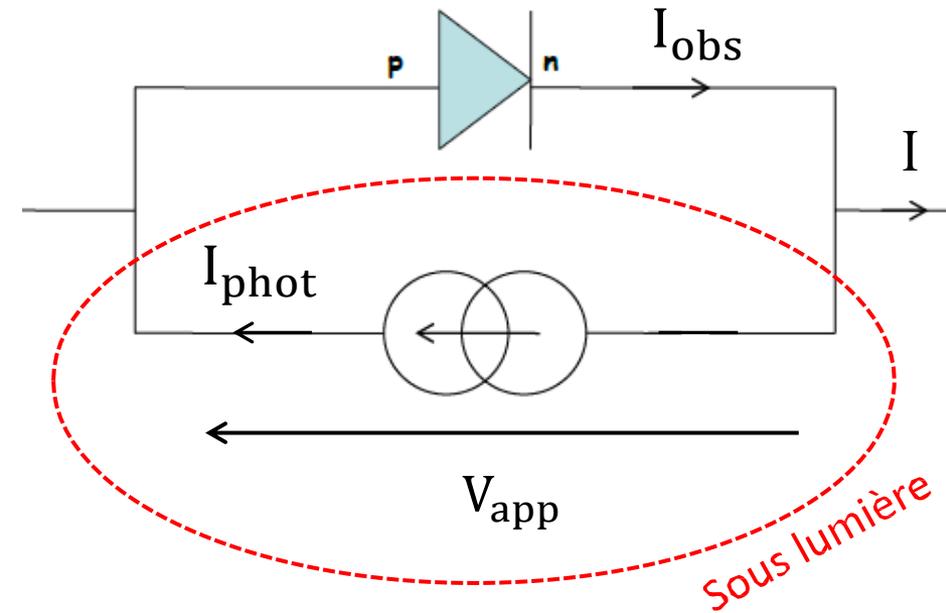
$$I_{\text{obs}} = I_{\text{sat}} \times \left\{ \exp \left[\frac{qV_{\text{app}}}{kT} \right] - 1 \right\}$$



Caractéristique Courant-Tension sous illumination

❖ Représentation électrique d'une jonction PN **idéale** :

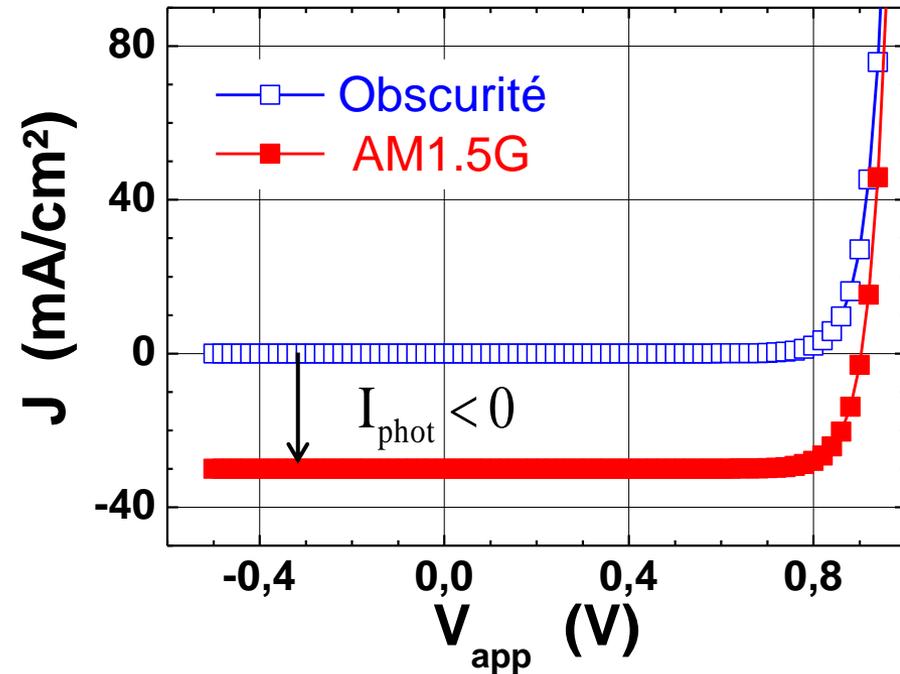
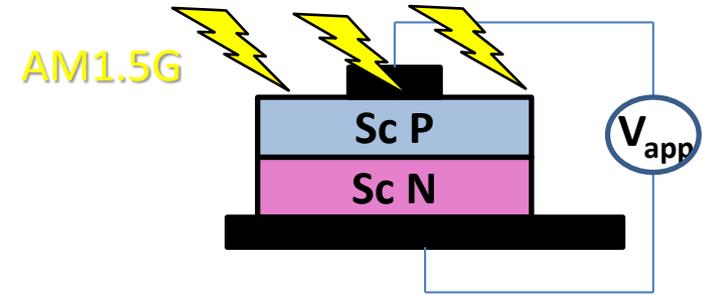
$$I_{\text{obs}} = I_{\text{sat}} \times \left\{ \exp \left[\frac{qV_{\text{app}}}{kT} \right] - 1 \right\}$$



$$I = I_{\text{obs}} + I_{\text{phot}}$$

>0
 <0

$$I = I_{\text{sat}} \times \left\{ \exp \left[\frac{qV_{\text{app}}}{kT} \right] - 1 \right\} - I_{\text{phot}}$$



Caractéristique Courant-Tension sous illumination

❖ Paramètres importants pour mesurer le rendement d'une cellule :

$$J_{sc} = J(V_{app} = 0) \quad V_{oc} \mapsto J(V_{oc}) = 0$$

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} = \frac{(V_{mpp} \times J_{mpp})}{J_{sc} \times V_{oc}}$$

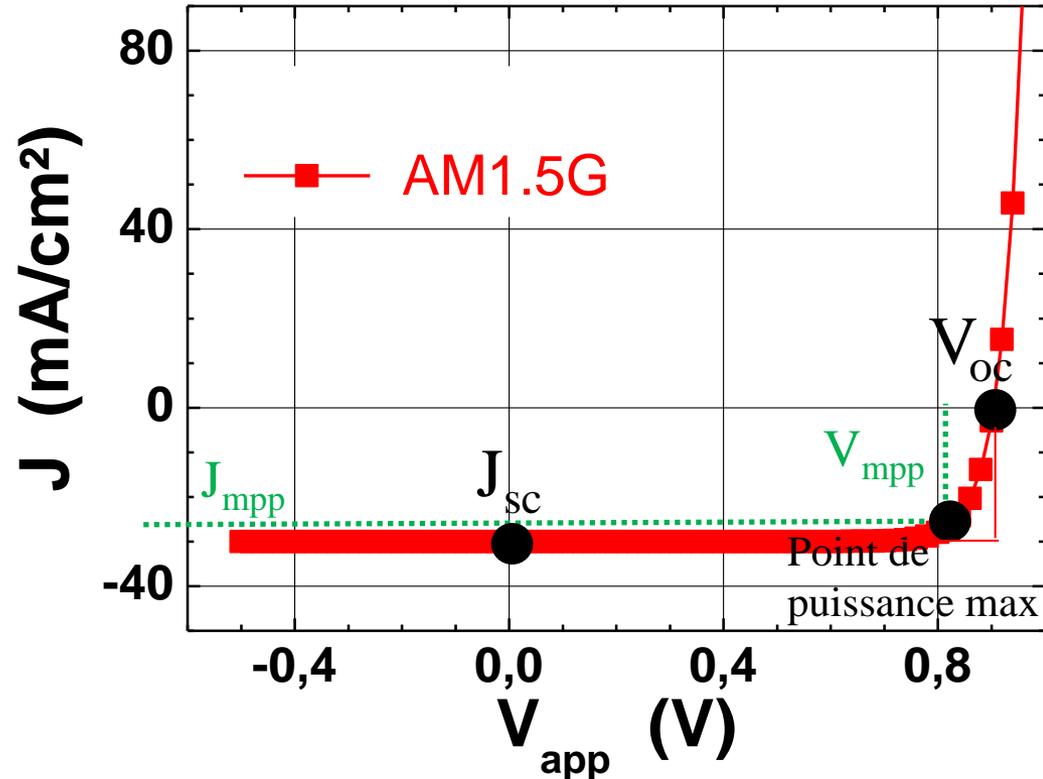
mpp : maximal power point

P_{max} idéal pour $J_{sc} \times V_{oc} \rightarrow FF=1$

Le rendement η est défini pour une illumination AM1.5G par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{lum}(AM1.5)} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{100 \text{ mW} / \text{cm}^2}$$

AM1.5G : $1000 \text{ W/m}^2 = 100 \text{ mW/cm}^2$

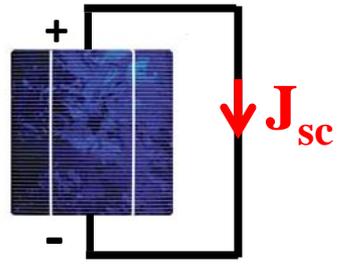
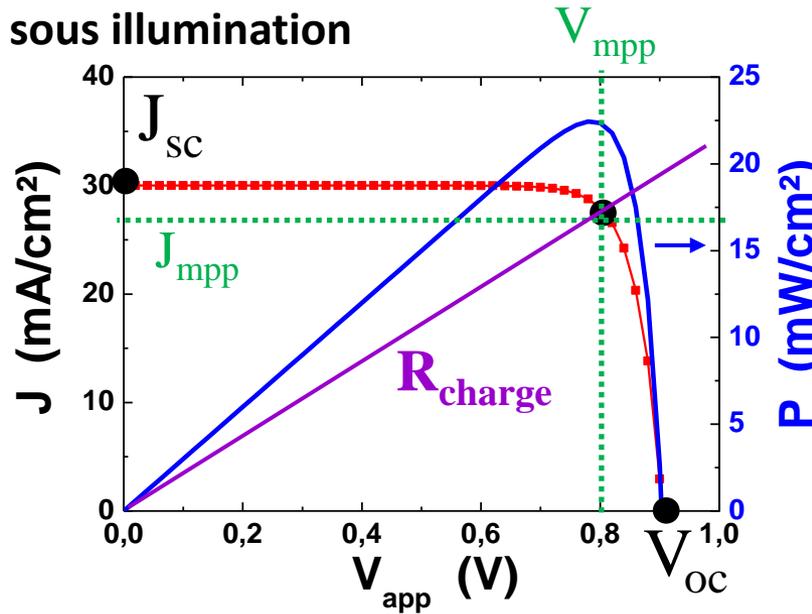


J_{sc} , V_{oc} , FF et η représentent les 4 paramètres électriques clef de la cellule solaire

Caractéristique Courant-Tension sous illumination

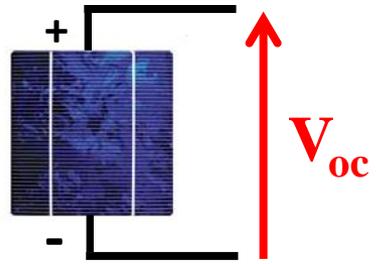
Pour déterminer les 3 paramètres clés ci-dessous, nous avons besoin des caractéristiques J(V) et P(V) illustrées ci-contre :

Convention communauté PV « générateur de puissance »



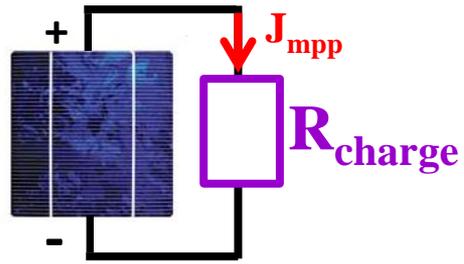
Courant de court-circuit J_{sc} :

Courant traversant la cellule lorsqu'elle est en court-circuit (tension nulle à ces bornes). La puissance fournie $P=V \times J_{sc}$ est nulle.



Tension de circuit ouvert V_{oc} :

Tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle est en circuit ouvert (courant traversant est nul). La puissance fournie $P=V_{oc} \times J$ est nulle.



Point de Puissance max P_{max} : Puissance max de fonctionnement de la cellule solaire quand la charge à une résistance égale à R_{charge} . La puissance fournie vaut $P=V_{mpp} \times J_{mpp}$.

Il est relié au FF par \rightarrow
$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} = \frac{(V_{mpp} \times J_{mpp})}{J_{sc} \times V_{oc}}$$
 mpp : maximal power point

Exemple d'une fiche constructeur d'un module vendu sur le marché





NEW

KuPower

HIGH EFFICIENCY MONO MODULE

CS3K-300|305|310|315MS

With Canadian Solar's industry leading mono-PERC cell technology and the innovative LIC (Low Internal Current) module technology, we are now able to offer our global customers high power mono modules up to 315 W.

The KuPower mono modules with a dimension of 1675 x 992 mm, close to our 60 cell SuperPower modules, have the following unique features:

- Higher power classes for equivalent module sizes
- High module efficiency up to 18.96 %
- LOW hot spot temperature risk
- LOW temperature coefficient (Pmax): -0.37 % / °C
- LOW NMOT (Nominal Module Operating Temperature): 42 ± 2 °C



More power output thanks to low NMOT: 42 ± 2 °C



Low power loss in cell connection



Safer: lower hot spot temperature



Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa*

25

years linear power output warranty

10

years product warranty on materials and workmanship

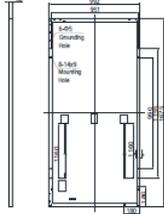
PRODUCT CERTIFICATES**
IEC 61215 / IEC 61730:2005 & 2016:VDE / CE / UL 1703; CSA



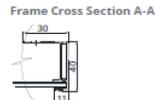
* For detailed information please refer to Installation Manual.
** Please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific product certificates applicable in your market.

ENGINEERING DRAWING (mm)

Rear View



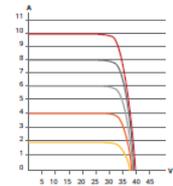
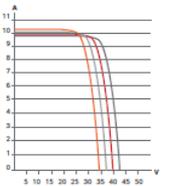
Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



CS3K-305MS / I-V CURVES

■ 1000 W/m²
■ 800 W/m²
■ 600 W/m²
■ 400 W/m²
■ 200 W/m²

■ 5°C
■ 25°C
■ 45°C
■ 65°C

ELECTRICAL DATA | STC*

CS3K	300MS	305MS	310MS	315MS
Nominal Max. Power (Pmax)	300 W	305 W	310 W	315 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	32.5 V	32.7 V	32.9 V	33.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.24 A	9.33 A	9.43 A	9.52 A
Open Circuit Voltage (Voc)	39.3 V	39.5 V	39.7 V	39.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.82 A	9.90 A	9.98 A	10.06 A
Module Efficiency	18.05 %	18.36 %	18.66 %	18.96 %
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC / UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	30 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline, 156.75 x 78.38 mm
Cell Arrangement	120 [2 x (10 x 6)]
Dimensions	1675 x 992 x 40 mm (65.9 x 39.1 x 1.57 in)
Weight	18.5 kg (40.8 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm² & 12 AWG, 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 (IEC / UL)
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	756 pieces

ELECTRICAL DATA | NMOT**

CS3K	300MS	305MS	310MS	315MS
Nominal Max. Power (Pmax)	223 W	227 W	230 W	234 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	29.6 V	29.8 V	30.0 V	30.2 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.54 A	7.62 A	7.67 A	7.75 A
Open Circuit Voltage (Voc)	36.8 V	37.0 V	37.2 V	37.4 V
Short Circuit Current (Isc)	7.92 A	7.98 A	8.05 A	8.12 A

** Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.37 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 2 °C

PARTNER SECTION

The above said datasheet only provides the general information on Canadian Solar products and, due to the on-going innovation and improvement, please always contact your local Canadian Solar sales representative for the updated information on specifications, key features and certification requirements of Canadian Solar products in your region.

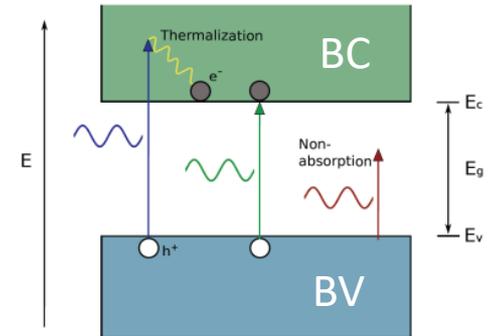
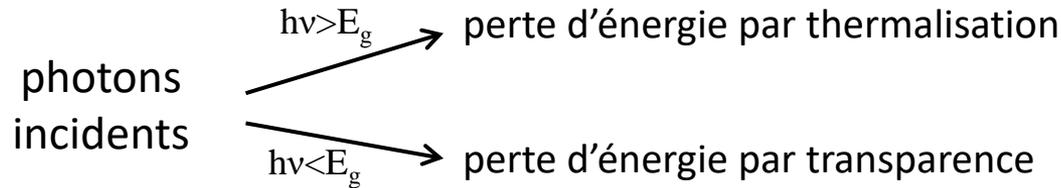
Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CANADIAN SOLAR (USA) INC. August 2017 | All rights reserved | PV Module Product Datasheet V5.552_E1_NA
3000 Oak Road, Suite 400, Walnut Creek, CA 94597, USA | www.canadiansolar.com/na | sales.us@canadiansolar.com

26

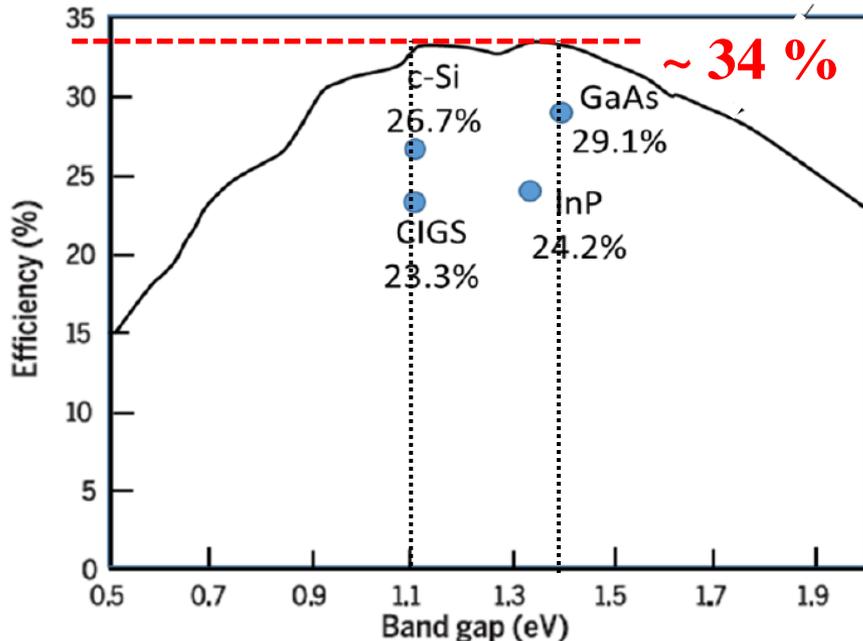
Conversion maximal Energie solaire/électrique

Efficacité de conversion max pour **homojonction PN**



- + Pertes prise en compte : - thermodynamique (Carnot) ~5% du spectre non converti (perdu par chaleur)
- recombinaison radiative, une fraction du courant est perdu $J = q \times (F_{lum} - F_{rec})$

Limite de Shockley-Queisser (1961)



Rendement max atteignable vaut 32-34 % pour **une jonction P-N** avec un gap compris entre $E_g = 1,1 - 1,4$ eV pour des conditions standard réalistes.

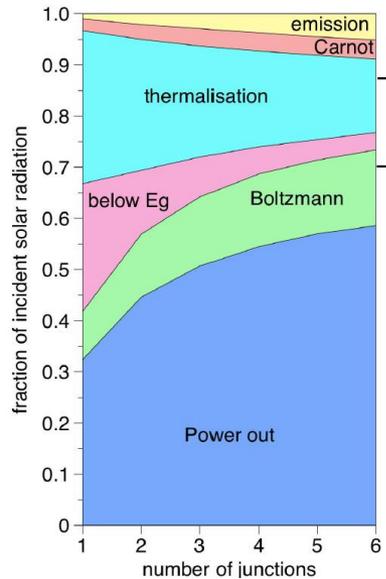
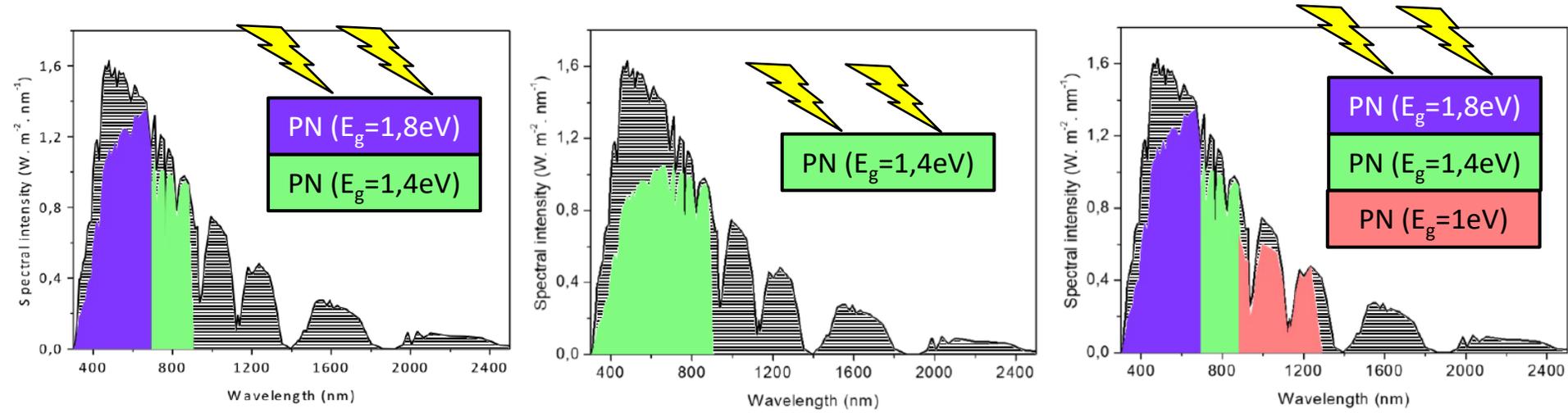
Depuis, amélioration des modèles :
limite théorique atteignable 29% - 31%



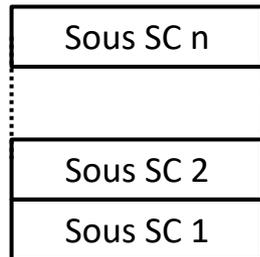
Peut-on dépasser cette limite ?

Conversion maximal Energie solaire/électrique

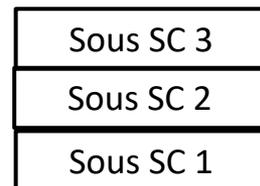
Réalisation de **multi-jonctions** : mise en série de plusieurs jonctions PN de gap différent
 → Limiter les phénomènes de thermalisation



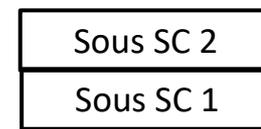
→ Repousse la limite de Shockley-Queisser



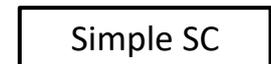
n-jonctions
~ 80 %



3-jonctions
~ 50 %



tandem
~ 44 %



simple
32-34 %²⁸

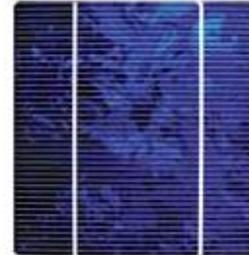
3 grandes catégories de technologie PV

Silicium cristallin épais (~95 % du marché PV)



Monocristallin

Fonte de silicium à l'état brut pour créer un barreau, refroidissement lent et maîtrisé afin d'obtenir un monocristal.



Polycristallin (ou multicristallin)

Elaborées à partir de blocs de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples sous l'effet d'un refroidissement forcé créant ainsi une structure multicristalline.

Couches minces (~5 % du marché PV)

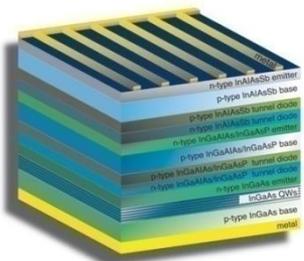


Fabriquées par le dépôt d'une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support en verre, plastique, acier...

Plusieurs technologies existent telles que :

- Silicium amorphe
- Silicium μ -cristallin
- CIS et CIGS
- CdTe

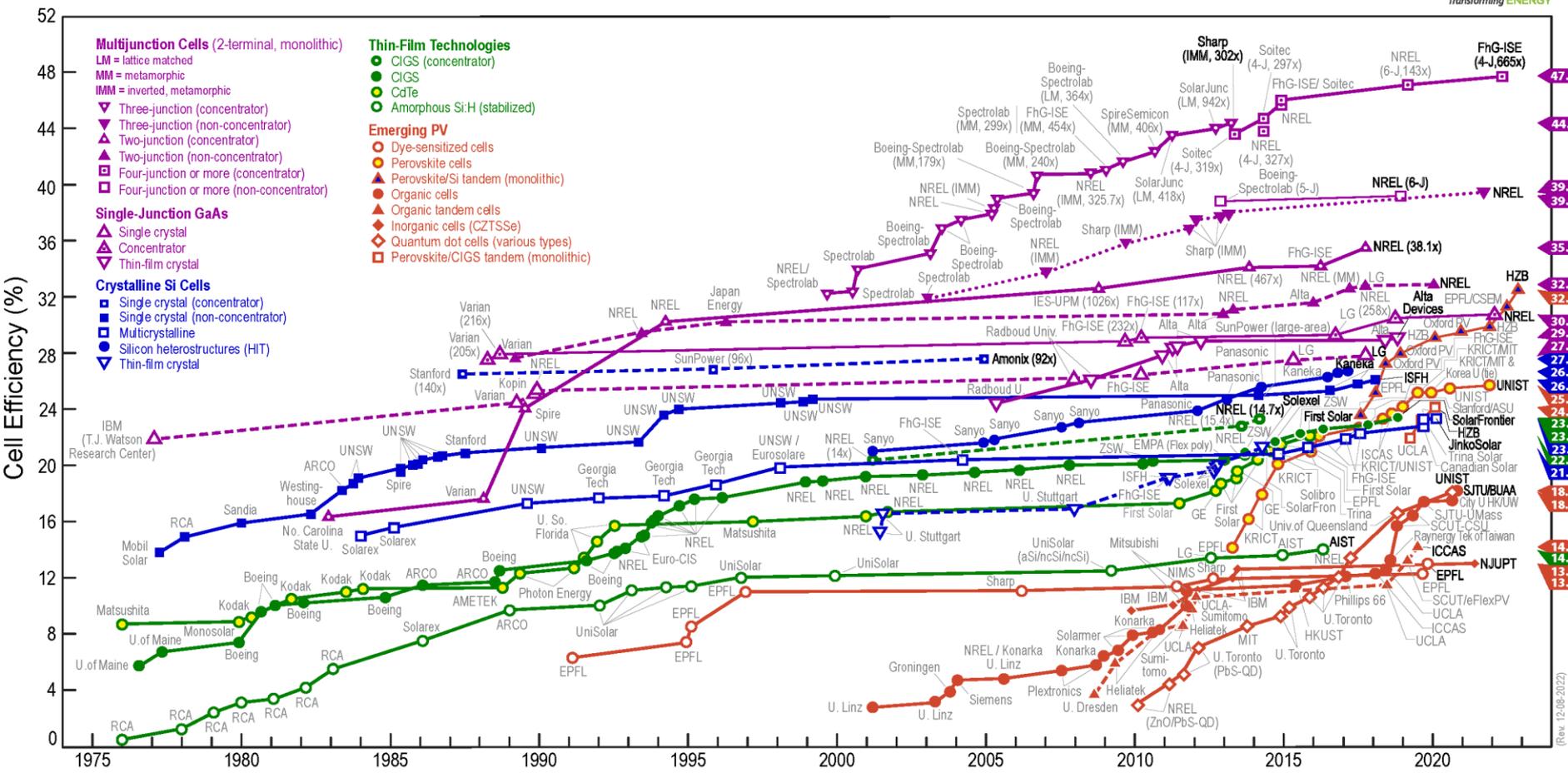
Multi-jonction (<1 % du marché PV)



Intégration de plusieurs couches (p-n) de différents gaps (III-V, IV...) afin de convertir électriquement un maximum du spectre électromagnétique. Structure complexe à élaborer par épitaxie (MOCVD) et très coûteuse. Technologie intéressante pour des applications spatiales.

Evolution des meilleures performances de cellules

Best Research-Cell Efficiencies

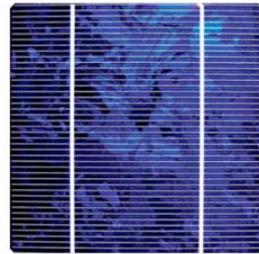


Augmentation des rendements de toutes les technologies de cellule solaire durant la dernière décennie

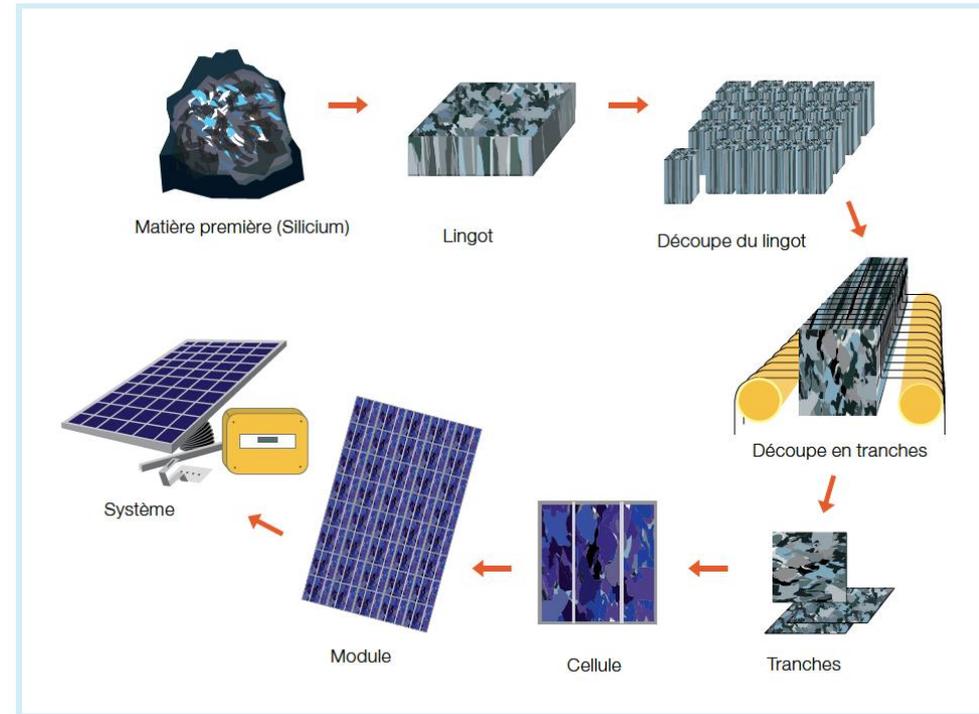
Filière historique du Silicium



monocristallin

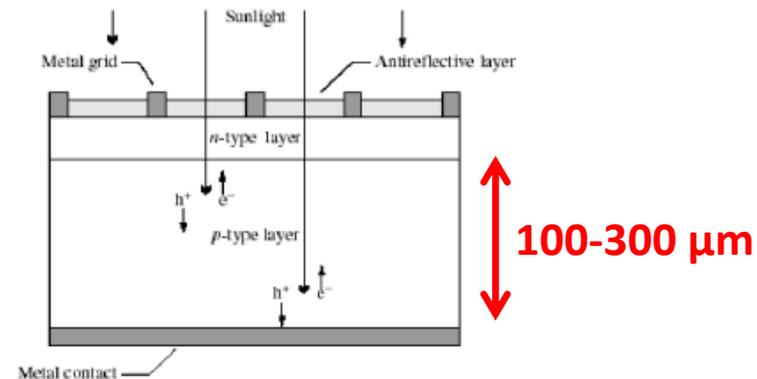


polycristallin



- Filière historique majoritaire (+95% du marché)
- Filière mature (suivi depuis 30 ans)
- Procédé de fabrication complexe
- Forts rendements industriels 16-24%
- Stabilité des panneaux PV (peu de vieillissement)

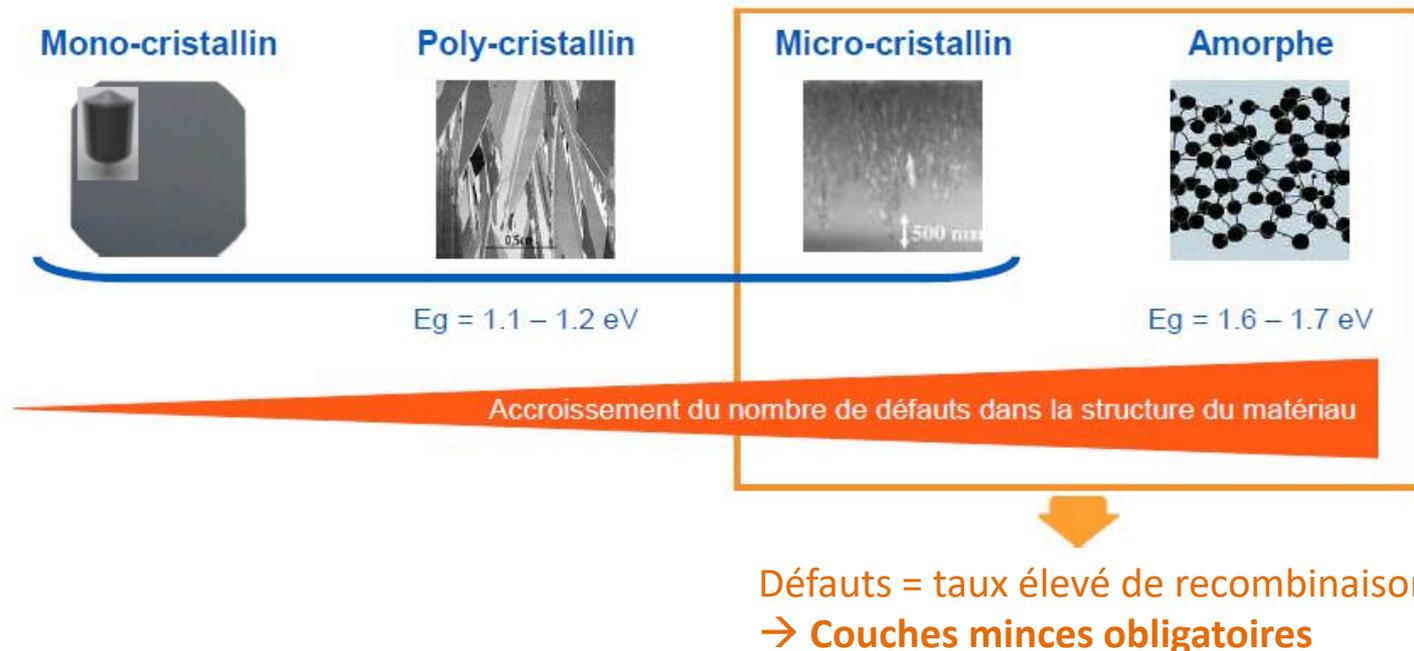
Acteurs majeurs : Jinko, Trina, Yinglin, Hanwha etc
(marché dominé par les industriels Chinois)



Pourquoi le silicium a-t-il autant de succès ?

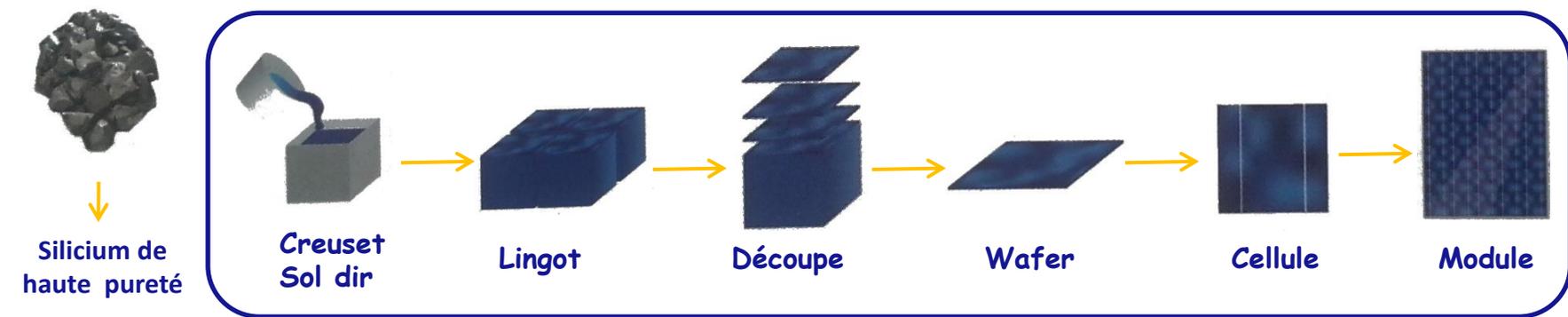
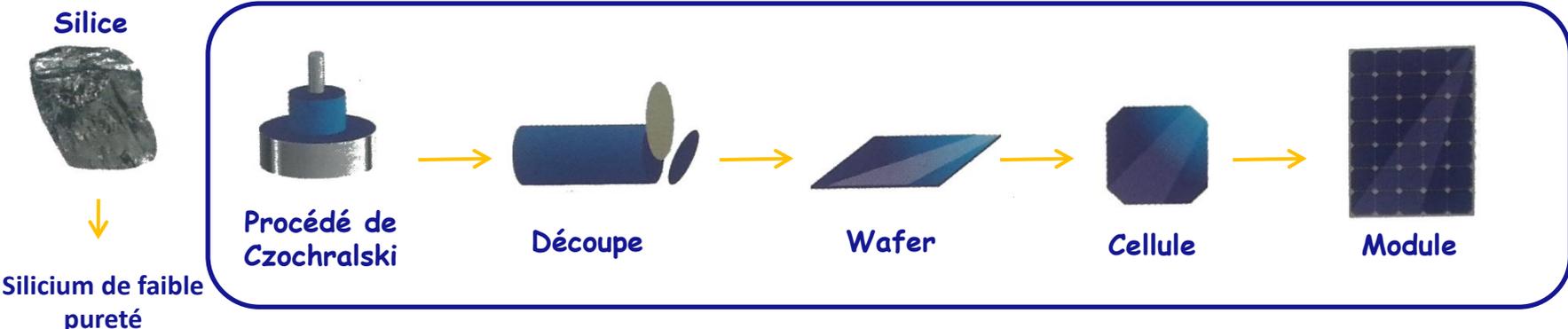
- Élément très stable (durée de vie du matériau quasi infinie)
- Non contaminant, non toxique et recyclable
- Élément très abondant : 27% de la croûte terrestre (2^{ème} élément sur Terre après O)
→ Fabrication des cellules PV limitée uniquement par la capacité de purification
- Possibilité de présenter sous plusieurs formes cristallines : mono ou polycristallin

Silicium mono, poly (ou multi), micro cristallin et amorphe ?



Formation de Si mono ou poly-cristallin ?

Monocristallin



polycristallin

Substrat Mono c-Si : ~ 90 % du marché Si épais en 2021
Substrat poly-Si : ~10 % du marché Si épais

En 2016, poly-Si ~80 % et c-Si ~20 % → en 5 ans la proportion s'est inversée

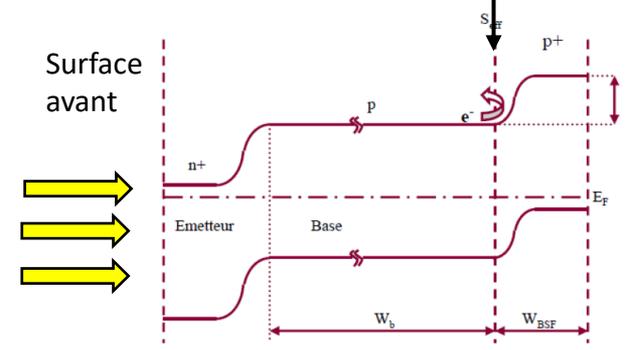
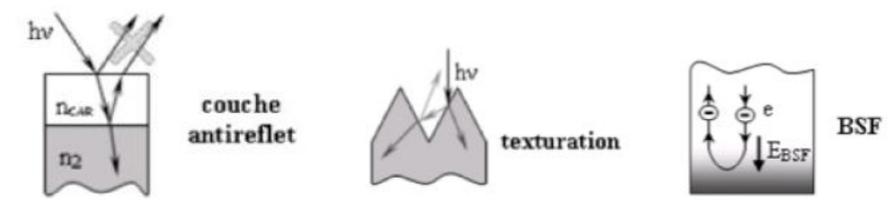
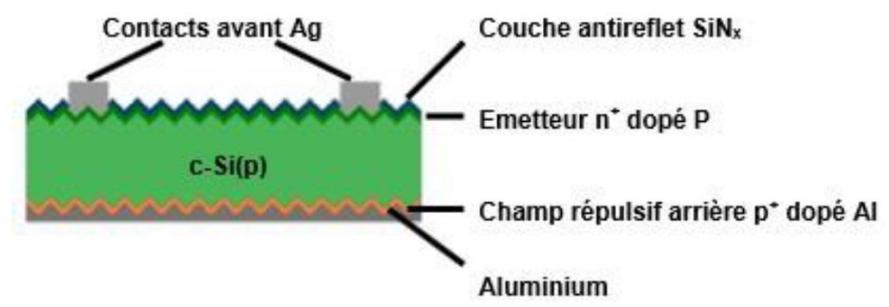
Cellule solaire Silicium typique

Caractéristiques	Emetteur type N	Base type P
Épaisseur (μm)	$\sim 0,5$	~ 300
Dopage (cm^{-3})	$\sim 10^{19}$	$10^{15}-10^{16}$
Diffusion mino ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)	~ 2	~ 40
Longueur diffusion mino (μm)	~ 14	~ 140
Vitesse recomb surface ($\text{cm}.\text{s}^{-1}$)	$\sim 10^5$	$\sim 10^5$
Réfectivité	$\sim 0,05$	~ 1

Rendement $\sim 18 - 20\%$

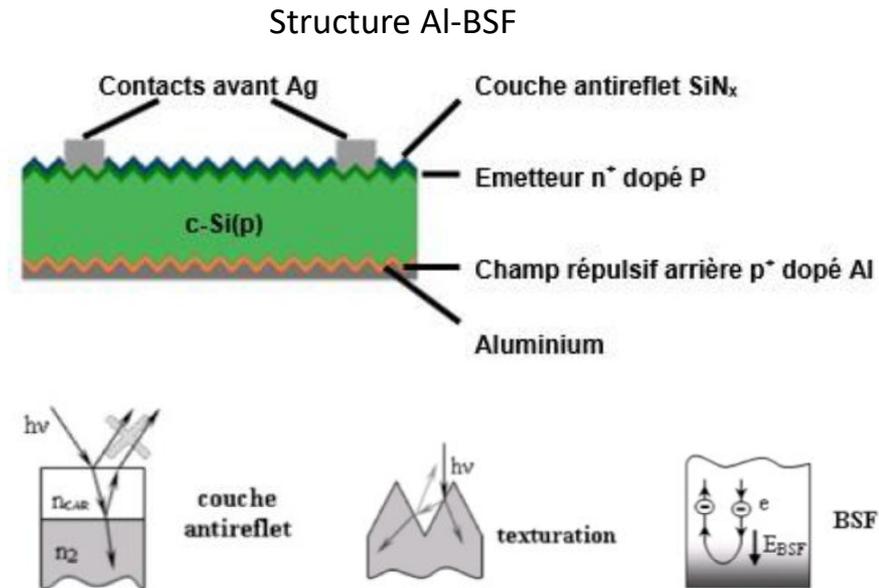
- Base type P doit être :
 - assez épaisse pour absorber le plus de lumière possible
 - peu dopée pour augmenter la longueur diffusion des porteurs.
- Emetteur N doit être :
 - très fin pour éviter l'absorption de lumière mais pas trop pour garder une résistance faible
 - très dopée pour réduire sa résistivité (réduire la résistance série).

Structure Al-BSF



Cellule solaire Silicium typique

Caractéristiques	Emetteur type N	Base type P
Épaisseur (μm)	$\sim 0,5$	~ 300
Dopage (cm^{-3})	$\sim 10^{19}$	$10^{15}-10^{16}$
Diffusion mino ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)	~ 2	~ 40
Longueur diffusion mino (μm)	~ 14	~ 140
Vitesse recomb surface ($\text{cm}.\text{s}^{-1}$)	$\sim 10^5$	$\sim 10^5$
Réfectivité	$\sim 0,05$	~ 1



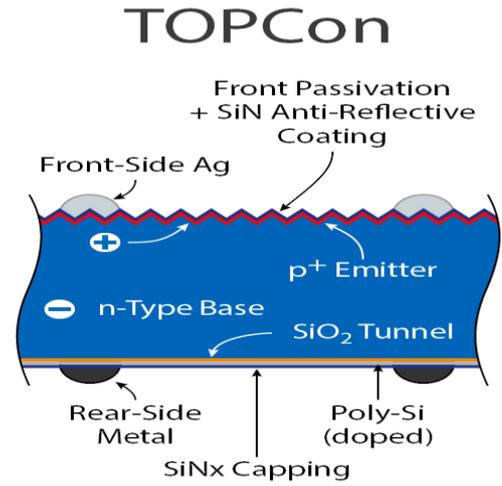
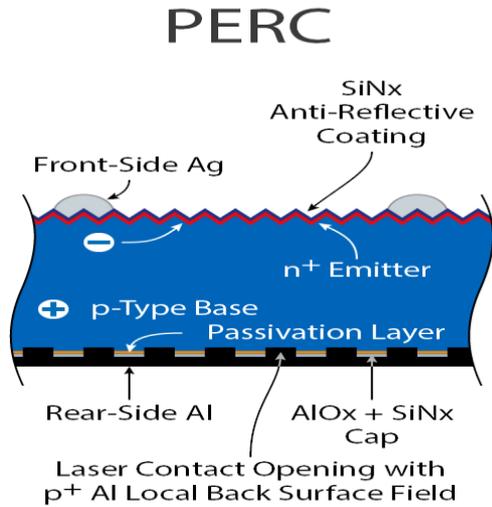
Comment augmenter l'efficacité des cellules (rendements $>20\%$) ?



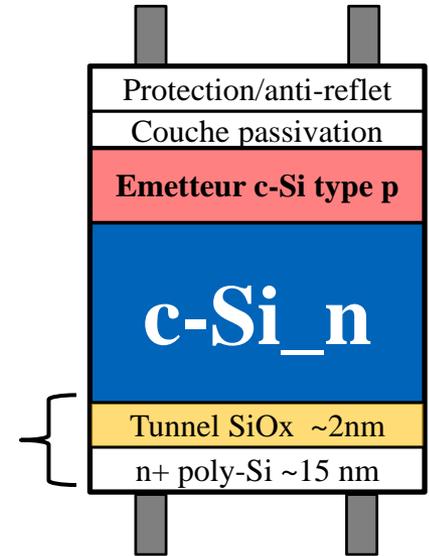
Optimisation du design de nouvelles architectures

- Meilleurs piégeages de la lumière
- **Réduire recombinaisons surface par passivation** → utilisation de contacts sélectifs passivants
- Eviter l'ombrage → architecture contact arrière interdigité **IBC**

Structure Silicium à « contacts passivants » (TOPCon)



Solar power world



Technologie TopCon développée par Fraunhofer ISE en 2014

Sol. Energ. Mater. Sol. Cell **120**, 270 (2014)

Avantage :

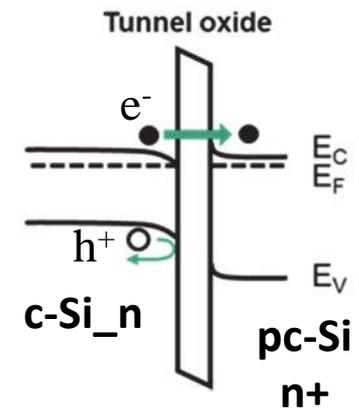
- excellente passivation du contact arrière c-Si grâce à l'interface **SiO_x/poly-Si**

Record **26,6%** sur cellule de surface 2x2 cm² obtenu par Fraunhofer ISE (2021)

Nature Energy **6**, 429 (2021)

Rendement **25,3 %** sur cellule 268 cm² obtenu par Jinko solar (2023)

(taille typique de cellule dans les modules)



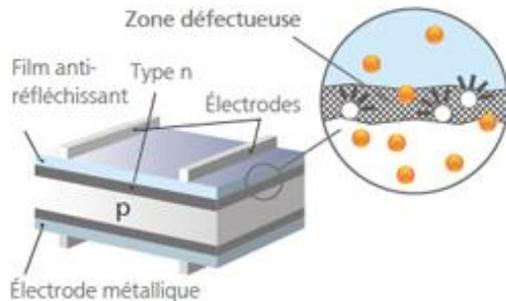
Hétérojonction Silicium (cellule HIT)

HIT[®]

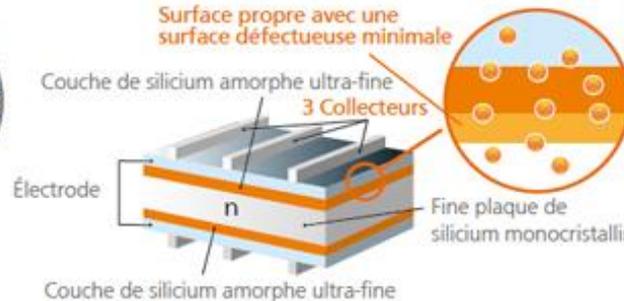
Photovoltaic Module

HIT : Heterojunction with Intrinsic Thin-layer

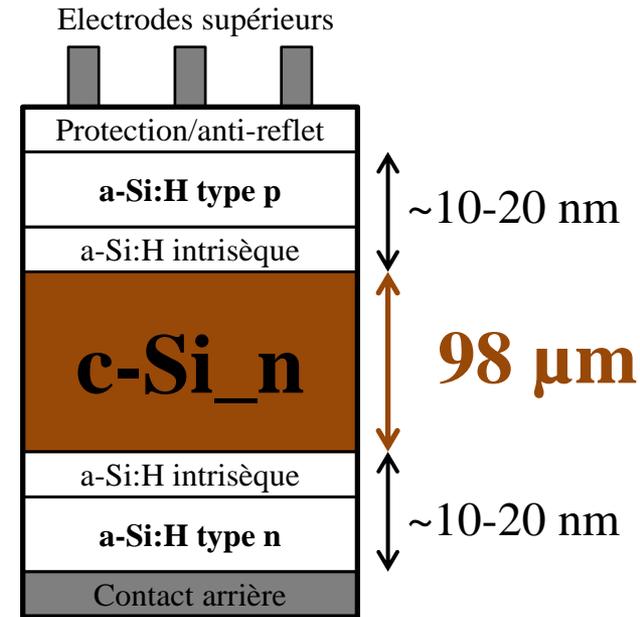
Cellule solaire en silicium monocristallin



Cellule solaire HIT[®]



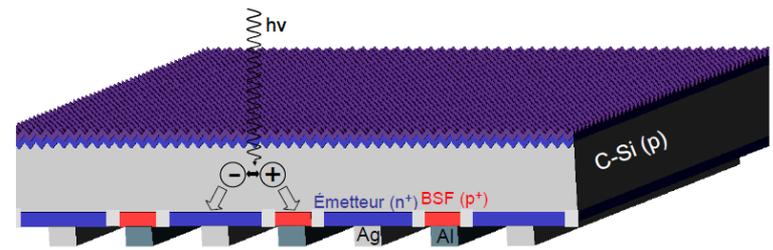
Produit par Panasonic (avant Sanyo)



utilisation a-Si:H pour limiter les recombinaisons de surface

- Avantages :
- excellente passivation
 - faible épaisseur
 - croissance procédés basse t°C

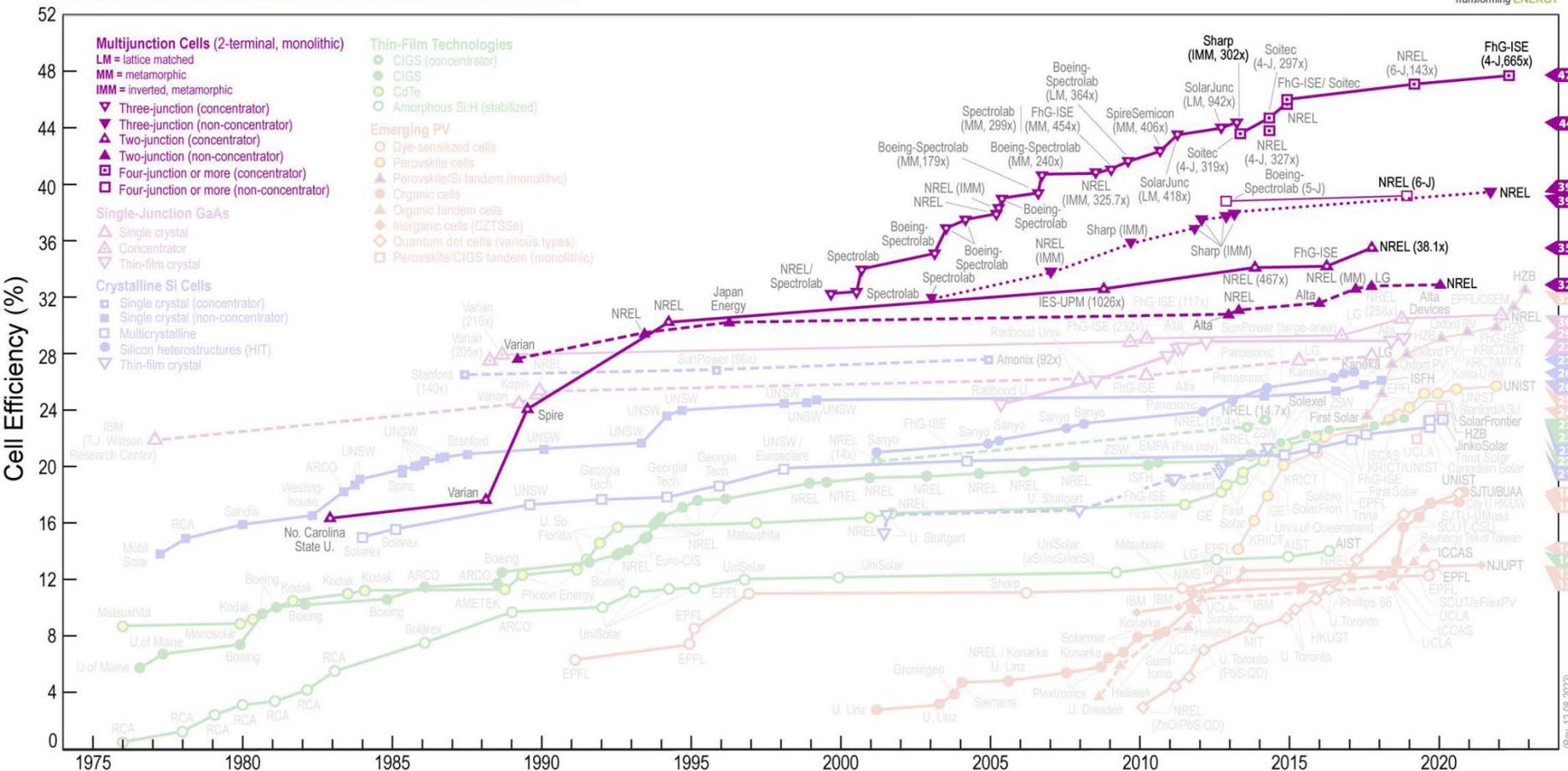
Technologie HIT combinée avec architecture IBC
(contact arrière interdigité)



Record **26,8% sur substrat type N** et 26,6% sur type P par Longi Solar en 2022/2023

Les cellules multi-jonctions

Best Research-Cell Efficiencies

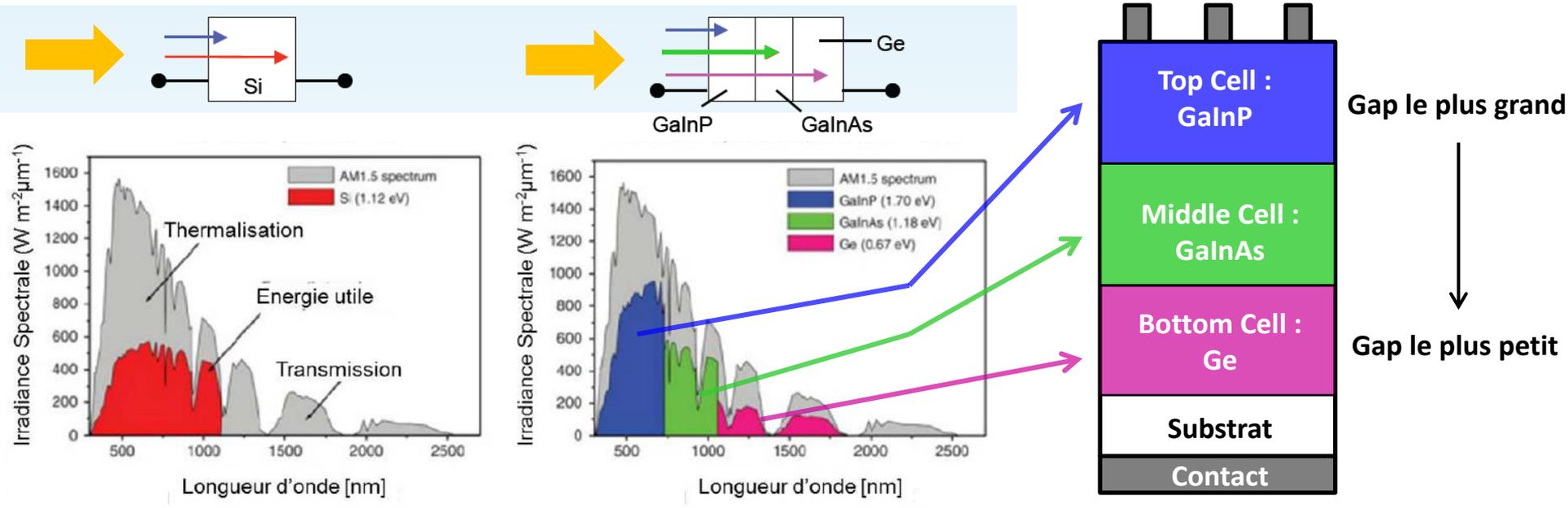


- Cellules PV possédant les plus hauts rendements
- Technologie la plus couteuse !

Intérêt des multi-jonctions

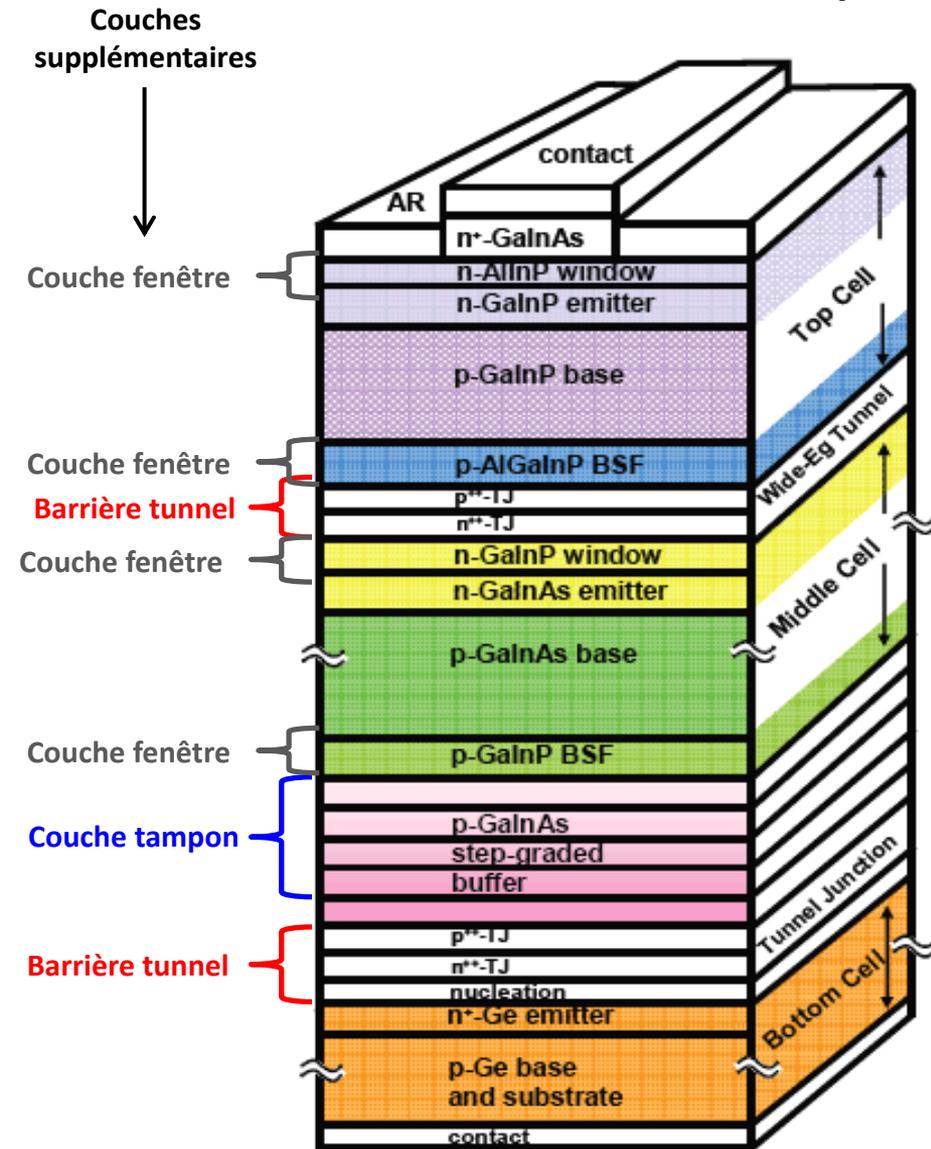
Idee : association série de plusieurs jonctions PN de gap différent de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbée (et limiter les phénomènes de thermalisation).

Ex : 1-jonction (c-Si) *versus* 3-jonctions (III-V / IV)



Pour une absorption optimale, la couche la moins absorbante (E_g le plus grand) doit être placée sur la face éclairée et ainsi de suite jusqu'à la face arrière.

Dispositif réel



Rajout d'interfaces supplémentaires par rapport à des jonctions p-n « classiques » (couche fenêtre, tampon et barrière tunnel).

→ **Augmentation du nombre d'interfaces**

Complexité + matériaux préparés par épitaxie (MBE, MOCVD)



Coût important au cm² mais hauts rendements PV (>30%)



Applications spatiales...

Mais applications terrestres envisagées sous concentration avec système de tracking

Pour applications terrestres chez des particuliers → Réalisation de **jonction tandem à bas cout**

Axes de recherche : vers tandem > 30% à bas coût

Cellule Bottom : technologie Silicium

- Produit industriellement mature
- Bon rendement
- Différentes architectures/technologies
AI-BSF/PERC&PERT/HIT/

Alternative crédible CIGS « petit gap »

Cellule Top : candidats pour $E_g \sim 1,7\text{eV}$

- **III-V**
 - Très bon rendement
 - Variétés de choix possible
 - Fort coût (car épitaxié)

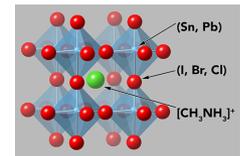
- **Pérovskite/organique**
 - Potentiel bas coût
 - Variétés de choix
 - Bon rendement
 - Problème de stabilité

- Record :
- simple jonction : 29,1% (Alta device)
 - tandem 2T sur Si: 33,7% (KAUST)
 - tandem 4T sur Si : 35,9% (NREL)

III V

13 Al Aluminium	15 P Phosphore
31 Ga Gallium	33 As Arsenic
49 In Indium	51 Sb Antimoine

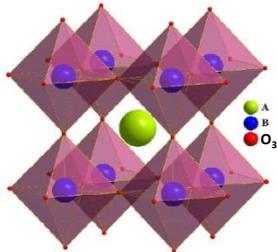
- Record :
- Pérovskite simple jonction : 25,7% (UNIST)
 - tandem 2T sur Si : 32,5% (HZB)



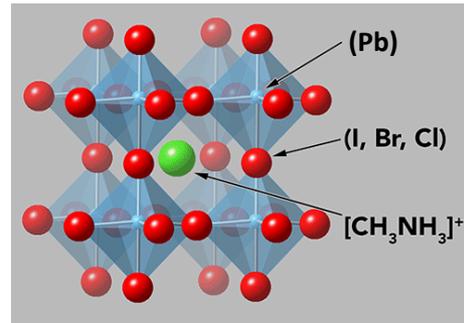
Nouveaux matériaux absorbeurs : Pérovskites

- Propriété des Pérovskites

Formule générale $A-B-O_3$. Propriétés multiferroïques

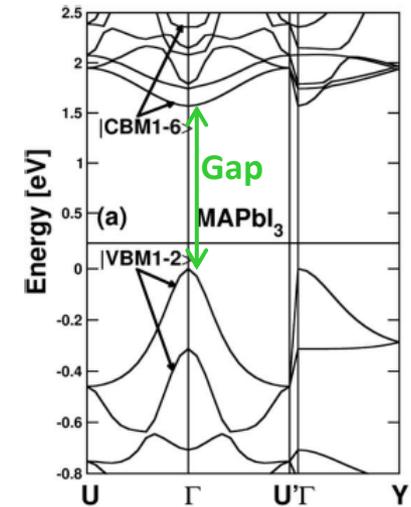


Pérovskite $A-B-O_3$



Pérovskite hybride (« organohalogénure de plomb »)

Structure bande électronique



Pérovskites hybrides {

- « mi-organique » aux **propriétés absorbantes** remarquables
- « mi-inorganique » aux **propriétés de transport** stupéfiantes (grande L_{diff} , grande mobilité...)

→ Utilisation en couche épaisse pour tirer parti de leur capacité d'absorption sans dégrader le transport des charges.

+ Peu coûteuses et facile à synthétiser



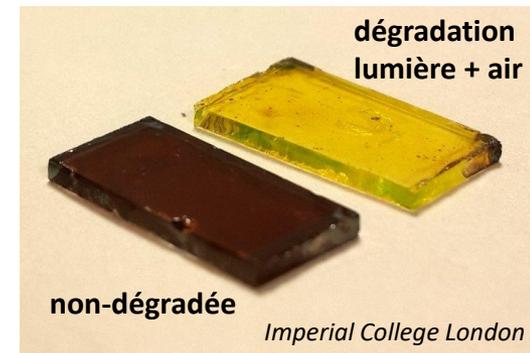
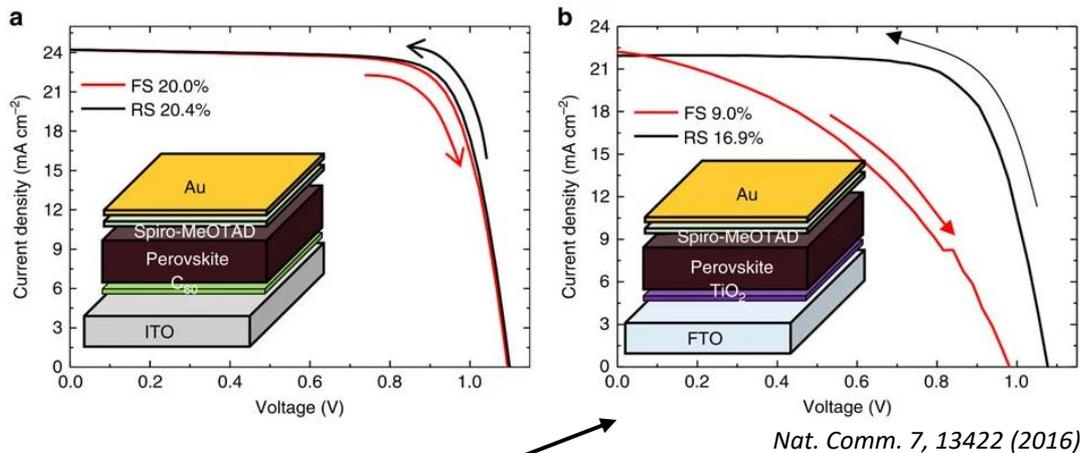
Matériau idéal pour le Photovoltaïque ?

Nouveaux matériaux absorbeurs : Pérovskites

- Avantages/inconvénients des Pérovskites hybrides pour le PV

Avantages :

- Multitude d'éléments → possibilité d'ingénierie de bandes et faire varier le gap (entre 1,3 et 2,3 eV)
- **Grandes longueurs de diffusion** des porteurs ($>1\mu\text{m}$ pour $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) et **forte mobilité** ($\mu \sim 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Coefficient d'absorption élevé
- Peu de défauts profonds dans le gap



Inconvénients :

- Stabilité du matériau, se détériore pour $T > 40^\circ\text{C}$, dégradation sous lumière, humidité et air
- Présence de Plomb! → Remplacement par d'autres éléments mais moins efficaces



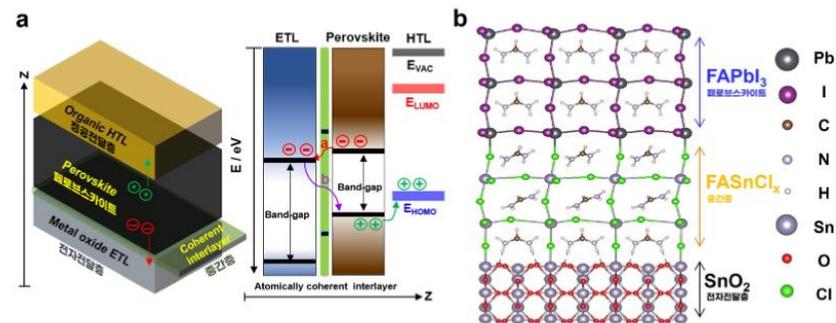
Obstacle à l'industrialisation ?

Certains industriels Chinois annoncent l'ouverture de lignes de productions dans un avenir proche

• Pérovskite simple jonction

Record certifié à **25,8 %** en 2022 (UNIST, Corée Sud)

Cellule non encapsulée conserve 90% de l'efficacité initiale après 500h exposition lumière.

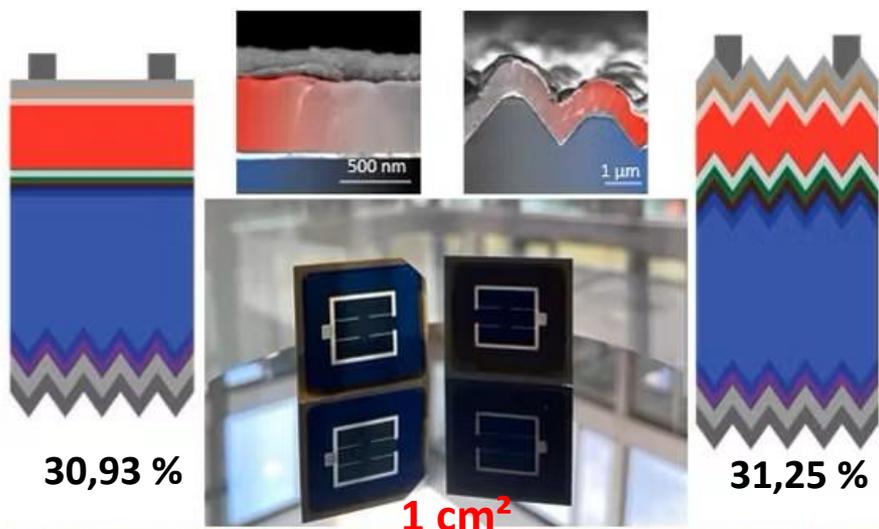


Nature 598, 444 (2021)

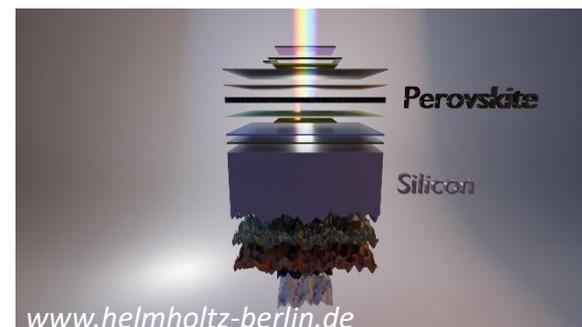
En une décennie, les cellules solaires Pkv ont atteint les valeurs de rendement de la technologie Silicium

• Tandem Pérovskite/Silicium

1^{ère} tandem Psk/Si $\eta > 30\%$ (2022)



Record actuel **Psk/Si avec $\eta = 32,5\%$** par HZB (2023)



Avenir de la technologie PV ?

Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis

Des questions... ?

...et des réponses

préparées par des chercheurs et des chercheuses du CNRS et de la Fédération de recherche du Photovoltaïque

Version du 13/06/2022 Disponible sur : <https://solairepv.fr>

Réponses à 25 questions (pour grand publique) dans les domaines :

❖ **Les installations PV aujourd'hui**

- 4) Cout d'une installation ?
- 5) PV est-il compétitif ?
- 7) Une installation PV fournit-elle plus d'énergie que ce qui a été consommé pour sa fabrication ?

❖ **Photovoltaïque, environnement et société**

- 8) Recyclage des panneaux PV ?
- 9) Quelles sont les émissions de CO2 d'un système PV ?
- 12) Impact de la filière PV en France ?

❖ **Place du PV dans le mixte énergétiques français ?**

- 17-18) Potentiel PV en France : toiture et parking ?
- 20) Potentiel de l'agrivoltaïsme ?

❖ **Démêlons le vrai du faux !**

Réponses à quelques critiques courantes entendues dans le débat public

- 21) Forte émission du CO₂ ?
- 23) Risque pour la stabilité du réseau ?

Conclusions

- ❑ **Base de conversion photovoltaïque**
- ❑ **Base sur les matériaux semi-conducteurs**
- ❑ **Fonctionnement de la cellule photovoltaïque**
- ❑ **Calcul du rendement**
- ❑ **Limite de conversion photovoltaïque**
- ❑ **Quelques technologies PV :**
 - Silicium qui domine le marché actuel à ~95%
 - Futur sur Silicium : nouvelles architectures de cellules haut rendement (contacts passivants et Hétérojonction)
 - Multi-jonctions
 - Futur des multi-jonctions : vers cellules > 30% à bas cout : tandem Perovskite/Si

