

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée

Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique

Faculté de Technologie

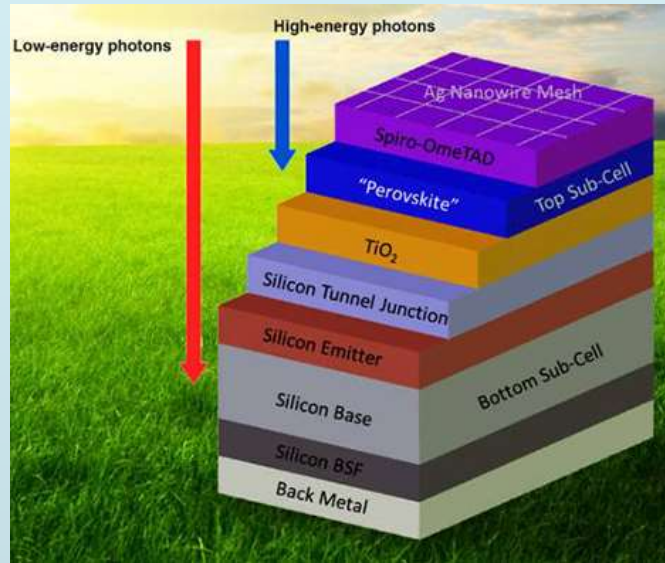
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batn2a.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84



Cellules photovoltaïques

De la technologie des couches actives
au panneau solaire photovoltaïque

Plan de l'exposé

I^{ère} Partie

- ▶ **Aspects généraux**
- ▶ **Matériaux photovoltaïques**
- ▶ **Conversion photovoltaïque**
- ▶ **Paramètres des cellules photovoltaïques**

Aspects généraux

Cellules Photovoltaïques

- ▶ **Quelle est la signification du mot photovoltaïque ?**
- ▶ Le terme photovoltaïque est composé des mots:
 - ▶ Photo = lumière,
 - ▶ Volt = unité de tension électrique.

C'est le terme utilisé pour désigner **l'électricité** produite à partir de **l'énergie solaire**.

Autrement dit:

Photovoltaïque signifie que **l'énergie solaire, la lumière (photons)**, est transformée en **tension électrique**

Cellules Photovoltaïques

Différentes sources d'énergie

Energies non renouvelables

- ▶ Charbon
- ▶ Pétrole
- ▶ Gaz
- ▶ Uranium

Energies renouvelables

- ▶ Vent
- ▶ Flux marins et océaniques
- ▶ Géothermie
- ▶ Soleil

Cellules Photovoltaïques

Historique

- ▶ L'effet photovoltaïque, découvert par Becquerel en 1839, permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité;
- ▶ Fritts (1883) et Grondahl (1930-32), ont proposé les premiers dispositifs photovoltaïques;
- ▶ En 1954, Chapin, Fuller et Pearson, mirent au point une première cellule photovoltaïque (jonction pn à base de silicium cristallin) avec un rendement de conversion de l'ordre de 6 %.
- ▶ Les premières applications ont vu le jour dans les années 1960 avec l'utilisation des panneaux solaires pour les satellites spatiaux.

Cellules Photovoltaïques

Aperçu sur les différentes périodes du marché solaire mondial

1^{ère} période 1954-1973: Naissance de la 1^{ère} cellule solaire aux Bell Labs avec un rendement de 6%;

2^{ème} période 1973-1980: 1^{ère} crise pétrolière mondiale et naissance du "Sunshine Plan" au Japon et déblocage de crédits importants aux USA et d'autres pays développés au profit de la R&D dans le domaine l'énergie solaire;

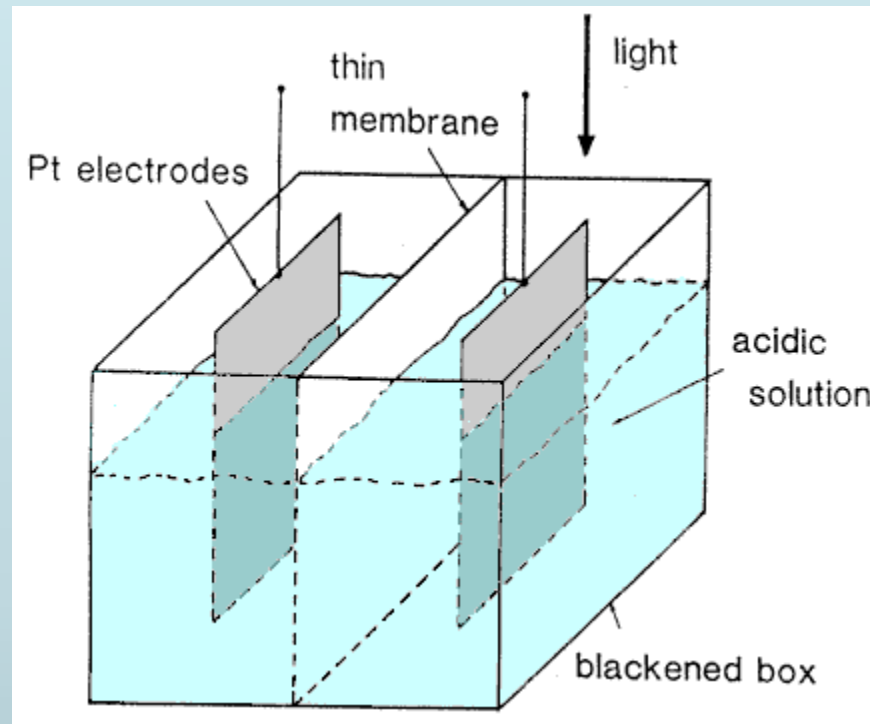
3^{ème} période 1980-1992: Vu la chute vertigineuse des prix du pétrole, le faible rendement des cellules solaires et leur prix de revient élevé, l'USA et autre pays ont réduit le financement de la recherche sur l'énergie solaire;

4^{ème} période 1992-2000: Suite à la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (UNCED), Les gouvernements du monde entier ont annoncé des politiques de soutien dans le développement de technologies d'énergie propre;

5^{ème} période 2000 – présent : L'industrie solaire est entrée dans une nouvelle ère avec un développement vigoureux et une croissance rapide de sa capacité de production.

Cellules Photovoltaïques

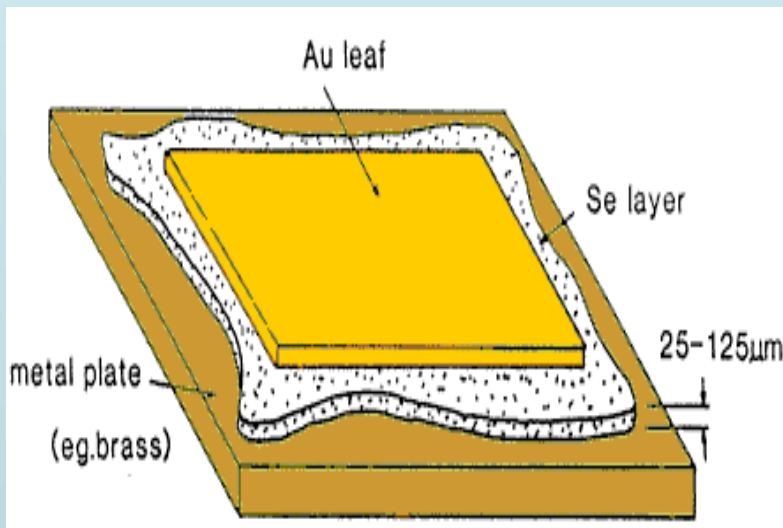
Schéma du dispositif décrit par Becquerel



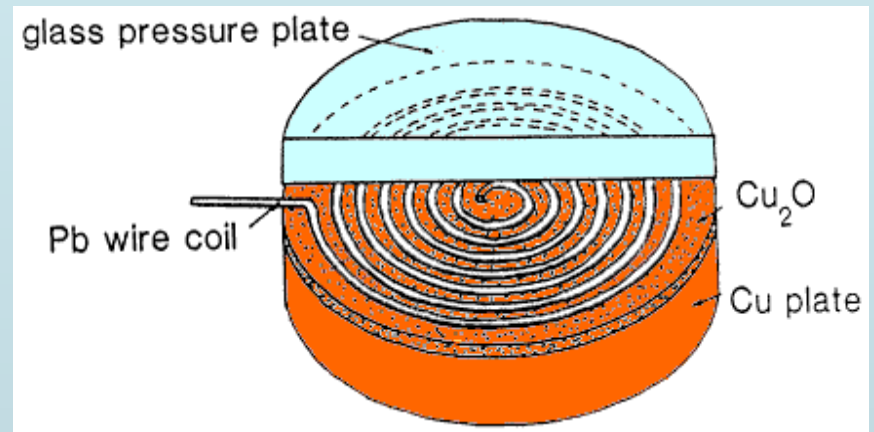
Becquerel 1839

Cellules Photovoltaïques

Autres schéma décrits par Fritts et Grondahl



Fritts 1883



Grondahl 1930-32

Cellules Photovoltaïques

Comparaison des deux sources d'énergie

Energies non renouvelables

Il y a 1^èrement

- ▶ Une baisse permanente des réserves

Et 2^èment

- ▶ La pollution

Energies renouvelables

Elles sont:

- ▶ Durables
- ▶ Sans pollution
- ▶ Abondantes

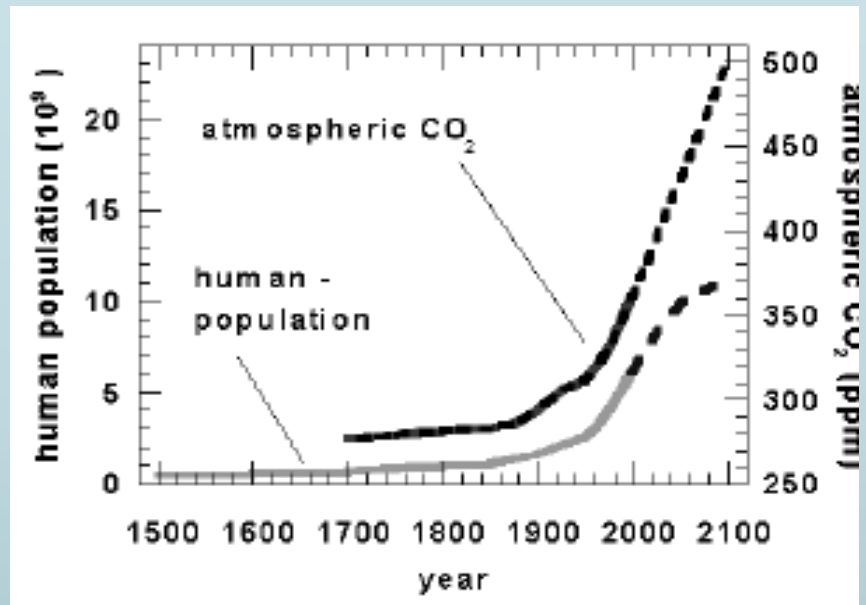
Cellules Photovoltaïques

Motivation

Données sur la pollution

- ▶ $20 \cdot 10^{20}$ kg/an de CO_2 libérés dans l'atmosphère
- ▶ Montée de la température de $0.3-0.6^\circ\text{C}$ depuis la fin du 19^{ème} siècle \Rightarrow montée de la mer de 10-25 cm

Evolution de la pollution



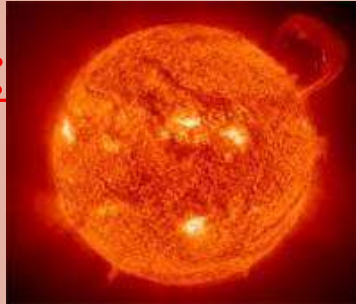
Cellules Photovoltaïques

Energie solaire

Réaction thermonucléaire

Pendant chaque seconde:

$6 \cdot 10^{11}$ kg d' **Hydrogène**
sont convertis en **He**

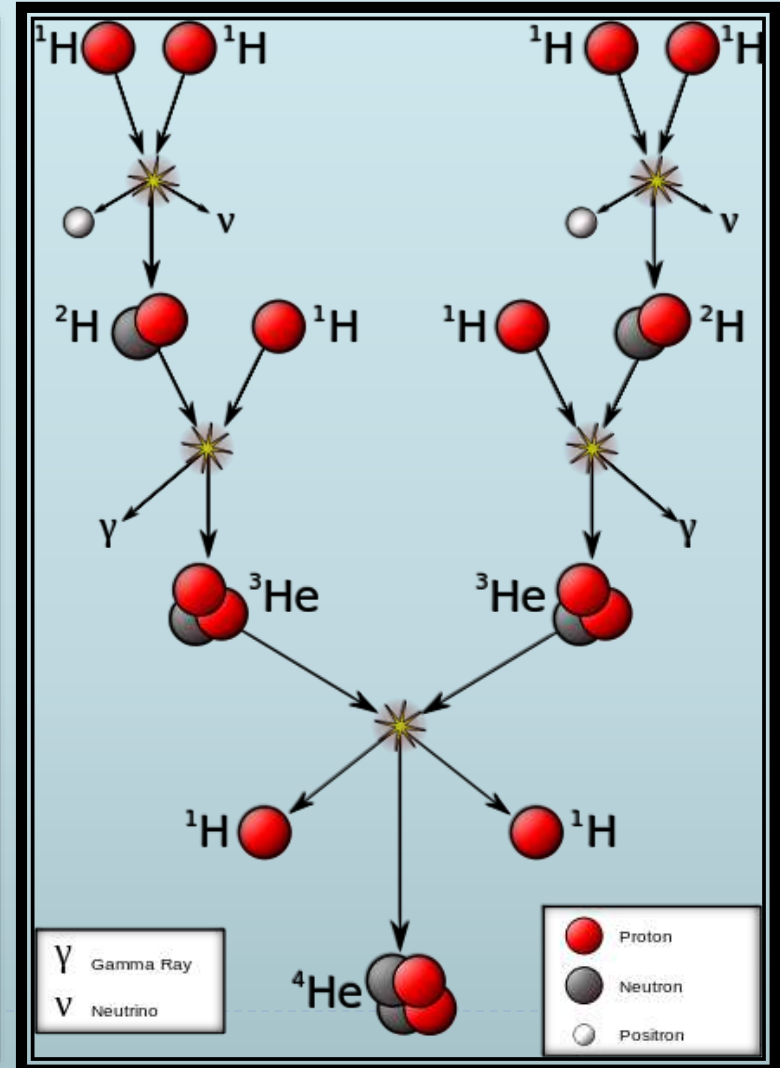


Avec une perte de masse de:

$$\Delta m = 4 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Donc une énergie:

$$E = \Delta m c^2 \approx 4 \cdot 10^{20} \text{ J}$$



Cellules Photovoltaïques

Données Soleil

▶ Dimensions :

- Diamètre=1 391 000 km
- Distance moyenne Terre Soleil=149 450 000 km

▶ Température :

- Température à l'intérieur= quelques millions de degrés
- Température de surface =5800K

▶ Pression :

- Pression à l'intérieur=1 milliard atm.
- Pression à la surface= 10^{-2} atm.

▶ Masse= $2 \cdot 10^{30}$ kg

Durée de vie= 10^{11} années.

Cellules Photovoltaïques

Avantages et atouts de l'énergie solaire

Avantages

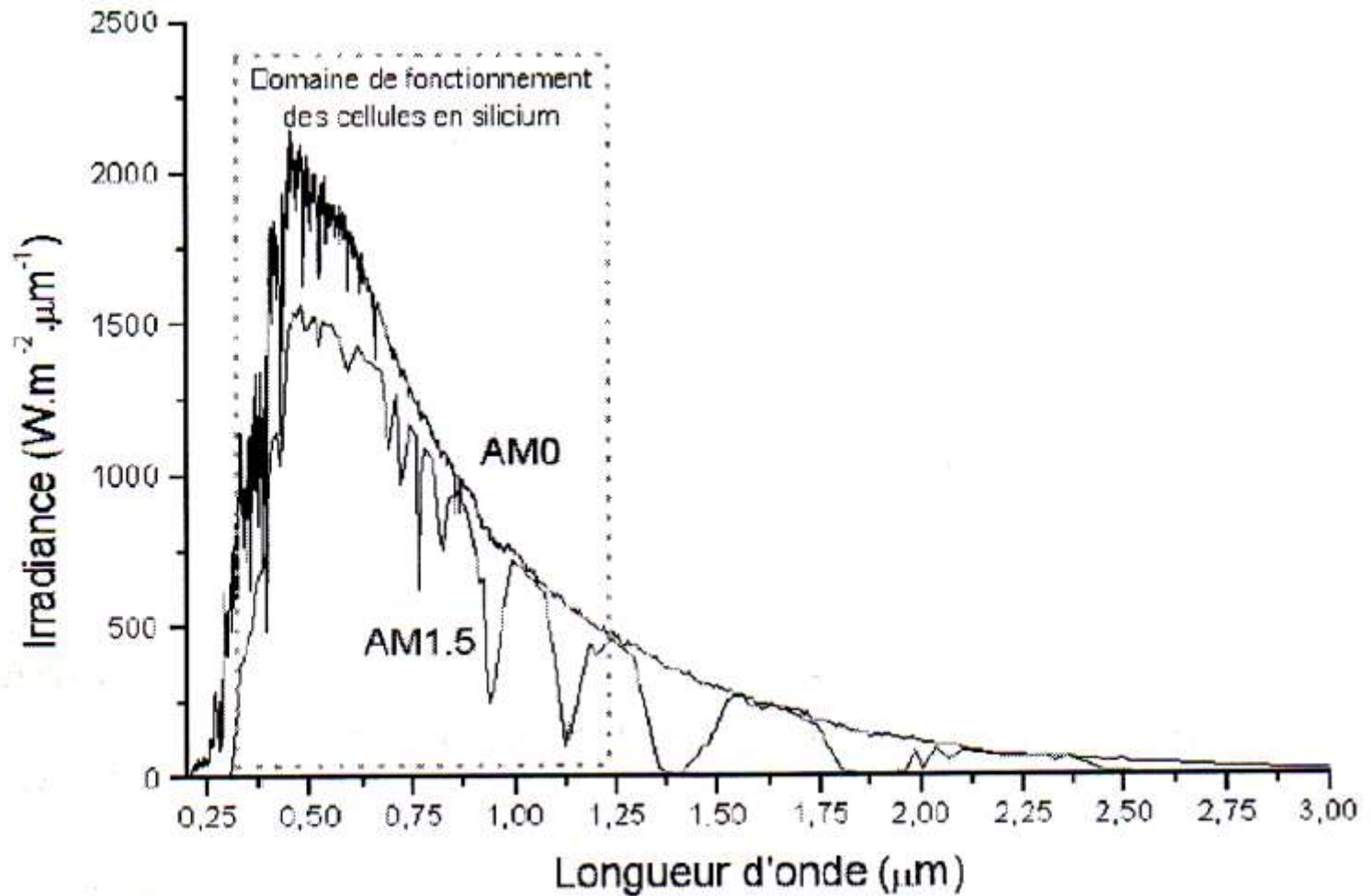
- ▶ Gratuite,
- ▶ Propre,
- ▶ Abondante
- ▶ Inépuisable à l'échelle du temps humain.

Atouts

- ▶ A chaque heure, environ 14 TW de rayonnement solaire atteignent la surface de la terre (l'équivalent de la consommation énergétique mondiale en une année).
- ▶ L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a calculé qu'une surface de 147 000 km² serait suffisante pour couvrir la totalité des besoins énergétiques de la planète.

Cellules Photovoltaïques

Spectre solaire



Cellules Photovoltaïques

Définition de paramètres importants

▶ Eclairement spectral (I_{λ}) (spectral irradiance)

C'est la puissance reçue par une surface unité dans la gamme spectrale de largeur $d\lambda$ ($\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$)

▶ Eclairement (Irradiance)

C'est l'intégrale de l'éclairement spectral sur le domaine spectral d'intérêt (W/m^2)

▶ Rayonnement

C'est l'intégrale dans le temps de l'éclairement sur une période donnée (J/m^2 –jour ou kWh/m^2 –jour ou kWh/m^2 –mois ou kWh/m^2 –an)

Cellules photovoltaïques

Notion d'air mass

Pour comparer et unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, on a institué la notion d'air mass:

$$AM = \frac{e^{-\frac{z}{7.8}}}{\cos(\theta)}$$

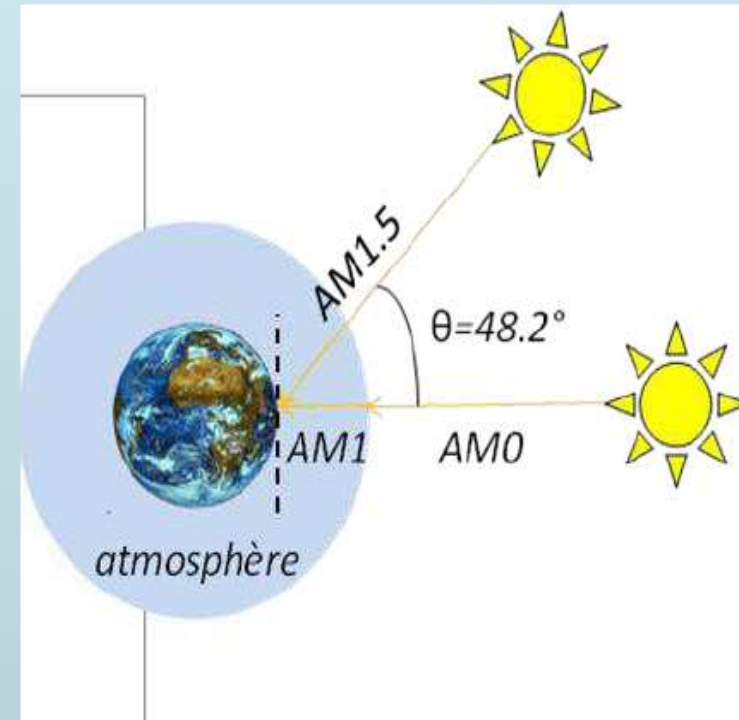
AM₀ → hors atmosphère ($z \rightarrow \infty$): 1353 W/m²

AM1 → Soleil au zénith ($\theta=0$): 925 W/m²

AM1.5 → $\theta \approx \pi/4$ (48,2 °) : 844 W/m²

AM2 → $\theta = \pi/3$: 691 W/m²

$$I_D \left(\frac{W}{m^2} \right) = 1353 (0.7^{AM})^{0.678}$$



$$AMx, \text{ avec } x = \frac{1}{\cos\theta}$$

Cellules photovoltaïques

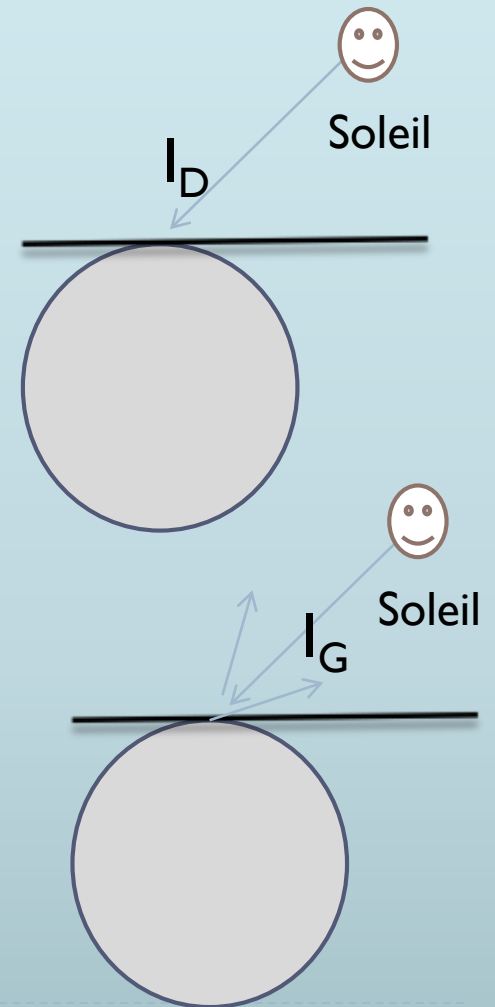
Rayonnement direct et rayonnement global

Remarque:

Il faut faire la différence entre l'**air mass global** qui tient compte à la fois des radiations directes et diffuses et l'**air mass direct** qui ne tient compte que des radiations directes

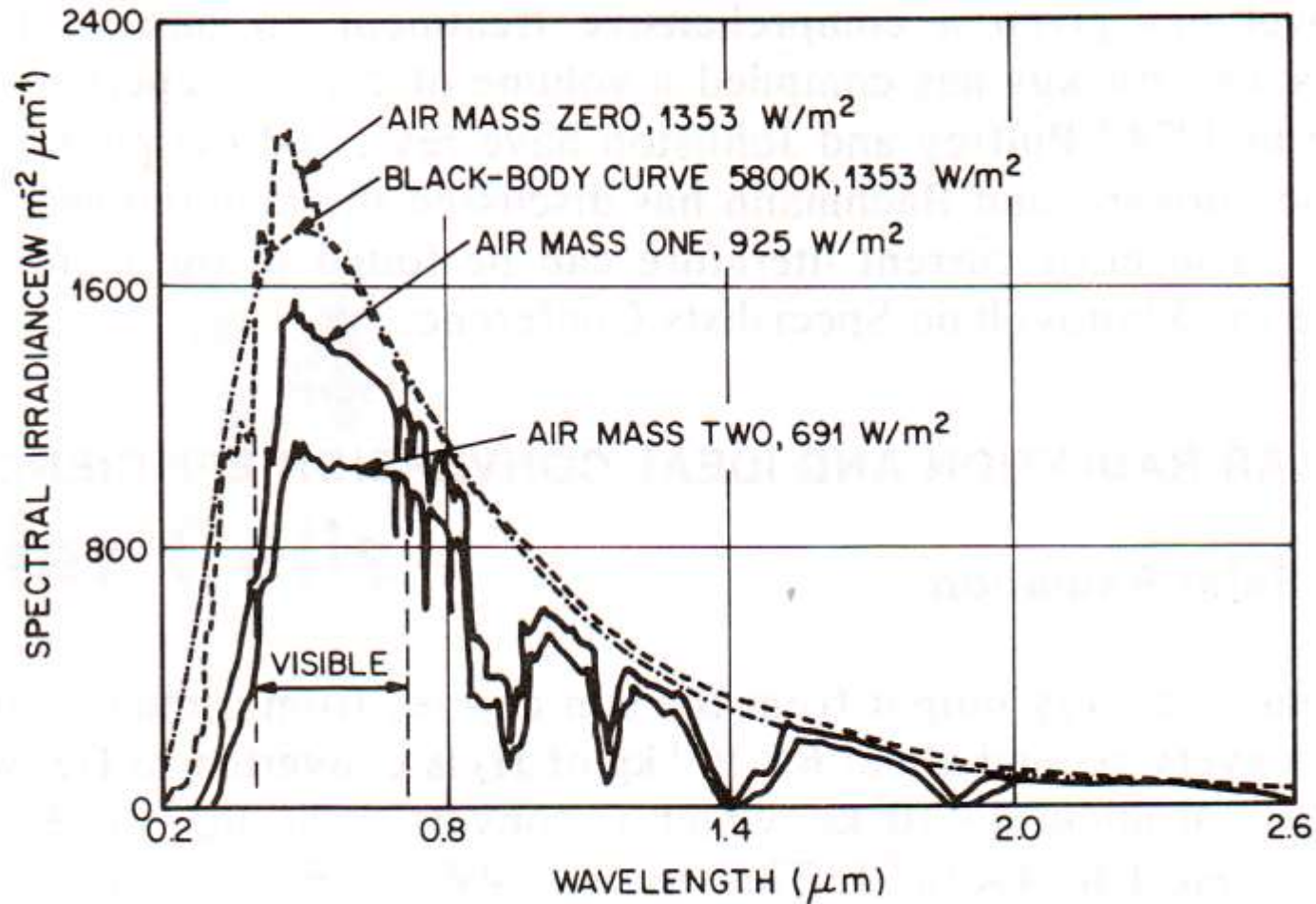
AM1.5 D → **844 W/m²**

AM 1.5 G → **970 W/m²**
≈ **1000 W/m²**



Cellules Photovoltaïques

Approximation de AM0



Cellules Photovoltaïques

Données pour différents pays

Important de le savoir

La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine > l'énergie produite par les réserves mondiales de charbon, de pétrole, de gaz et d'uranium.

Les ensoleillements moyens sur l'année sont:

- Nord Australie et au Botswana $\approx 7 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- Algérie $\approx 5.6 \text{ (HP)} \text{ à } 6.5 \text{ (sud) kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- Espagne $\approx 3 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- Sud Suède $< 1 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$

Cellules Photovoltaïques

Production d'électricité Photovoltaïque

Croissance importante depuis 1990

- 1996: $\approx 100 \text{ MWc}$
- 2001: $\approx 400 \text{ MWc}$
- 2010: $\approx 3 \text{ GWc}$
- 2020: $\approx 9-21 \text{ GWc}$

La puissance crête représente la puissance délivrée par le panneau au point de puissance maximum (dans le diagramme Intensité/Tension) et pour une irradiation solaire de 1000 W/m^2 (avec un spectre standard) avec une cellule à 25°C .

Cellules Photovoltaïques

Problèmes

Deux principaux problèmes:

- Dispositif de conversion
- Moyens de stockage

La recherche s'oriente sur deux principaux axes:

- Augmenter le rendement;
 - Diminuer les coûts de production;
 - Mettre au point des moyens de stockage adéquats.
- } → Dispositif de conversion

Matériaux photovoltaïques et exigences

Cellules Photovoltaïques

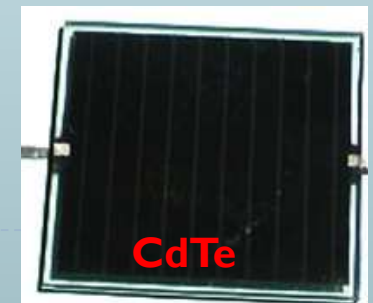
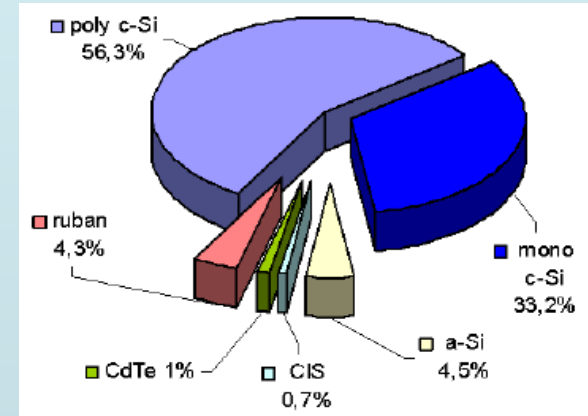
Matériaux utilisés

Le matériau le plus utilisé est le **silicium**.

Pourquoi ?

- Abondant (deuxième élément dans la croûte terrestre)
- Non toxique
- Technologie maîtrisée
- Qualité de son oxyde
- NB: Le prix du matériau intervient pour environ 50% dans le prix du module

- 1) O
- 2) Si
- 3) Al
- 4) Fe



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Cellules à base de CdTe

Rendement

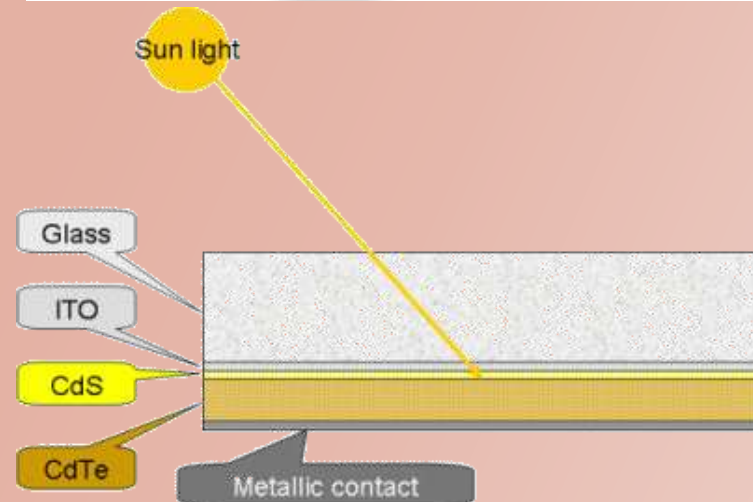
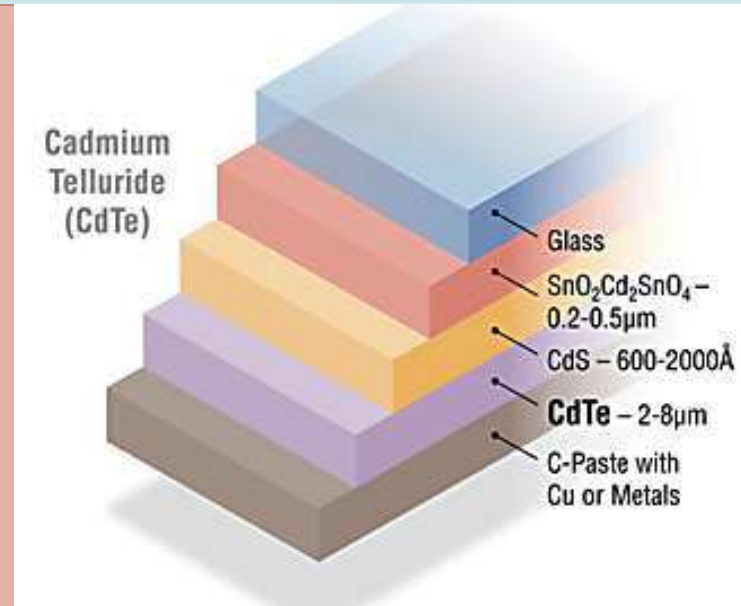
Meilleur rendement en laboratoire \approx 18%

Avantages

Prix très réduit (un panneau peut être produit en 2 h30 avec des pertes de matière première estimées à seulement 2 %.)

Problèmes

- ▶ Le tellure est un élément rare;
- ▶ Présence du Cd nocif à l'environnement.



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Cellules à base de CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium)

Avantage principal

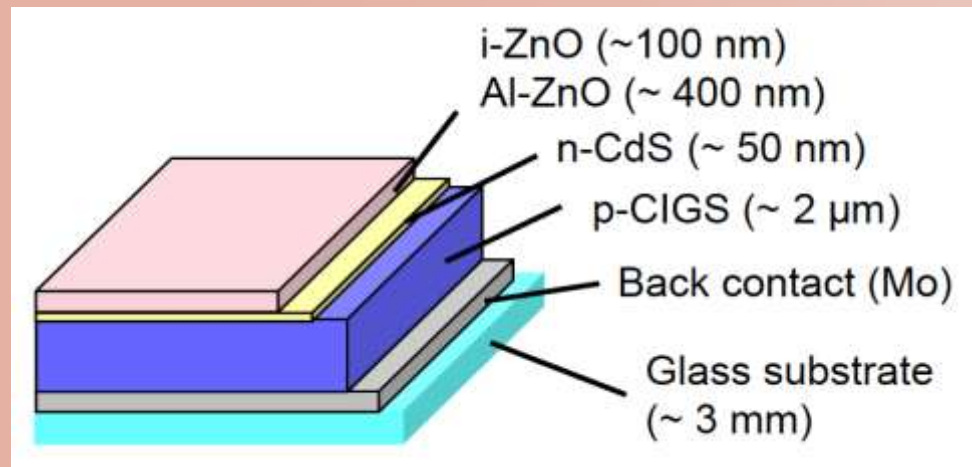
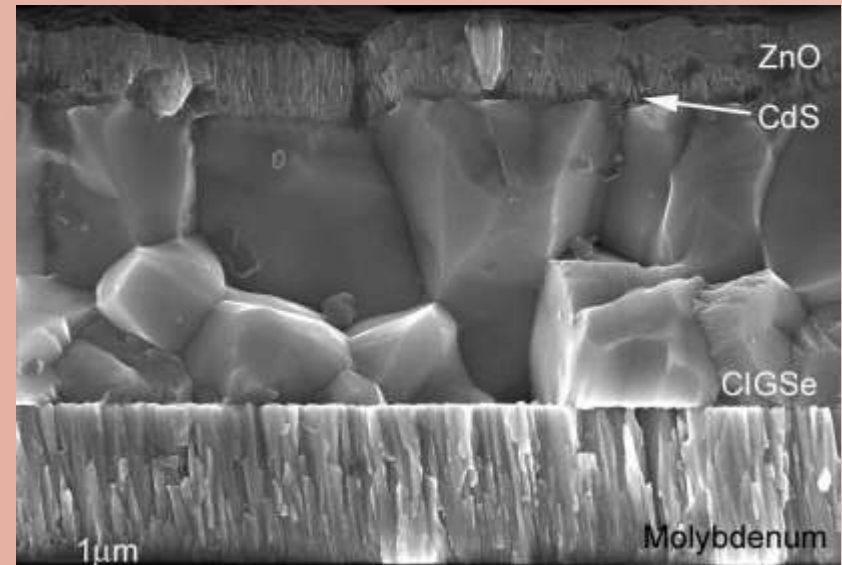
Les cellules CIGS sont ainsi celles qui ont le plus important coefficient d'absorption parmi les couches minces inorganiques : plus de 99% des photons incidents sont absorbés par un micron de matériau.

Rendement

Meilleur rendement en laboratoire $\approx 20.8\%$

Problèmes

- ▶ Rareté de l'Indium
- ▶ Présence du **Cd**, nocif à l'environnement.



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Cellules à base de CZTS

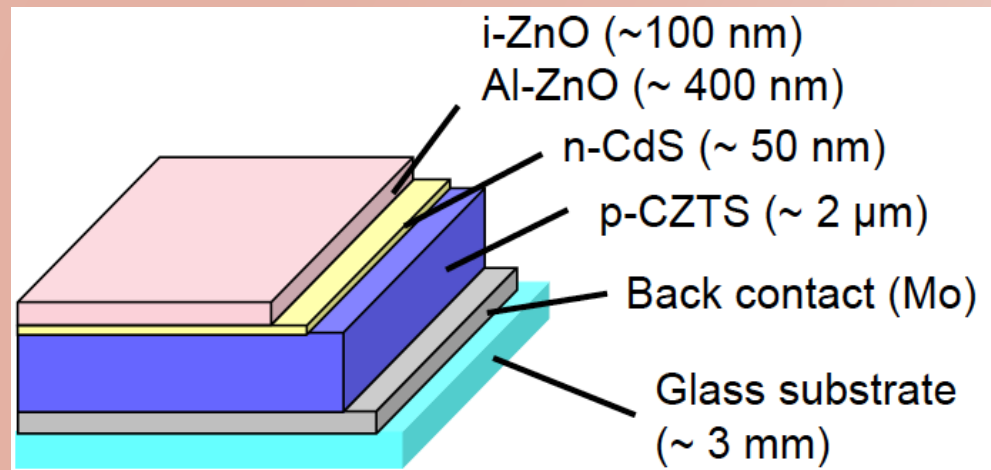
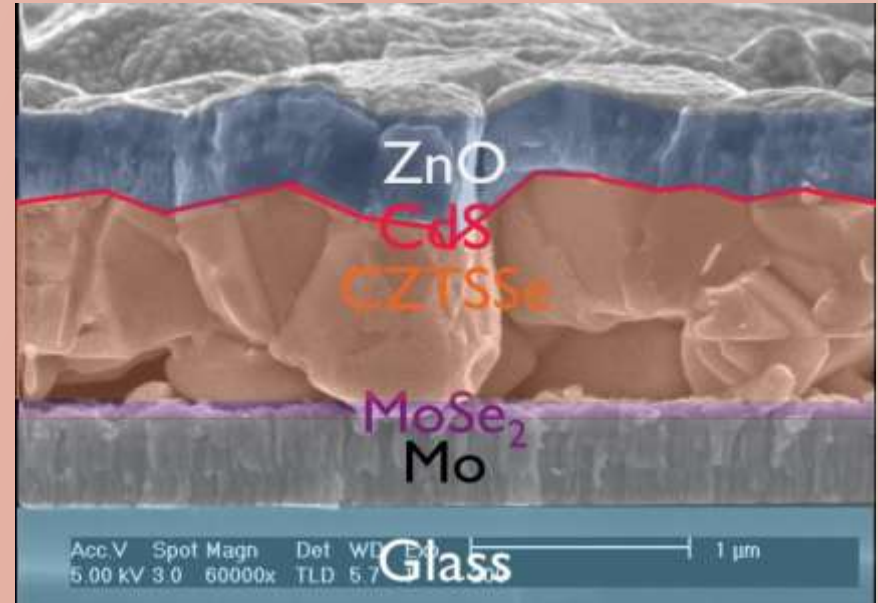
(Cuivre-Zinc-Tellure-Sélénium)

Rendement

Meilleur rendement en laboratoire $\approx 12,6\%$

Problèmes

- ▶ Voc faible par rapport aux cellules à base de CIGS et CdTe
- ▶ Présence du Cd nocif à l'environnement.
- ▶ Présence de phases secondaires



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Cellules à base de Pérovskite

($\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{M X}_3$ avec $\text{M}=\text{Pb}$ ou Sn et $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$ ou I)

Exemple: $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{PbI}_3$

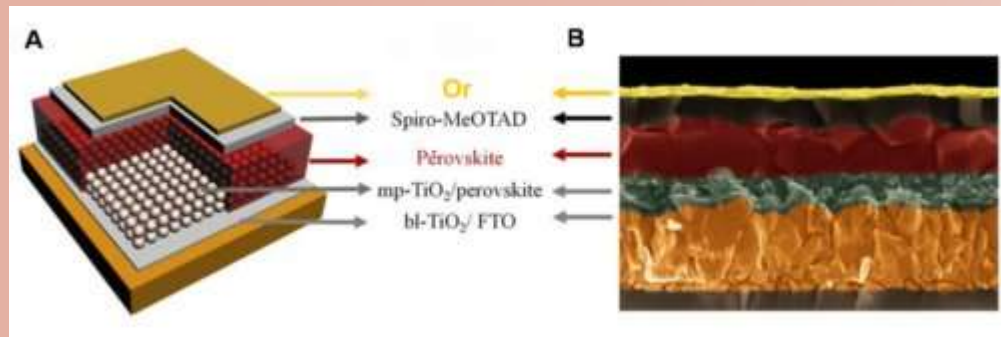
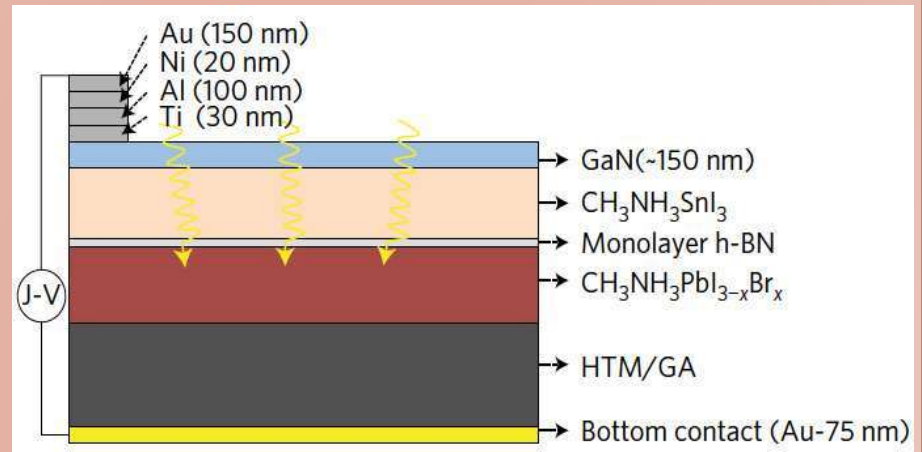
(iodure de plomb méthylammonium).

Avantages

- Meilleur rendement en laboratoire $\approx 19\%$
- Gap typiquement : 1.5-1.6 eV
- Modes de synthèse faciles à bas coût
- Éléments chimiques abondants

Problèmes

- ▶ Remplacer Pb par Sn
- ▶ Améliorer la stabilité
- ▶ Trouver la technologie de dépôt la plus appropriée



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Matériaux organiques

I. Cellules à colorant

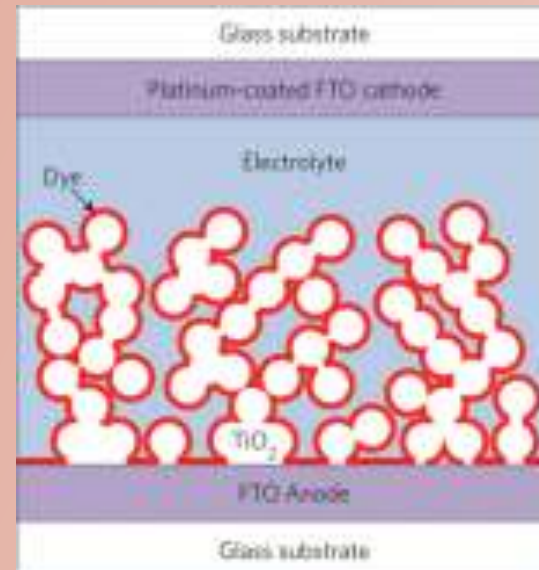
Elles sont constituées d'un sandwich d'oxyde de titane, de **pigment photosensible** (colorant : polypyridine de ruthénium) et d'un électrolyte à base d'iode (ex : I-/I₃⁻), liquide ou gélifié

Rendement

de 8 à 12 % (modules commerciaux 3 – 5%)

Problèmes

- ▶ Pas de stabilité à long terme;
- ▶ Faible résistance à la température.;
- ▶ Baisse de performance (< 10 % au-delà de 20 000 h);



Cellules Photovoltaïques

Matériaux utilisés

Matériaux organiques

II. Cellules à polymères

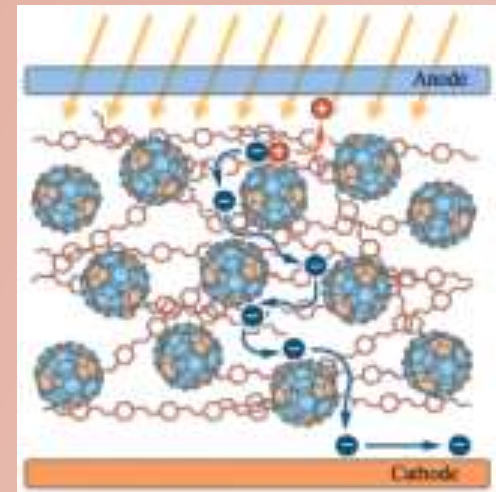
Le matériau absorbeur (ou donneur d'électrons) peut être :

- ▶ soit de petites molécules organiques comme des phthalocyanines, des polyacenes, ou des squarenes combinées avec des perylene ou des fullerènes comme accepteur ;
- ▶ soit des molécules à longue chaîne (polymères de type P3HT, MDMO-PPV, PEDOT:PSS, PET, PC61BM, PCDTBT...) combinées avec des dérivés des fullerènes comme accepteurs (PC60BM, PC70BM).

Rendement: de 8 à 10 % (modules 3 – 5%)

Problèmes

- ▶ Pas de stabilité à long terme:
(la durée de vie ne dépasse pas les 10 ans,
voire les 2 ans)

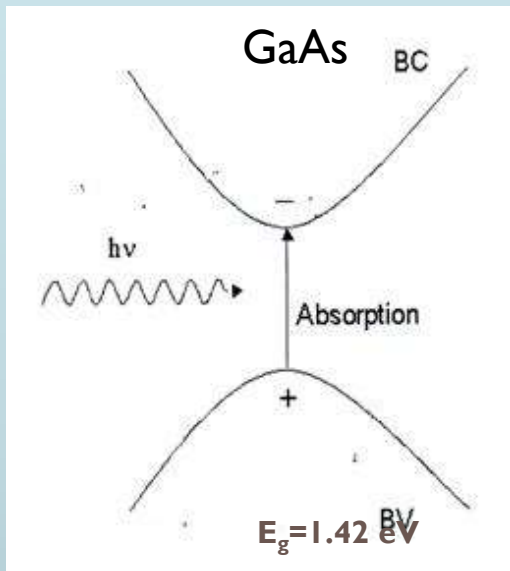


Cellules Photovoltaïques

Effet de la nature du gap

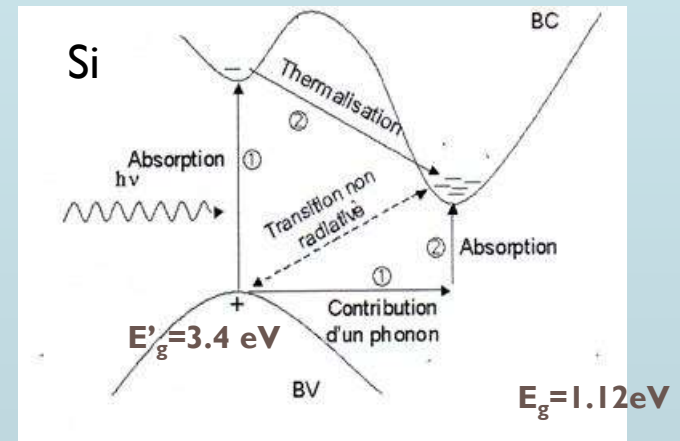
Gap direct : GaAs

Probabilité de transition radiative importante



Gap indirect : Si

Probabilité de transition radiative faible



Le silicium amorphe est un composé à gap direct ($E_g = 1.70 \text{ eV}$) et possède par conséquent un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé dans le visible (d'un facteur d'environ 100) que le silicium cristallin. Cela permet d'envisager la fabrication de cellules à l'aide de couches minces, de l'ordre du micron d'épaisseur et de réduire significativement les coûts de production.

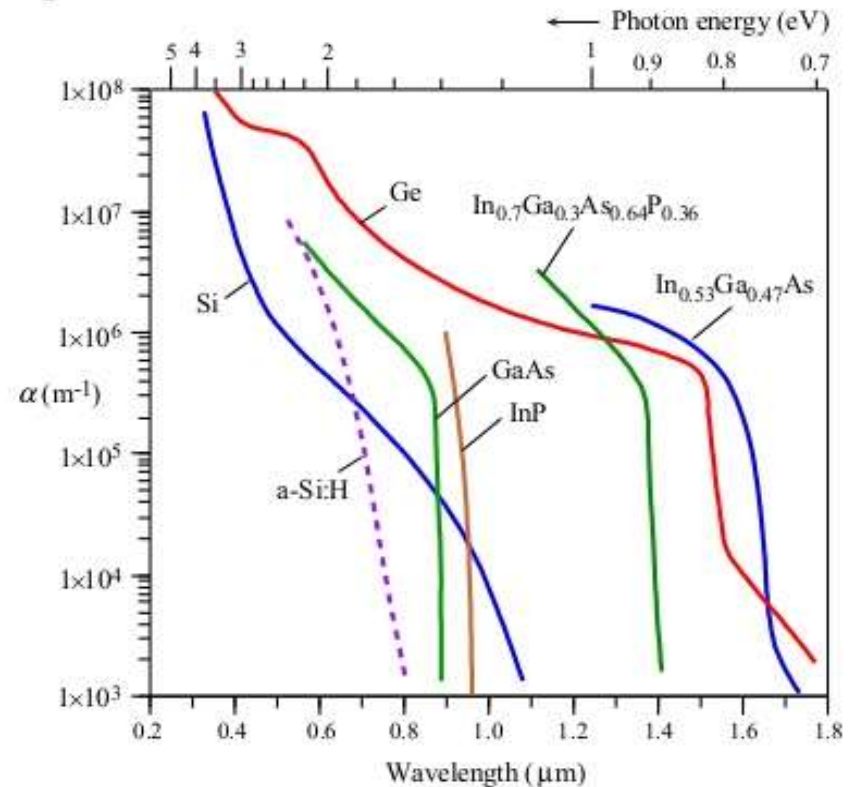
Cellules Photovoltaïques

Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration

En raison de son **gap indirect** et de son **faible coefficient d'absorption optique** pour les grandes longueurs d'onde, les cellules à base **du silicium monocristallin** doivent utiliser **une base épaisse (> 200 μm)** pour absorber toute la lumière incidente.

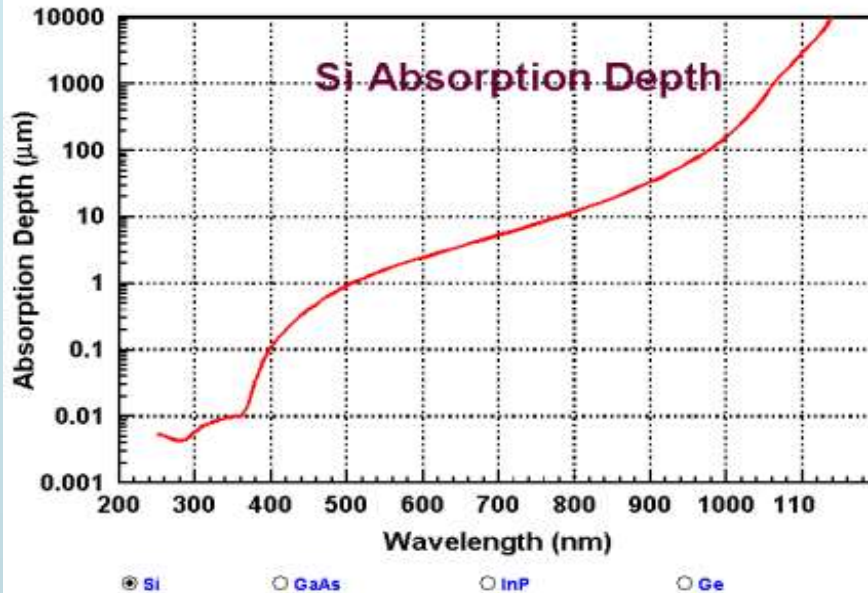
- Absorption coefficient α is a material property.
- Most of the photon absorption (63%) occurs over a distance $1/\alpha$ (it is called **penetration depth δ**)

Absorption Coefficient



Cellules Photovoltaïques

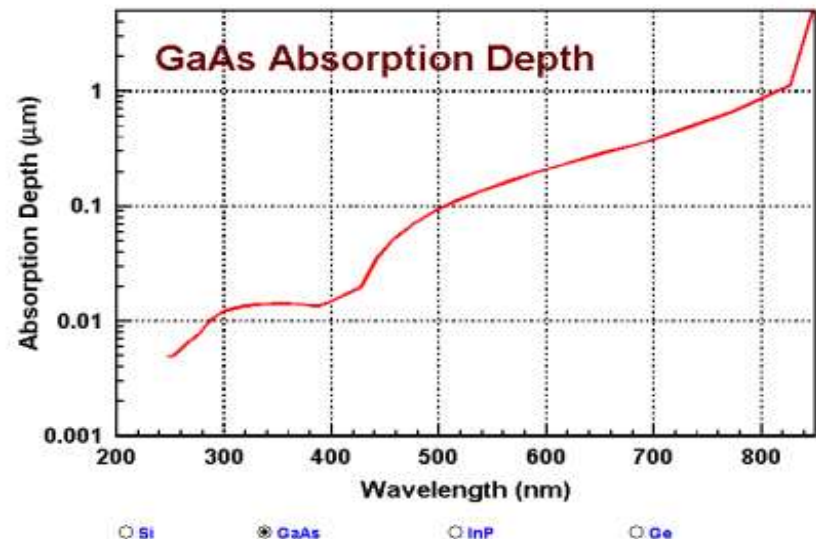
Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration



Il faudra beaucoup plus de silicium pour absorber la même quantité de rayonnement

Intensité de la lumière à la profondeur x :

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

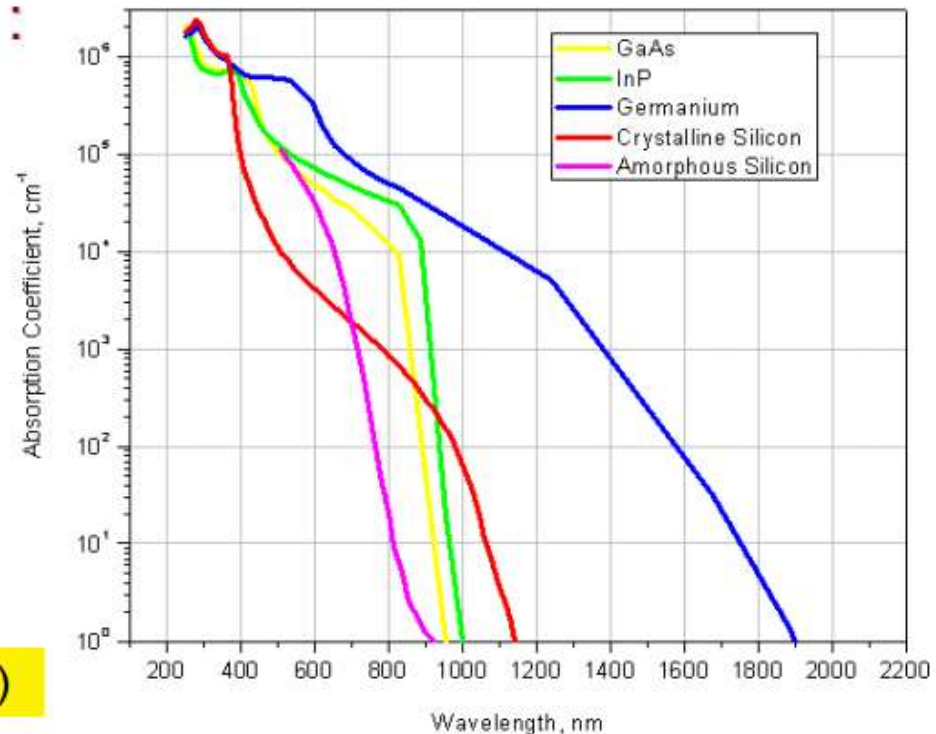


Cellules Photovoltaïques

Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration

Absorption du rayonnement par les matériaux semi-conducteurs :

Matériau	Gap (eV)
InSb	0,2
InAs	0,4
Ge	0,6
CIS	1,06
c-Si	1,12
GaAs	1,43
CdTe	1,44
a-Si	1,72
AlAs	2,2
GaP	2,35
CdS	2,42



$$E_{\text{photon}} \text{ (eV)} = 1240 / \lambda \text{ (nm)}$$

Le coefficient d'absorption permet de déterminer la profondeur de pénétration du rayonnement et l'épaisseur de matériau nécessaire. Il est lié à l'énergie de bande interdite (gap).

Conversion photovoltaïque

Cellules Photovoltaïques

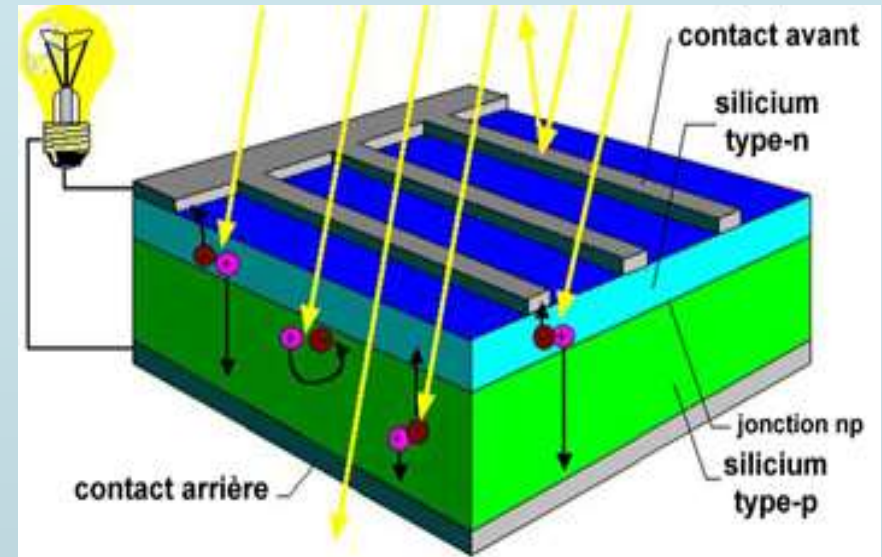
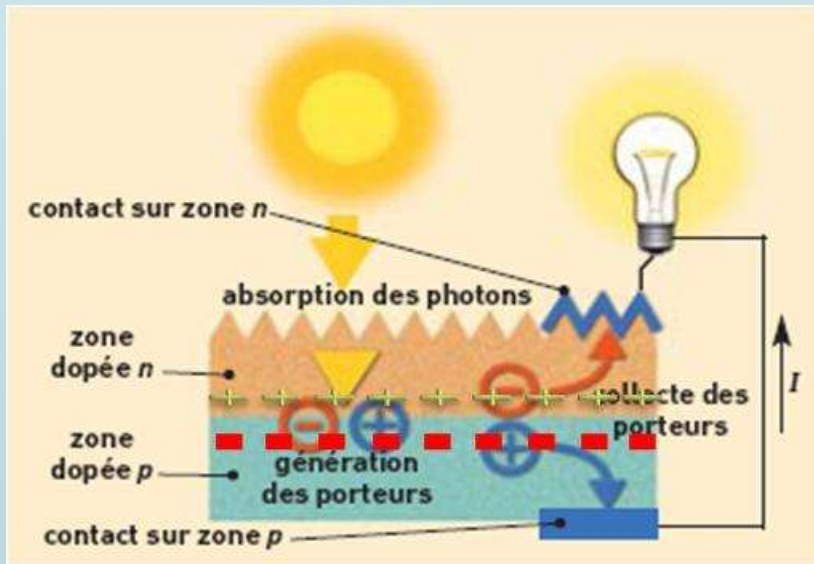
Conversion photovoltaïque

Les 4 étapes de la conversion photovoltaïque

- ▶ **Absorption de photons** par un matériau semi-conducteur;
- ▶ **Formation des paires** électron-trou;
- ▶ **Dissociation des paires** électron-trous via la jonction (inorganique) ou via les interfaces (organique);
- ▶ **Circulation des porteurs** dans la charge;

Cellules Photovoltaïques

Comment fonctionne une cellule photovoltaïque?



La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants:

- Absorption des photons dont $h\nu > E_g$ par le matériau
- Création des paires électron/trou
- Collecte des porteurs créés en les séparant par le champ interne du dispositif (champ **jonction** ou **hétérojonction**)

Cellules Photovoltaïques

Photo-courant

Photo-courant
de diffusion

Photo-courant
de génération

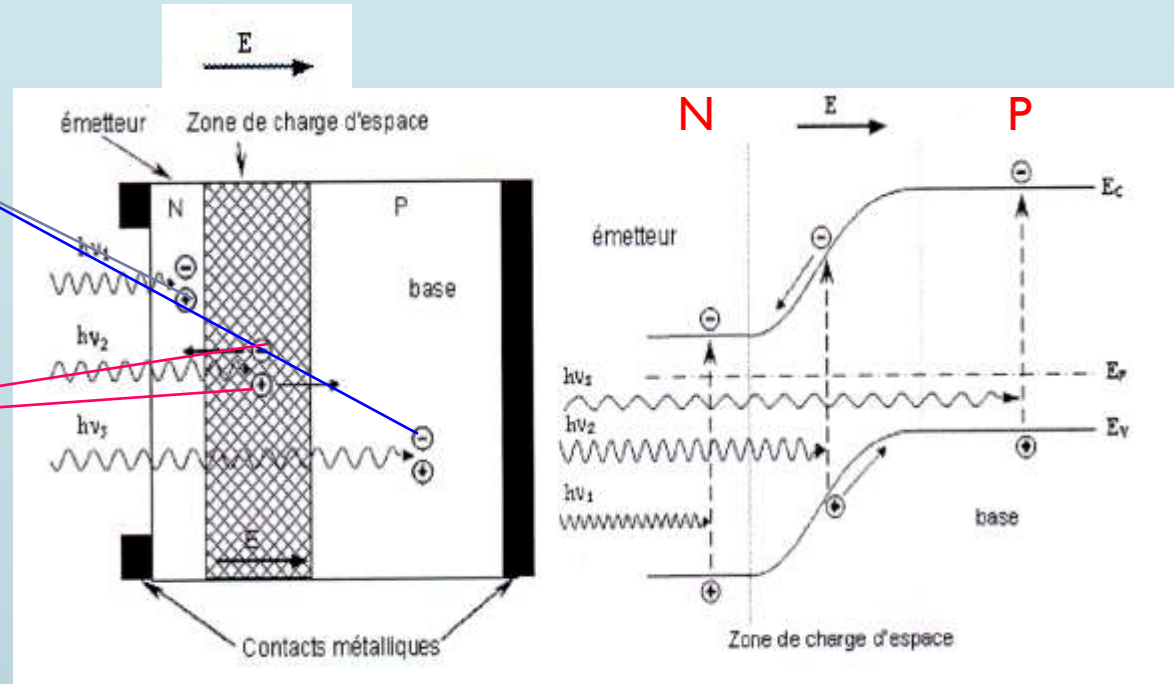


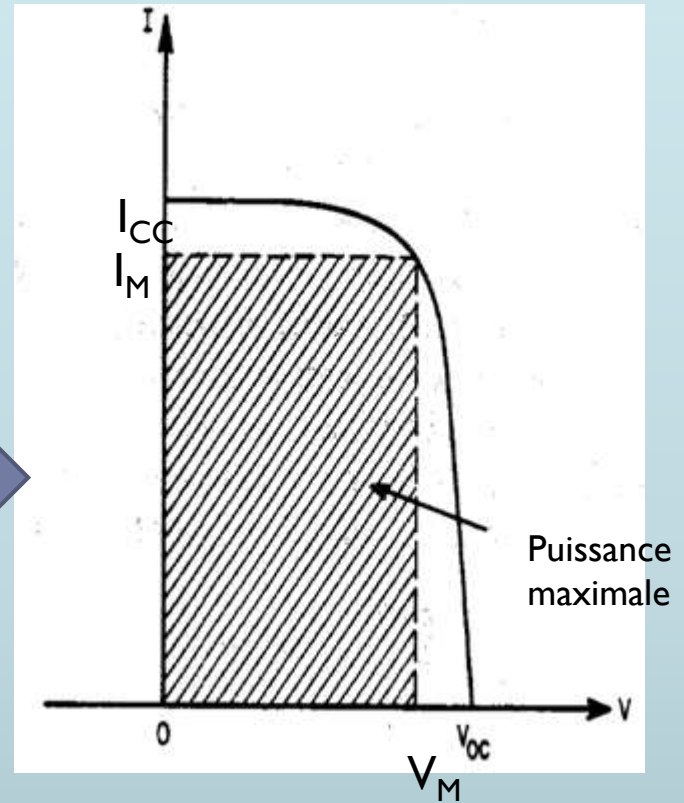
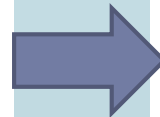
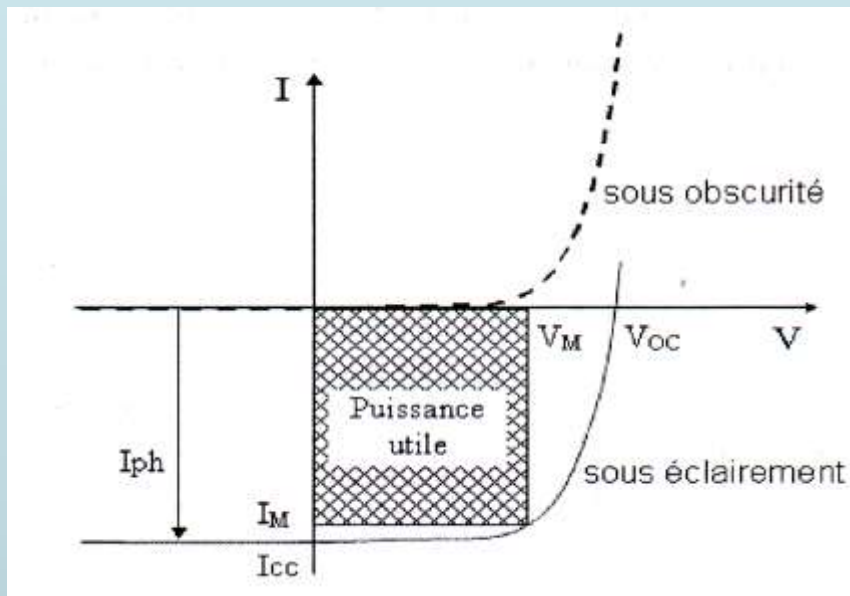
Photo-courant résultant=Photo-courant de diffusion+Photo-courant de génération

Le photo-courant résultant est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse

Paramètres des cellules photovoltaïques

Cellules Photovoltaïques

Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque



Cellules photovoltaïques

Paramètres des cellules photovoltaïques

- ▶ **I_{cc}**: courant de court-circuit
- ▶ **V_{co}**: tension en circuit ouvert
- ▶ **I_M** : courant à la puissance maximale
- ▶ **V_M** : tension à la puissance maximale
- ▶ Puissance maximale délivrée à la charge est donnée par:

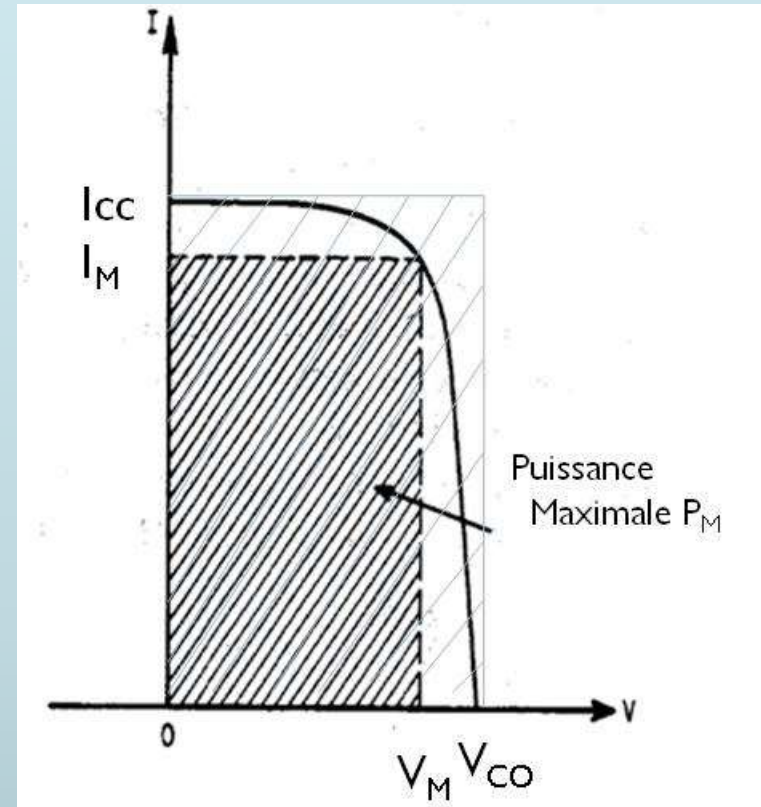
$$P_M = V_M \times I_M$$

- ▶ Facteur de forme défini par:

$$FF = (V_M \times I_M) / (V_{CO} \times I_{CC})$$

- ▶ Le rendement défini par:

$$\eta = P_M / P_i$$



Cellules photovoltaïques

Paramètres des cellules photovoltaïques

