

conversion photovoltaïque

Besoins énergétiques

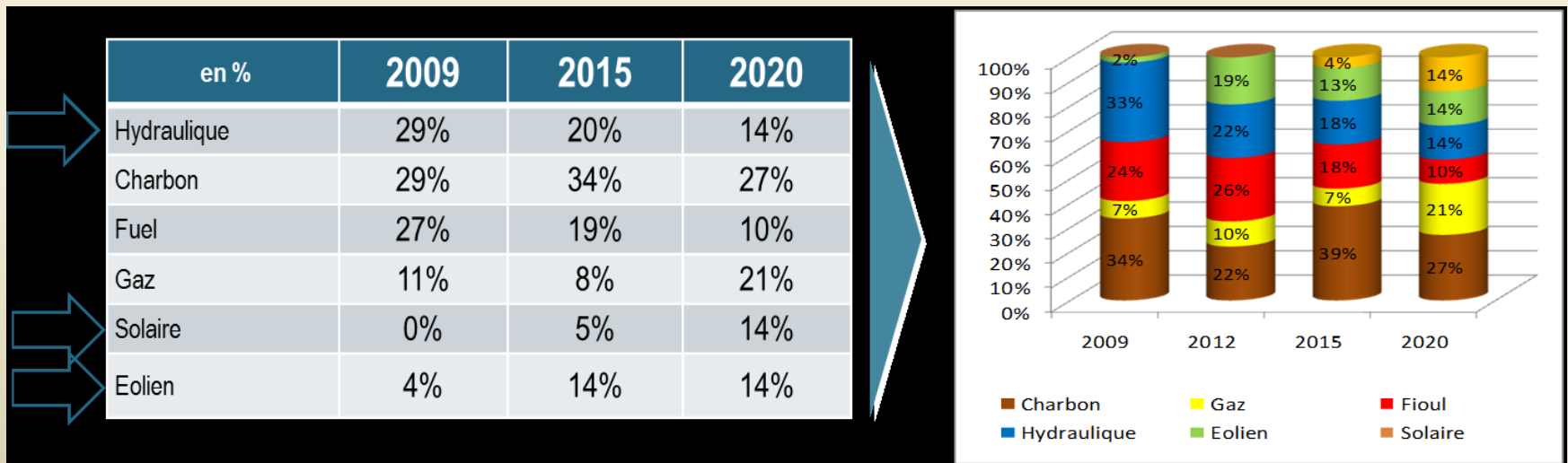
- le taux de croissance moyen annuel de la demande mondiale pour l'électricité, sur la période 2012-2040 sera de l'ordre de 2,1%;
- L'augmentation de la demande énergétique mondiale de 37% d'ici à 2040
- La capacité totale installée passera de 5950 GW en 2013 à plus de 10700 GW en 2040;
- Une capacité totale de près de 7200 gigawatts supplémentaires est nécessaire dont 2450 GW pour remplacer les centrales qui seront déclassées pendant cette période;

Energies renouvelables

- La contribution des énergies renouvelables dans le mix énergétique primaire sera portée de 13% en 2012 à 19% en 2040;
- L'électricité produite annuellement à partir de sources renouvelables augmentera de près de 8420 TWh d'ici 2040
- Le total des puissances ajoutées sera de 2850 GW portant ainsi la capacité totale installée pour les renouvelables en 2040 à 4550 GW
- La contribution de l'éolien en termes de capacité totale projetée (1320 GW d'ici 2040) sera la deuxième plus importante après celles à base de gaz naturel.
- Le solaire photovoltaïque arrive en deuxième position derrière l'éolien, avec une capacité installée qui atteindra 930 GW d'ici 2040.
- La contribution maximale du solaire avoisinera les 15% de la demande maximale en énergie électrique .

Plan Solaire Marocain

- Plus de 3000h/an d'ensoleillement
- Rayonnement moyen de 5kwh/m².jour
- Objectif 2020 :
 - atteindre 14% de la puissance électrique installée de source solaire (42% des sources renouvelables)
 - Installer 2GW
 - Investir 9MM\$



Transformation de l'énergie solaire

- La conversion thermodynamique (CSP concentrated solar power) : le facteur est la chaleur



Transformation de l'énergie solaire

- La conversion photovoltaïque: la facteur est le rayonnement solaire (rendement en constante amélioration)



Prix des modules photovoltaïques

Module type, Origin	€ / Wp	Trend from September 2016	Trend from January 2016
Crystalline modules			
Germany	0.51	0.00 %	-13.56 %
Japan, Korea	0.59	-1.67 %	-10.61 %
China	0.5	-3.85 %	-10.71 %
Southeast-Asia, Taiwan	0.44	-4.35 %	-8.33 %

Source: <http://www.pvxchange.com>

La puissance crête (Wp, Wc) correspond à la puissance électrique maximale que délivre le module dans des conditions d'essai standards (STC, Standard Test Conditions):

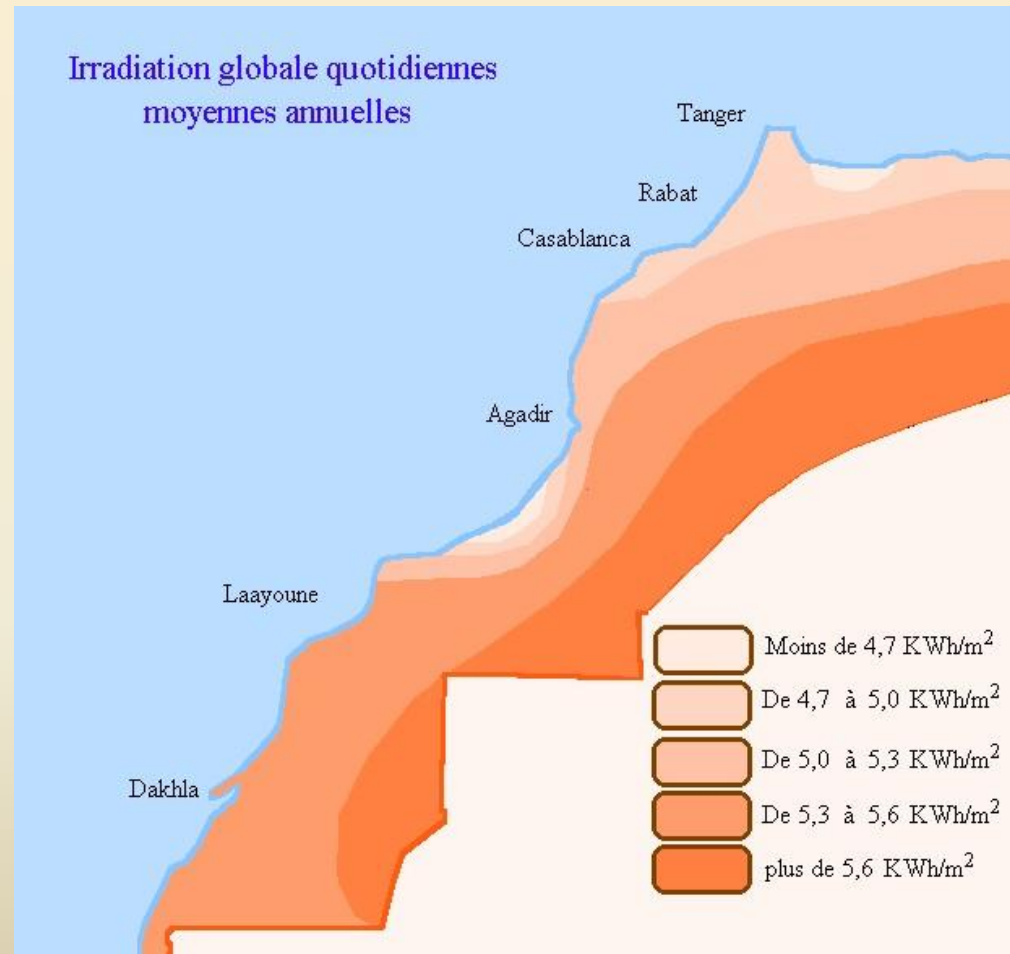
- 1 kW/m² ensoleillement perpendiculaire aux panneaux ;
- 25°C température dans les cellules;
- masse d'air (AM) égale à 1.5.

Fabricants des panneaux solaires

- Le Top 10 a atteint un volume de livraisons de 23,7 GW, en hausse de 10% comparé à 2013, et une part du marché mondial en progression d'un point à 49%.
- Les fournisseurs chinois continuent de dominer le marché mondial du PV
- **Trina Solar** est le nouveau leader, avec des livraisons en augmentation de 30%.

Classement 2014		Classement 2013
1	Trina Solar	2
2	Yingli Green Energy	1
3	Canadian Solar	3
4	Hanwha SolarOne	10
5	Jinko Solar	5
6	JA Solar	9
7	Sharp	4
8	ReneSola	7
9	First Solar	6
10	Kyocera	8

Distribution horizontale globale quotidienne de rayonnement au Maroc en kWh/(m².jour)



La ressource est abondante (5% des déserts suffiraient pour alimenter la planète), mais la source (le soleil) n'est pas toujours disponible (nuit, nuages), ce qui implique un stockage, maillon faible du système.

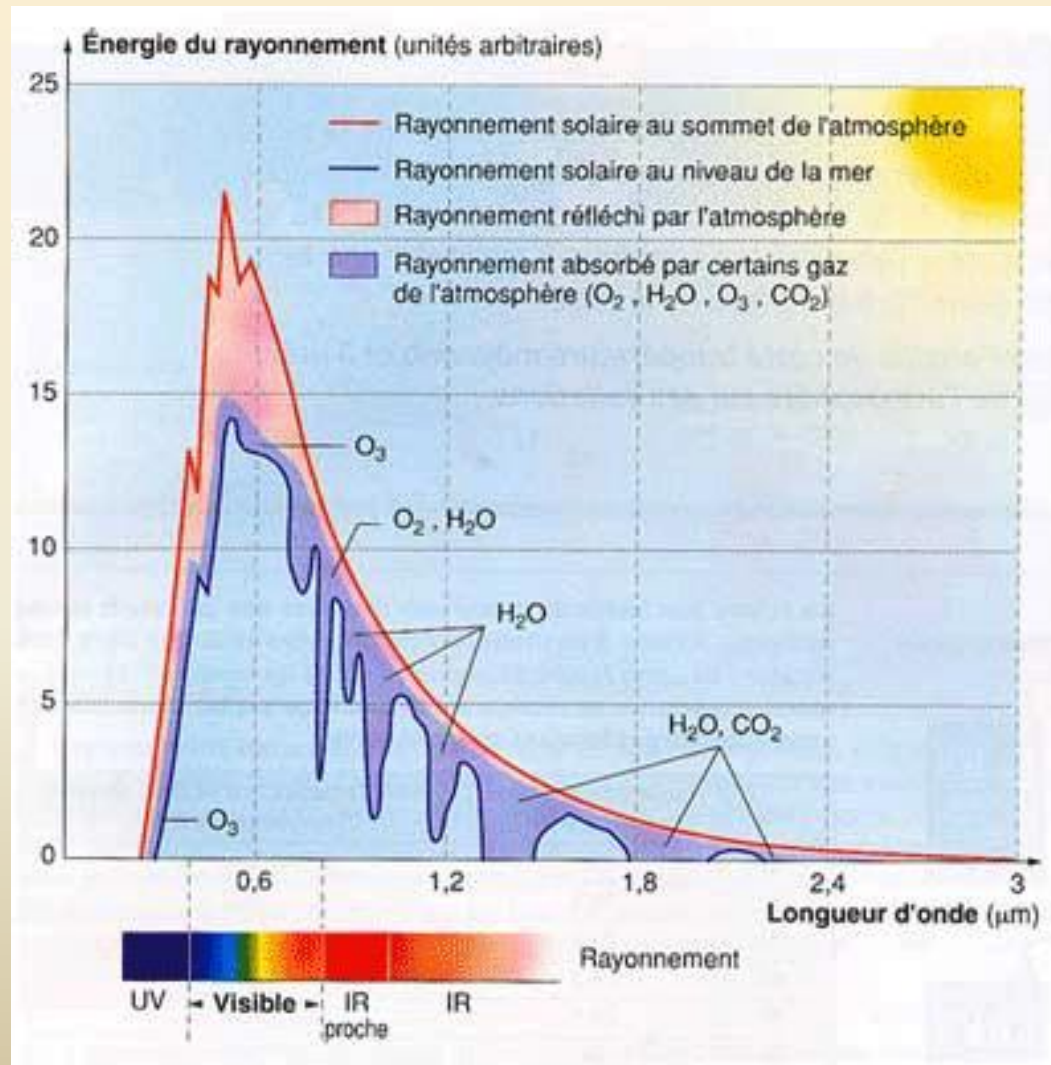
Fonctionnement théorique des photopiles

- La création de charges électriques libres sous l'action du rayonnement solaire ou effet photoélectrique,
- La collection ou collecte de ces charges qui fournissent une différence de potentiel aux bornes du dispositif.

L'ensemble de ces deux effets s'appelle l'effet photovoltaïque.

I- Effet Photoélectrique

spectre solaire



I- Effet Photoélectrique

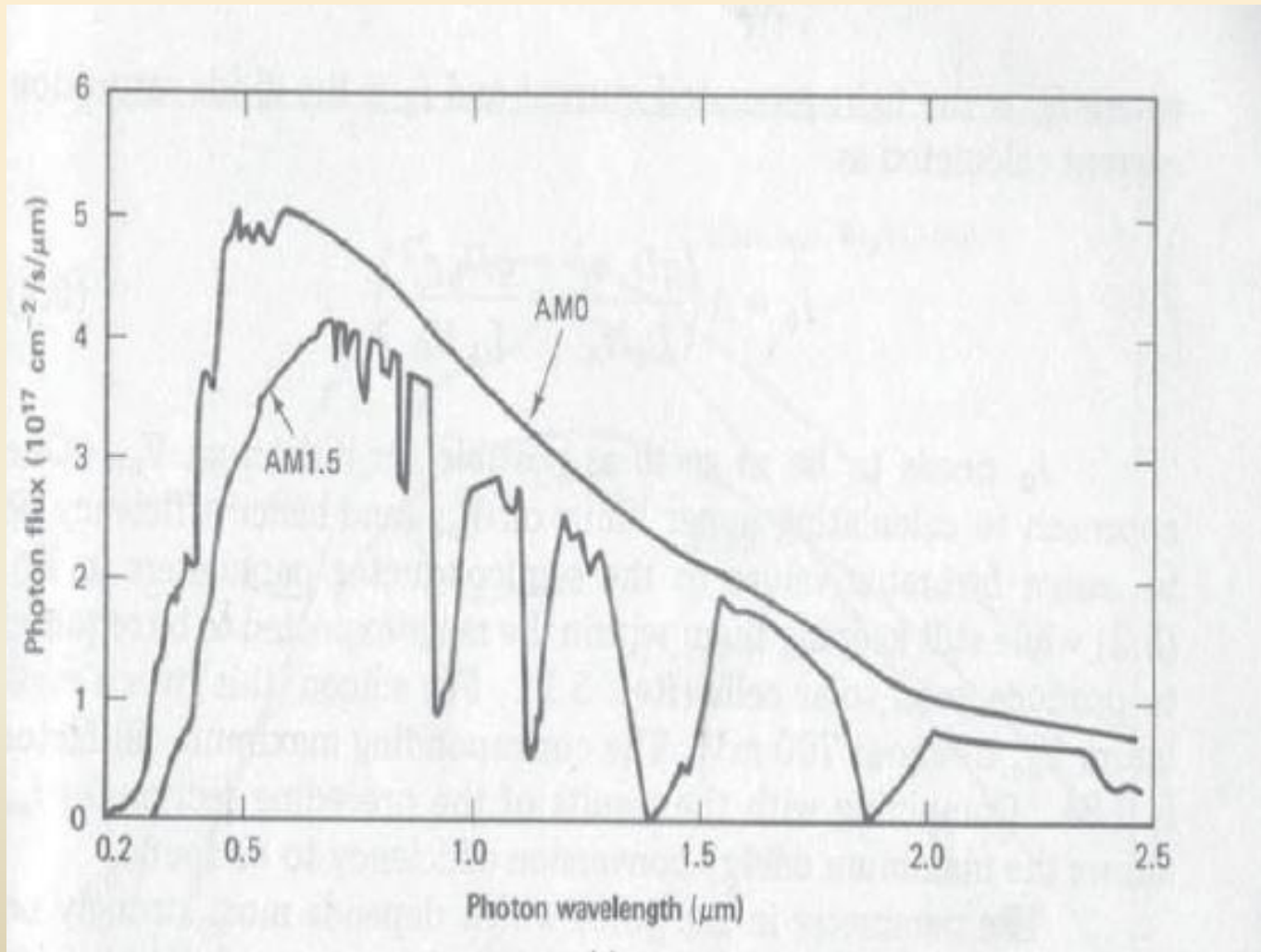
- Les photons: la lumière se comporte comme une onde constituée de « grains d'énergie »,

$$w = h \nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)} eV$$

- L' énergie U contenue dans une onde, à λ donné, est égale à :

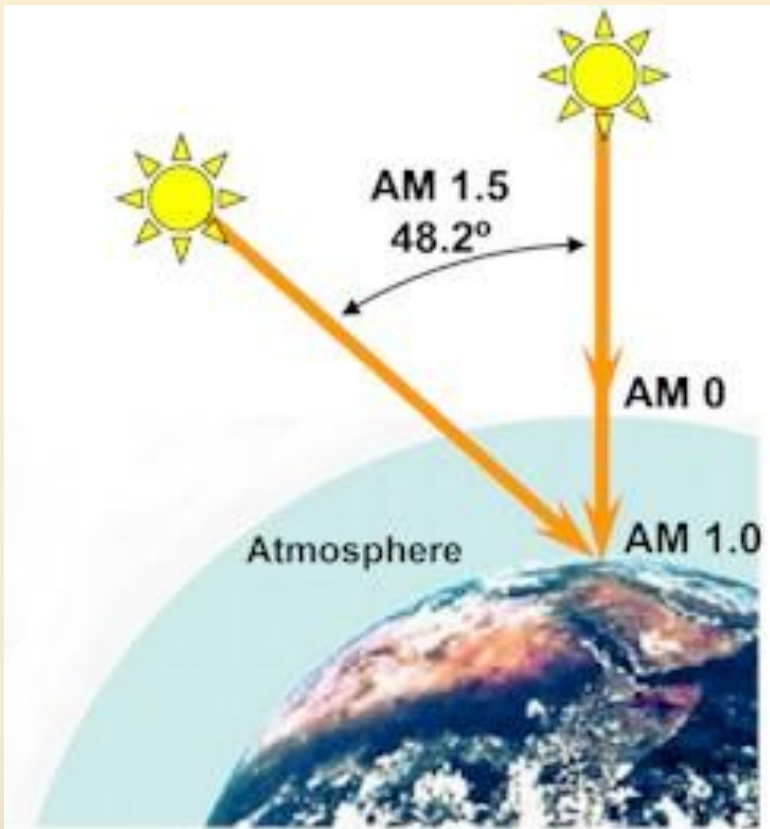
$$U_{\lambda} = n_{\lambda} \cdot w_{\lambda}$$

I- Effet Photoélectrique



Flux des photons dans le spectre solaire

Masse d'air



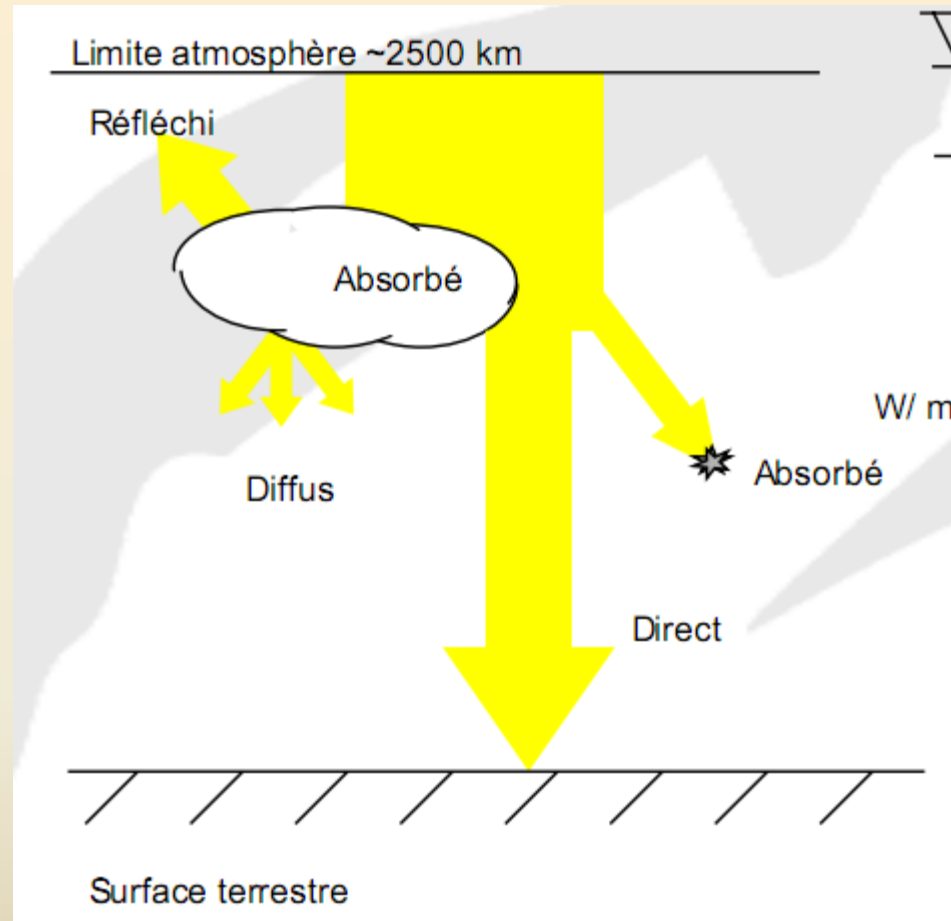
AM0: $W = 1.360 \text{ W/m}^2$ (hors atmosphère, constant solaire).

AM1: Soleil au zénith (au niveau de la mer). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie.

AM1.5: $W \sim 1.000 \text{ W/m}^2$ (970 W/m^2)

$$AM_i \text{ avec } i = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

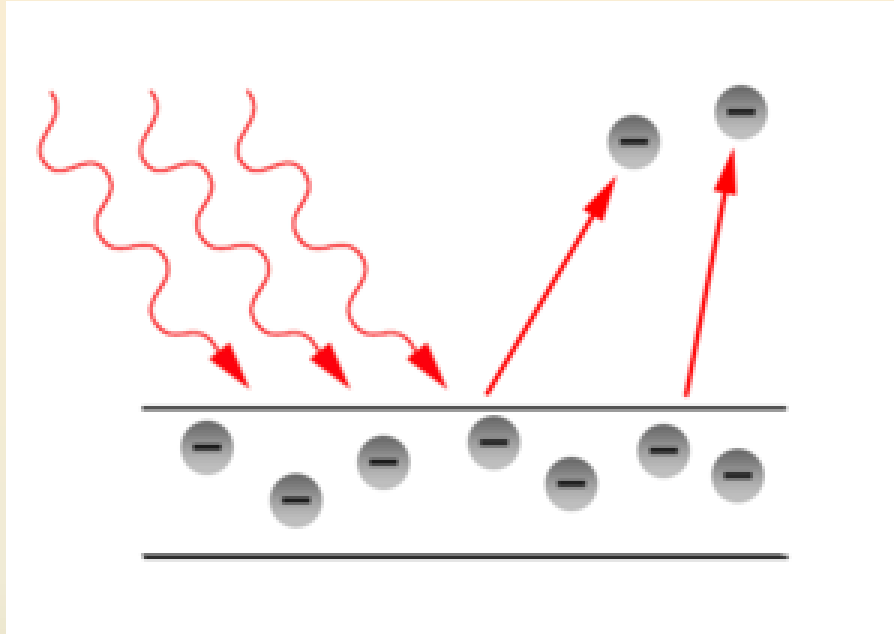
Radiation direct et diffuse



Radiation direct et diffuse

- En temps clair, la composante diffuse de la radiation est d'environ 10 à 20% de la radiation totale reçue quotidiennement par une surface horizontale,
- Ce pourcentage croit lors des journées nuageuses (elle peut être prépondérante),
- Temps nuageux entraîne, en plus de la baisse de la radiation reçue, une augmentation de la composante diffuse dont la composition spectrale est différente,
- La composition spectrale change pour la composante diffuse de la lumière solaire (déplacement vers les faibles λ),
- Incertitudes sur la distribution de la composante diffuse suivant les directions entraîne une incertitude dans le calcul des niveaux de radiation sous inclinaison par rapport aux données des surfaces horizontales.

Effet Photoélectrique



L'effet photoélectrique ;
l'onde
électromagnétique
incidente éjecte les
électrons du matériau

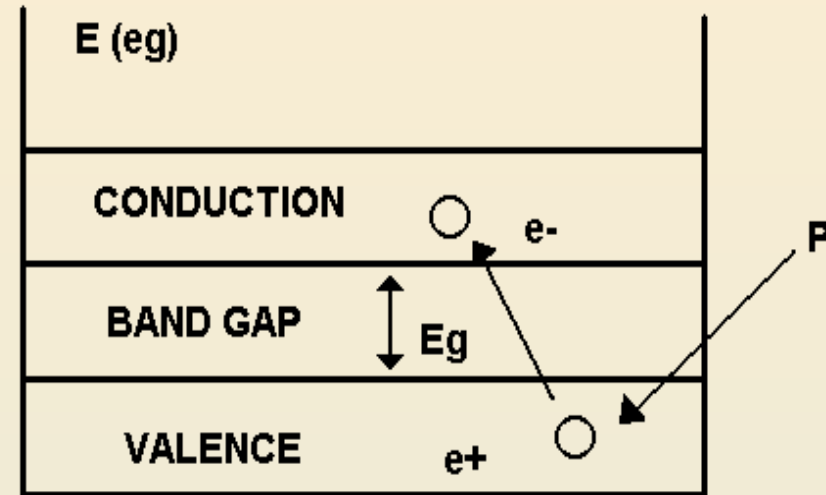
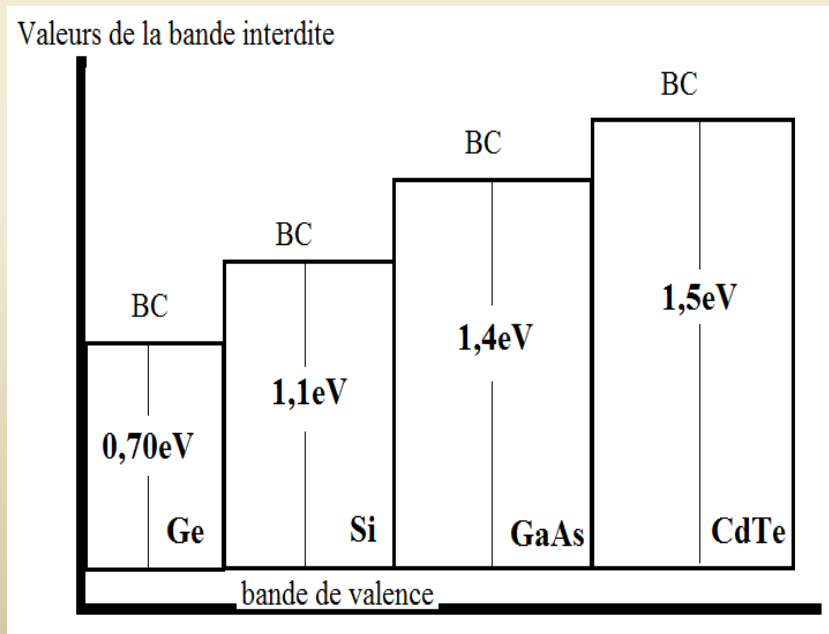


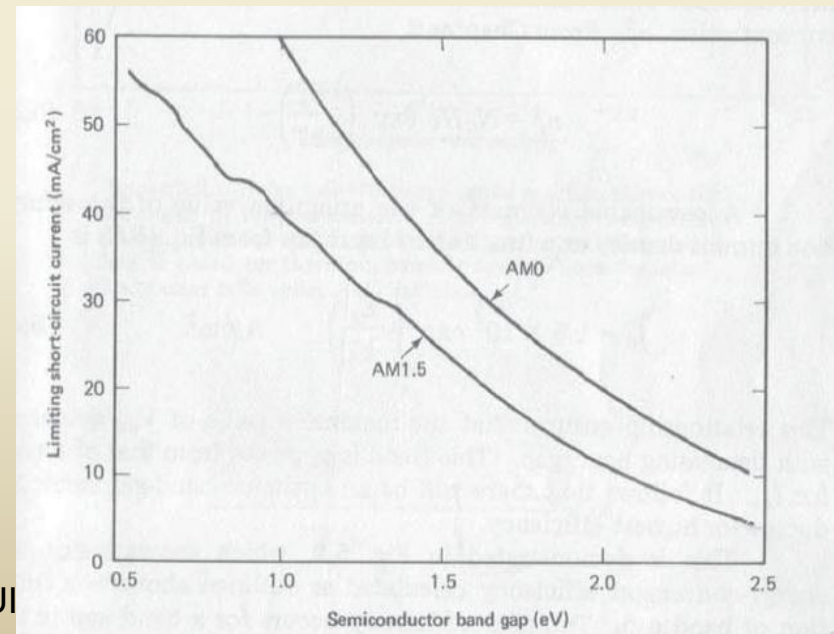
Schéma explicatif du
phénomène en utilisant
la notion de la bande
interdite « gap ».

Création de porteurs libres ou effet photoélectrique

- Les effets produits par les différents photons du rayonnement dépendent de:
 - La valeur de leur quantum d'énergie,
 - La valeur de la bande interdite E_g de l'absorbeur donc de sa nature et de son dopage.



Pr REGRAGUI



II- Collecte des charges électriques

- La création de paires électron-trou dans un matériau
- semi-conducteur n'entraîne pas de variation de potentiel,
- Donc les paires créées par les photons se recombinent rapidement,
- D'où la photopile fait appel au dispositif qu'est la jonction PN.

IV-1: Définition de la jonction pn

- C'est la juxtaposition de deux régions de types différents (N et P),
- La différence de densité des donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N (jonction abrupte).

SEMI-CONDUCTEURS

Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il est pur. Il n'a pas été dopé et son comportement électrique ne dépend que de la structure électronique du matériau.

Les porteurs sont tous créés par génération thermique, c'est-à-dire en excitant des électrons dans la bande de conduction grâce à une hausse de la température. En conséquence, un nombre égal d'électrons et de trous est créé. Le niveau de Fermi se situe au milieu du gap. À l'équilibre et au zéro absolu, la bande de valence est occupée complètement par les électrons (pas de trous) tandis que la bande de conduction est vide.

Ces semi-conducteurs ne conduisent pas, ou très peu, le courant, excepté si on les porte à haute température.

SEMI-CONDUCTEURS

Semi-conducteur type N

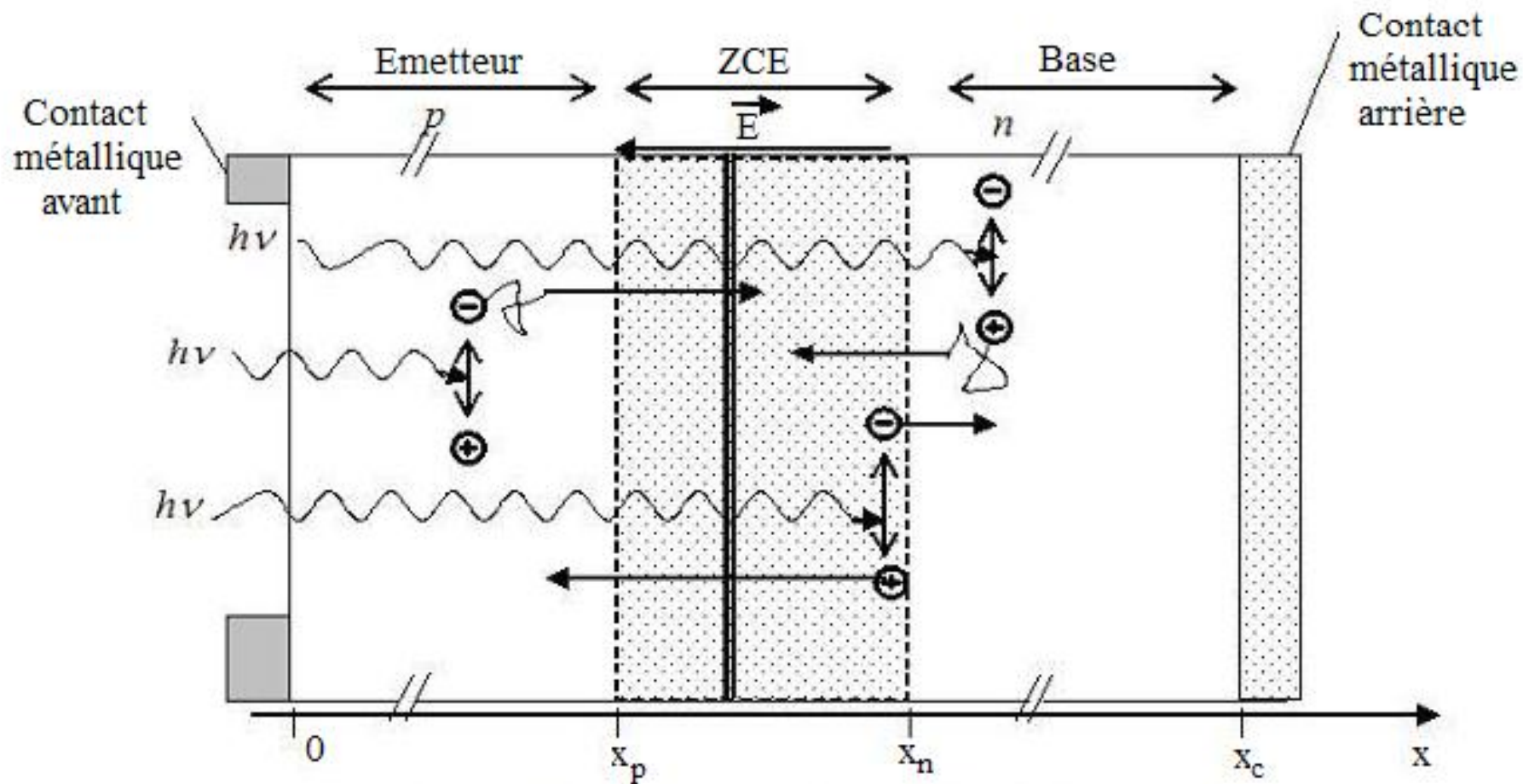
- Les semi-conducteurs de type N sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. Le but d'un dopage N est de produire un excès d'électrons. Afin de comprendre comment un tel dopage s'effectue, considérons le cas du silicium (Si). Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente. Si un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux du groupe V de la table périodique (par exemple, le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Aux températures ordinaires, quasiment tous ces électrons le sont. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Et parce que les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à « donner », ils sont appelés atomes donneurs. Les matériaux ainsi formés sont appelés semi-conducteurs de type N parce qu'ils contiennent un excès d'électrons négativement chargés.

SEMI-CONDUCTEURS

Semi-conducteur type P

- Les semi-conducteurs de type P sont également des semi-conducteurs extrinsèques. Le but d'un dopage P est de créer un excès de trous. Dans ce cas, un atome trivalent, généralement un atome de Bore, est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin. En conséquence, il manque un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents, et l'atome peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires ; ces atomes sont appelés atomes accepteurs.

III: Effet photovoltaïque

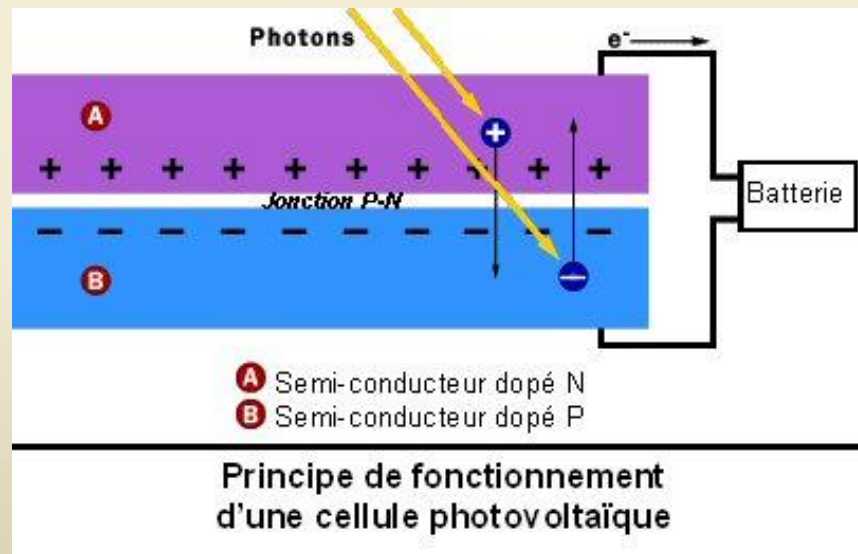


IV-2: Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique

- Dans le modèle de la jonction abrupte, La différence ($N_d - N_a$) passe brutalement dans le plan $x=0$ d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N,
- Les trous majoritaires dans la région de type P diffusent vers la région de type n où ils se recombinent avec les électrons (il en est de même pour les électrons dans l'autre sens),

IV-2: Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique

- Apparition d'une charge d'espace résultant de la présence de donneurs et d'accepteurs ionisés.
- Apparition au voisinage de la jonction d'un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires,
- A l'équilibre thermodynamique, il y a équilibre entre la force électrique et celle de diffusion.



IV-3: Charge d'espace

- Nous supposons que dans chaque région la conductivité est de nature extrinsèque,
- La charge d'espace dans chaque région s'écrit:

$$\rho(x) = e[N_d - N_a + p(x) - n(x)]$$

- La densité de charge s'écrit dans l'hypothèse des frontières abruptes:

– $\rho(x) = 0$	pour $x < x_p$ et $x > x_n$
– $\rho(x) = -eN_a$	pour $x_p < x < 0$
– $\rho(x) = eN_d$	pour $0 < x < x_n$

IV-4: Tension de diffusion

- Le potentiel varie d'une valeur V_p dans la région neutre de type P à une valeur V_n dans la région neutre de type N:

$$V_d = V_n - V_p$$

- La densité des porteurs dans chacune des régions s'écrit:

$$n_n = N_c \exp\left(-\frac{E_{c_n} - E_{F_n}}{KT}\right)$$

$$n_p = N_c \exp\left(-\frac{E_{c_p} - E_{F_p}}{KT}\right)$$

IV-4: Tension de diffusion

- A l'équilibre thermodynamique on a :

$$E_{F_n} = E_{F_p}$$

$$\Rightarrow E_{c_p} - E_{c_n} = KT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

- Puisque:

$$E_{c_p} = -eV_p$$

$$E_{c_n} = -eV_n$$

$$\Rightarrow V_d = V_n - V_p = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

IV-5: La barrière de potentiel

- Avant la formation de la jonction:

$$\delta E_{F_p} = E_{F_p} - E_v = KT \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right)$$

$$\delta E_{F_n} = E_c - E_{F_n} = KT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right)$$

- Après formation de la jonction:

$$eV_d = E_G - \delta E_n - \delta E_p = KT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

avec: $n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_G}{KT}\right)$

IV-5: La barrière de potentiel

- Il existe une variation de potentiel en traversant une jonction pn même si la polarisation extérieure est nulle,
- A dopages N_d et N_a identiques, Plus E_G augmente plus V_d augmente,
- Pour E_G fixé, plus le produit $N_d N_a$ augmente plus V_d augmente,
- Lorsque la température de la jonction augmente, E_G varie peu et la hauteur de la barrière de potentiel diminue.

IV-6: Potentiel et champ électrique dans la zone de charges d'espace

- Intégrant l'équation de Poisson:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

- Pour $x_p < x < 0$ on a :

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon} (x - x_p)^2 + V_p$$

- Pour $0 < x < x_n$ on a :

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x - x_n)^2 + V_n$$

IV-6: Potentiel et champ électrique dans la zone de charges d'espace

- Le champ électrique est donné par

$$E = - \frac{dV(x)}{dx}$$

- Pour $x_p < x < 0$ on a :

$$E(x) = - \frac{eN_a}{\epsilon} (x - x_p)$$

- Pour $0 < x < x_n$ on a :

$$E(x) = \frac{eN_d}{\epsilon} (x - x_n)$$

IV-7: Largeur de la zone de charges d'espace

- en $x=0$ de la composante normale du vecteur déplacement donne:

$$\varepsilon E_{0^-} = \varepsilon E_{0^+} \Rightarrow eN_a x_p = -eN_d x_n \Leftrightarrow N_a w_p = N_d w_n$$

- La largeur de la zone de charge d'espace est donnée à partir de la continuité du potentiel en $x=0$:

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon} (x_p)^2 + V_p = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x_n)^2 + V_n$$

$$\Rightarrow w_n = L_{D_n} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \right]^{1/2}$$

et

$$w_p = L_{D_p} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \right]^{1/2}$$

IV-8: Capacité de la jonction

- La zone de déplétion est formée de charges fixes positives et négatives, tel un condensateur.
- En analogie avec un condensateur classique, la capacité dans la région de déplétion est égale à:

$$C = \frac{\epsilon A}{w}$$

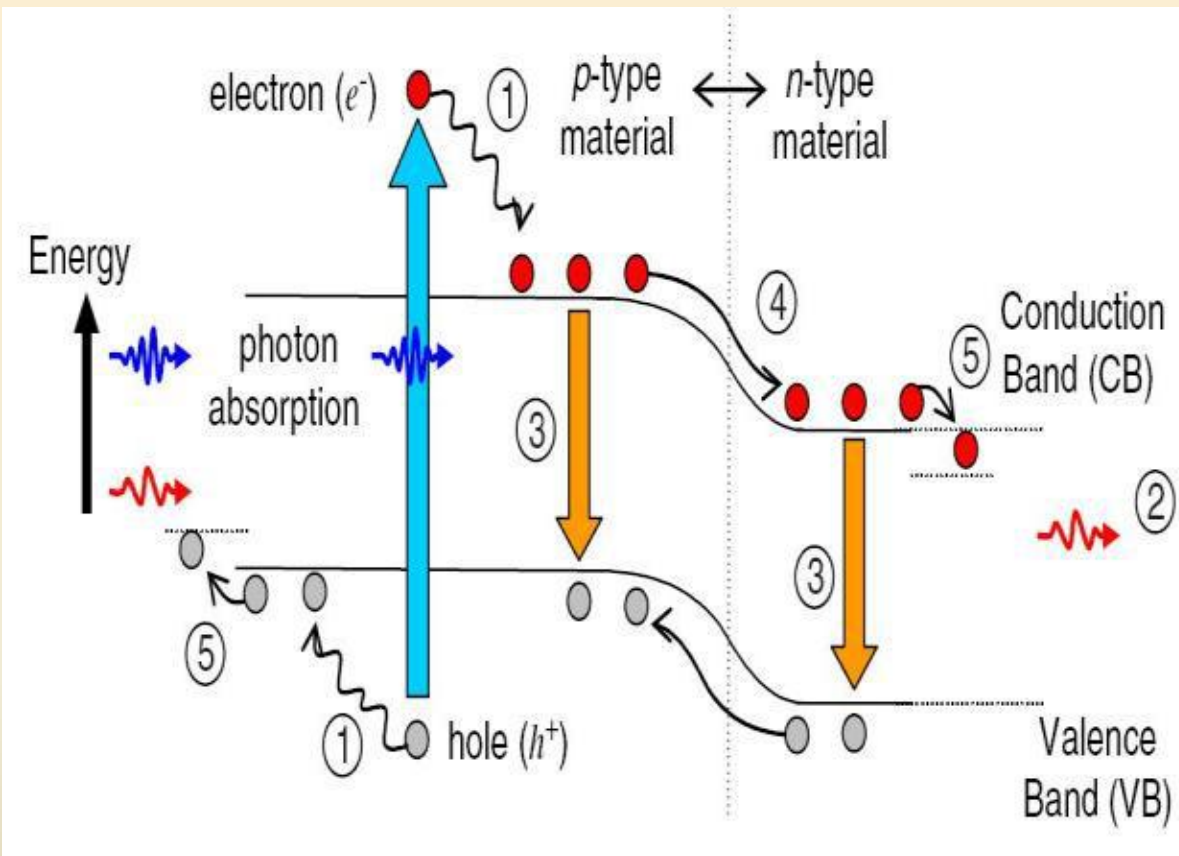
avec $w = w_n + w_p$

- Si une région de la diode est fortement dopée, on a:

$$\frac{C}{A} = \left[\frac{q \epsilon N}{2(V_d + V_a)} \right]^{1/2}$$

- En traçant C^2 en fonction de $(1/V_a)$, on peut déterminer N .

V- Le rendement des photopiles



- (1) Perte sous forme de chaleur
- (2) Énergie du photon incident plus faible que le gap
- (3) Perte par recombinaison
- (4) Flux du courant
- (5) Perte due au contact

V- Le rendement des photopiles

- Une très faible partie de l'énergie primitivement reçue par le dispositif est collectée.
- Le rendement total de la photopile peut s'écrire:

$$R = \xi . H . K . M$$

- ξ : réflexion parasite de la lumière,
H : rapport énergie utilisée à l'énergie absorbée,
K : efficacité de collecte,
M : Limitation de rendement par les différentes résistances internes.

V-1: La perte par réflexion

(Pour le Si, 30% de lumière incidente est réfléchi)

Une partie de l'énergie incidente est réfléchi au moment de l'impact des photons et perdue pour l'utilisation

$$\xi = \frac{\text{nombre de photons absorbés}}{\text{nombre de photons incidents}}$$

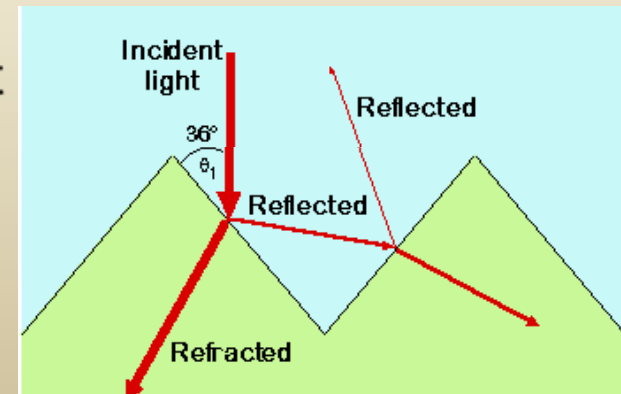
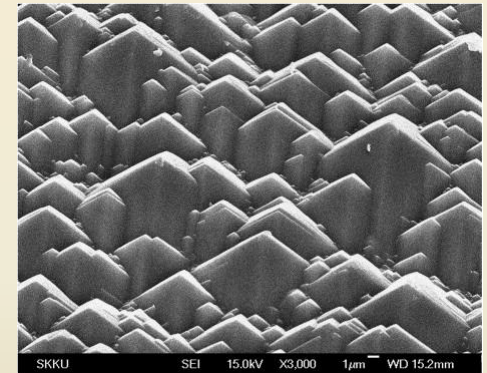
La valeur de ξ est fonction de:

- ✓ L'état de surface qui est exposée à la lumière d'où gravure de la surface
- ✓ La nature du matériau

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad \text{d'où dépôt de couche anti reflet}$$

$$\phi = \phi_0(1 - R)e^{-\alpha d} \quad \text{où } \alpha = \frac{4\pi\nu k}{c}$$

Pr REGRAGUI



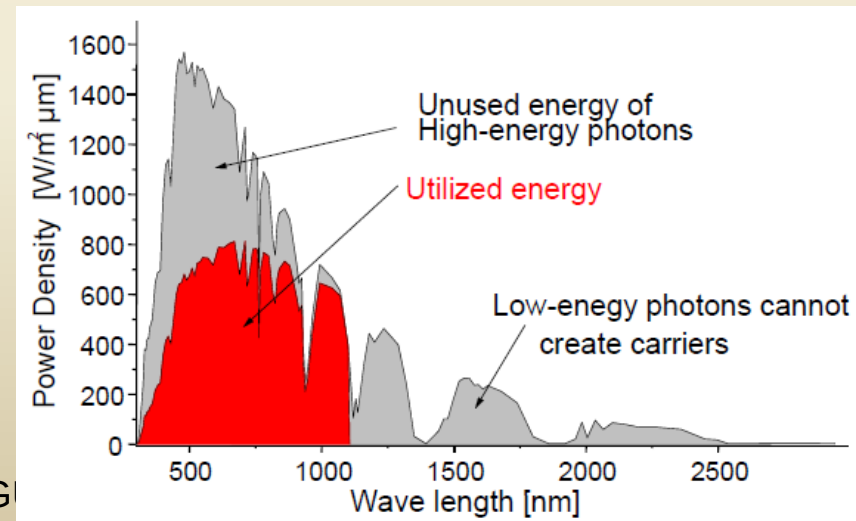
V-2: Rendement de transport H

- Ce facteur exprime la perte de rendement de l'effet photoélectrique:

$$H = \frac{\text{Énergie utilisable pour libérer (créer) des charges électriques}}{\text{Énergie des photons absorbés par le matériau}}$$

H dépend de:

- ✓ La valeur du gap de l'absorbeur
- ✓ De la composition de lumière.

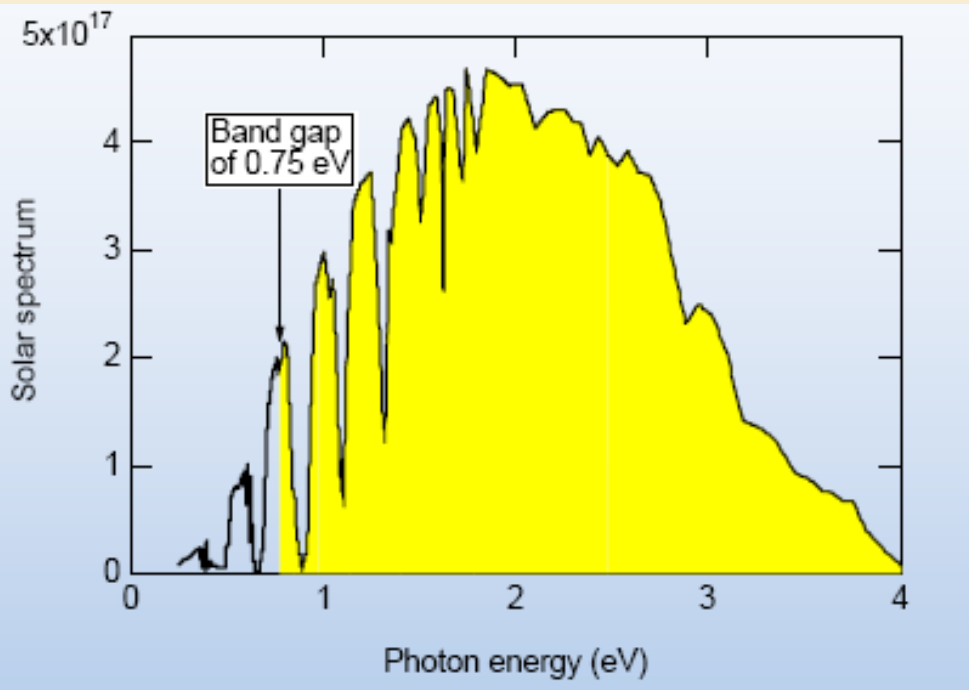


Absorption du spectre solaire

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

$$I_o = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right)$$

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

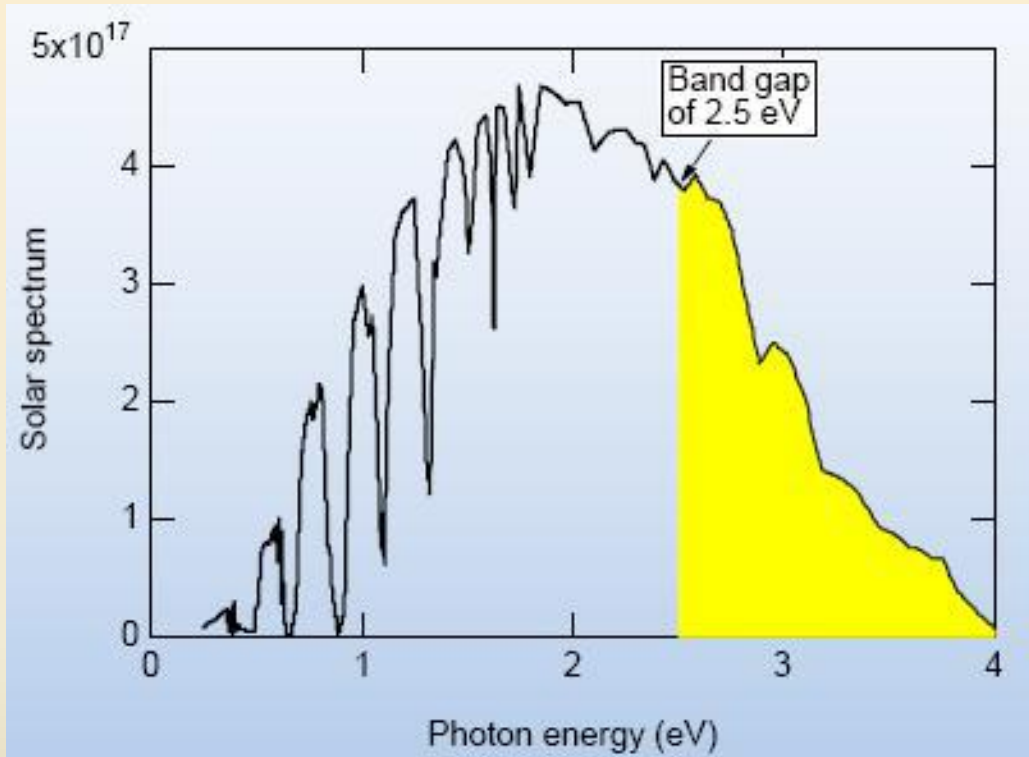


Si $w > E_g$ il y a effet photoélectrique (c.-à-d. création d'une paire électron trou);

L'excédent d'énergie du photon par rapport à E_g est également transformé en chaleur.

- Generation d'un grand courant (I_{cs})
- Faible voltage V_{co} (E_g diminue)
- L'excès d'énergie incidente est perdue sous forme de chaleur

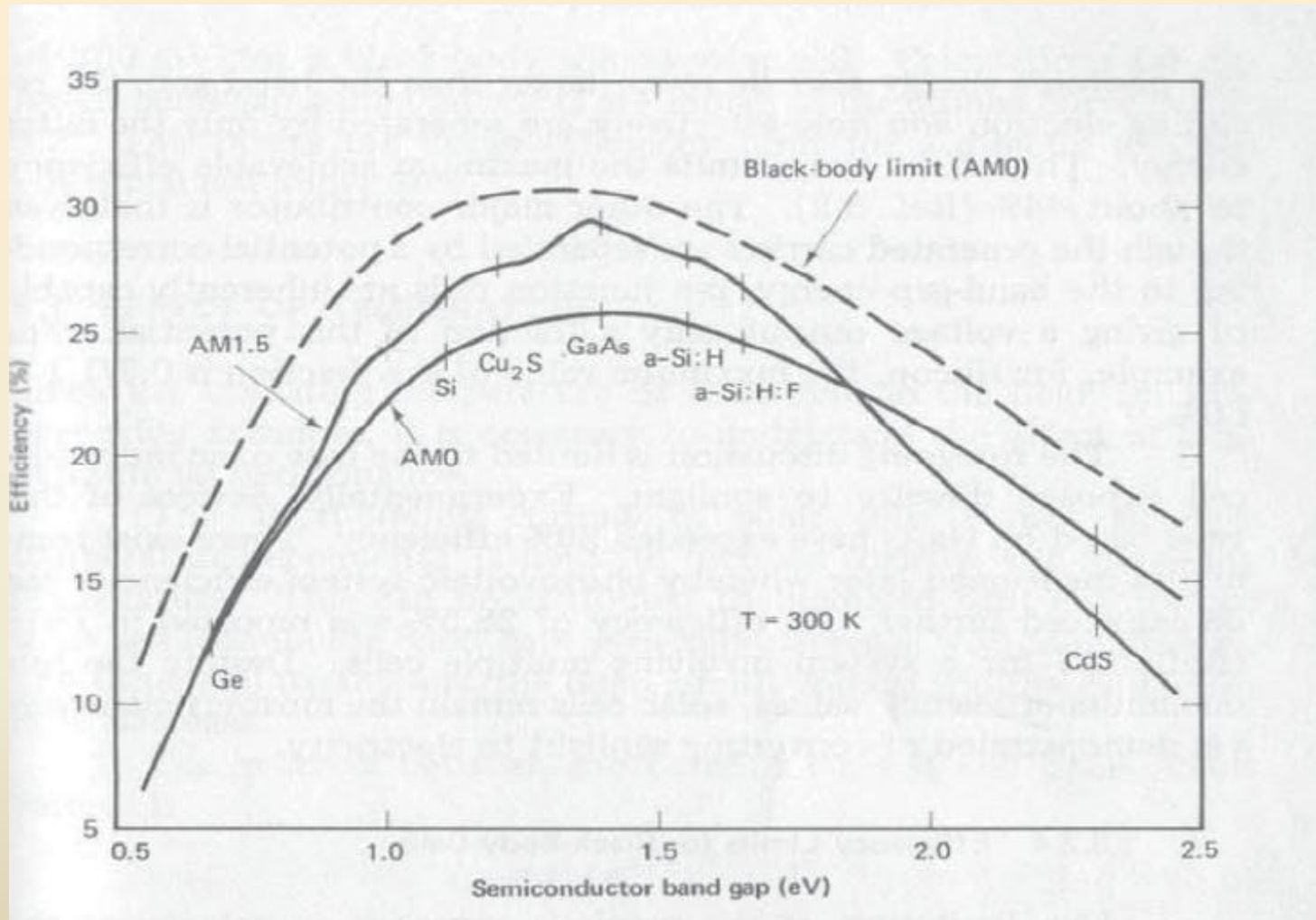
Absorption du spectre solaire



$w < E_g$ aucune création de porteur libre (énergie du photon transformée en énergie thermique)

- Generation d'un grand voltage V_{co}
- Faible courant (I_{cc})
- La bande de faible énergie incidente est perdue

Absorption du spectre solaire



Limite du rendement des cellules solaires en fonction du gap

Pr REGRAGUI

V-3: Efficacité de collecte

- C'est le rapport du nombre de charges collectées réellement aux bornes de la cellule photovoltaïque par le nombre des charges « théoriquement utilisables »:

$$K = \frac{\text{Nombre de charges collectées}}{\text{Nombre de charges « théoriquement utilisables »}}$$

- Ce coefficient comprend deux fonctions statistiques:
 - Une probabilité P d'interaction des photons avec l'absorbeur pour libérer une paire électron-trou ou Probabilité de choc,
 - Une probabilité G de collection de ces paires.

V-3-1: Probabilité de choc

- La probabilité de choc est définie comme suit:

$$P = \frac{\text{Nombre de charges créées réellement}}{\text{Nombre de charges utilisables suivant le facteur H}}$$

La probabilité de choc dépend de l'épaisseur des zones p et n et de leur coefficient d'absorption. Ces facteurs ont une certaine importance pour la géométrie de la cellule photovoltaïque et pour le choix du matériau.

V-3-2: Probabilité de collecte G

- La probabilité de collecte G exprime donc la probabilité pour une charge libérée en un point donné d'atteindre sans recombinaison la jonction où elle sera accélérée par le champ électrique:

$$G = \frac{\text{Nombre de charges collectées}}{\text{Nombre de charges créées réellement}}$$

La zone de transition de la jonction, seule région capable de séparer les paires électron-trous créées par effet photoélectrique, devra se trouver aussi proche que possible de la région de génération des porteurs minoritaires.

V-3-3: Efficacité de collecte

- Le facteur de collecte K correspondant à la perte de rendement introduite par ces deux coefficients s'écrit:

$$K = P.G$$

- L'analyse de leur intervention a mis en évidence l'influence contradictoire de l'épaisseur

V-3-3: Efficacité de collecte

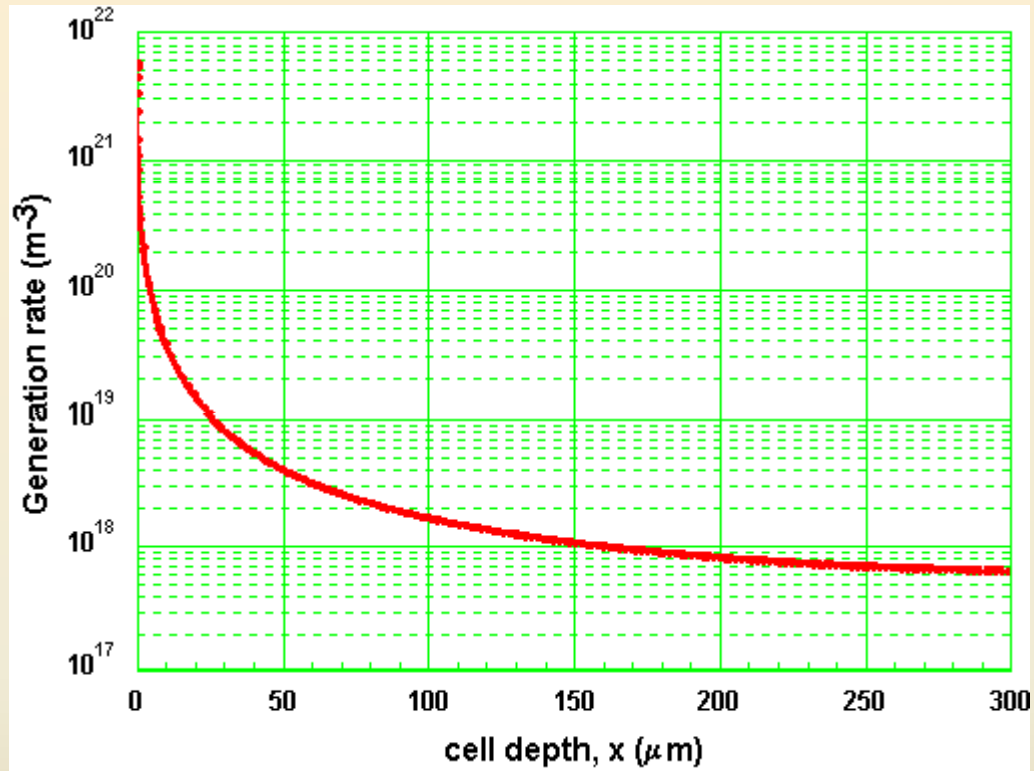
a. Influence de l'épaisseur:

Pour une valeur de λ donnée et un matériau donné, l'énergie utilisable, contenue dans l'ensemble des photons reçus dans le matériau est transformée en énergie électrique suivant:

$$U = aU_0 e^{-\alpha x}$$

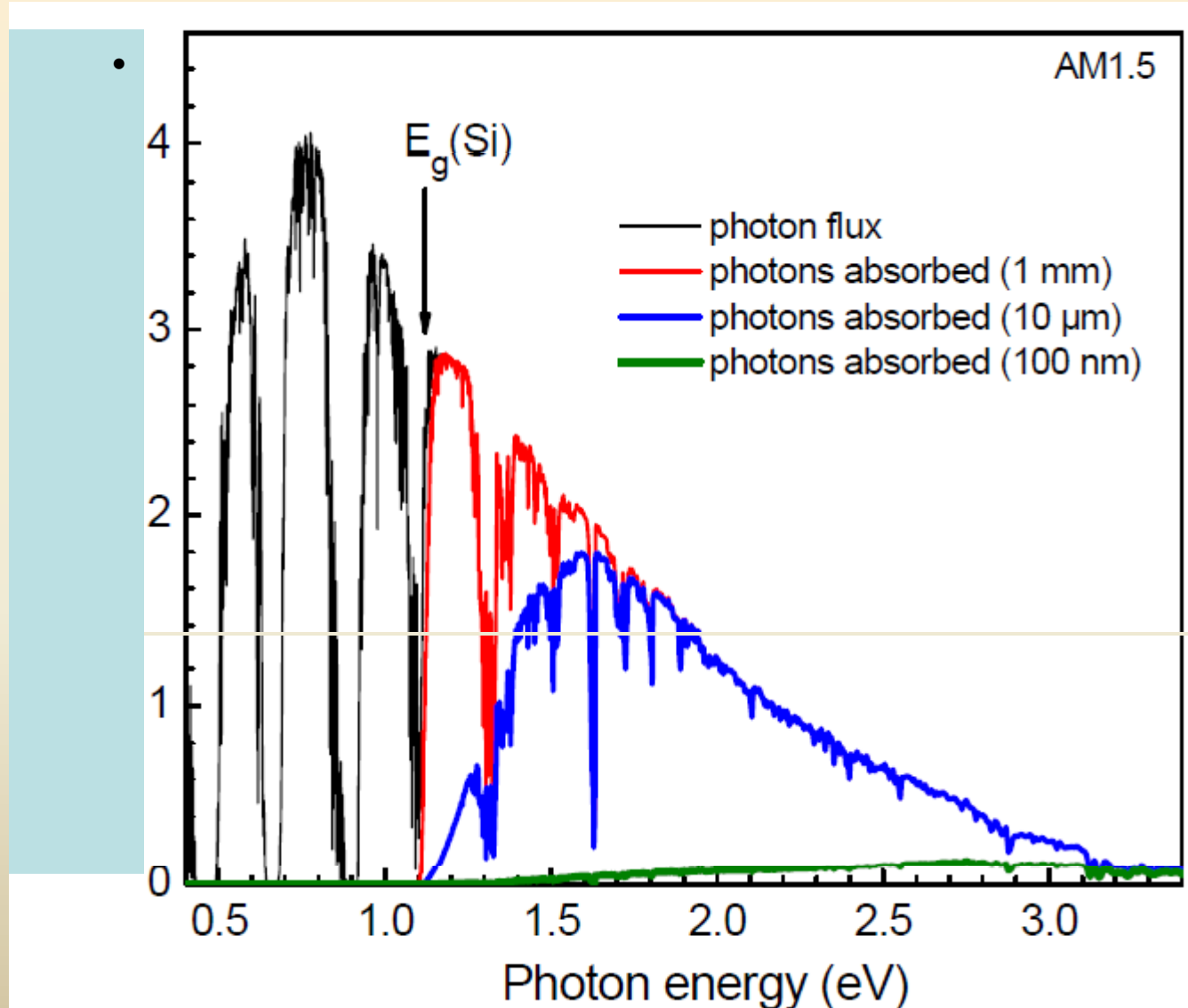
Plus l'épaisseur x est grande plus l'énergie disponible des photons sera utilisée pour la génération de paires électron-trous, mais inversement le processus de recombinaison est grand (la point de création est loin des électrodes de collecte) donc il y a un compromis à réaliser dans lequel peut intervenir le coefficient d'absorption

V-3-3: Efficacité de collecte



$$G(x) = -\frac{d\phi}{dx} = a\phi e^{-\alpha x}$$

V-3-3: Efficacité de collecte

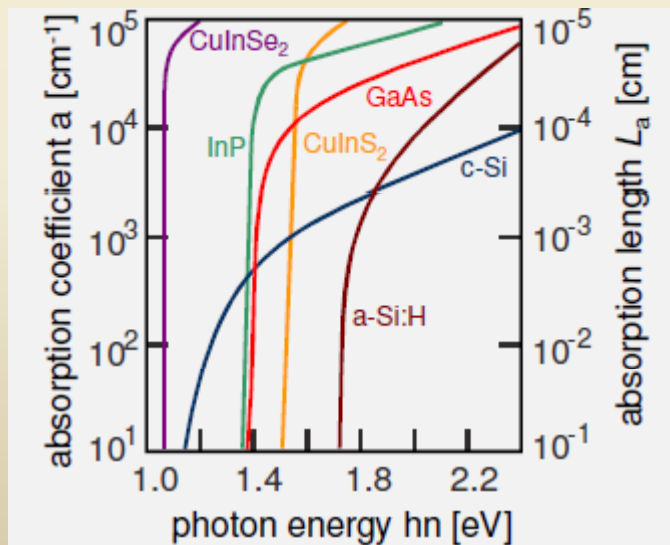


V-3-3: Efficacité de collecte

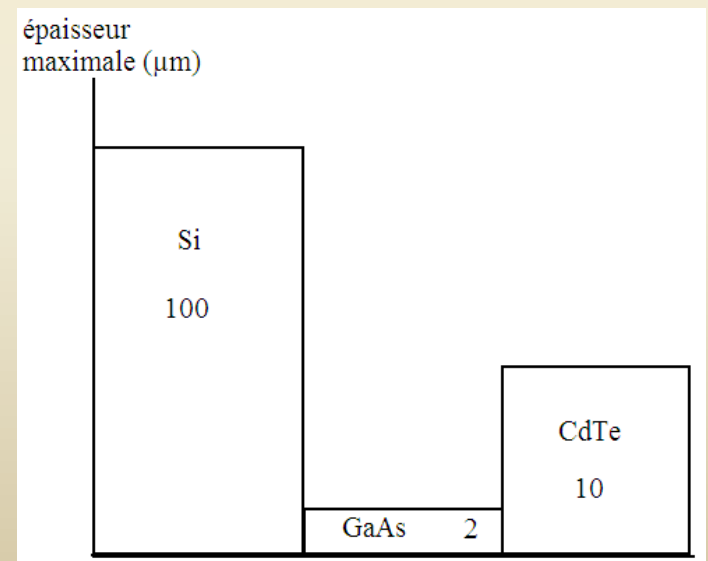
a. Influence du coefficient d'absorption α :

Pour une valeur de α élevée correspond une décroissance de l'énergie plus rapide donc une faible épaisseur de l'absorbeur suffira pour retirer le même pourcentage d'énergie utile.

la valeur de α dépend d'une part de la longueur d'onde λ et d'autre part du matériau absorbeur



Pr REGRAGUI



V-3-3: Efficacité de collecte

Génération-recombinaison:

Variation du nombre de porteur par unité de volume et par unité de temps:

$$\frac{dn}{dt} = g - r$$

- Recombinaison direct électron-trou:

$$r_n = r_p = r = k(np - n_i^2)$$

$$\tau_n = \tau_p = \frac{1}{k(n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

- Régie de faible injection

- Sc (type n):

$$r_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

avec

$$\tau_p = \frac{1}{kn_0}$$

- Sc (type p):

$$r_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

avec

$$\tau_n = \frac{1}{kp_0}$$

V-3-3: Efficacité de collecte

Génération-recombinaison:

- Recombinaison assistée par centres de recombinaison:

$$r = \frac{1}{\tau_m} \frac{pn - n_i^2}{2n_i + p + n}$$

$$\tau_m = \frac{1}{CN_R}$$

- Semiconducteur dopé

$$r = \frac{\Delta p}{\tau_m}$$

- Zone dépeuplée :

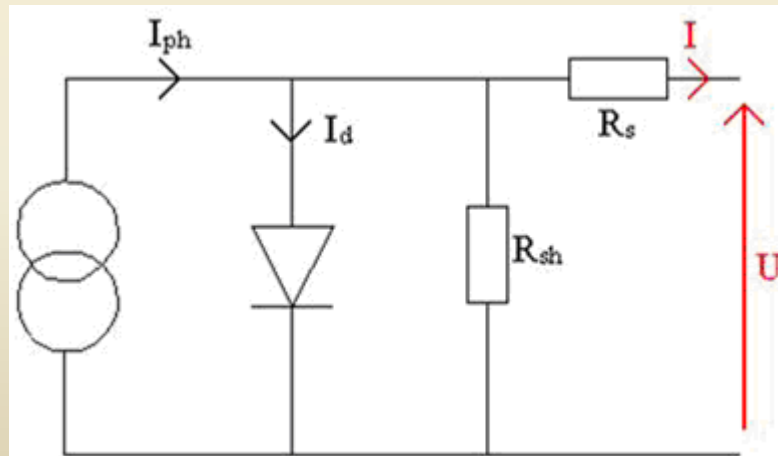
$$r = -\frac{n_i}{2\tau_m}$$

V-4: LE FACTEUR M

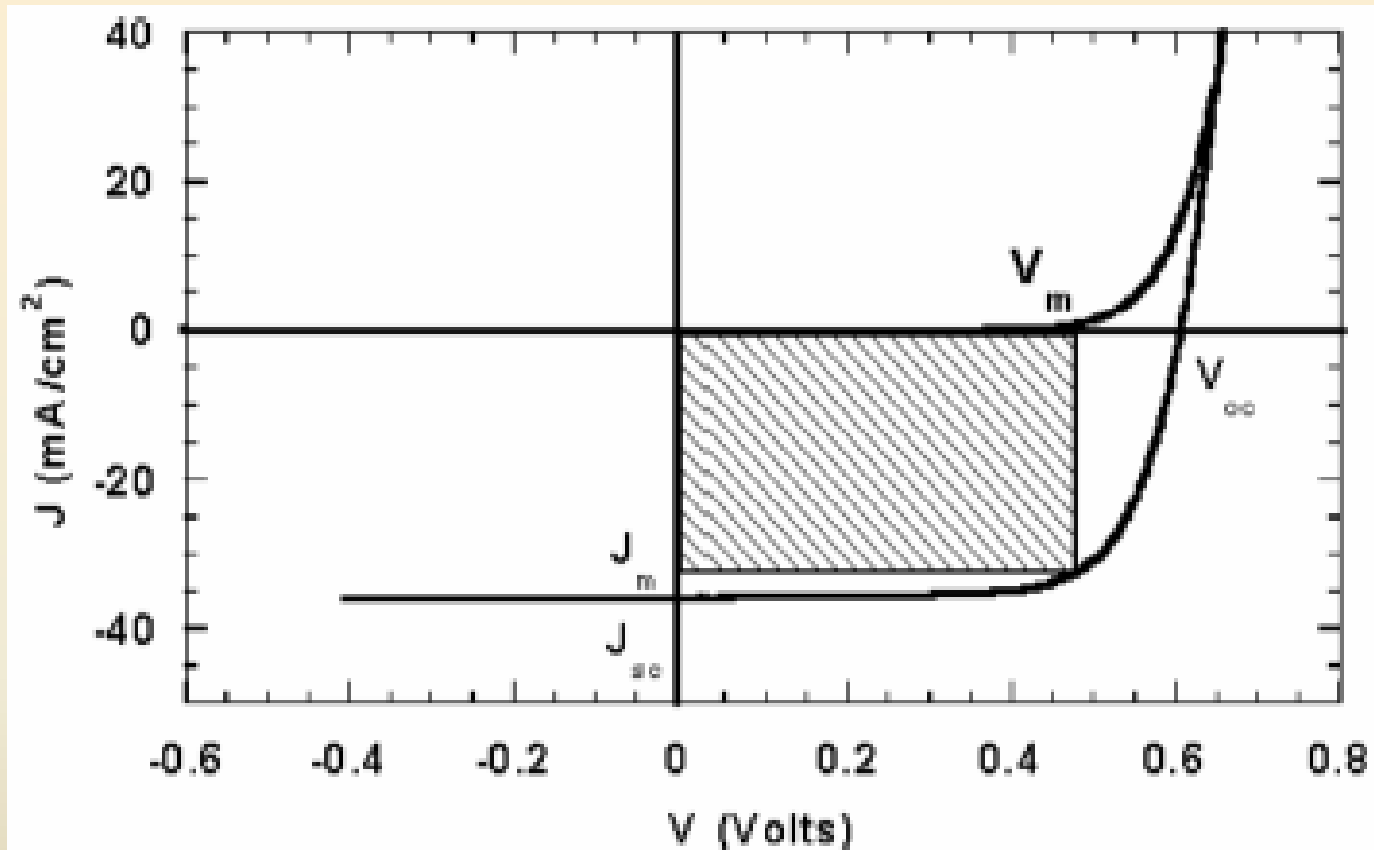
Le facteur M du rendement concerne le fonctionnement complet de la photopile comme générateur de courant.

Ce facteur englobe l'effet des résistances internes qui limitent la puissance utilisable.

- Modélisation électrique:



V-4: LE FACTEUR M



$$I = I_{ph} - I_0 \sigma \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

V-4: LE FACTEUR M

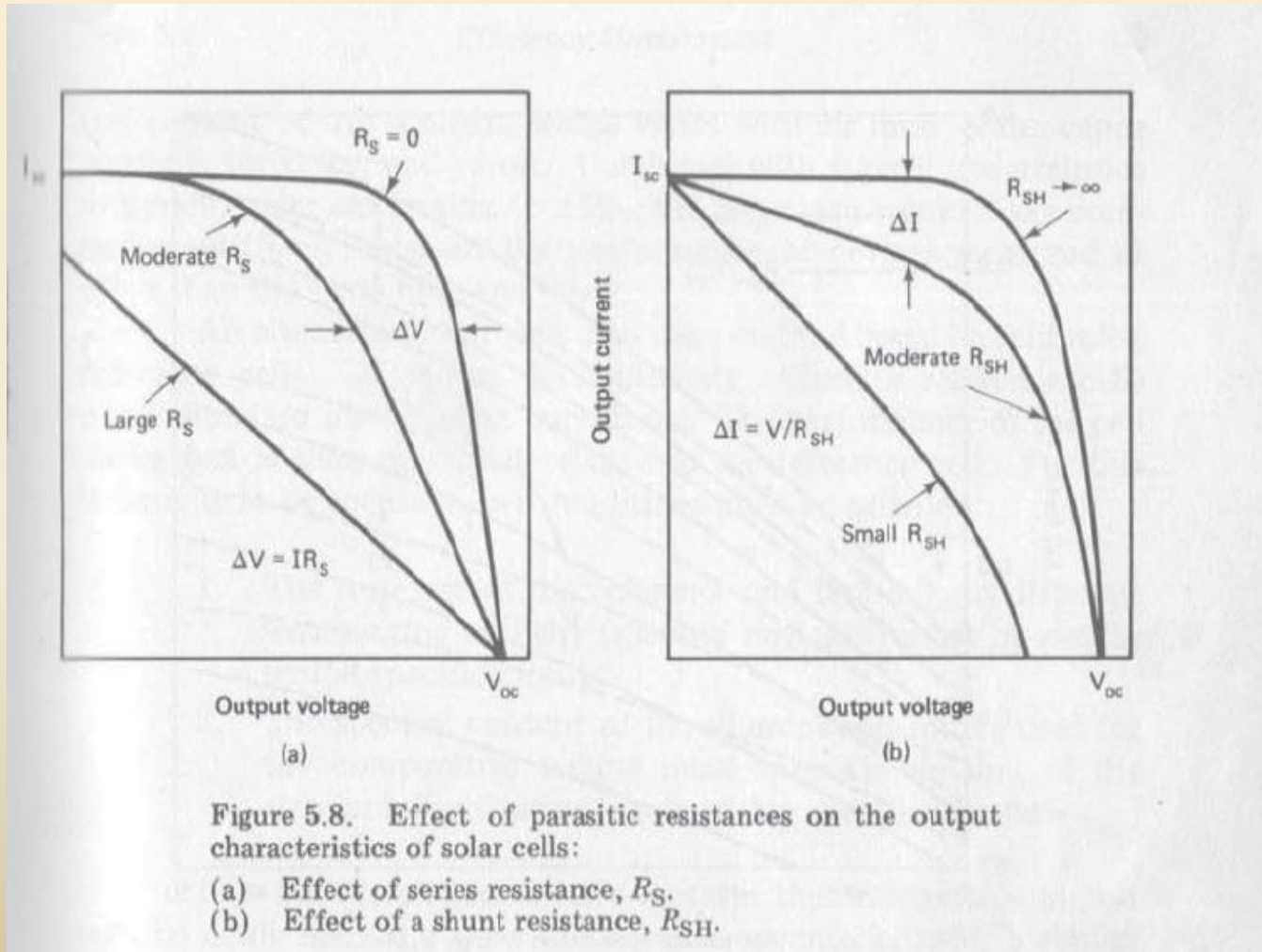
a. Modélisation électrique:

La résistance série (R_s) est formée par la résistance électrique du semiconducteur dans la zone extérieure à la ZCE et par la résistance de contact entre le Sc et le métal qui assure le contact électrique avec le circuit extérieur. Elle est estimée par l'inverse de la pente (I/V) aux voltages proches de V_{co} (pour de hauts voltages la diode devient plus conductrice donc R_s domine la pente).

La résistance shunt (R_{sh}) est due à des impuretés ou défauts qui court-circuitent le courant entre les deux électrodes. Elle peut être obtenue en prenant l'inverse de la pente près de 0V (pour de petits voltages la diode ne conduit pas donc le courant donné par V est déterminé par R_{sh} et R_s avec R_{sh} plus grand)

V-4: LE FACTEUR M

Effet de la résistance série et shunt:



V-4: LE FACTEUR M

$$M = \frac{P_{\text{réelle max}}}{P_{\text{théoriquement disponible}}}$$

$$P_{\text{réelle max}} = V_M I_M$$

$$P_{\text{theo dip}} = I_{cc} \frac{E_g}{q}$$

$$\Rightarrow M = \frac{q V_M I_M}{I_{cc} E_g}$$

VI: CALCUL DE RENDEMENT EXPERIMENTAL DE LA CELLULE PHOVOLTAÏQUE

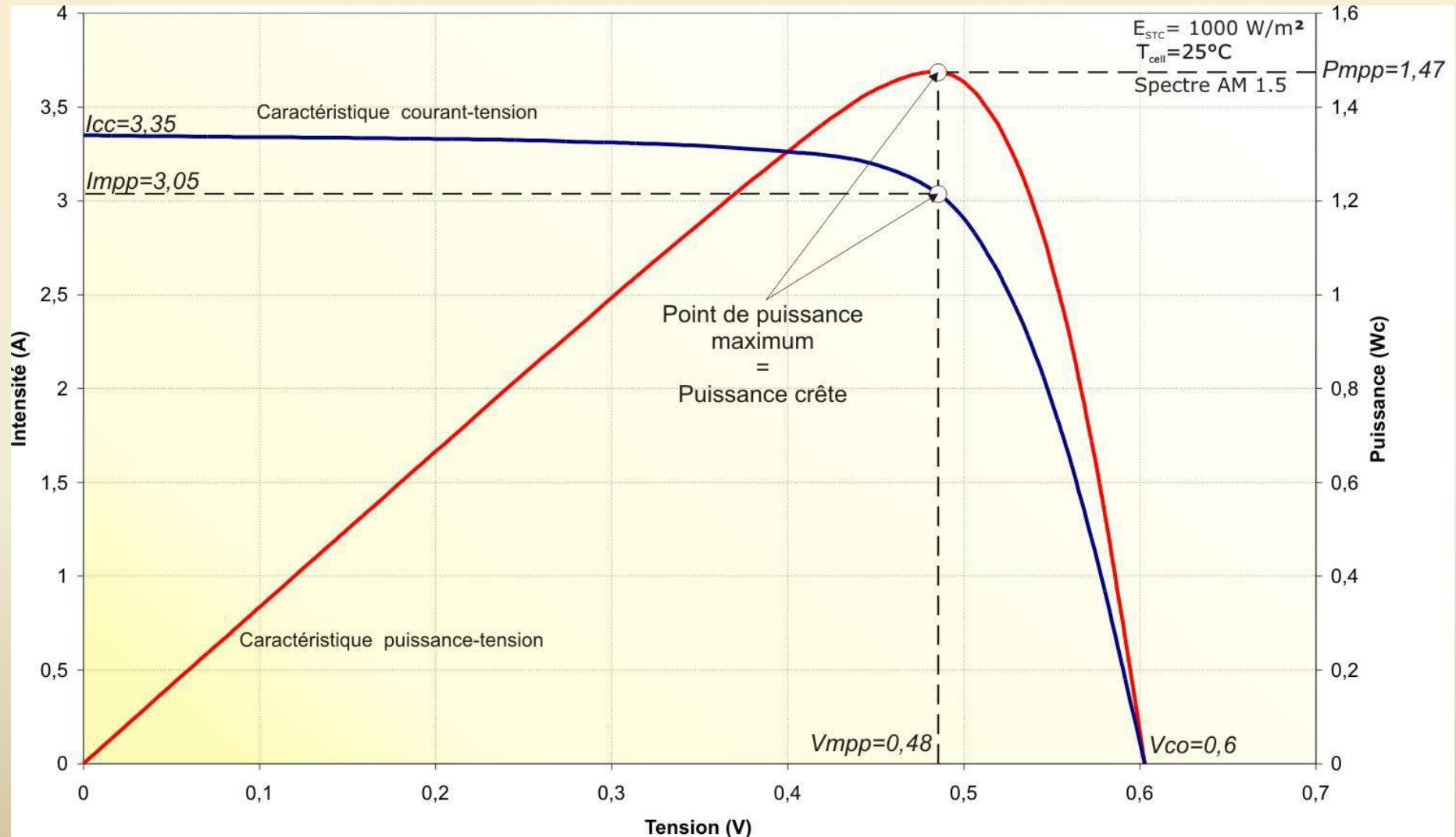
- A partir de la caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule solaire réelle sous éclairement, on extrait:
 - Le courant de court circuit I_{cc}
 - La tension de circuit ouvert V_{co}
 - Les valeurs V_M et I_M qui correspondent à la puissance maximale délivrée par la cellule solaire.

- Le facteur de forme FF: $FF = \frac{V_M I_M}{I_{cc} V_{co}}$

- Le rendement de la conversion:

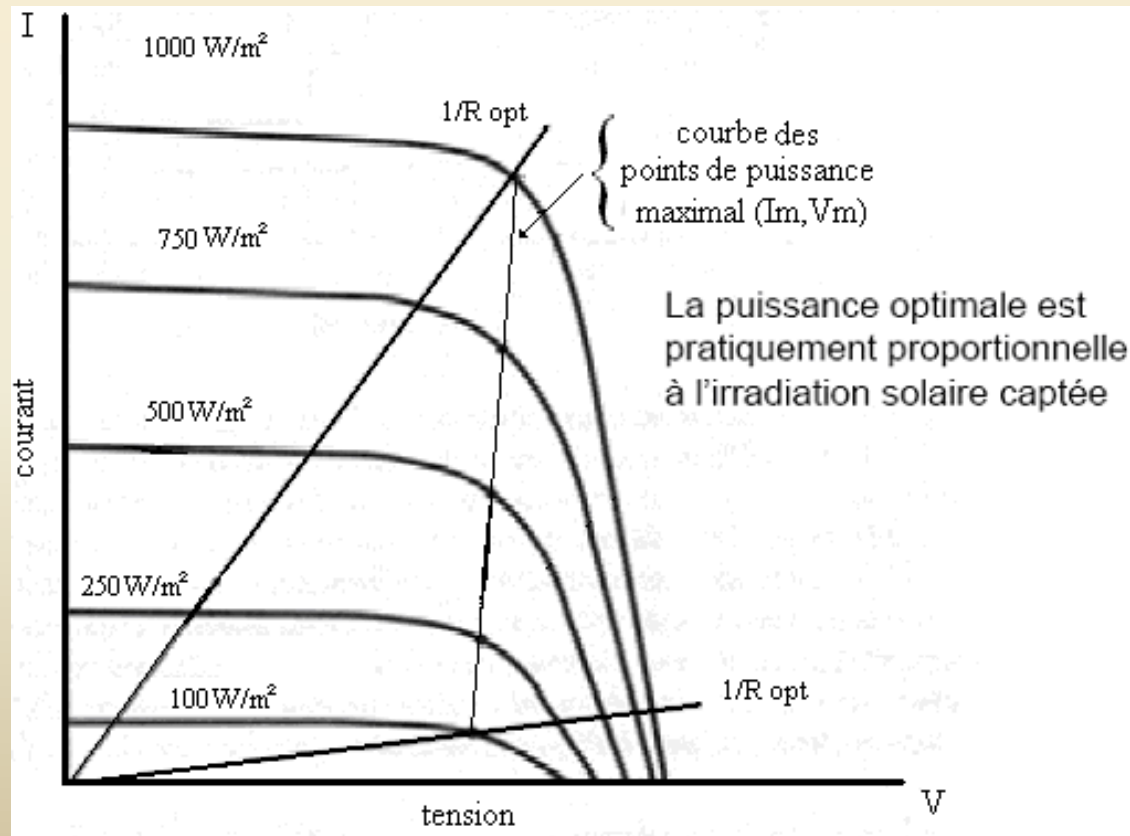
$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{incidente}}} = \frac{V_M I_M}{P_{\text{incidente}}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{\text{incidente}}}$$

VI: CALCUL DE RENDEMENT EXPERIMENTAL DE LA CELLULE PHOVOLTAÏQUE



Influence de l'ensoleillement sur la puissance fournie par la cellule solaire

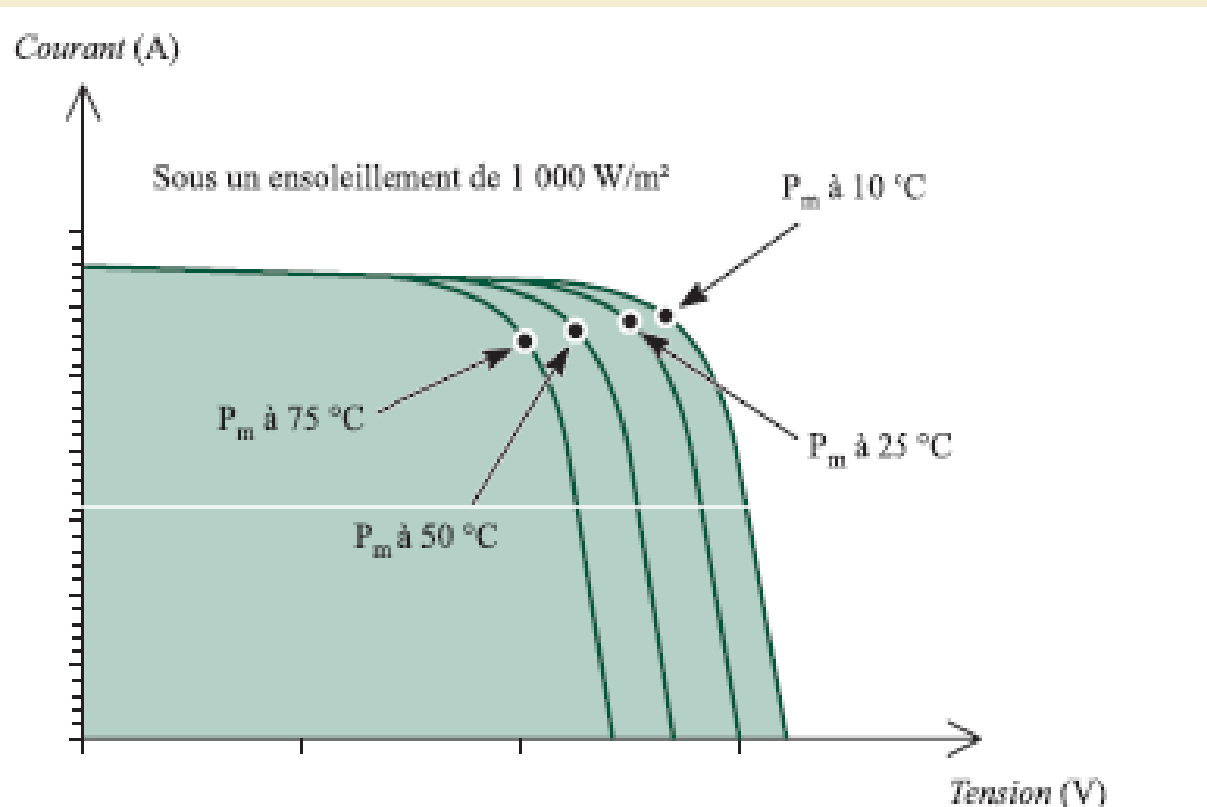
Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.



Influence de la température sur la puissance fournie par la cellule solaire

Le courant de court circuit n'est pas très affecté par la température du module.
Plus la température augmente moins la cellule est performante (V_{co} et FF diminuent).

$$\frac{dV_{co}}{dT} = -\frac{V_{go} - V_{co} + \gamma(kT/q)}{T}$$



Cette dépendance diminue pour les matériaux à large gap (GaAs est de moitié sensible aux effets de la température que le Si)

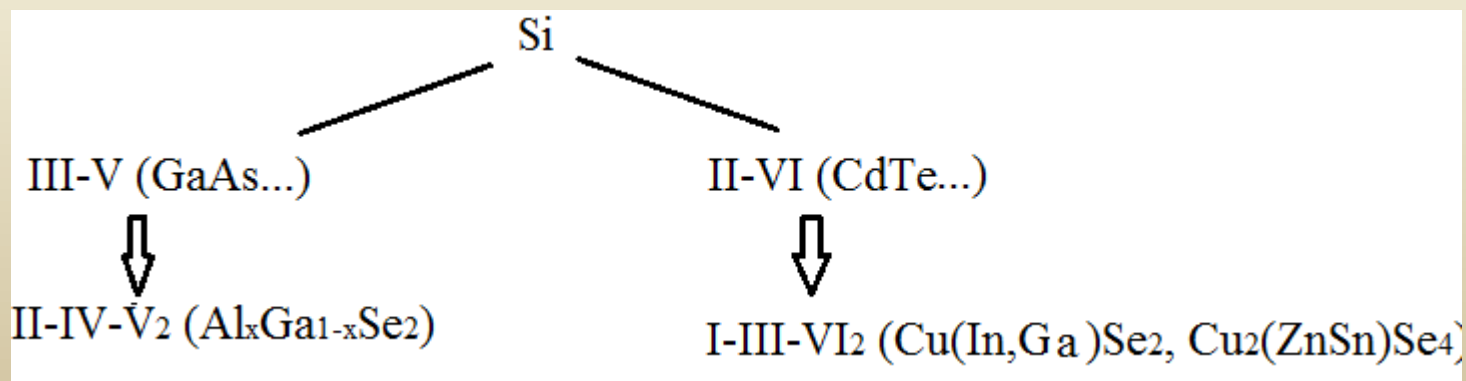
Conditions standard du module photovoltaïque

Typical Electrical Characteristics ⁽¹⁾	BP 2140S	BP 2150S
Maximum Power (P_{max}) ⁴	140W	150W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	34.0V	34.0V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.16A	4.45A
Warranted minimum P_{max}	130W	140W
Short-circuit current (I_{sc})	4.48A	4.75A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.8V	42.8V
Temperature coefficient of I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}\text{C}$	
Temperature coefficient of V_{oc}	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$	
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$	
NOCT ³	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$	
Maximum system voltage ²	600V	

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}\text{C}}{0,8} \right) \cdot S$$

Les absorbeurs

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB



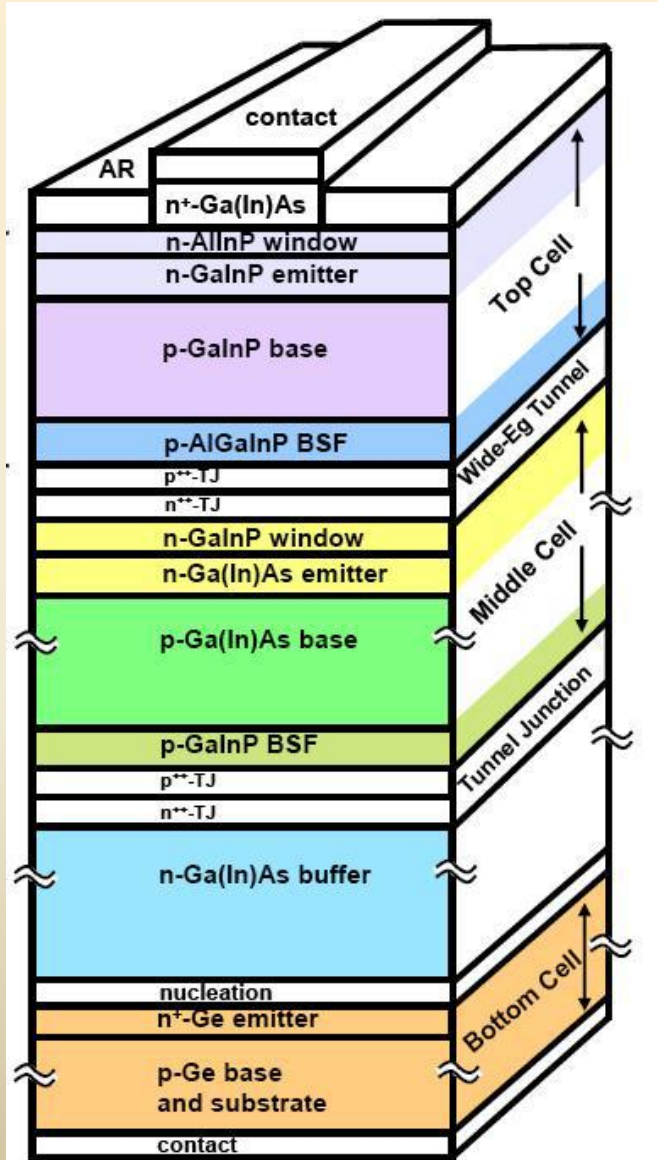
classification	Efficiency (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA/cm ²)	FF
Si (crystalline)	25.0	0.705	42.7	82.8
GaAs (crystalline)	26.1	1.038	29.7	84.7
Cu(In,Ga)Se ₂ (cell)	19.4	0.716	33.7	80.3
Si (amorphous)	9.5	0.859	17.5	63.0
dye sensitized	10.4	0.729	22.0	65.2
organic (polymer)	5.15	0.876	9.39	62.5
multijunction GaInP/GaAs/Ge	32.0	2.622	14.37	85

Rendement de cellules solaires

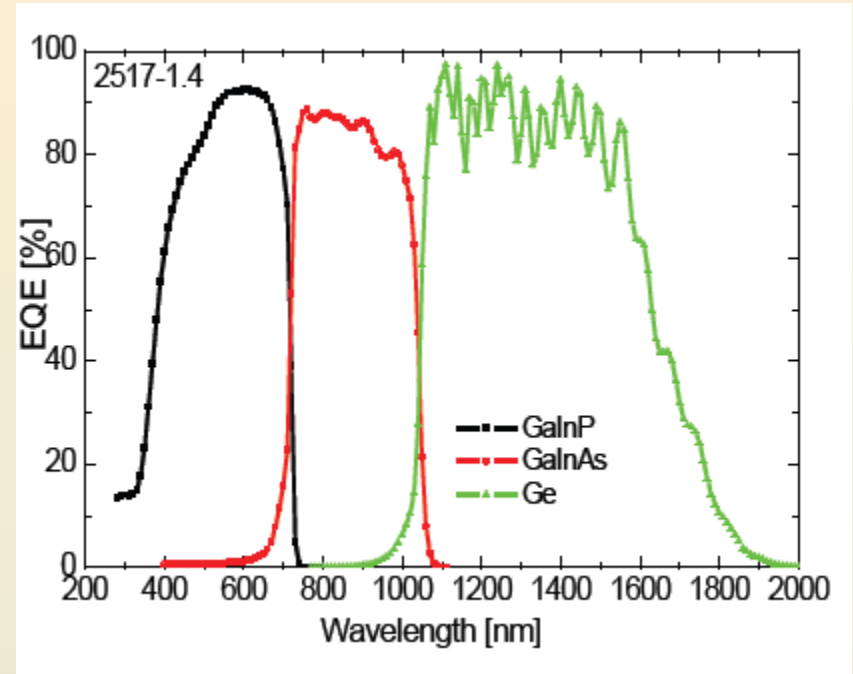
M. A. Green, Prog. Photovolt: Res. Appl. 17 (2009) 85

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: AsGa



Rendement quantique externe



rendement de modules commercialisés 37% à 25°C.

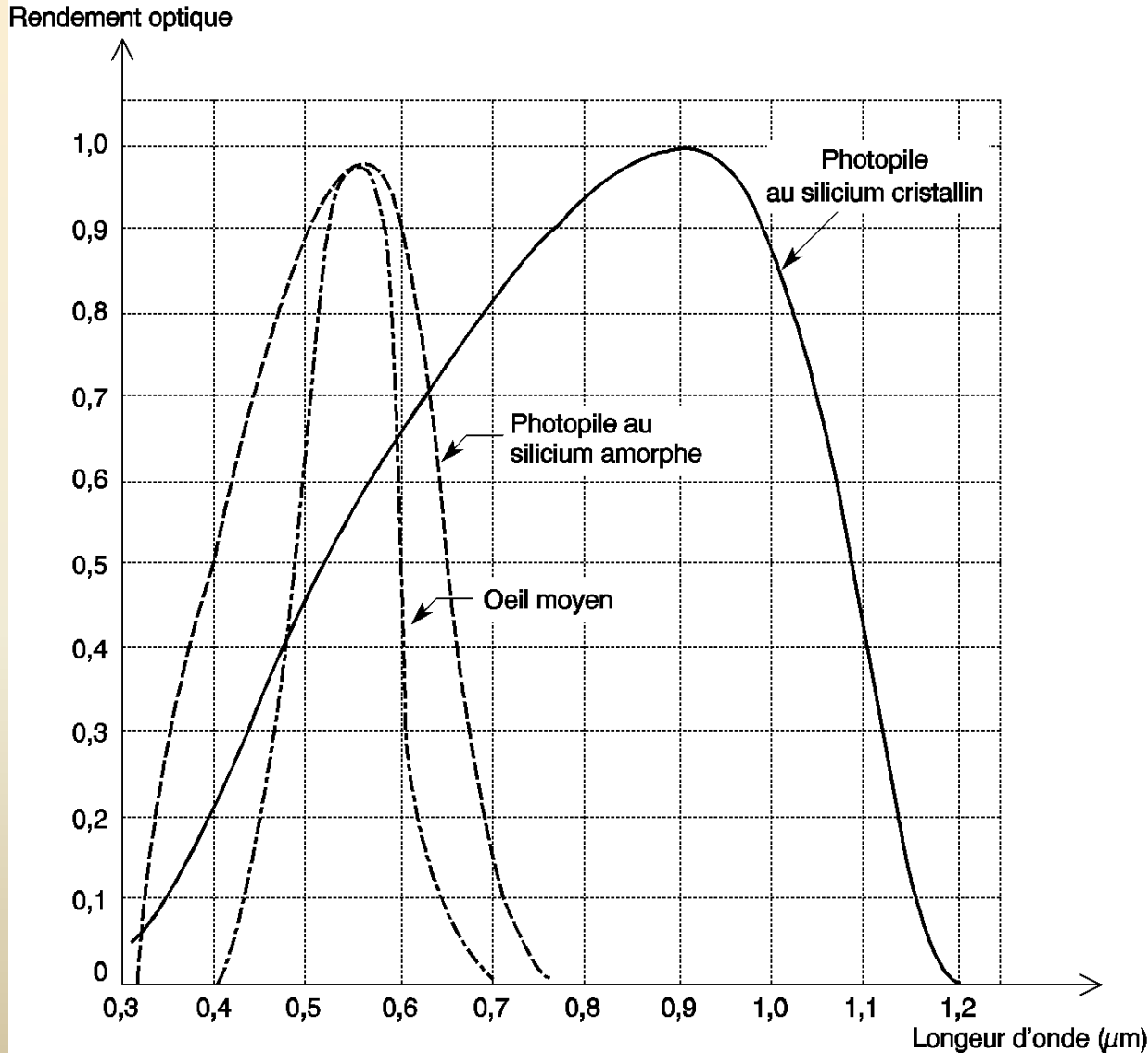
Coût du watt élevé

Utilisation dans les panneaux solaires de satellites
ou les systèmes à concentration

Pr REGRAGUI

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

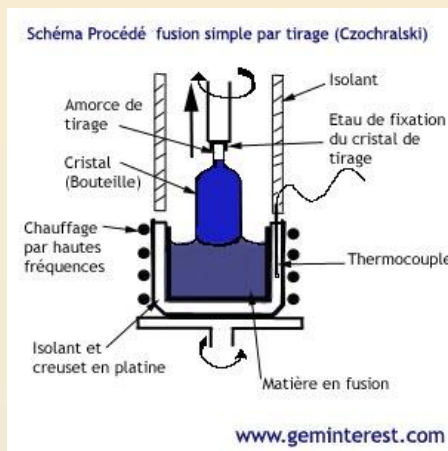
- Le silicium est très utilisé dans l'industrie de la microélectronique (Pureté à 99,9999%; la qualité solaire nécessite pureté à 99,99%)
- Prix du KW crête a beaucoup baissé vu le développement de l'industrie électronique,
- Grande épaisseur (absorption de 90% de l'onde incidente nécessite 100µm),
- Si monocristallin: grand rendement, un processus de fabrication lent, des coûts élevés, fonctionnement médiocre sous faible éclaircissement.
- Si Polycristallin: faible coût, un processus de fabrication rapide, une rendement moindre.
- Obtention de Si à partir de SiO₂ (forme cristalline utilisé) :
 - ✓ Réduction carbothermique du SiO₂:
$$\text{SiO}_2 (\text{sol}) + 2\text{C} (\text{sol}) \longrightarrow \text{Si} (\text{liq}) + 2\text{CO} (\text{gaz}) \text{ (pureté 98 à 99\%)}$$
 - ✓ Réduction aluminothermique du sable:
$$3\text{SiO}_2 (\text{liq}) + 4\text{Al} (\text{liq}) \longrightarrow 3\text{Si} (\text{sol}) + 2\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{liq})$$

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

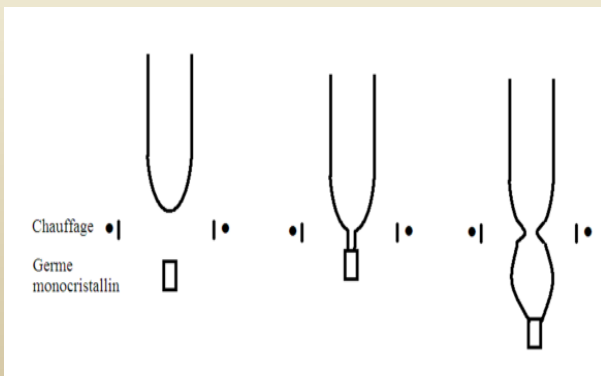
- Technique de croissance utilisée pour le Si Mono:

1 - Czochralski (Cz),



- ❖ Vitesse de tirage : 10cm/h
- ❖ Diamètre du lingot 30cm, L=1m
- ❖ Les impuretés se concentrent dans le Si fondu
- ❖ Nécessité de maintenir le Si fondu (1140°C) ce qui entraîne des coûts de production élevés
- ❖ Possibilité de dopage (type p:B)

2- méthode de la zone flottante (FZ).



- ❖ Un lingot poly et un germe mono sont nécessaires
- ❖ l'interface entre les deux est assurée par des bobines de chauffage coulissantes
- ❖ Absence du creuset donc pas de contamination extérieure
- ❖ Lingots FZ ont une moindre teneur en oxygène
- ❖ le matériau obtenu à partir de FZ est plus cher que CZ

Pr REGRAGUI

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

Lingots Poly:

avantages

- ❖ Procédés de fabrication moins coûteux en énergie
- ❖ Plaquettes mieux adaptés au remplissage géométrique des modules
- ❖ Grande tolérance aux impuretés

Les grains doivent être gros et s'étendre verticalement, perpendiculairement au plan de découpe

Procédé Semix:

- ❖ La fusion et la solidification se font dans des creusets différents
- ❖ Le creuset de haut est rempli de morceaux de Si:P puis est chauffé à 1250°C
- ❖ Si fondu s'écoule dans la lingotière en céramique revêtue d'une couche de Ni de Si

Des teneurs en impuretés sup à Si EG sont obtenus

La qualité du Si est limitée par la densité des dislocations

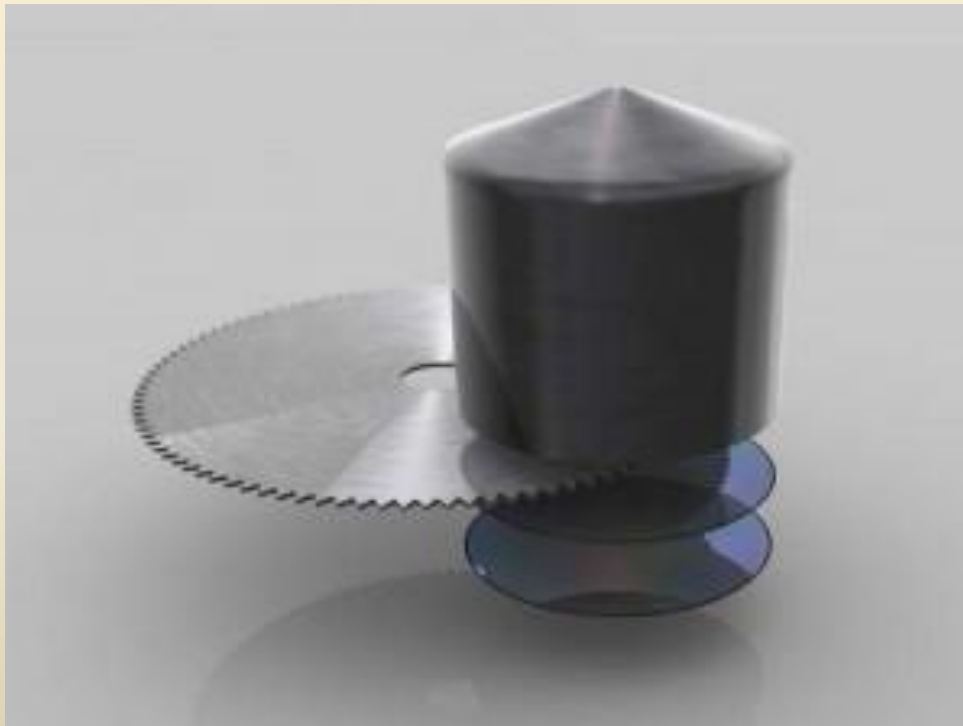
Ces défauts entraînent la diminution de la longueur de diffusion (100 à 160 μm pour le Si EG à 80 μm pour le Si SG)

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

fabrication de dispositifs

1. préparation du lingot type p puis découpage en plaques de 420 μm d'épaisseur, (perte dû au découpage)



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

fabrication de dispositifs

2. Dopage: la formation de la jonction p-n dans un four de diffusion

Le procédé consiste à chauffer les plaquettes de silicium en présence d'un dopant (type n: P)

Equation de diffusion de Fick:
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

avec
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$$

a- La source de diffusion est une couche mince: répartition gaussienne

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

b- Concentration superficielle constante: diffusion des 2 côtés

$$C = C_s \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Pr REGRAGUI

où
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du$$

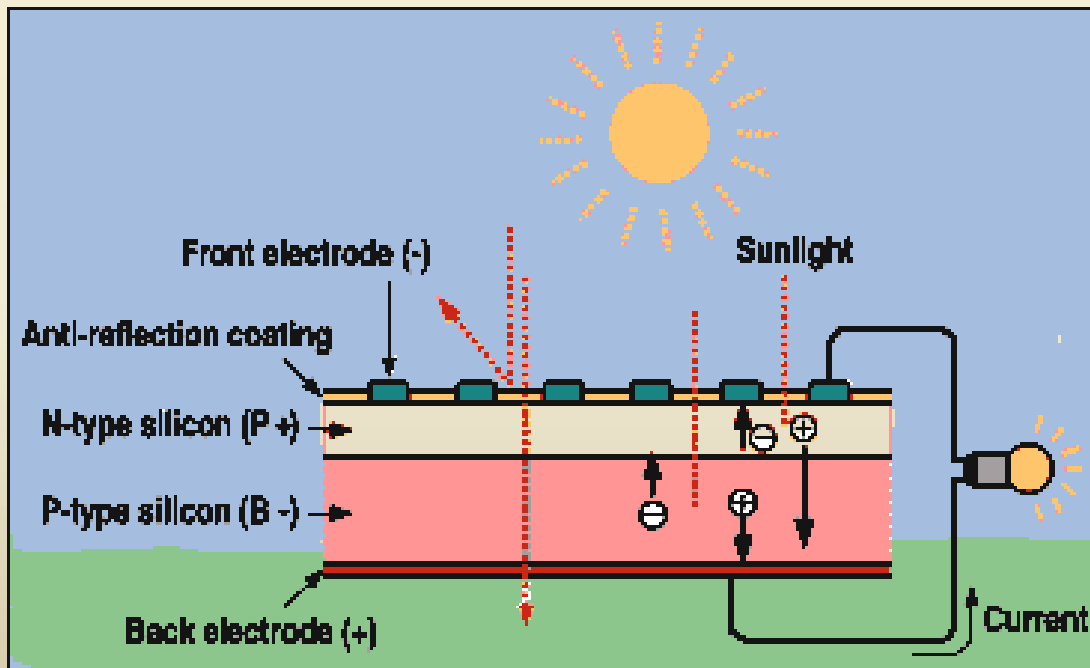
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

fabrication de dispositifs

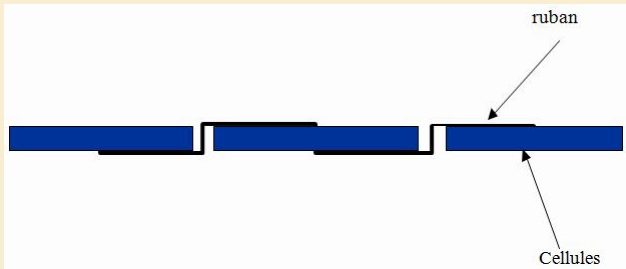
3. Métallisation: pole positif sur la totalité de la face p et pole négatif sur la face n (doit tenir compte d'un compromis entre insolation et collecte des porteurs),

4- Dépôt de la couche antireflet qui accroît la pénétration des photons

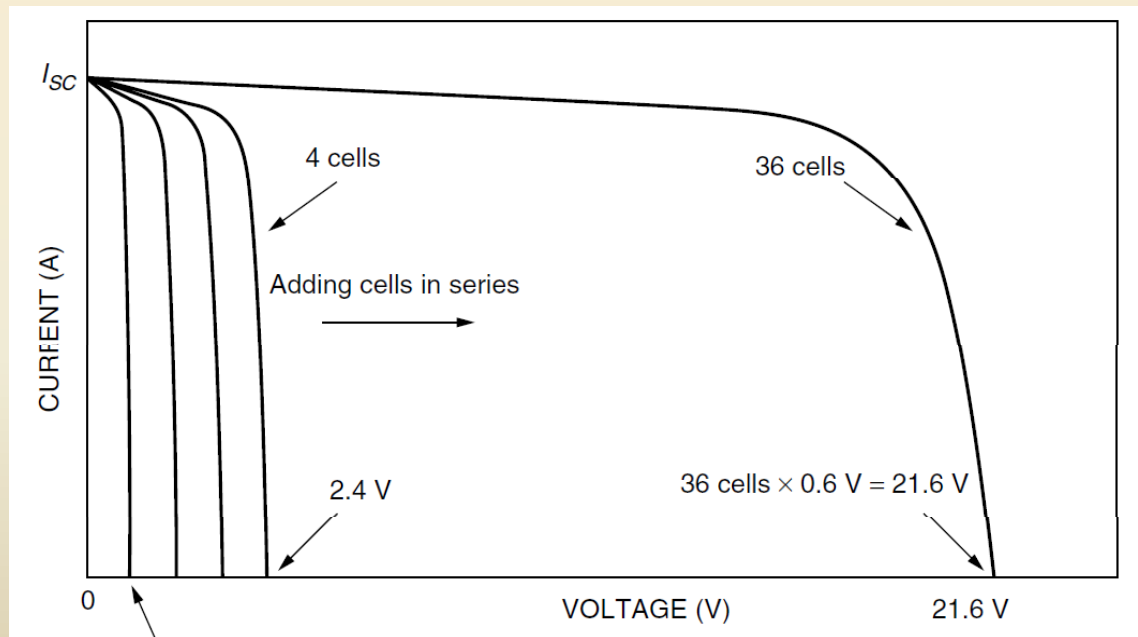
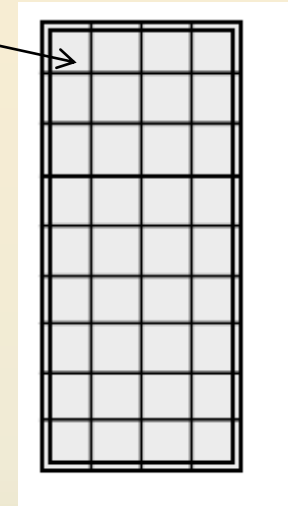


Pr REGRAGUI

De la cellule au module



Connexion des cellules en série pour former des modules



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

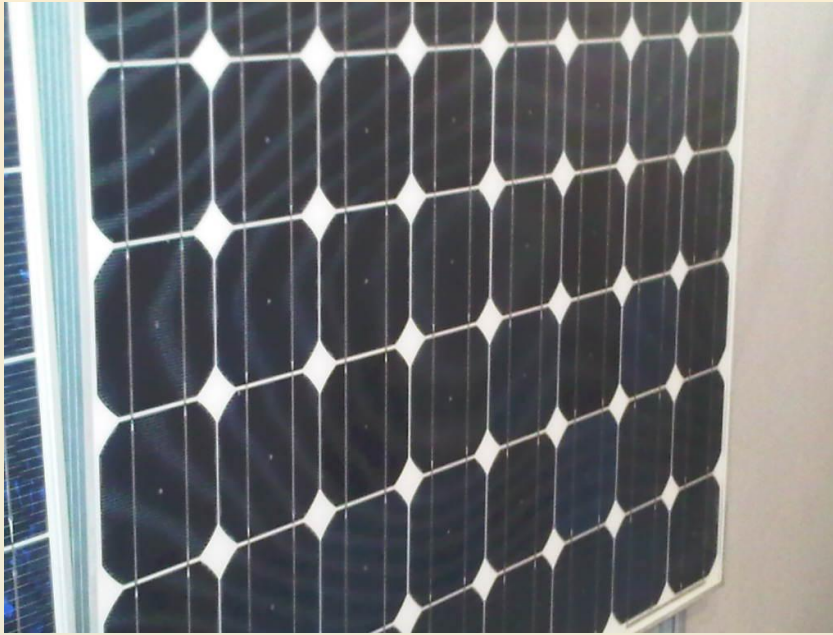
- Le rendement des modules est égal à 15% et le cout de watt crête varie entre 0,6 et 0,8 euro.
- L'interconnexion de 36 cellules en série est nécessaire pour obtenir 12V
- L'encapsulation des cellules pour protéger des chocs, protéger les interconnexions des agressions extérieures et pour isoler l'environnement de la tension générée par les cellules



Pr REGRAGUI

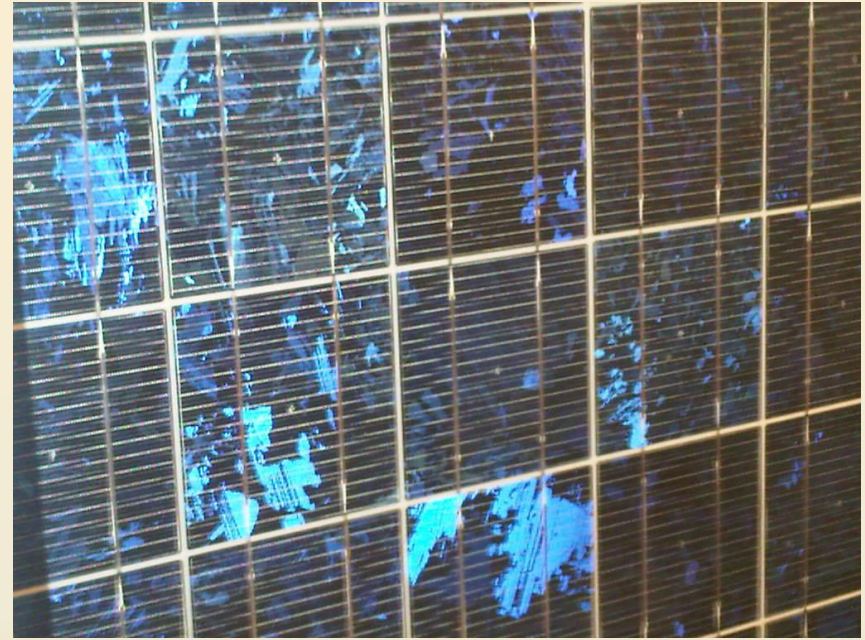
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si



Monocristallin

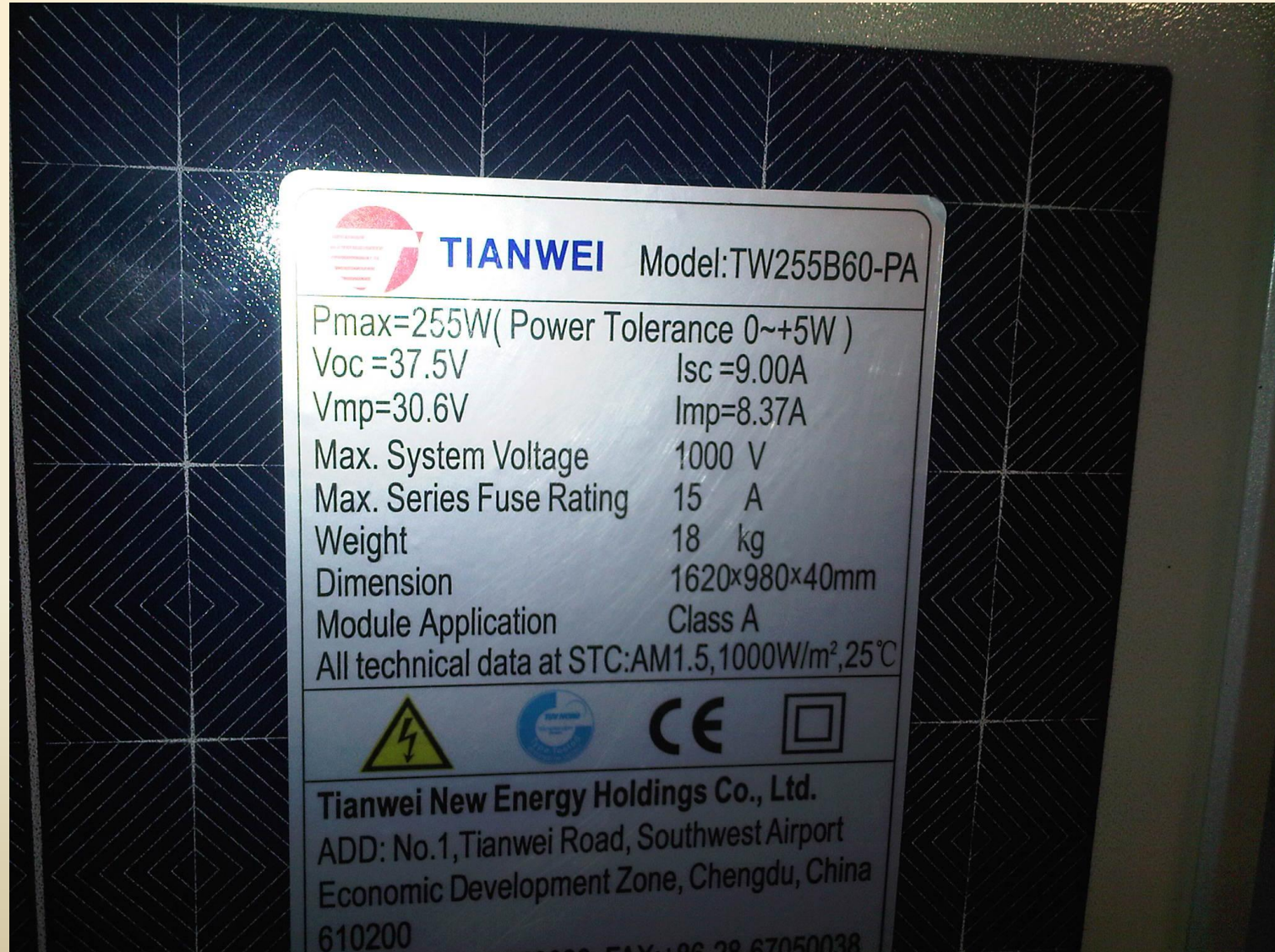
- prix élevé
- rendement faible sous un faible éclairement



Polycristallin

- meilleur rapport qualité / prix
- rendement faible sous un faible éclairement

Exemple de fiche signalétique d'un panneau PV



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières:

- la filière du silicium microcristallin et/ou amorphe
- la filière Tellure de Cadmium / Sulfure de Cadmium
- la filière des composés à structure chalcopirite basée sur le CuInSe_2 (ou sa variante $\text{Cu(In,Ga)(S,Se}_2)$ dénommée CIGS)
- La filière des composés $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se}_4)$

Avantages:

- capacité de produire de grandes plaques
- Consommation très réduite de matière
- Faible consommation énergétique durant le cycle de production

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- couches minces

la filière silicium en couches minces a-Si:H

- Meilleur aux éclairagements faibles et diffus
- faible mobilité des porteurs, rendement faible et durée de vie courte
- Son rendement baisse moins que le cristallin quand la température augmente
- A cause du désordre, les liaisons covalentes sont coupées d'où présence de liaisons pendantes (états localisés dans la BI)
- Pour remédier à ces défauts, on ajoute de l'hydrogène ce qui entraîne une forte diminution des densités d'états dans la BI
- L'existence des queues d'Urbach dans a-Si:H entraîne un effet néfaste sur la collecte
- a-Si:H est légèrement de type n
- L'énergie de la BI (1,8 eV) diminue avec la concentration de H liés (1,6eV), il dépend aussi du dopage pour le type p (varie inversement au dopage)
- La zone p est utilisée comme fenêtre

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

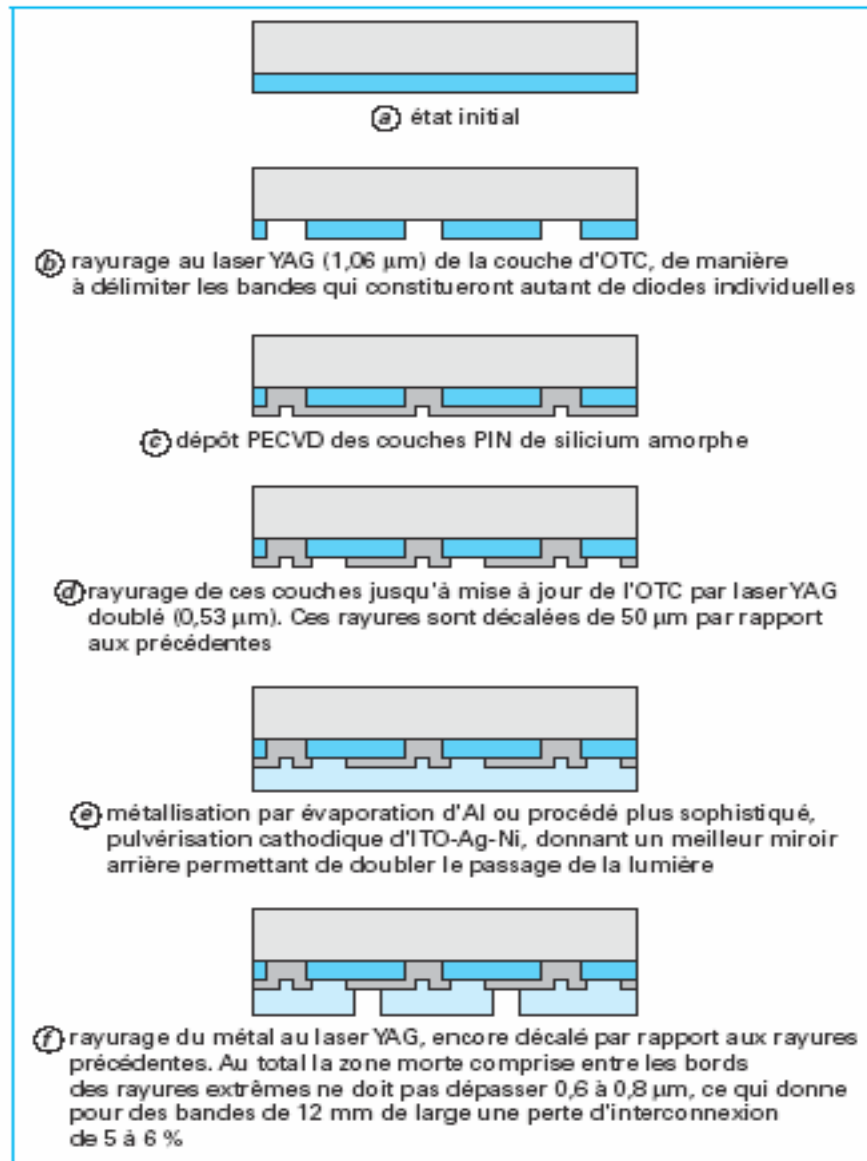
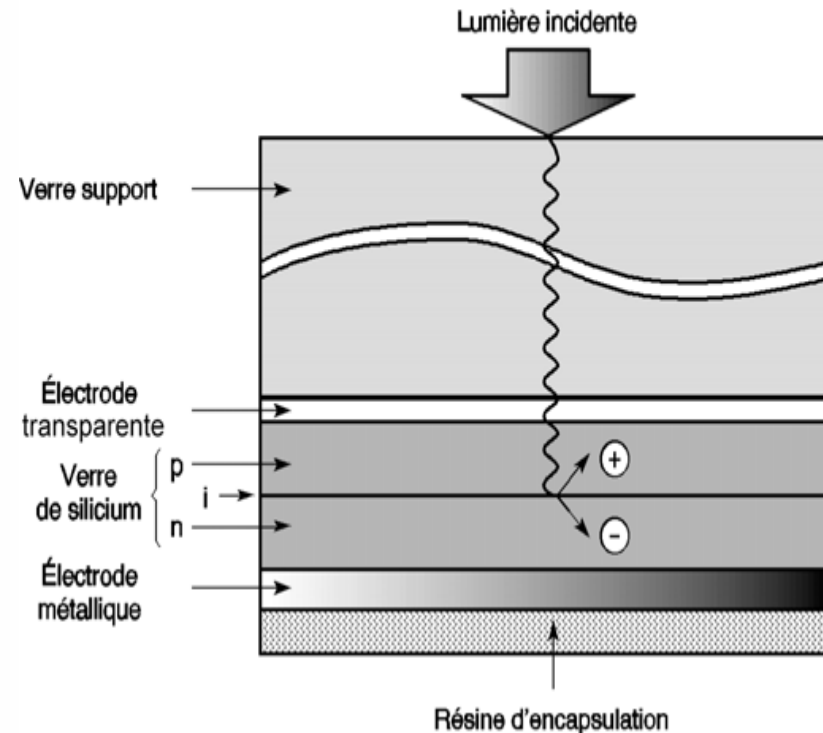
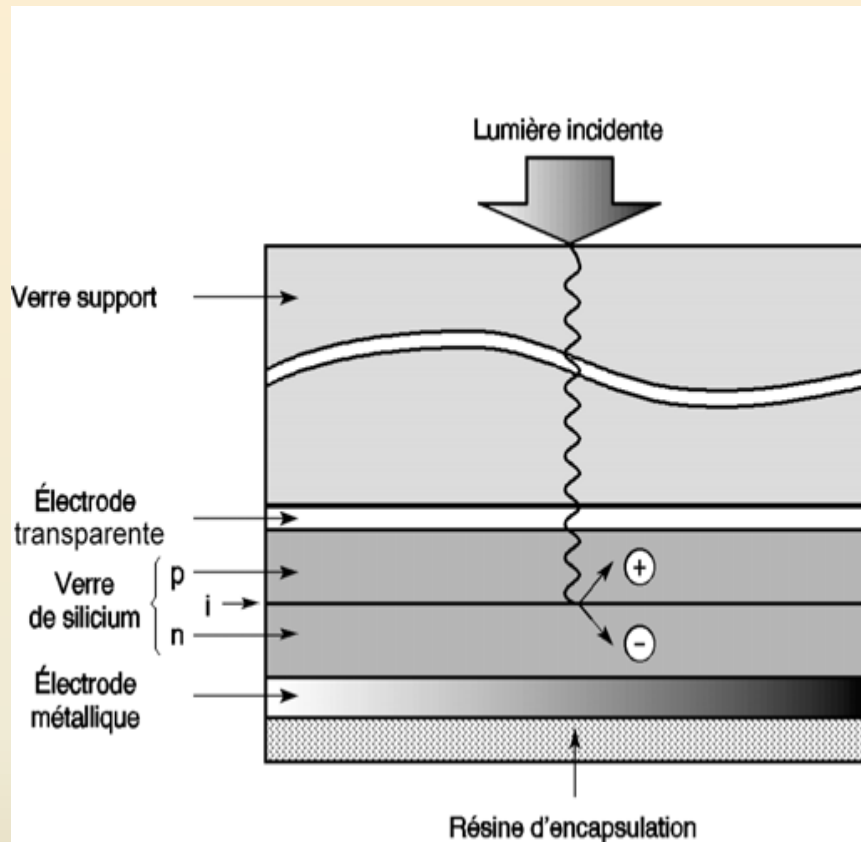


Figure 13 – Interconnexion monolithique en tuiles d'un module au a-Si:H avec superstrat en verre

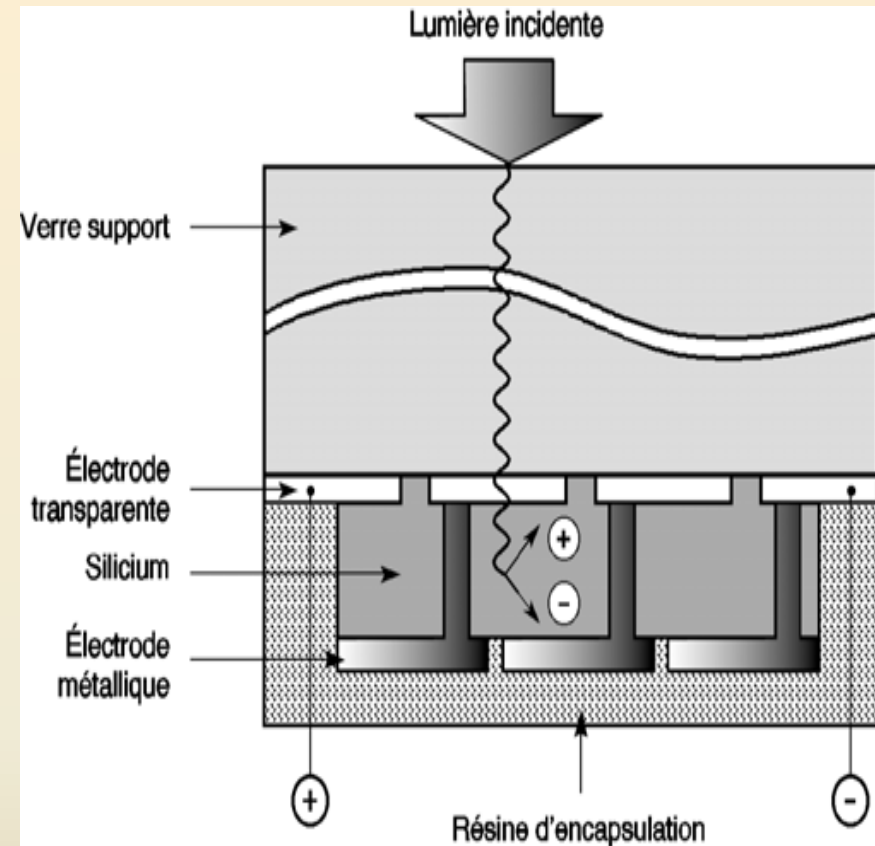


- Fonctionne avec un éclaircissement faible (calculatrices)
- Si déposé sur une feuille de verre

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES



Photopile au silicium amorphe



Principe de la mise en série

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- couches minces

La filière silicium en couches minces: a-Si:H

Les couches type p sont dopées au C pour pallier à la baisse du gap (2eV)

Effet Stabler-Wronsky: Diminution lente de la photoconductivité sous fort éclaircissement

Jonction pn n'a pas de caractère redresseur → jonction pin

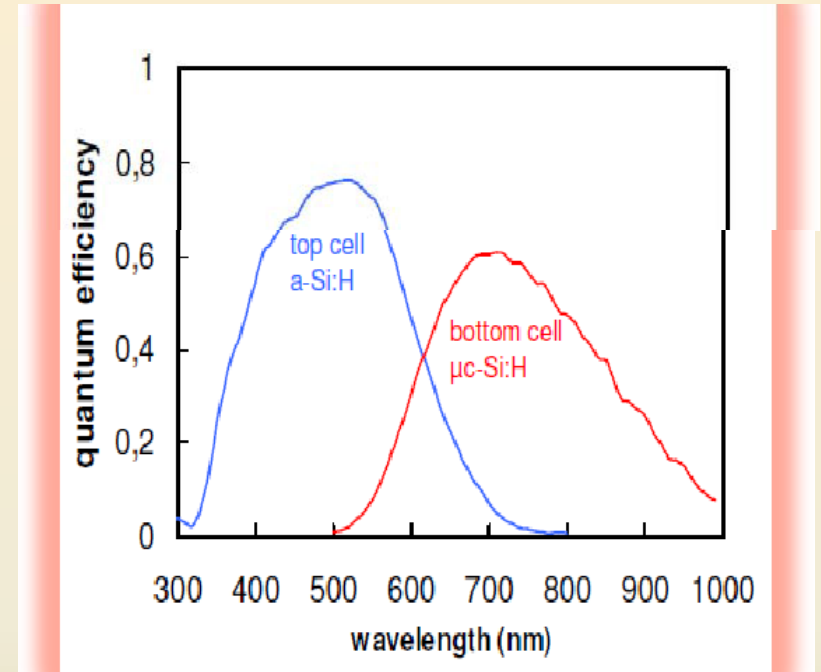
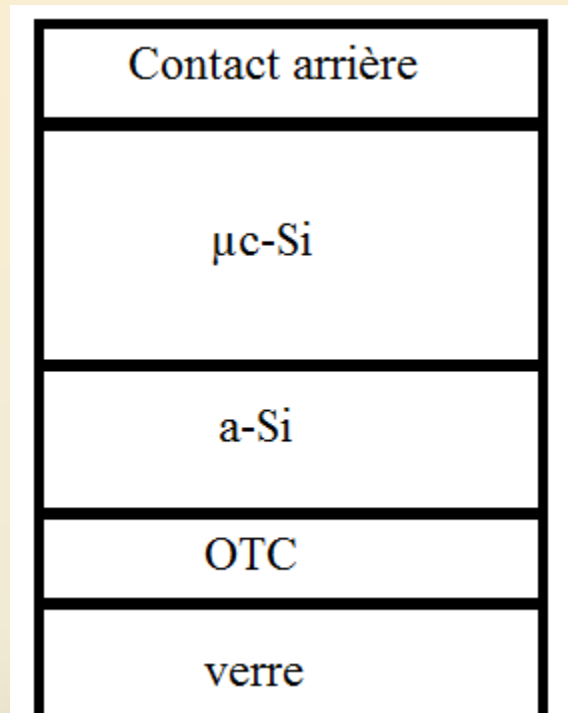
L'épaisseur de la couche intrinsèque doit être optimisée

Son coefficient d'absorption optique est 100 fois supérieur à celui du monocristal.

Des cellules amorphes avec des rendements excédant légèrement les 10% ont été réalisées tandis que les triples jonctions ont donné des rendements de plus de 13 %.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- couches minces



a-Si:H/ μcSi / rendement 2012 $\approx$ 10.8% , coût $\approx$ 0.35 \$/W

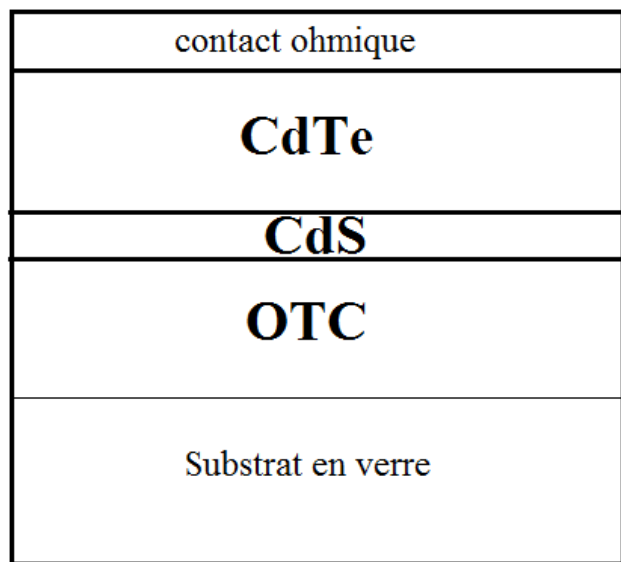
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière CdTe

- Bande interdite directe de l'ordre de 1,45 eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire,
- d'où quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de $2\mu\text{m}$
 - utilisation de matériaux relativement impurs
- Utilisation d'une couche de CdS de type n ($E_g = 2,4\text{eV}$) comme fenêtre d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel

Structure d'une cellule de
base au CdS-CdTe




Lumière

CdTe

Record Cell 18.7%

Record Module 15.5%

moy. Module 12.5%

**Capacité Prod. en 2011 (MWp/an)
2200**

**Capacité Prod. en 2012 (MWp/an)
2700**

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière CdTe

Malgré des rendements excédant les 15%, des problèmes non négligeables se posent, à savoir :

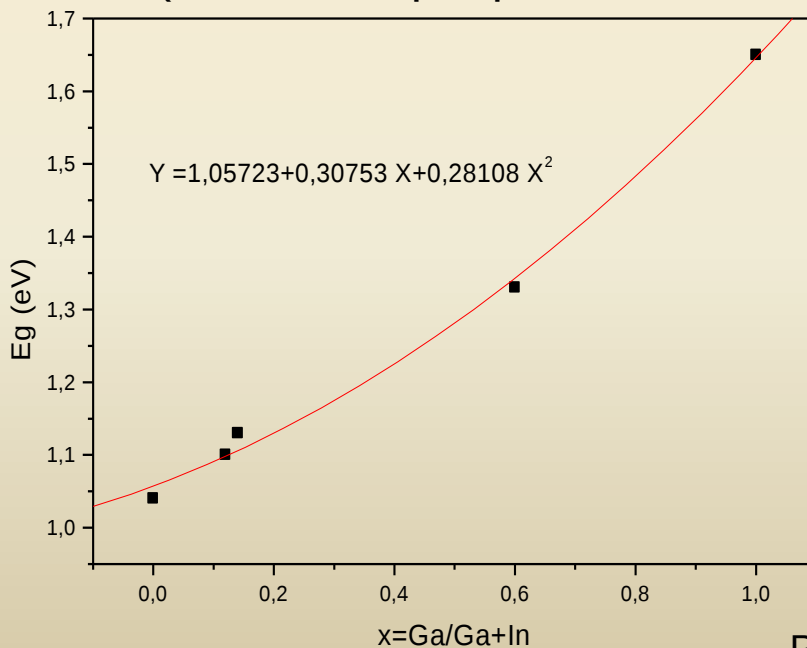
- Rareté de Te et toxicité du Cd
- Difficulté du contrôle du dopage de type p du CdTe
- Difficulté de réaliser des contacts électriques ohmiques stables sur le CdTe
- Les meilleurs rendements ont été obtenus sur des cellules utilisant comme substrat le silicate de bore, substrat fort coûteux
- La diffusion du sodium du verre ne semble pas profiter au CdTe et, au contraire, Na paraît avoir un effet négatif sur la durée de vie des porteurs minoritaires dans les cellules de CdTe
- La sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau
- L'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du Cadmium qui est toxique et polluant
- Le cout de watt crête vaut 0,67 euro

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière chalcopyrite Cu-III-VI₂

- Les cellules de type Cu(In,Ga)(Se,S)₂ ont atteint des rendements de 19%
- Le coefficient d'absorption a le même seuil que celui du c-Si mais il est plus fort dans la gamme 1,1 à 2,6eV
- Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1,5 à 2µm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire (contre 100 µm pour le silicium cristallin),



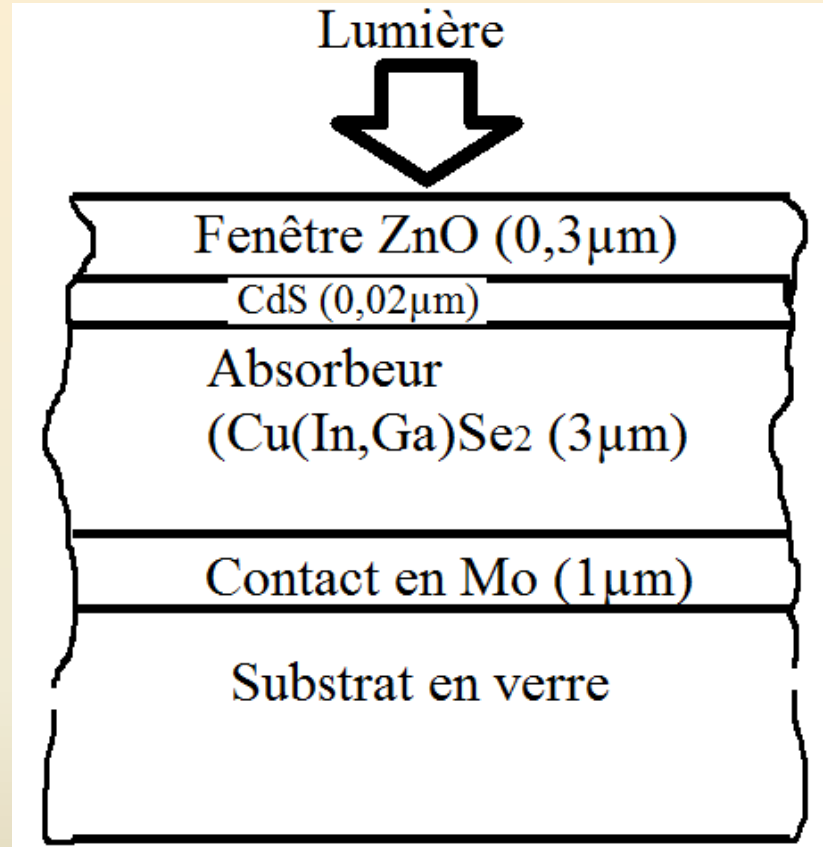
Le matériau le plus prometteur semble être le CIS. Cependant, sa faible bande interdite (1,02 eV) limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la photopile.

➡ introduction du Ga

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

Coupe de la cellule au CIGS



CIGSS	rend
Minimodule	17,8%
Cell (0.5cm²)	19,7%
Record Module	14.5%
Moy Module	12.6%
Prod. Capacity 2011 (MWc/an)	
500	
Prod. Capacity 2012 (MWc/an)	
1000	

A cause des problèmes d'environnement (Cd), on est en quête de matériaux inoffensifs tels que: ZnO, ZnS, SnO₂, Sn(S,O)₂, In₂S₃, In(OH)₃, ZnSe, ZrO₂; performances faibles avec ces couches tampon

Le cout de watt crête varie entre 0,42 et 0,55 euro.

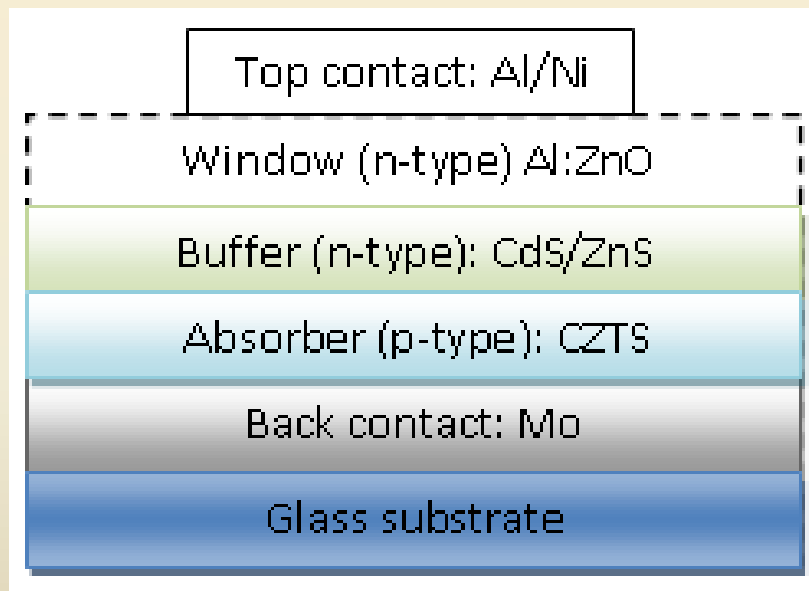
Pr REGRAGUI

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière $\text{Cu}_2(\text{ZnSn})(\text{S},\text{Se})_4$

- Coefficient d'absorption important (10^4cm^{-1}) et un gap égal à 1,5eV,
- Propriétés optiques et électriques similaires à celles du CIGS,



cellule à base de CZTS

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière $\text{Cu}_2(\text{ZnSn})(\text{S},\text{Se})_4$

- Plusieurs méthodes ont été utilisées pour son élaboration comme:

Technologies sous vide:

- pulvérisation de la poudre quaternaire, d'un composite pressé à froid contenant Cu_2S , ZnS et SnS_2 suivi d'un recuit, pulvérisation Dc magnétron utilisant des métaux (Cu:Zn:Sn) suivi d'une sulfurisation,...;
- Évaporation d'un empilement contenant Cu/Sn/Zn suivi d'un recuit dans H_2S ou coévaporation de Cu, Zn, Sn,S
- Dépôt par laser pulsé: Pastille est formée d'une poudre de Cu_2S , ZnS et SnS_2

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

La filière $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$

- Plusieurs méthodes ont été utilisées pour son élaboration comme:

Technologies n'utilisant pas de vide:

- Electrodeposition: Cu et Sn déposé par une solution alcaline, Zn par une solution acide le tout recuit dans une atmosphère sulfurée à 500°C,
- Sol-gel ou spin coating utilisant Cu(II) acetate monohydraté, Zn(II) acétate di-hydraté, Sn(II) chloride di-hydraté dans des solvant suivi d'un recuit dans une atmosphère sulfurée à 500°C,
- Sérigraphie de billes frittées puis pressées de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$,
- Spray pyrolysis à partir de CuCl , ZnCl_2 , SnCl_4 et thiourée dans un mélange d'eau désionisée et d'éthanol.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

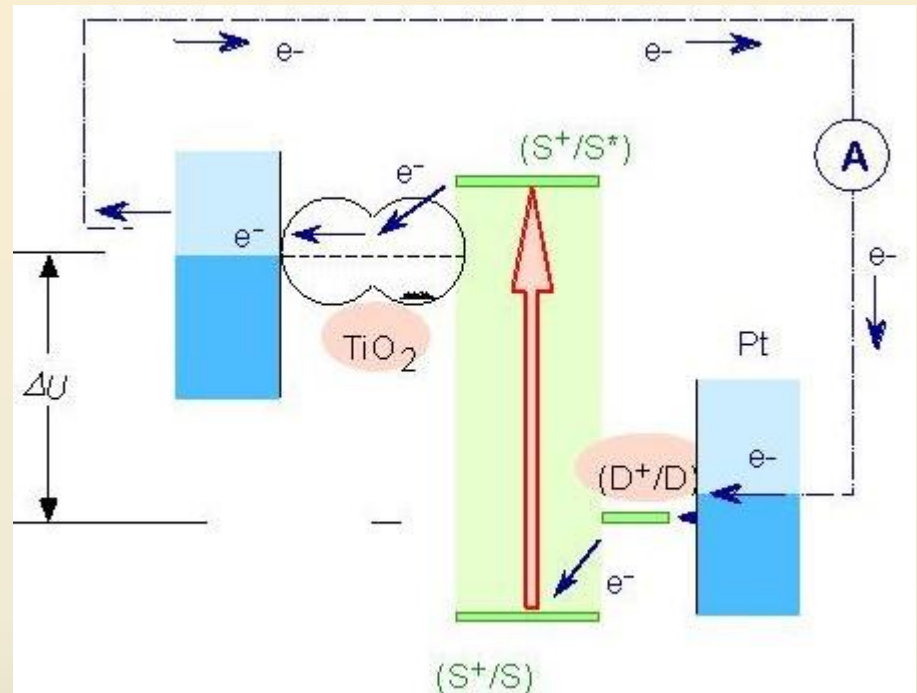
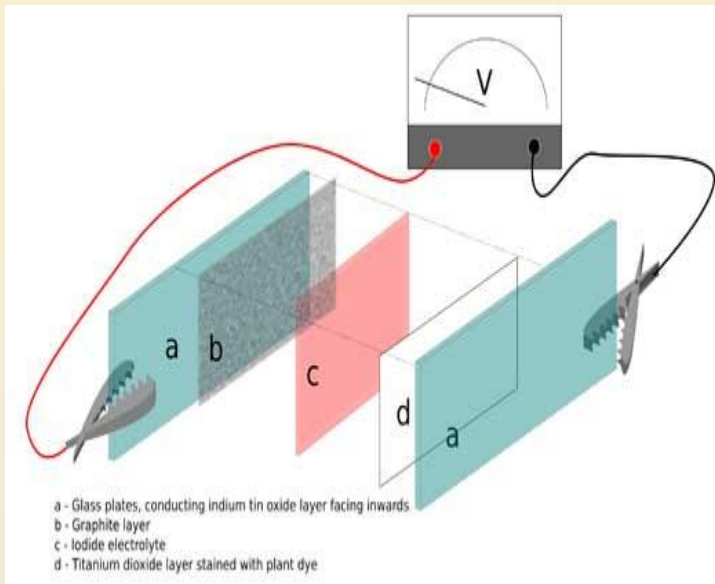
La filière $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$

dépôt	méthode	Rendement (%)
Sous vide	évaporation	8,4
	pulvérisation	6,7
	Laser pulsé	4,1
Sans vide	Spin coating	11,1
	électrodéposition	7,3
	CVD	6,03

Rendements maximum des cellules PV à base de CZTS
reportés dans la littérature

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- cellule de Graetzel



- Ces cellules solaires, composées de matériaux organiques sur inorganiques peuvent atteindre des rendements supérieurs à 10%
- La couche monomoléculaire de colorant absorbe moins de 1% de la lumière incidente → augmentation de la rugosité de surface

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

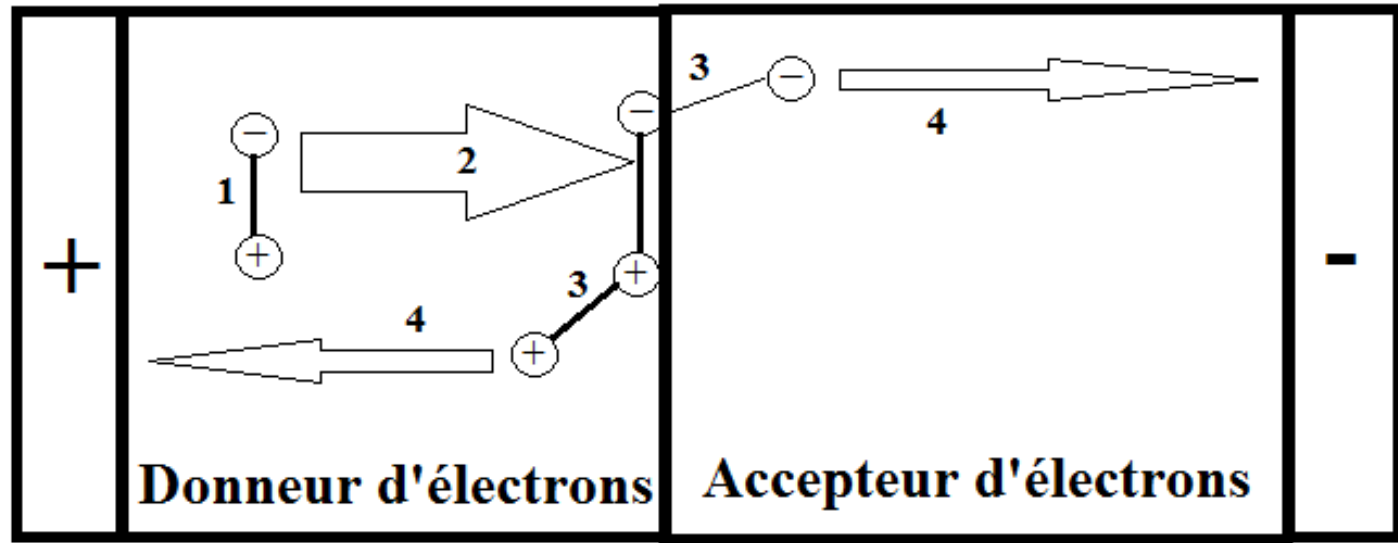
c- cellule de Graetzel

- Difficulté de trouver un semi-conducteur dont les propriétés physiques soient à la fois compatibles avec l'exposition à la lumière et le contact d'un électrolyte liquide
- Le colorant doit être compatible avec le Semi-conducteur et l'électrolyte (ruthenium bipyridyls)
- Des possibilités de substrats permettent une flexibilité
- Peuvent alimenter des montres à faible consommation à partir du verre de montre
- Peuvent être utilisées dans les objets de consommation et non dans des applications de puissance



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

d- cellules organiques

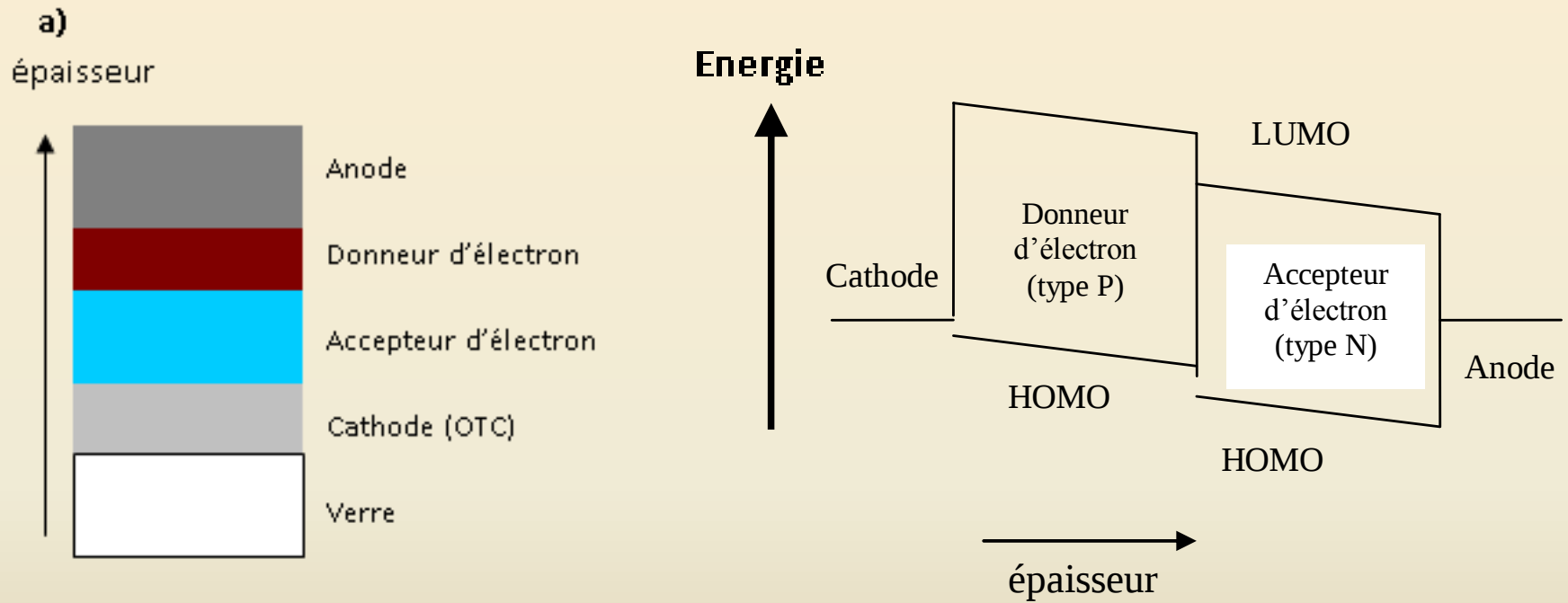


- 1: absorption de photons et création d'excitons**
- 2: diffusion des excitons**
- 3: dissociation des excitons**
- 4: transport des électrons et des trous**

Principe de fonctionnement

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

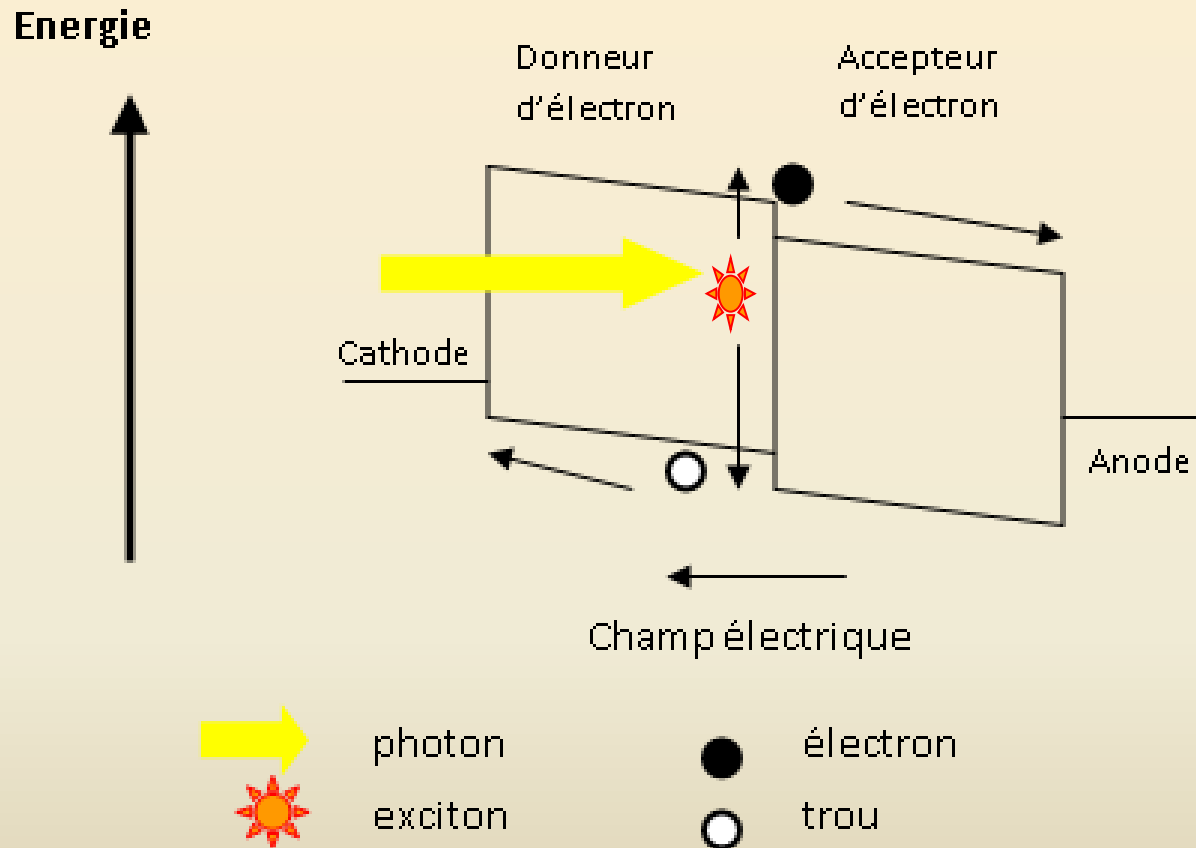
d- cellules organiques



Photopile organique à jonction « PN » (a) et sa structure de bande en circuit ouvert (b).

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

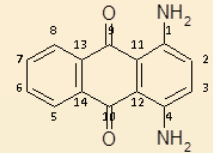
d- cellules organiques



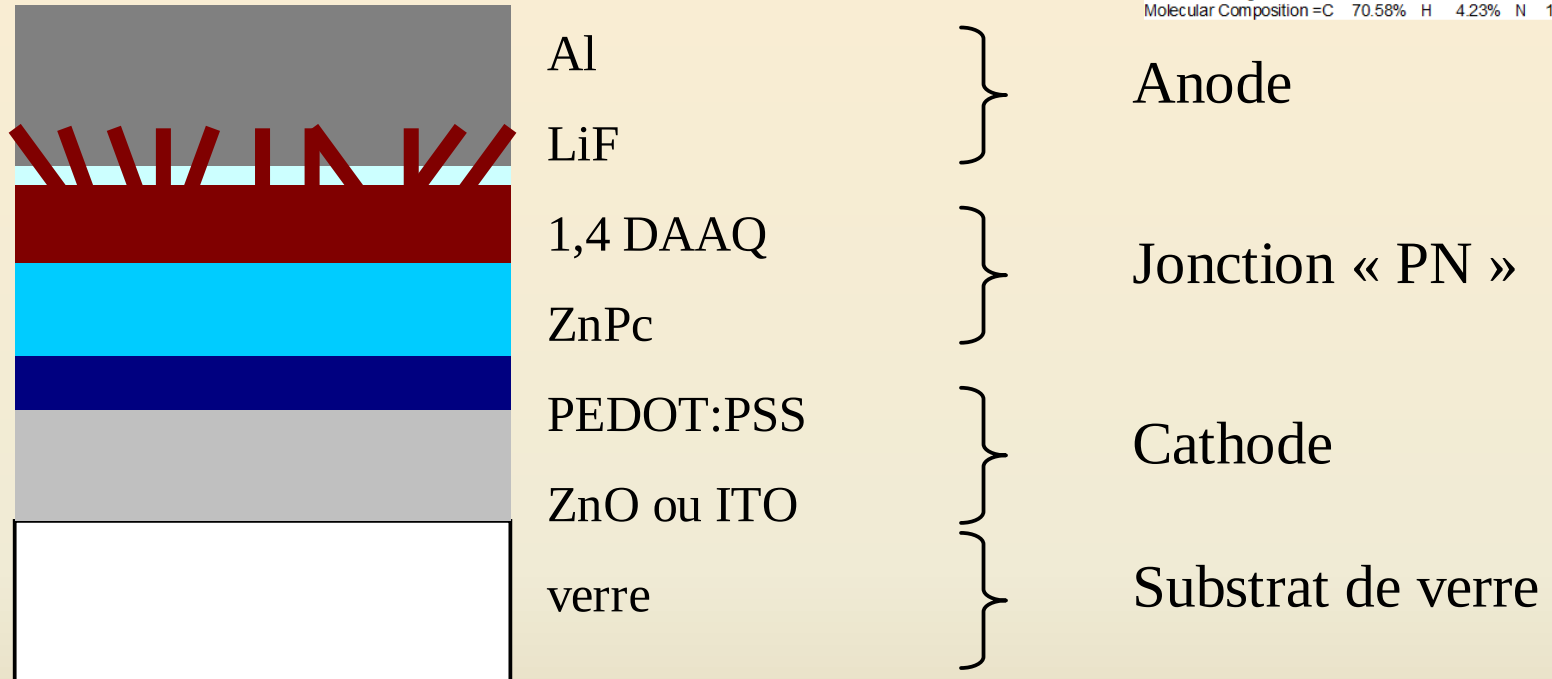
Principe de fonctionnement d'une photopile organique à jonction PN.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

d- exemple de cellule organique

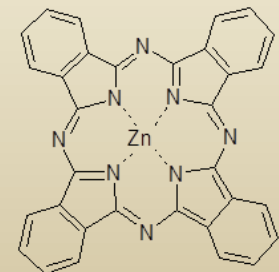


Molecular Weight =238,25
Molecular Composition =C 70.58% H 4.23% N 11.76% O 13.43%



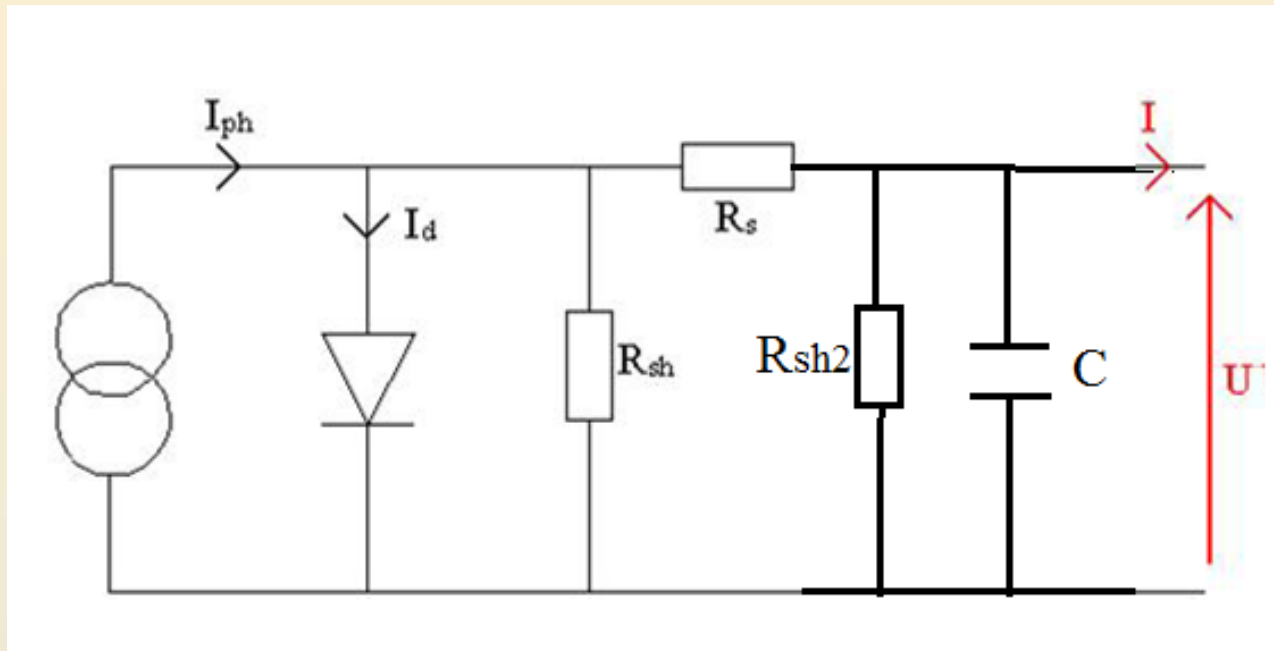
Structure « classique » de photopile.

Pr REGRAGUI



Molecular Weight =579,92
Molecular Composition =C 66.28% H 3.13% N 19.32% Zn 11.27%

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES d- cellules organiques



R_{sh2} prend en compte les pertes de recombinaison près des électrodes

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

d- cellules organiques

Problèmes:

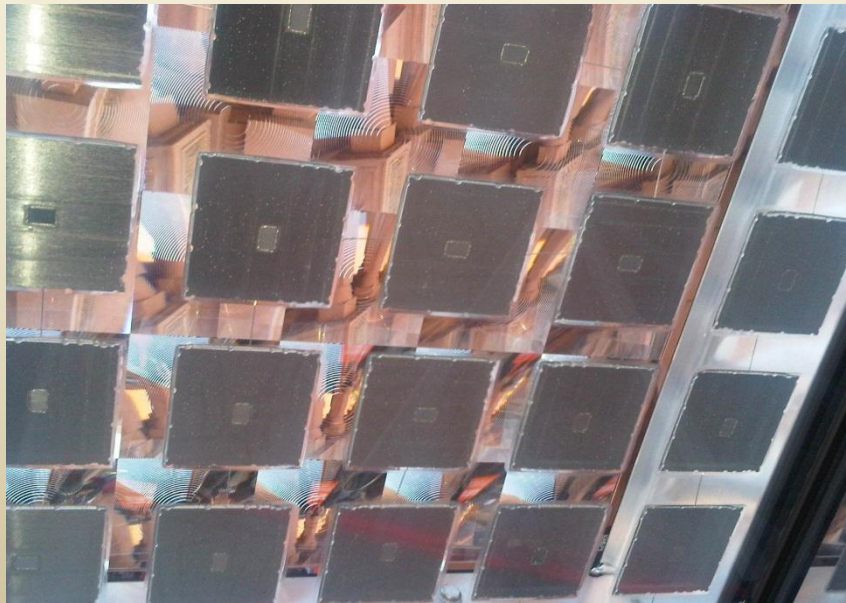
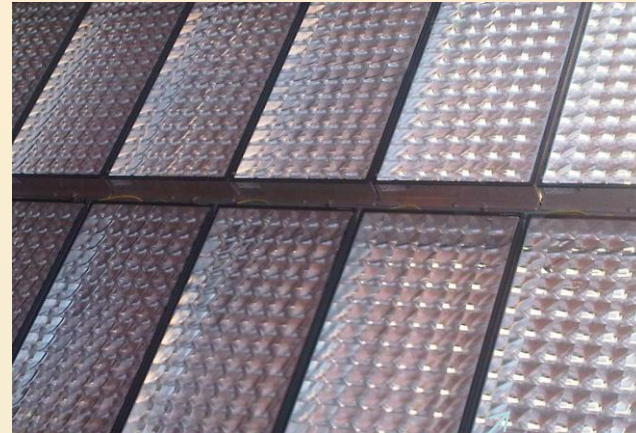
- 1- Pertes de photons: souvent les organiques ont un $E_g \approx 2 \text{ eV}$
- 2- Pertes d'excitons: lors de leur diffusion
- 3- Pertes de porteurs: lors de leur diffusion et collection
- 4- une très grande R_s
- 5- une petite valeur de R_{sh}

Solution:

Milieux interpénétrés, Copolymers...etc au niveau de D/A le transfert d'électrons est plus rapide que la désexcitation de l'exciton

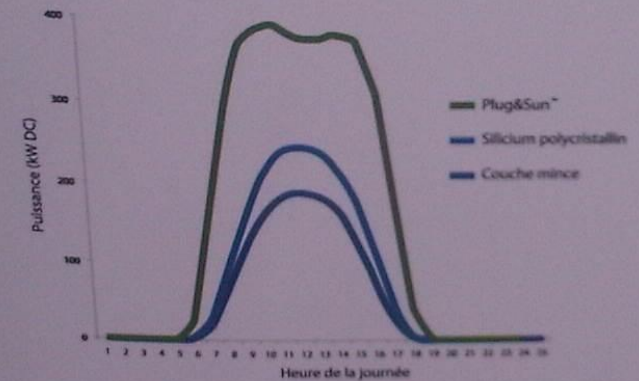
Pr REGRAGUI

Photovoltaïque à concentration CPV



REGRAGUI

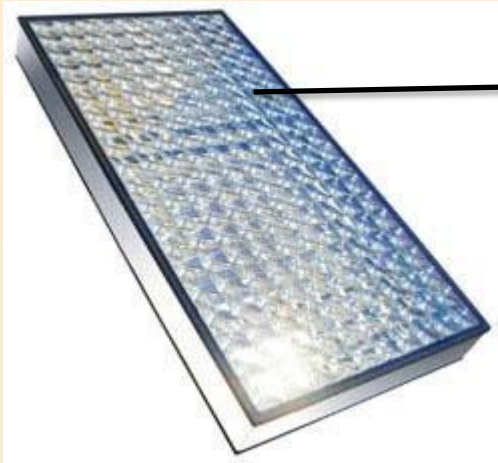
Production maximale dans
les zones à fort ensoleillement



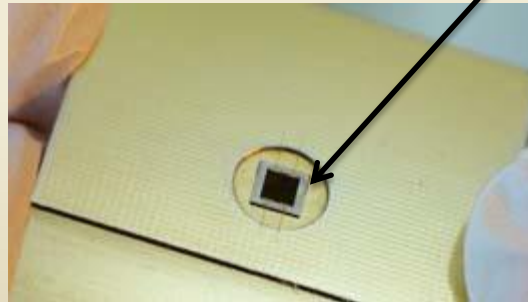
Production 2 à 3 fois supérieure

Photovoltaïque à concentration CPV

Module CPV



Concentrateur à lentille



Cellule PV multi-jonctions III-V

Pr REGRAGUI

Formation

Etude pour la MEMEE pour les compétences pour le plan stratégique de l'énergie:

	2015	2020	2025
SBT	911	1606	2830
Eolien	3378	3844	7437
PV et CSP	2904	6113	7356

Pour la génération de l'électricité par voie solaire, il faut former annuellement:

- 750 techniciens
- 160 Bac + 5

Etat des lieux:

➤ Formation:

- 799 compétences en EnR&EE dont 173 en énergie solaire PV
- 31 formations (D Ing 3, Mas Rec 5, MS 6, LP 9, LST 2, DUT6)

➤ Recherche:

- 239 personnes actives en EnR&EE dont 55 en énergie solaire PV
- 29 Structures