

conversion photovoltaïque

Pr REGRAGUI

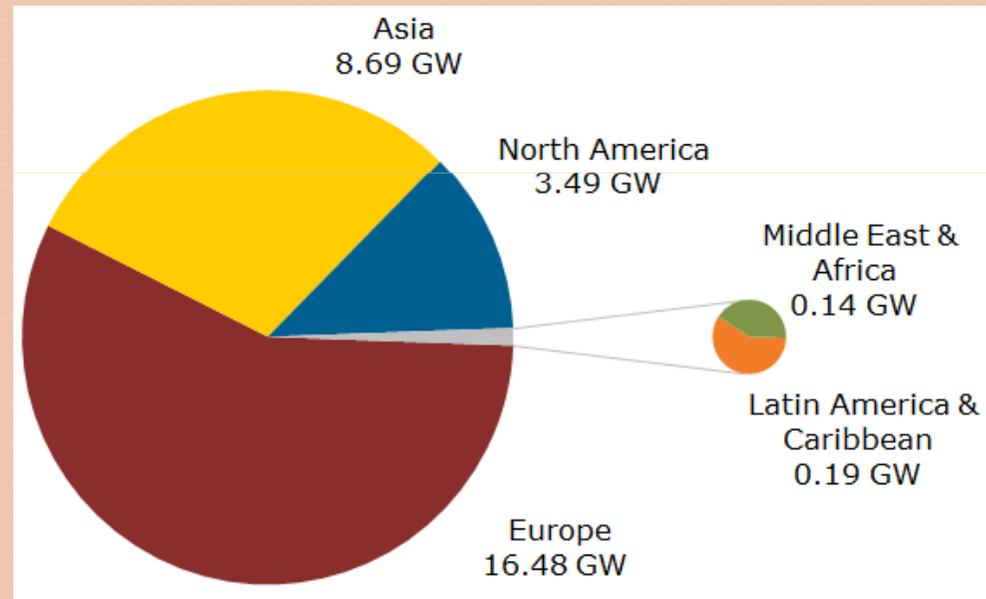
Transformation de l'énergie solaire

- 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)



Demande PV par région en 2012 (29GW)
Estimation pour 2013 = 31GW

Pr REGRAGUI

Transformation de l'énergie solaire

- Dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998.
- Fin 2011, la capacité totale installée était évaluée entre 71 GW, contre 24 GW en 2009.
- La capacité cumulée installée en 2012 est d'environ 100 GW répartie :
 - Europe 70 GW
 - Chine 8,3 GW
 - USA 7,8 GW
 - Japan 6,9
- Photovoltaïque Puissance installée en 2011

Allemagne: 7,5 GW	Italie: 9 GW	France: 1,5 GW	Royaume-Uni: 0,7 GW
Belgique: 0,55 GW	Espagne: 0,4 GW	Slovaquie: 0,35 GW	Grèce: 0,35 GW

Photovoltaïque Puissance installée en 2011

Fabricant	MWc 2010	MWc 2011
Suntech Power (Chine)	1 800	2 400
Ja Solar (Chine)	1800	2254
Trina Solar (Chine)	1200	1900
Motech (Taiwan)	1200	1800
Yingli (Chine)	980	1700
Gintech (Taiwan)	930	1500
Sharp (Japon)	1000	1400
Q-Cells (Allemagne)	1235	1325
Kyocera (Japon)	800	1000
First Solar (USA)	1510	710

Prix des modules photovoltaïques (Sept 2013)

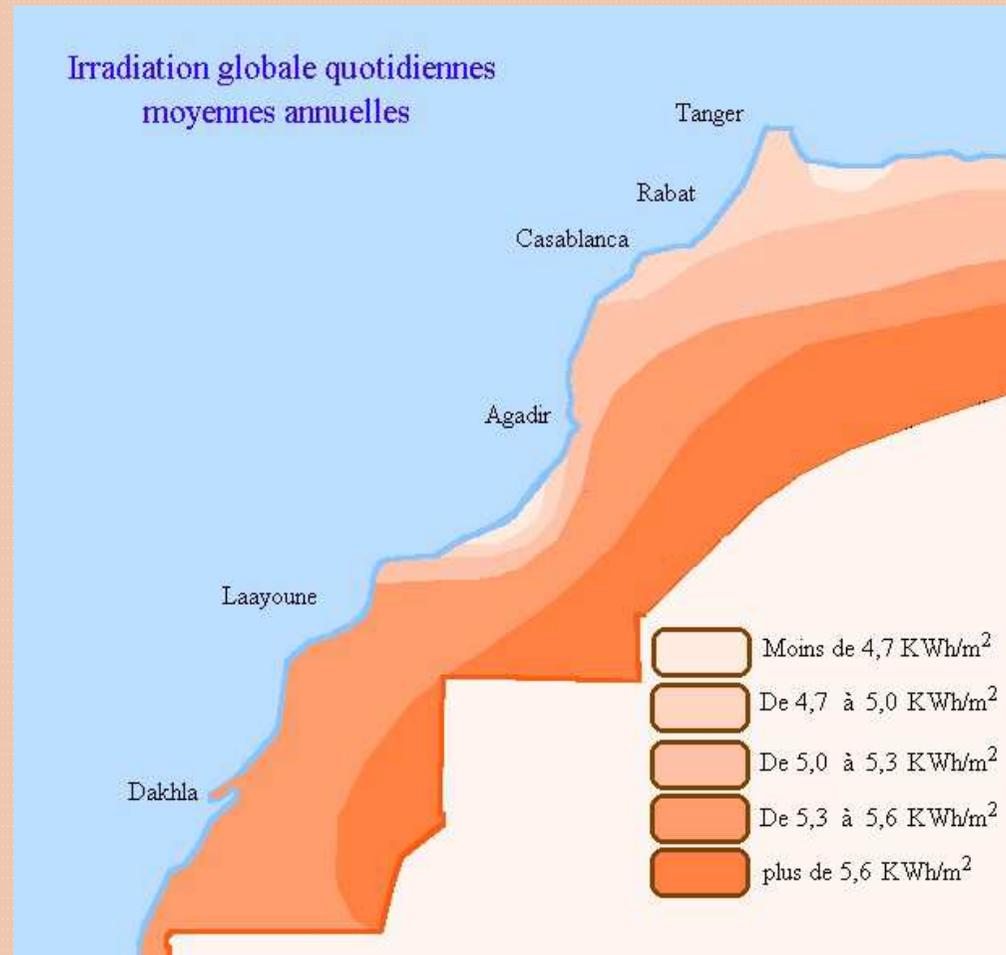
Type de module	Origine	Prix (€/Wc) Sept 2013	Tendance /AOUT 2013
cristallins	Japan	0,77	-1,28%
	Allemagne	0,74	00%
	Chine	0,58	1,75%
Couches minces	CdS/CdTe	0,58	00%
	a-Si/ μ -Si	0,45	-2,17%
	a-Si	0,35	-2,78%

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.

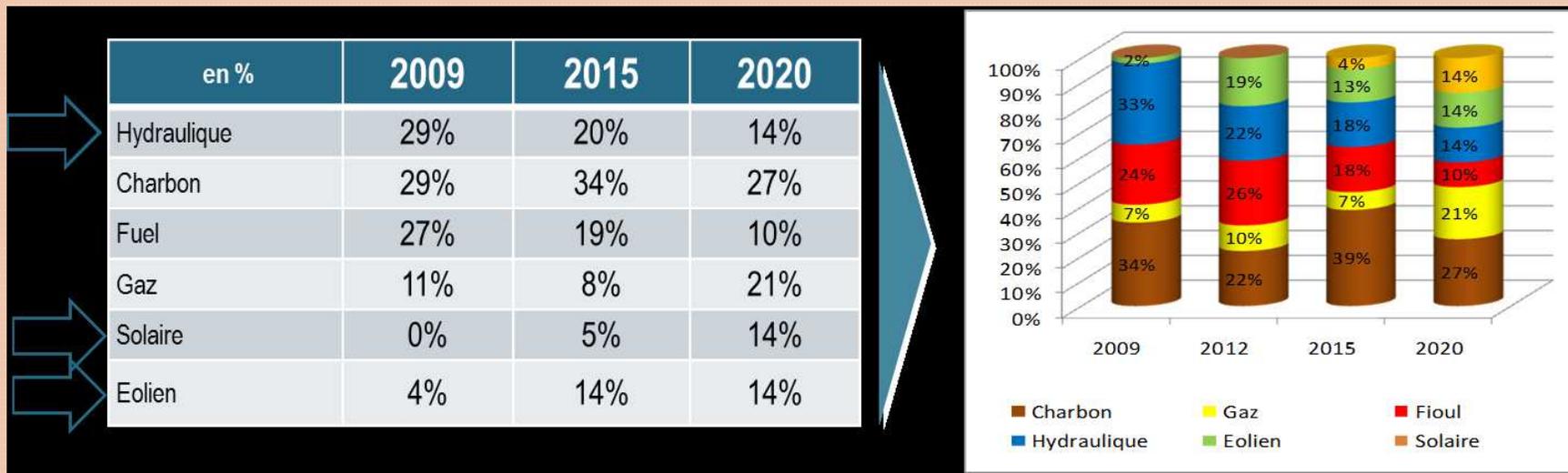
Distribution horizontale globale quotidienne de rayonnement au Maroc en kWh/(m².jour)



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.

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\$

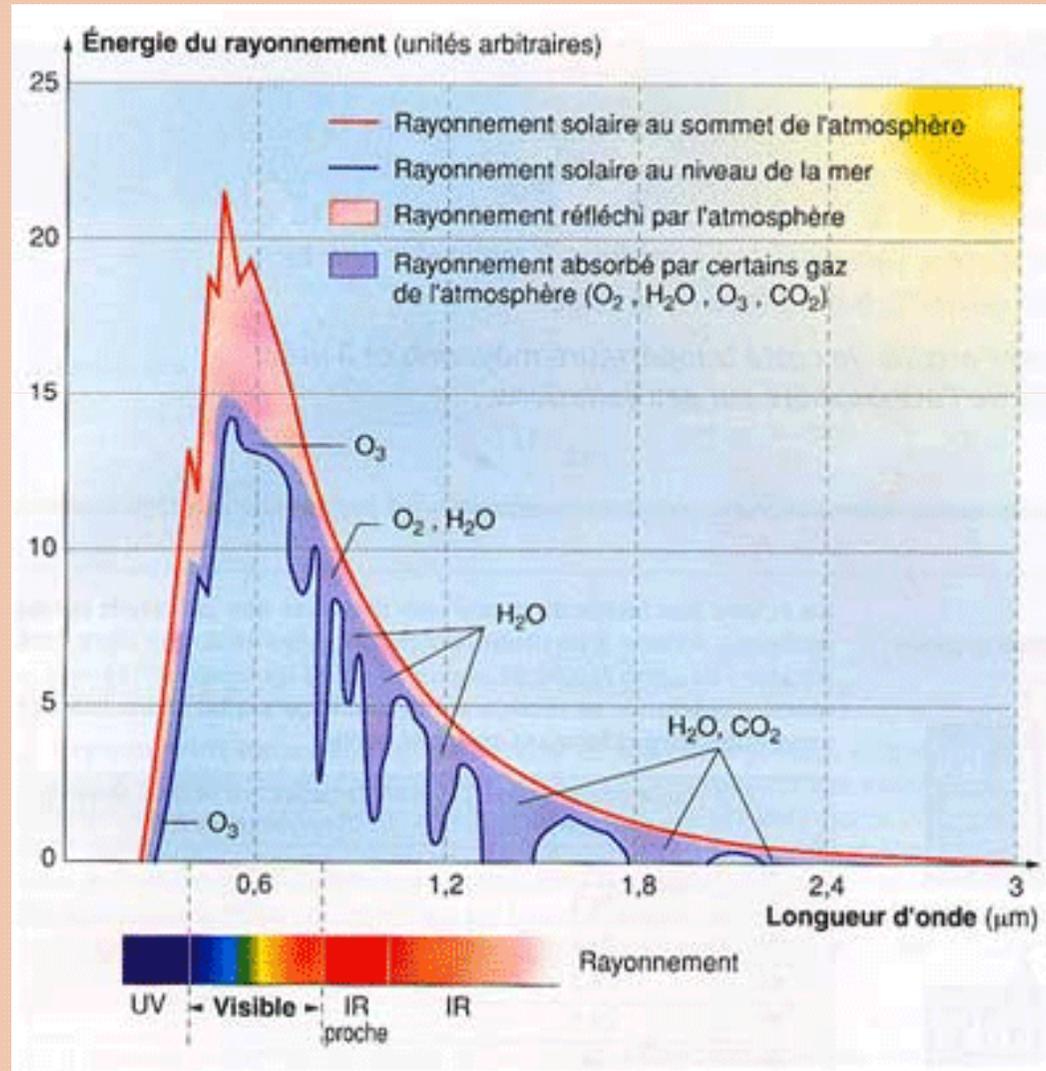


Fonctionnement théorique des photopiles

- 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

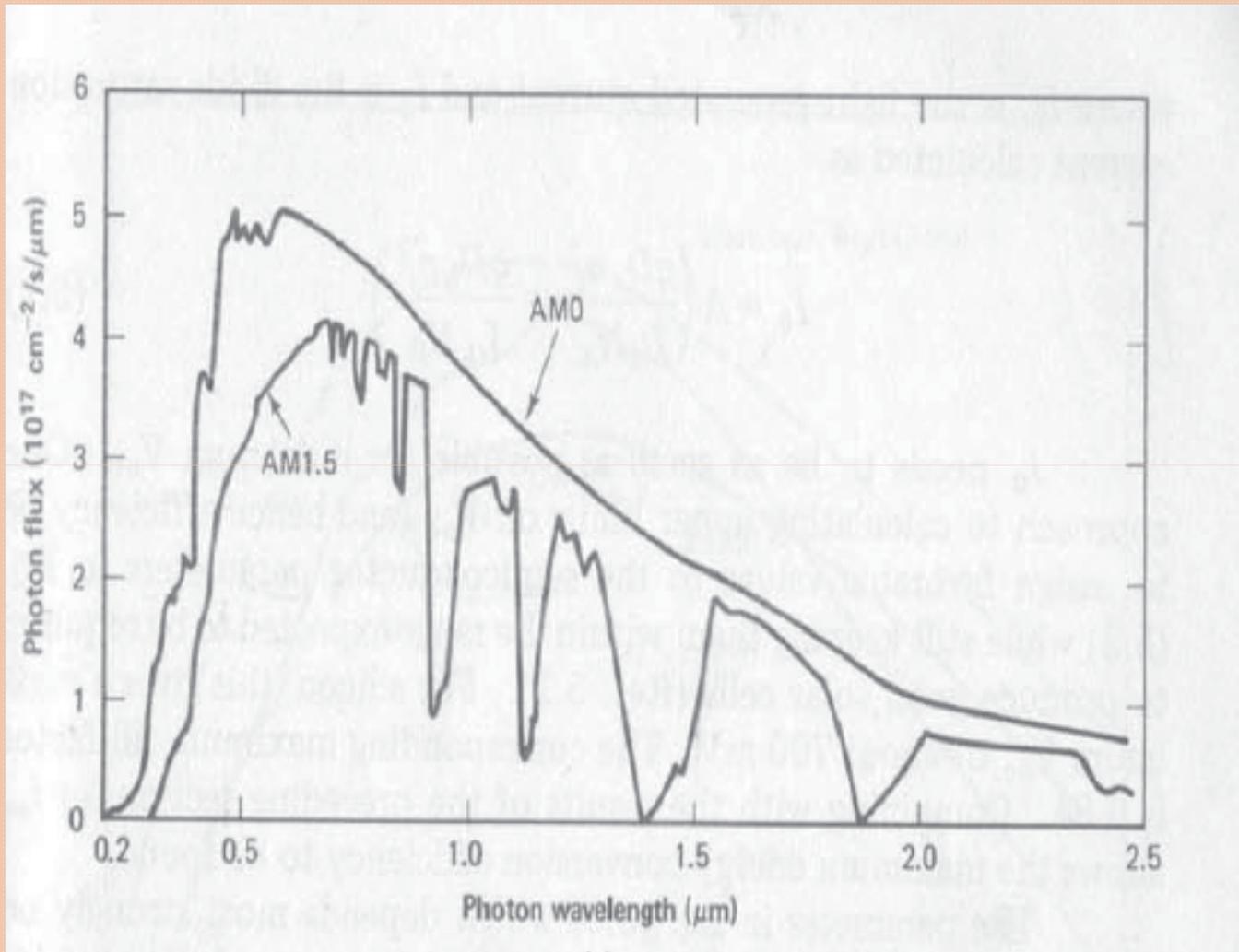
- Les photons: la lumière se comporte comme une onde constituée de « grains d'énergie »,

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

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

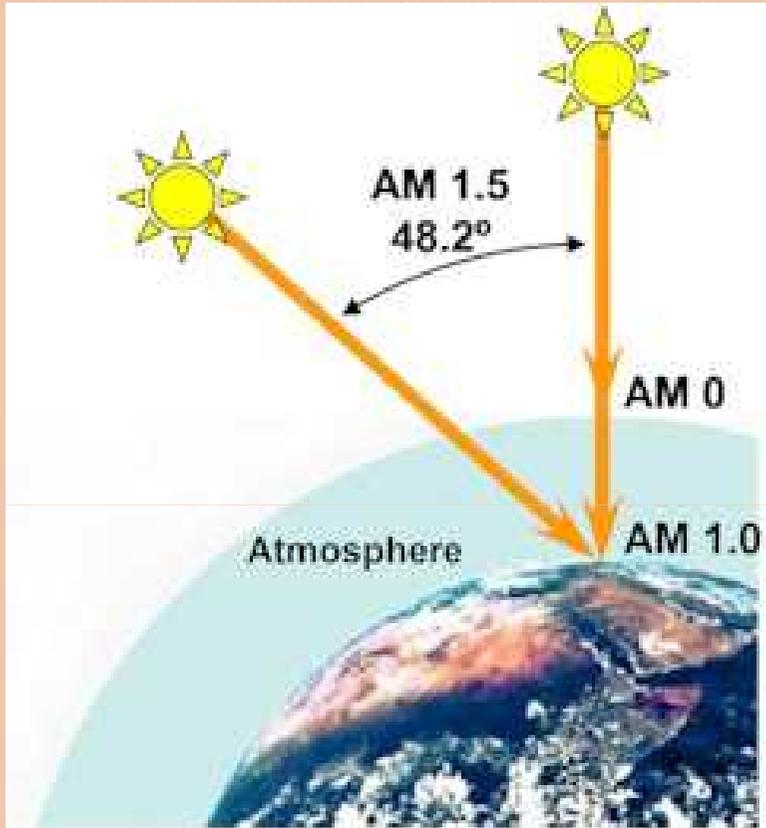
$$U_{\lambda} = n_{\lambda} \cdot w_{\lambda}$$

I- Effet Photoélectrique



Flux des photons dans le spectre solaire

Masse d'air



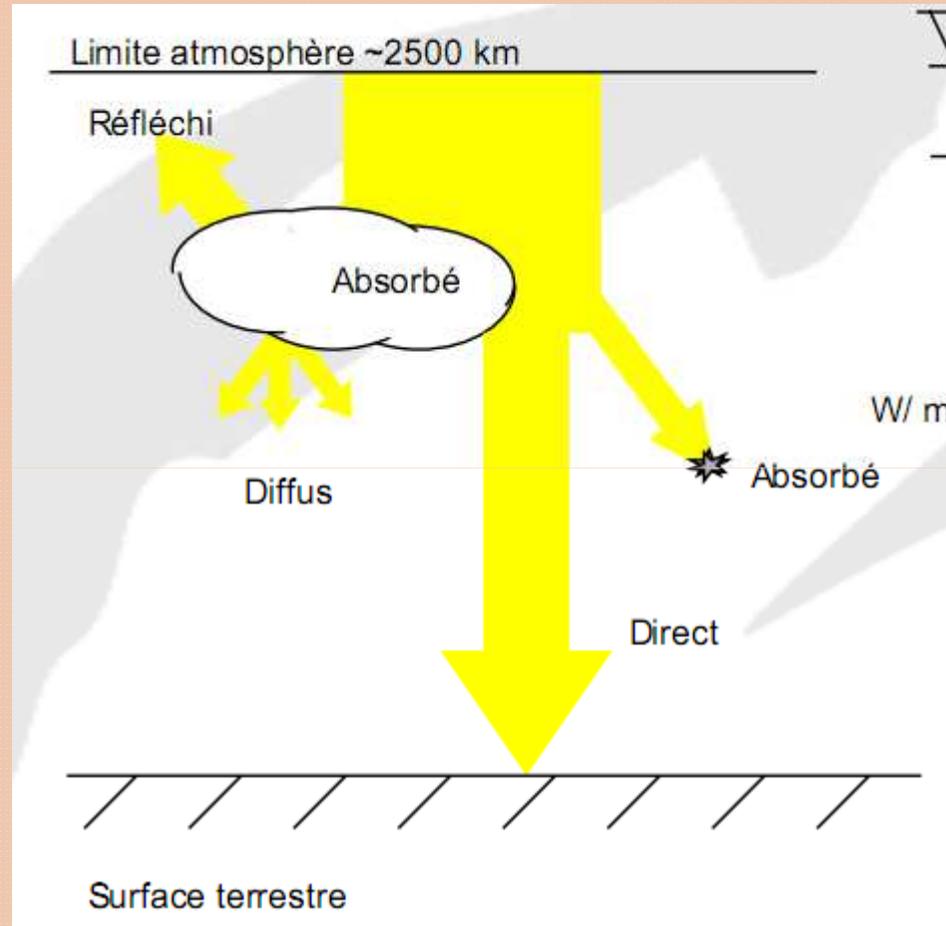
AM0: $W = 1.360 \text{ W/m}^2$ (hors atmosphère, constant solaire).

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)

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

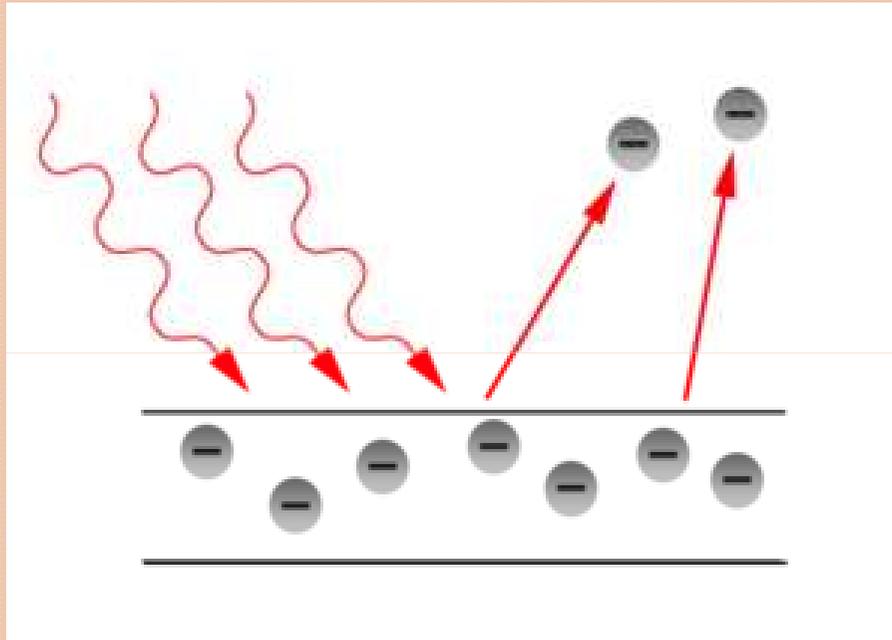
Radiation direct et diffuse



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

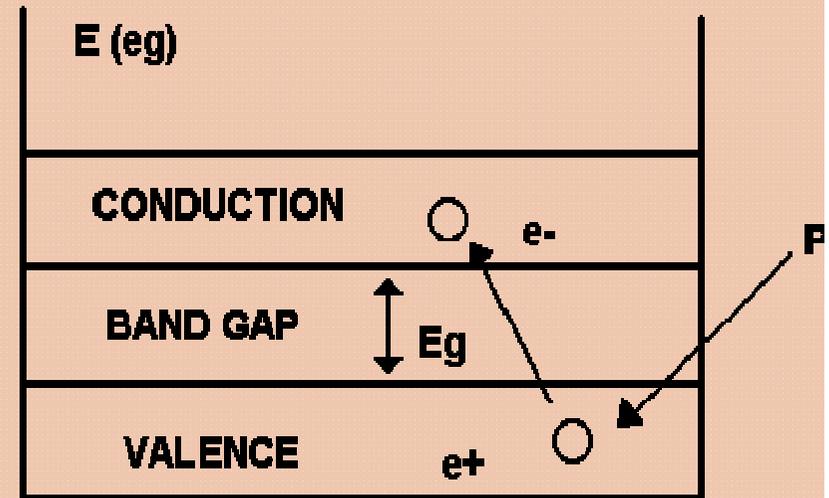
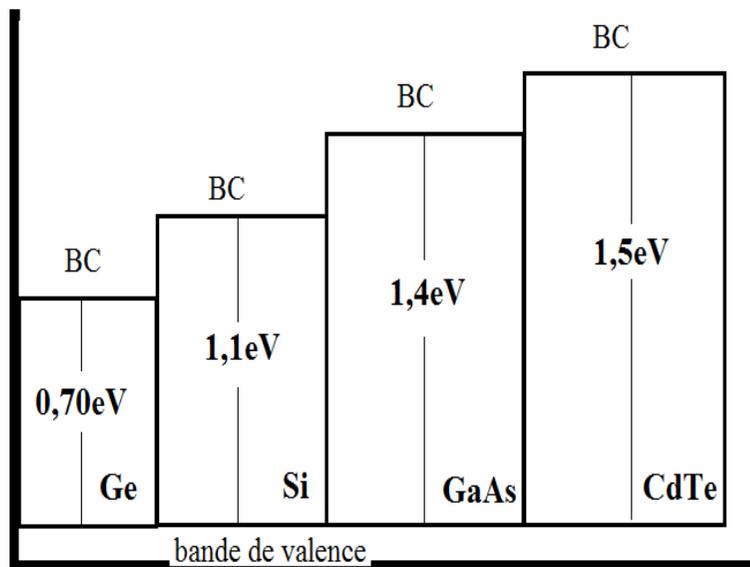


Schéma explicatif du
phénomène en utilisant
la notion de la bande
interdite « gap ».

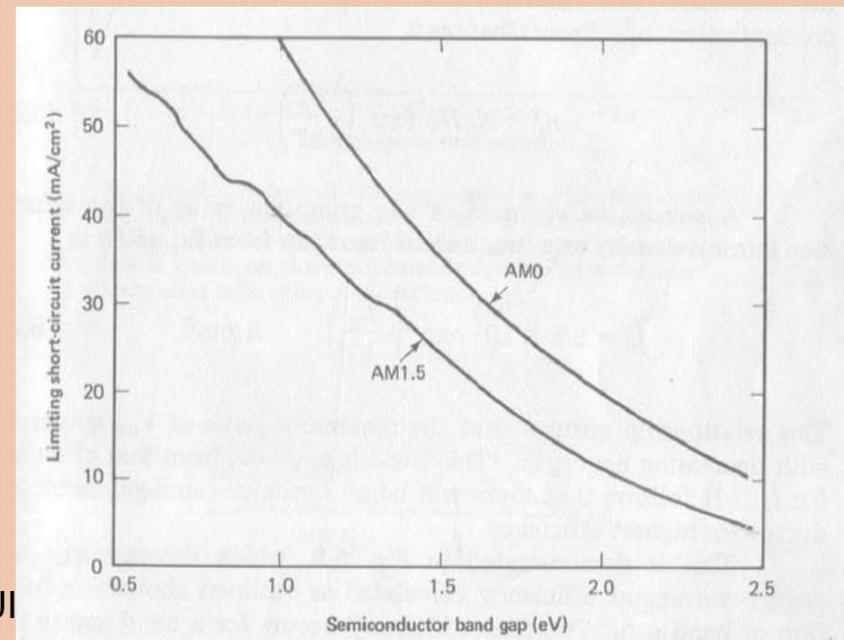
Création de porteurs libres ou effet photoélectrique

- 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.

Valeurs de la bande interdite



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

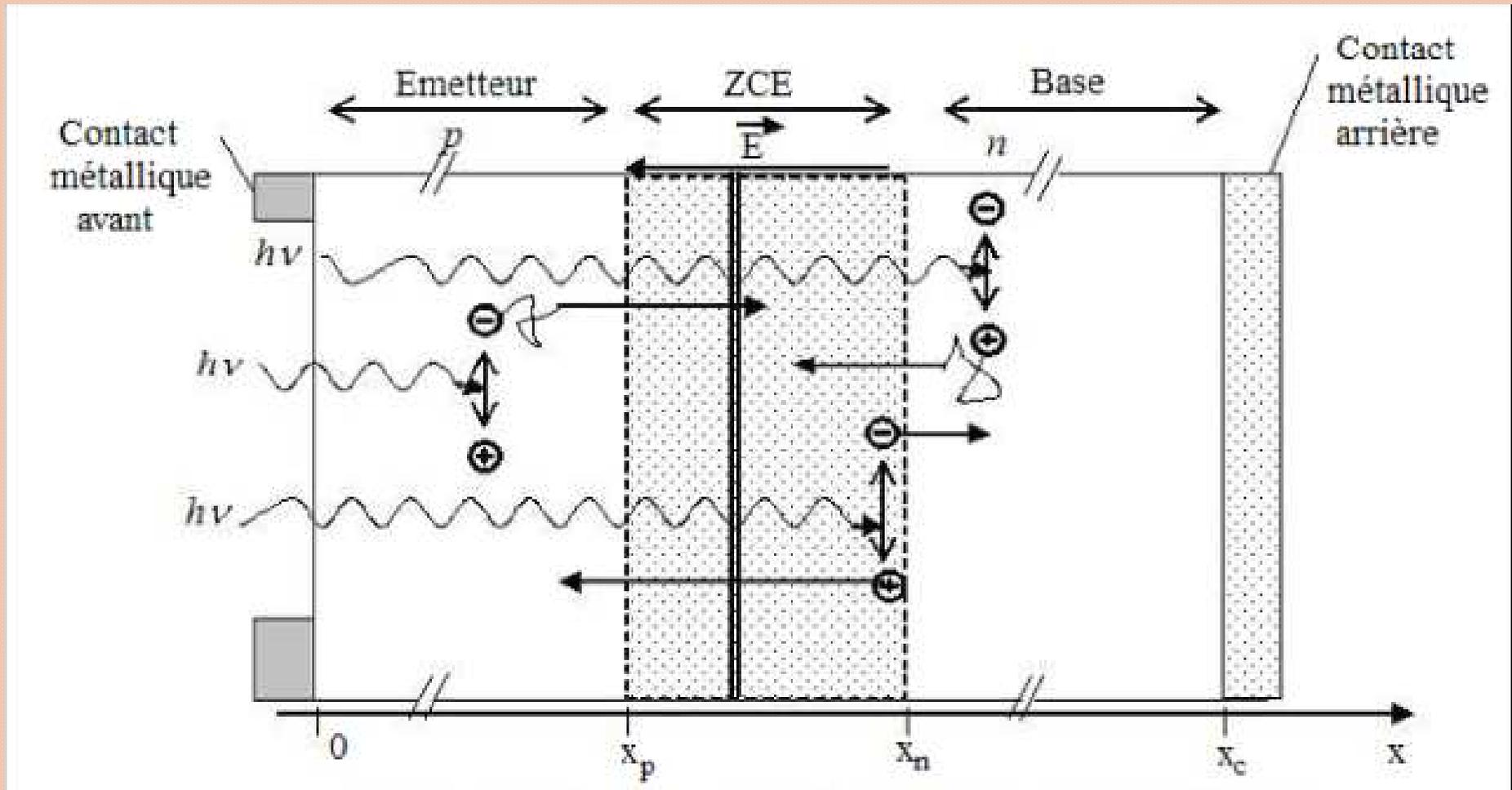
- Les semi-conducteurs de type N sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. Le but d'un dopage N est de produire un excès d'électrons. Afin de comprendre comment un tel dopage s'effectue, considérons le cas du silicium (Si). Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome 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

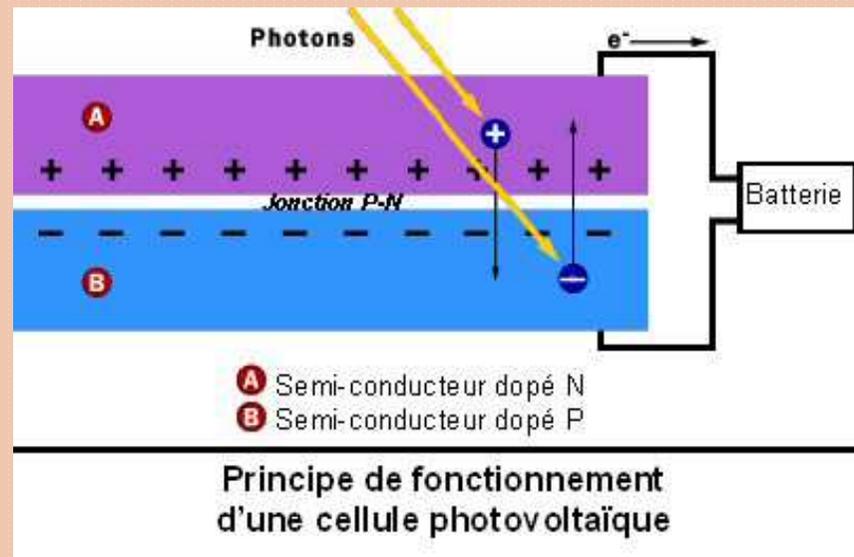


IV-2: Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique

- 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:

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

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

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

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

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

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 $x=0$:

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

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

et

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

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:

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

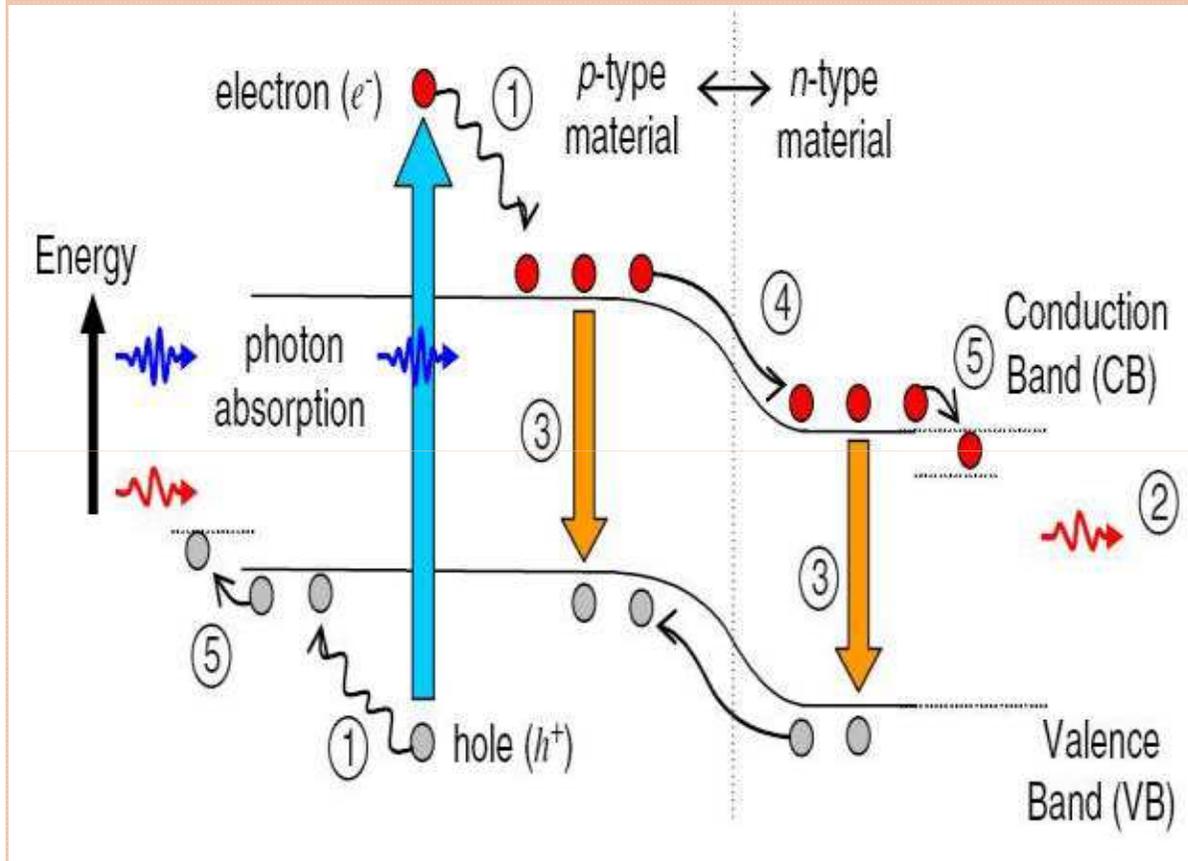
avec $w = w_n + w_p$

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

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

- En traçant C^2 en fonction de $(1/Va)$, 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

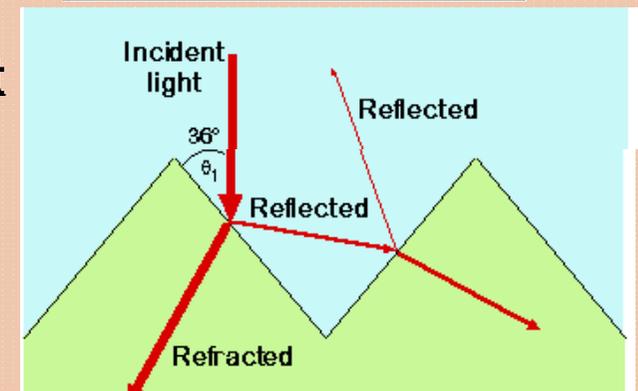
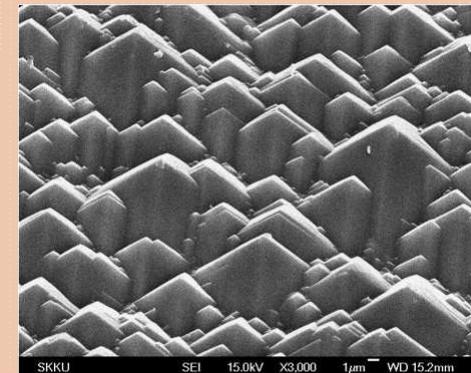
$$\xi = \frac{\text{nombre de photons absorbés}}{\text{nombre de photons incidents}}$$

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

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

$$\Phi = \Phi_0 (1 - R) e^{-\alpha d} \quad \text{où } \alpha = \frac{4\pi\nu k}{c} \quad \text{Pr REGRAGUI}$$



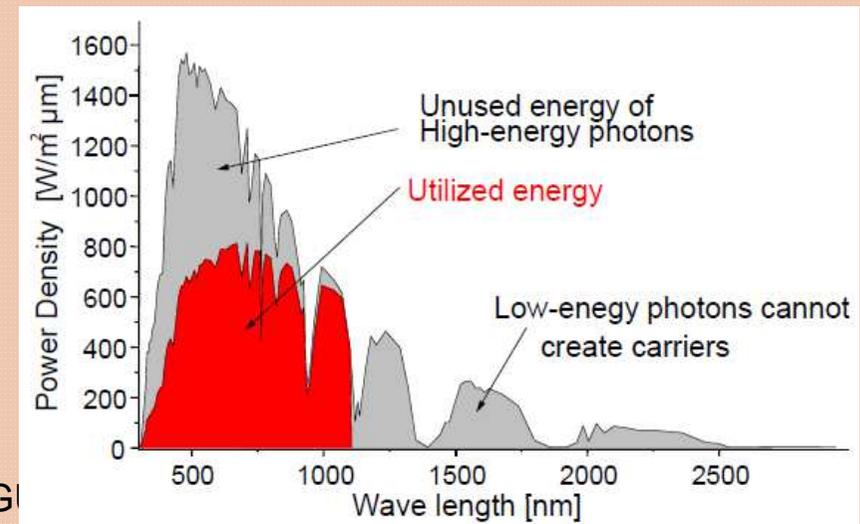
V-2: Rendement de transport H

- 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.

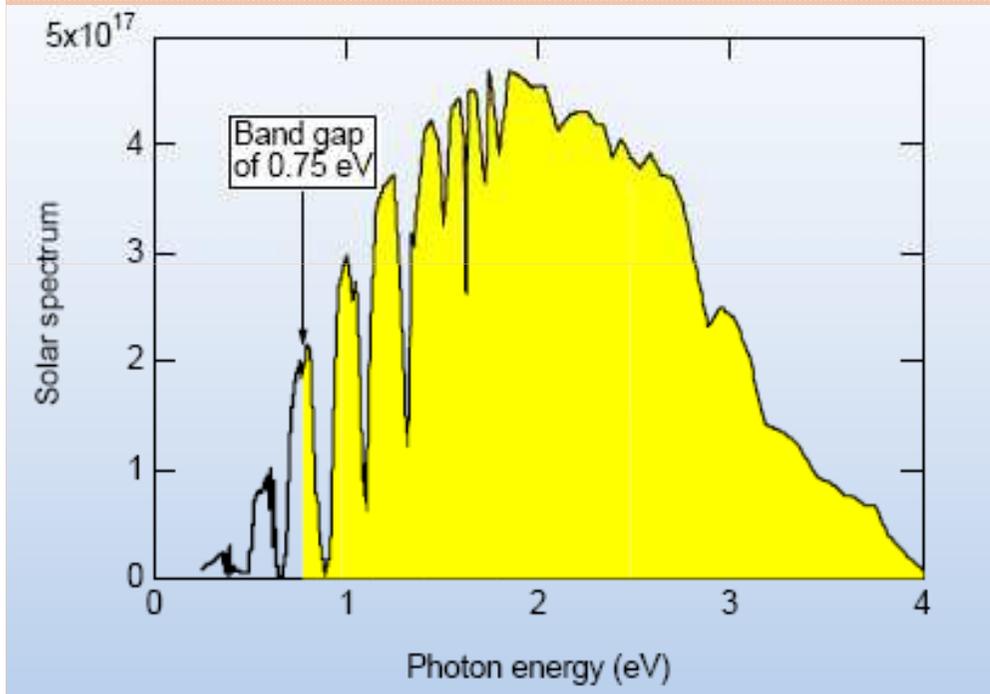


Absorption du spectre solaire

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

$$I_0 = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right)$$

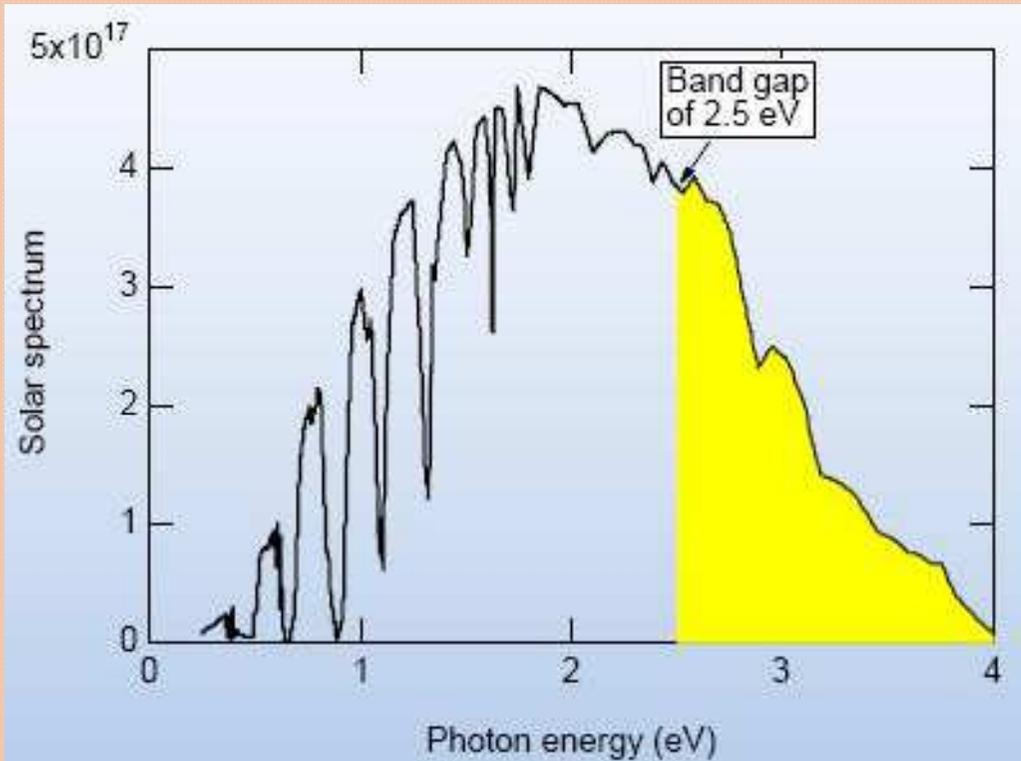
$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$



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 (Ics)
- Faible voltage V_{co} (E_g diminue)
- L'excès d'énergie incidente est perdue sous forme de chaleur

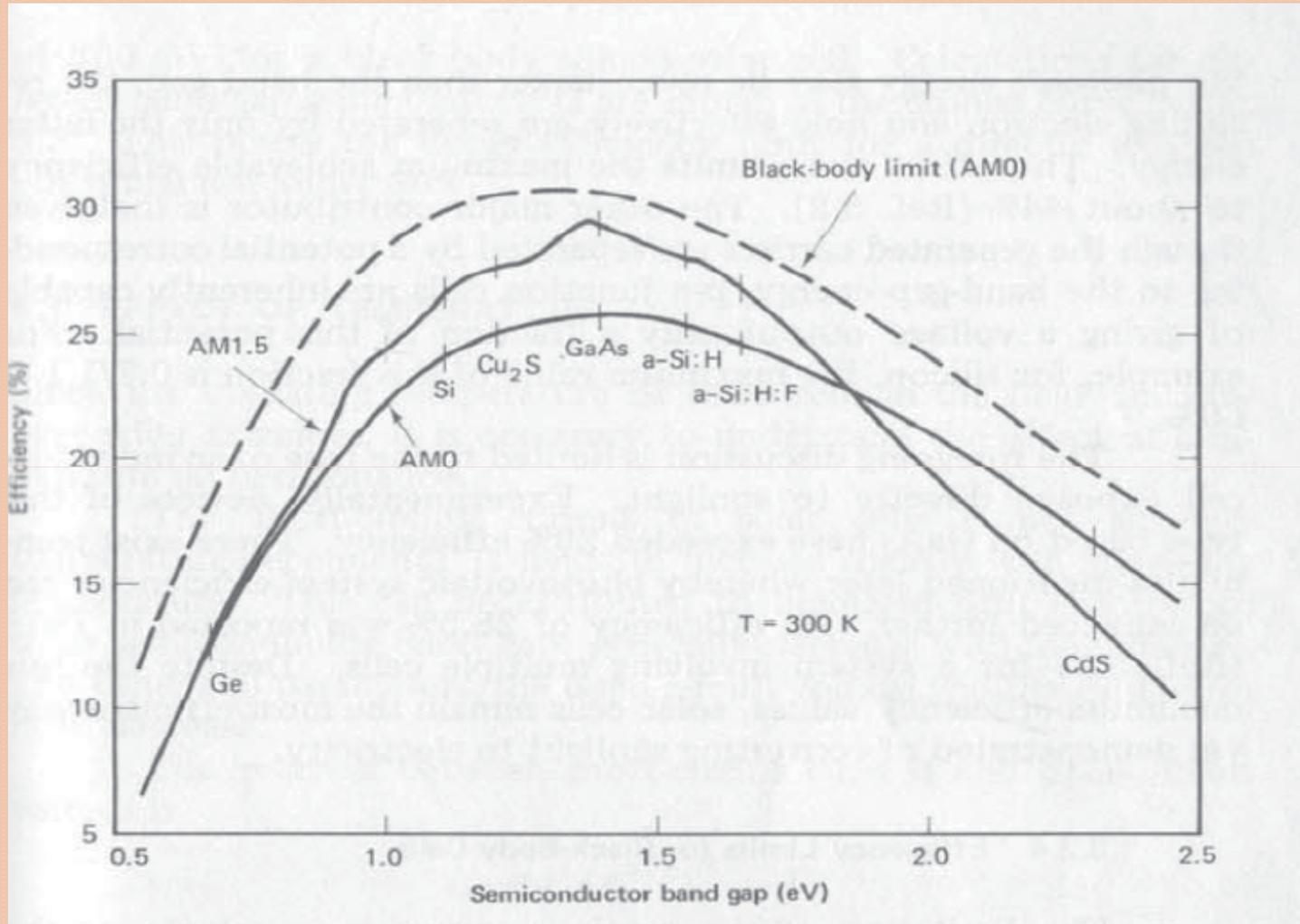
Absorption du spectre solaire



$w < E_g$ 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

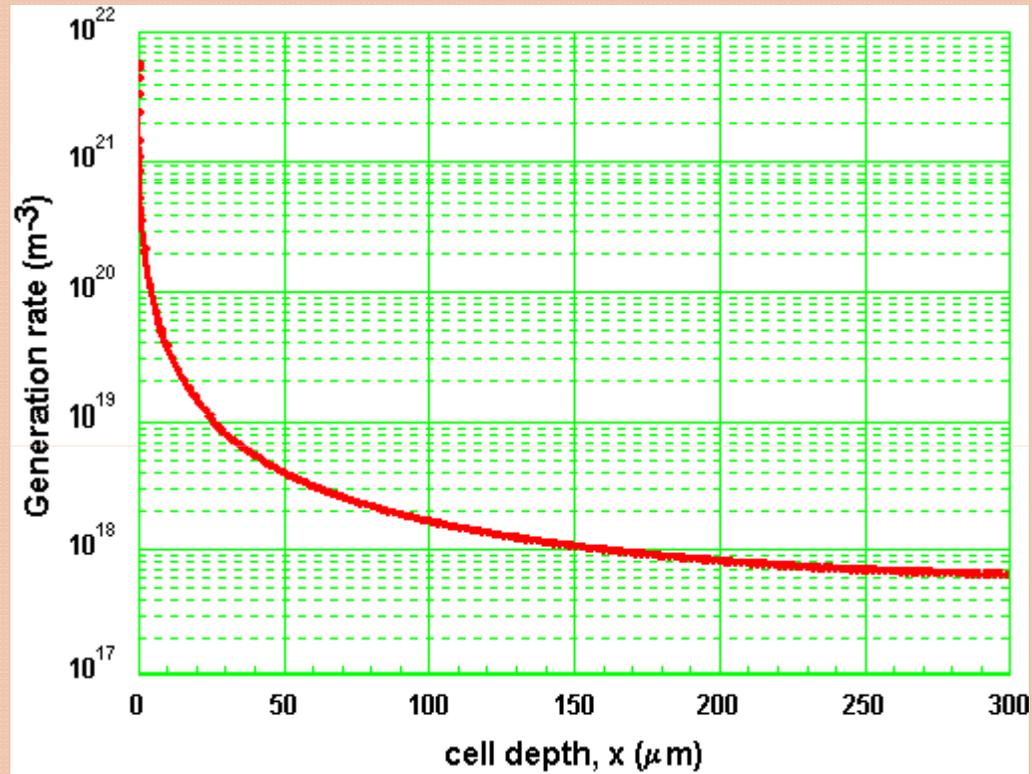
a. Influence de l'épaisseur:

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

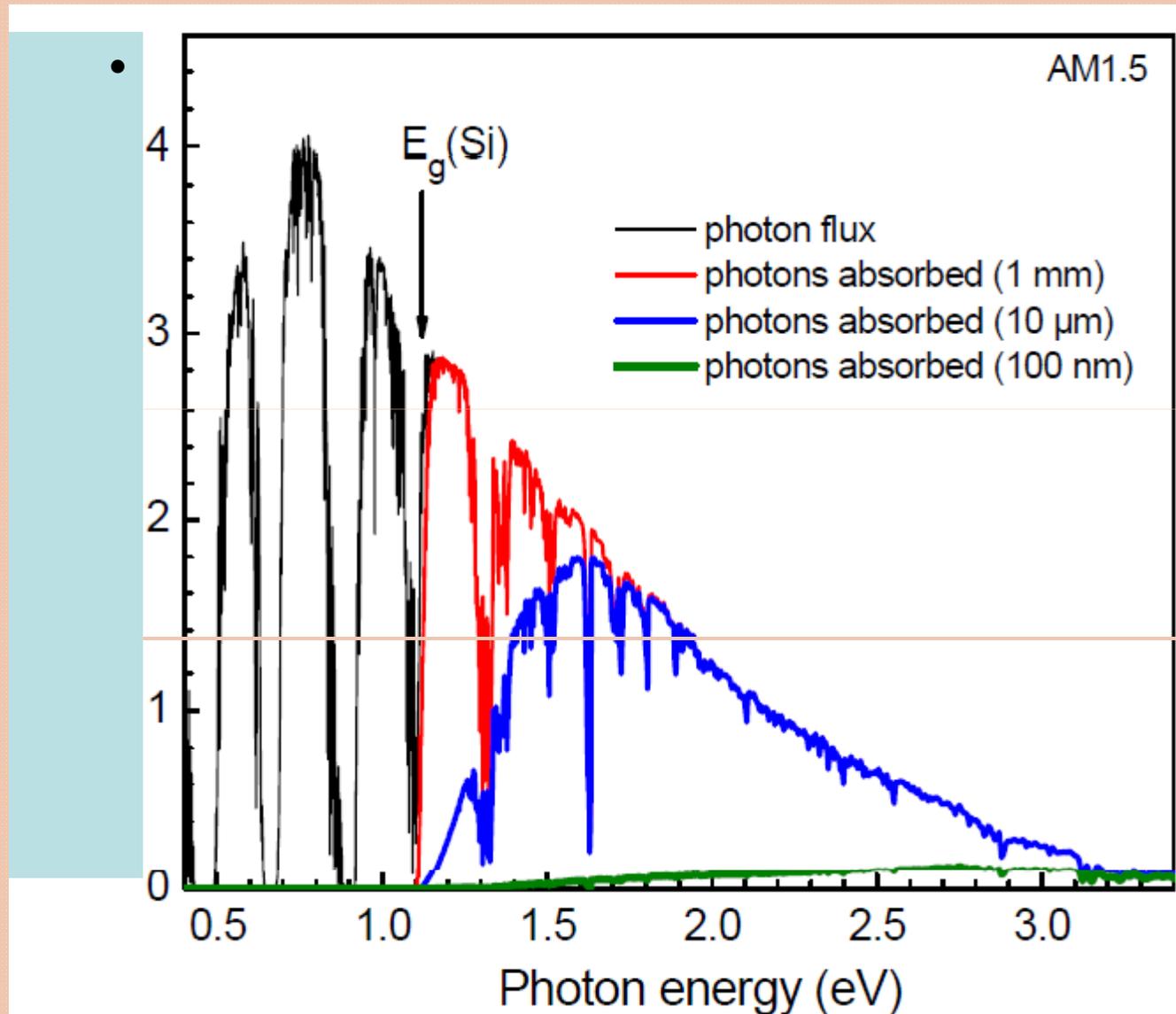
V-3-3: Efficacité de collecte



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

Pr REGRAGUI

V-3-3: Efficacité de collecte

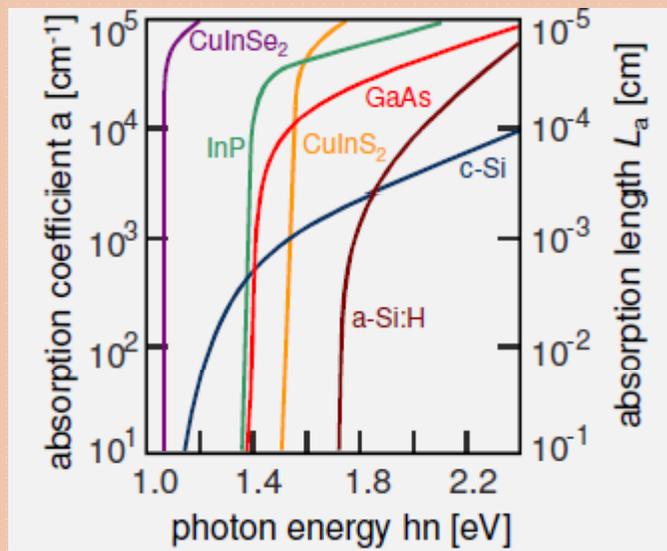


V-3-3: Efficacité de collecte

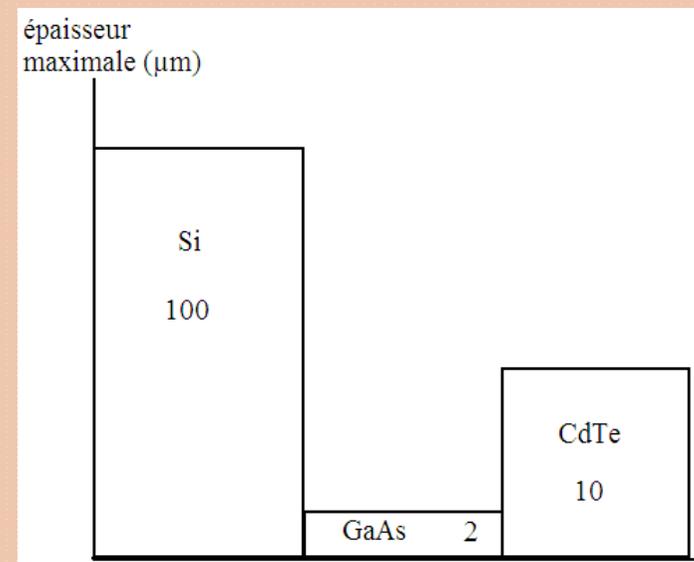
a. Influence du coefficient d'absorption α :

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:

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

- Semiconducteur dopé

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

- Zone dépeuplée :

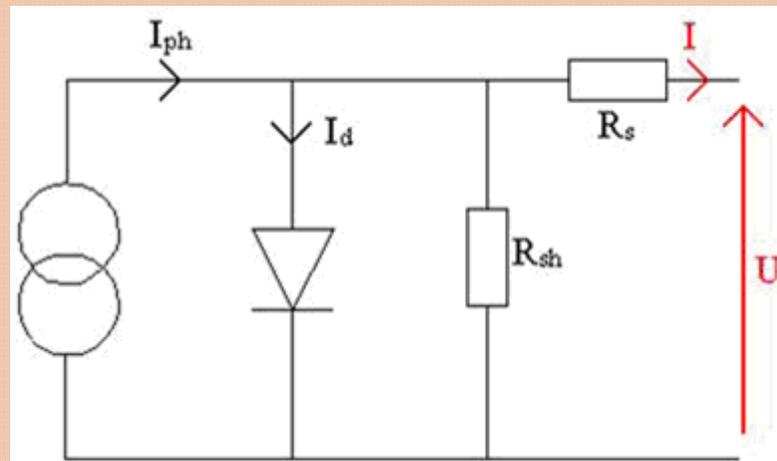
$$r = -\frac{n_i}{2\tau_m}$$

V-4: LE FACTEUR M

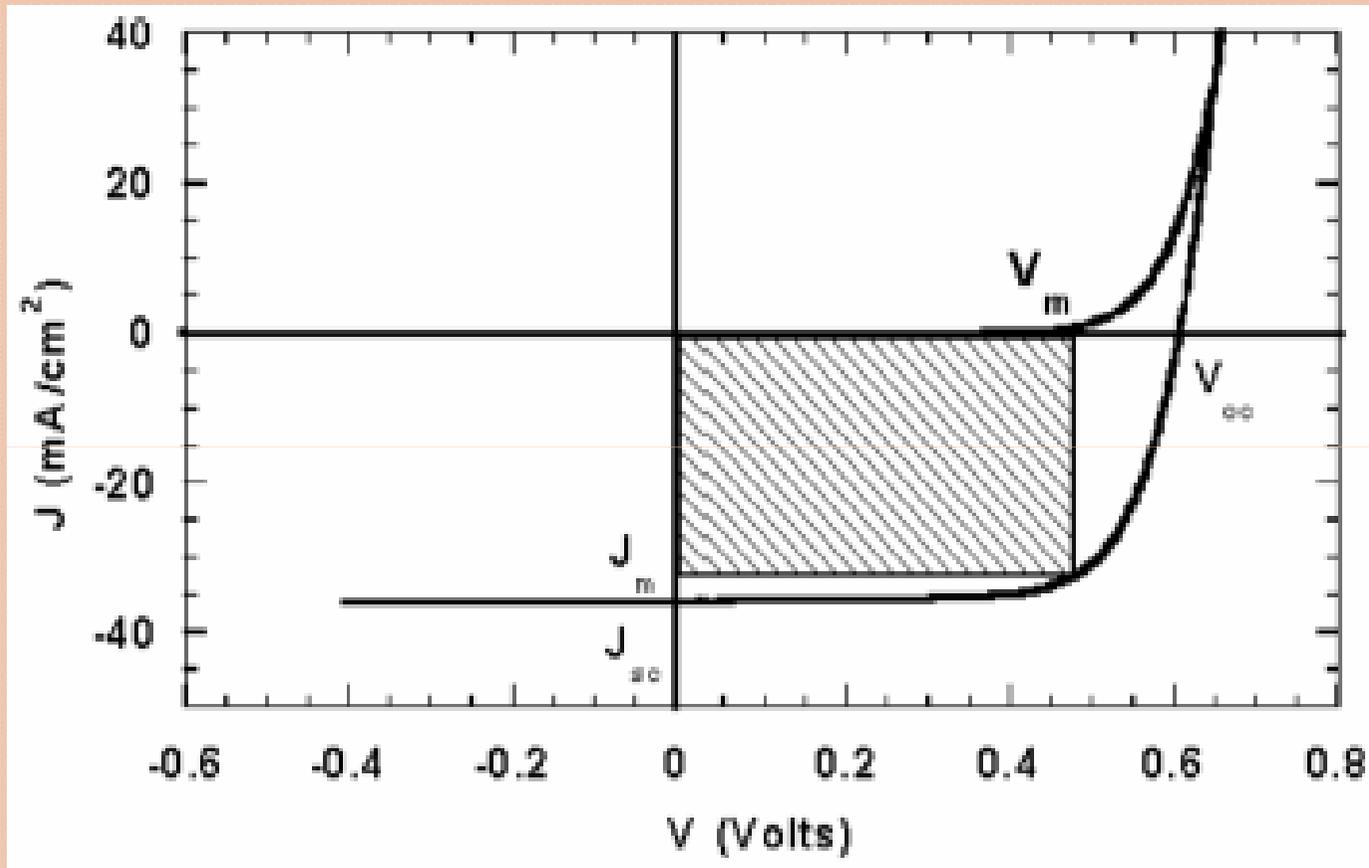
Le facteur M du rendement concerne le fonctionnement complet de la photopile comme générateur de courant.

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

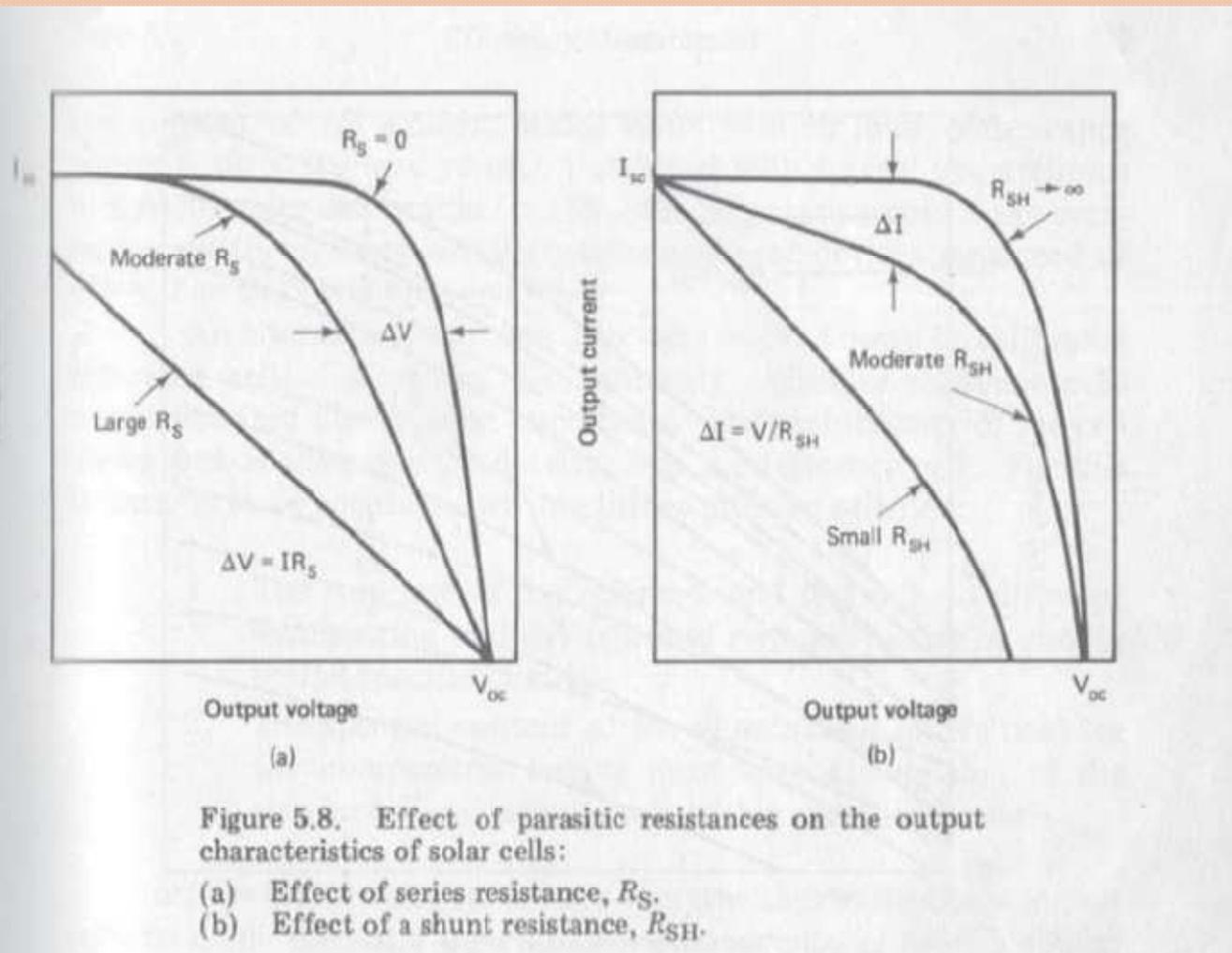
a. Modélisation électrique:

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

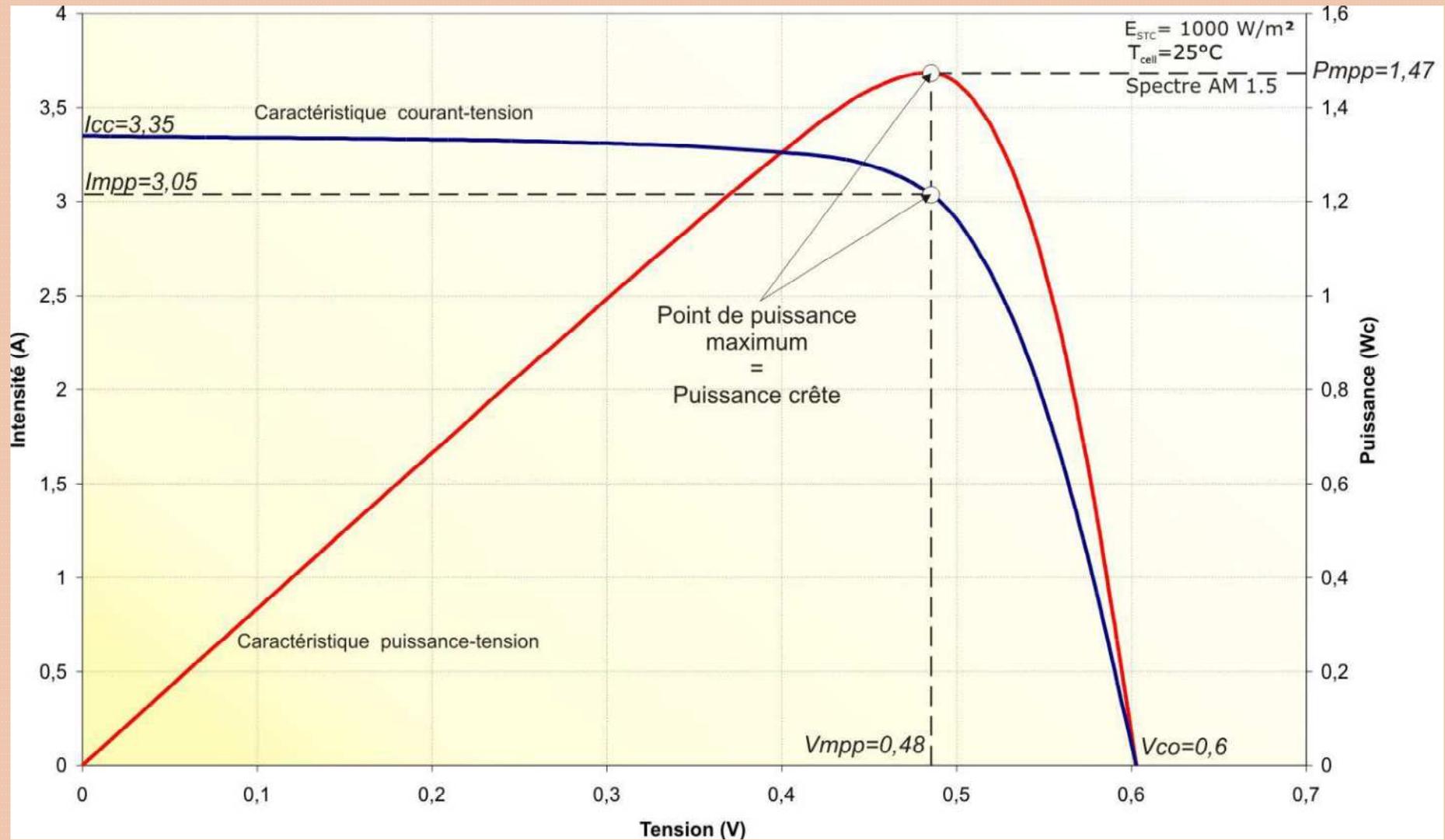
- A partir de la caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule solaire réelle sous éclairement, on extrait:
 - Le courant de court circuit I_{cc}
 - La tension de circuit ouvert V_{co}
 - Les valeurs V_M et I_M qui correspondent à la puissance maximale délivrée par la cellule solaire.

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

- Le rendement de la conversion:

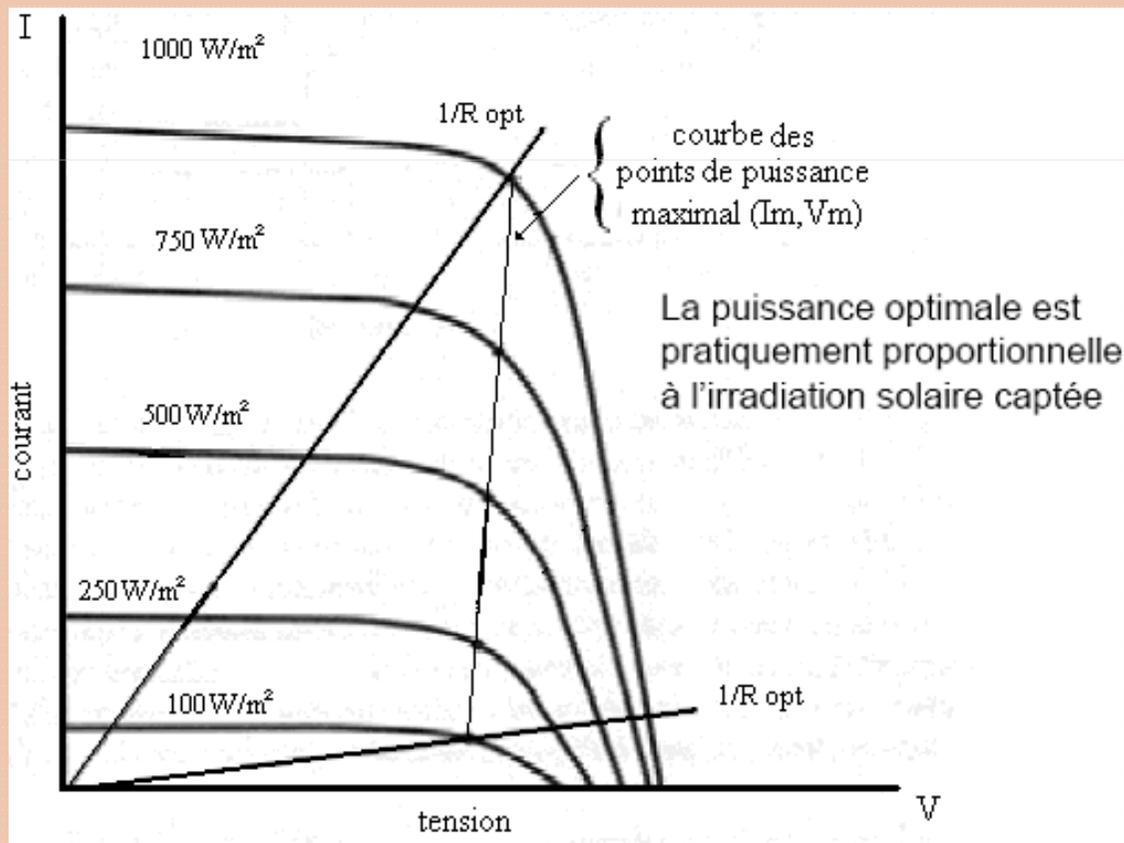
$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{incidente}}} = \frac{V_M I_M}{P_{\text{incidente}}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{\text{incidente}}}$$

VI: CALCUL DE RENDEMENT EXPERIMENTAL DE LA CELLULE PHOVOLTAÏQUE



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

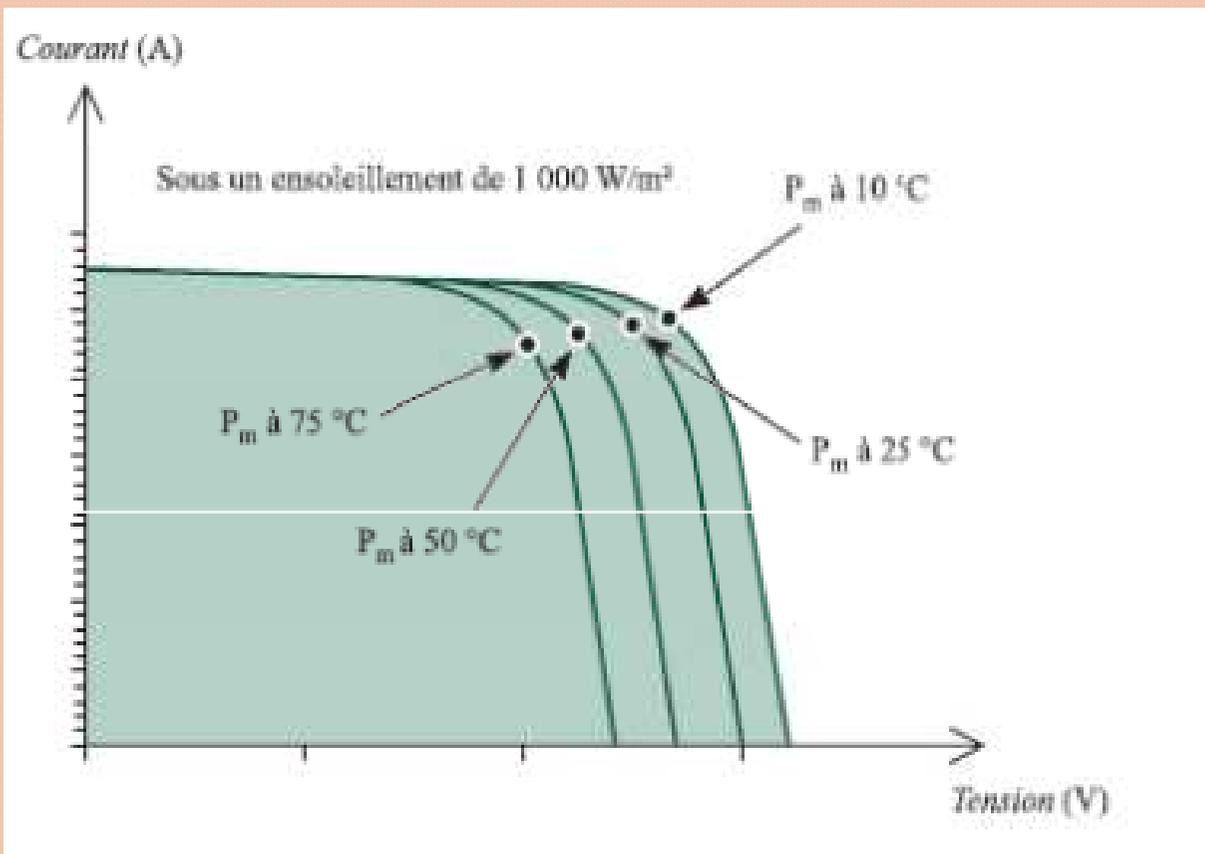
Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.



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)

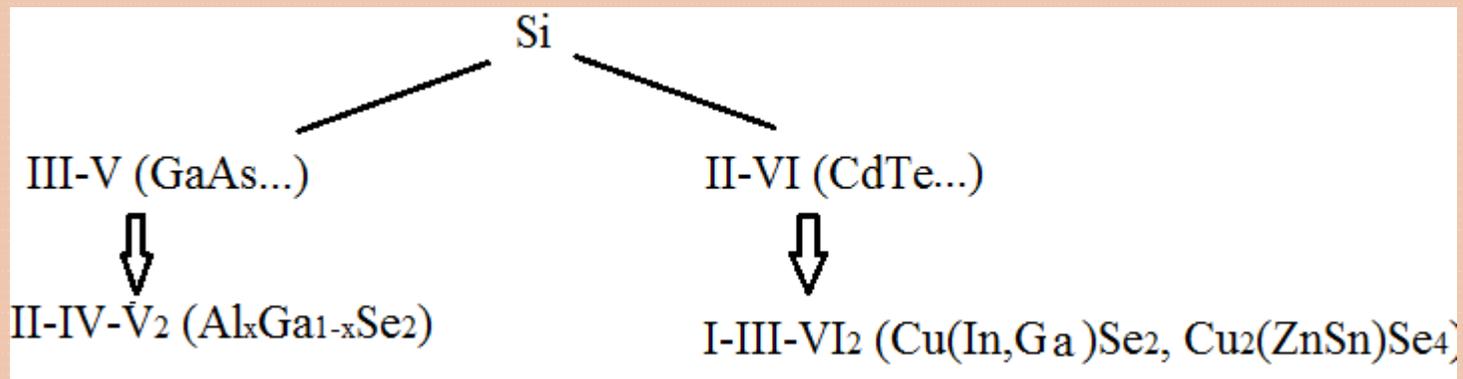
Conditions standard du module photovoltaïque

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±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(160±20)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum system voltage ²	600V	

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

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



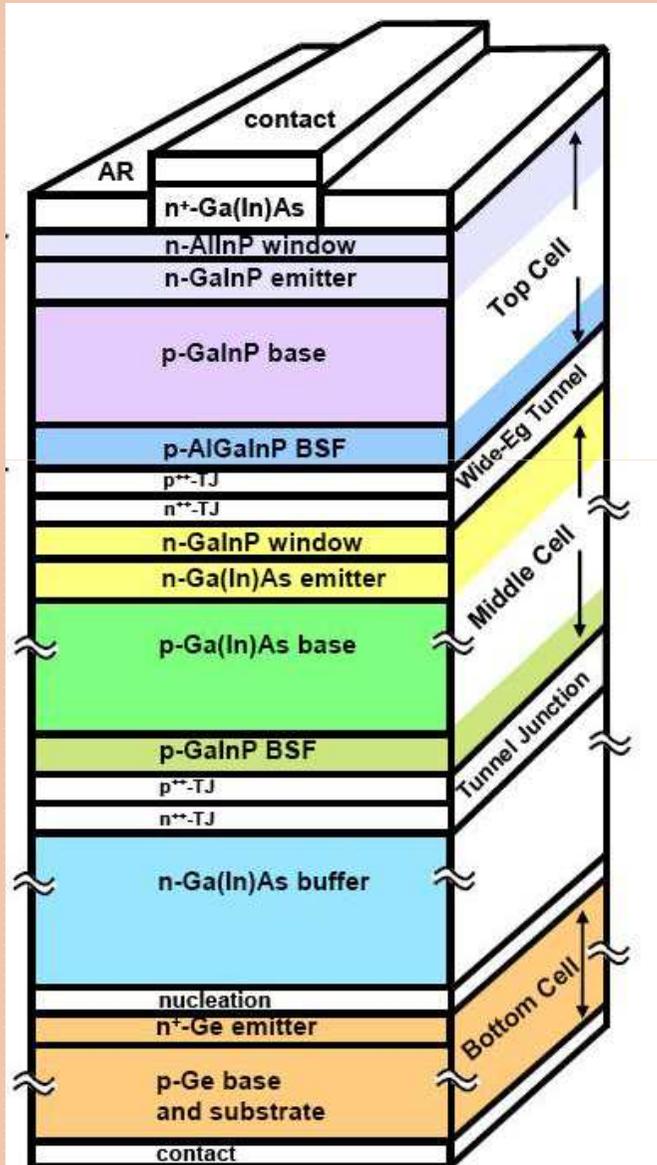
classification	Efficiency (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA/cm ²)	FF
Si (crystalline)	25.0	0.705	42.7	82.8
GaAs (crystalline)	26.1	1.038	29.7	84.7
Cu(In,Ga)Se ₂ (cell)	19.4	0.716	33.7	80.3
Si (amorphous)	9.5	0.859	17.5	63.0
dye sensitized	10.4	0.729	22.0	65.2
organic (polymer)	5.15	0.876	9.39	62.5
multijunction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

Rendement de cellules solaires

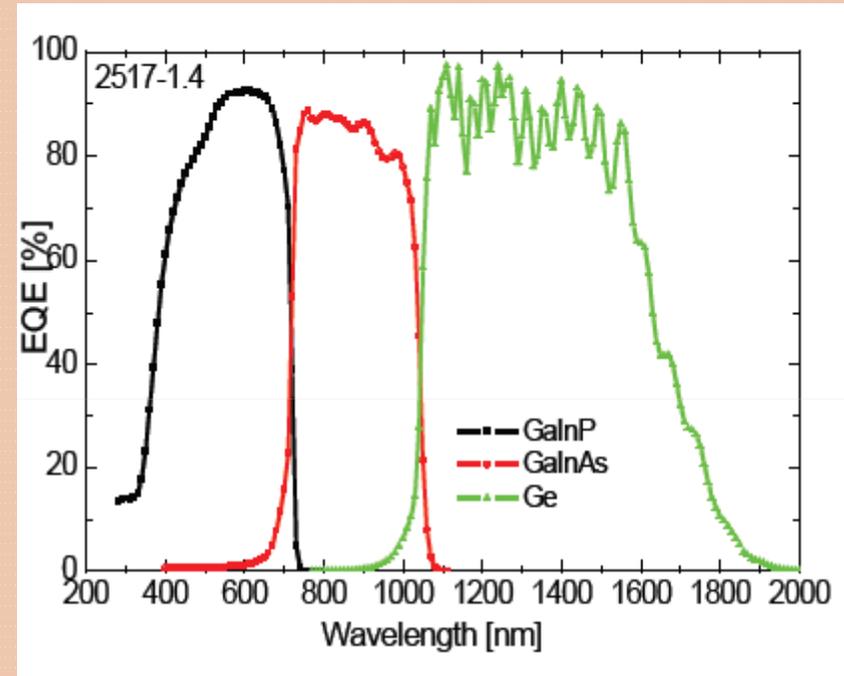
M. A. Green, Prog. Photovolt: Res. Appl. 17 (2009) 85

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: GaAs



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

La filière du silicium cristallin domine le marché elle couvre plus de 89,6% de la production mondiale ($\approx 95\%$ en 2005)

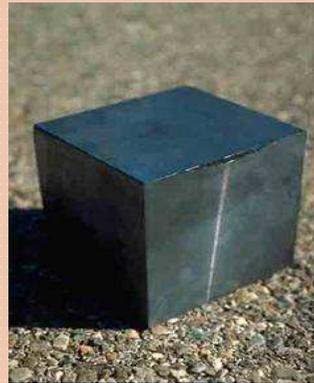
- Monocristallin : 42,2%
 - ✓ Dérive de la filière électronique
- Polycristallin : 45,2%
 - ✓ Matériau coule en lingots.
 - ✓ Grains mm à cm.

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 100 μ m),
- Si monocristallin: grand rendement, un processus de fabrication lent, des coûts élevés, fonctionnement médiocre sous faible éclairement.
- Si Polycristallin: faible coût, un processus de fabrication rapide, un rendement moindre.

Technologie des plaquette de silicium (mono-ou polycristallin)

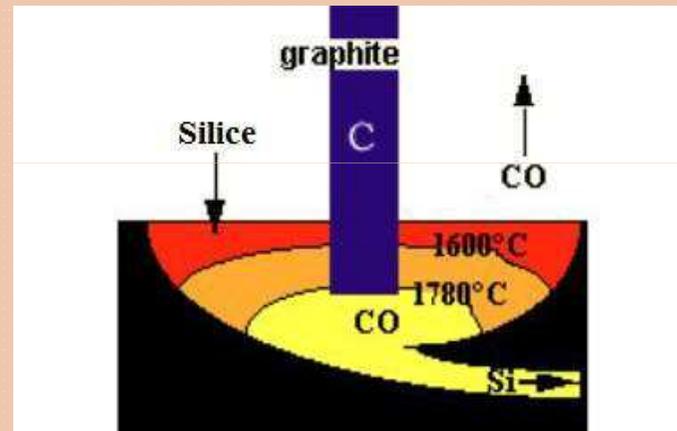


Pr REGRAGUI

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

- Obtention de Si à partir de SiO₂ :
 - ✓ Réduction carbothermique du SiO₂ (1700°C):



Cette réaction consiste à porter à des températures très élevées un mélange de quartz et d'espèces carbonées qui vont se combiner avec l'oxygène du quartz pour donner du monoxyde puis du dioxyde de carbone.

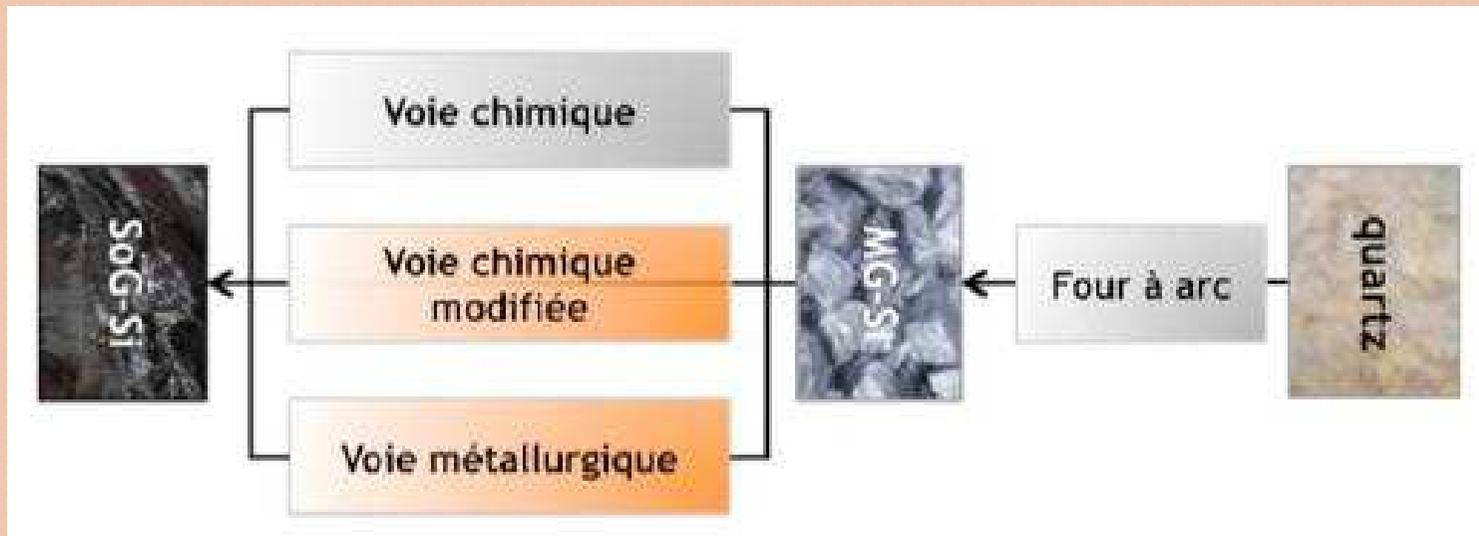
La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher ces réactions chimiques.

Purification du Si

- ✓ Hydrochlorination (300-350°C)



- ✓ Distillation (type alambic) permet alors une purification supérieure.
- ✓ Décomposition thermique à 1100°C



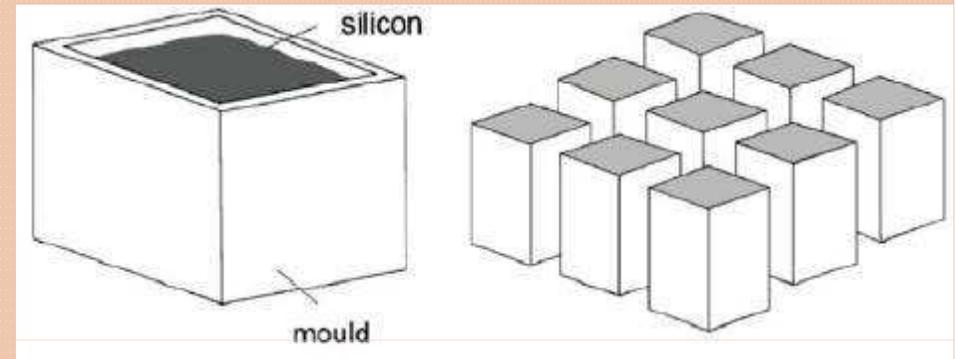
Purification du Si

Voie métallurgique : procédé Elkem

- ✓ Tout l'enjeu de la voie métallurgique est de diminuer les coûts de production tout en garantissant une qualité suffisante pour les applications solaires.
- ✓ Plusieurs industriels et centres de recherche développent actuellement des procédés qui permettent de s'affranchir du passage par les composés gazeux, dans le but de réaliser une économie d'énergie.
- ✓ Les procédés métallurgiques consistent traditionnellement en une série de fusion et solidification successives permettant d'éliminer progressivement les impuretés.
- ✓ Entre autres exemples, le projet européen SolSilc a réuni des laboratoires de recherche et des industriels de Suède, Norvège et des Pays-Bas autour de l'amélioration du procédé de réduction carbothermique à partir de matériaux très propres (quartz de haute pureté et noir de carbone) : le silicium solaire est cette fois obtenu directement à partir de quartz.

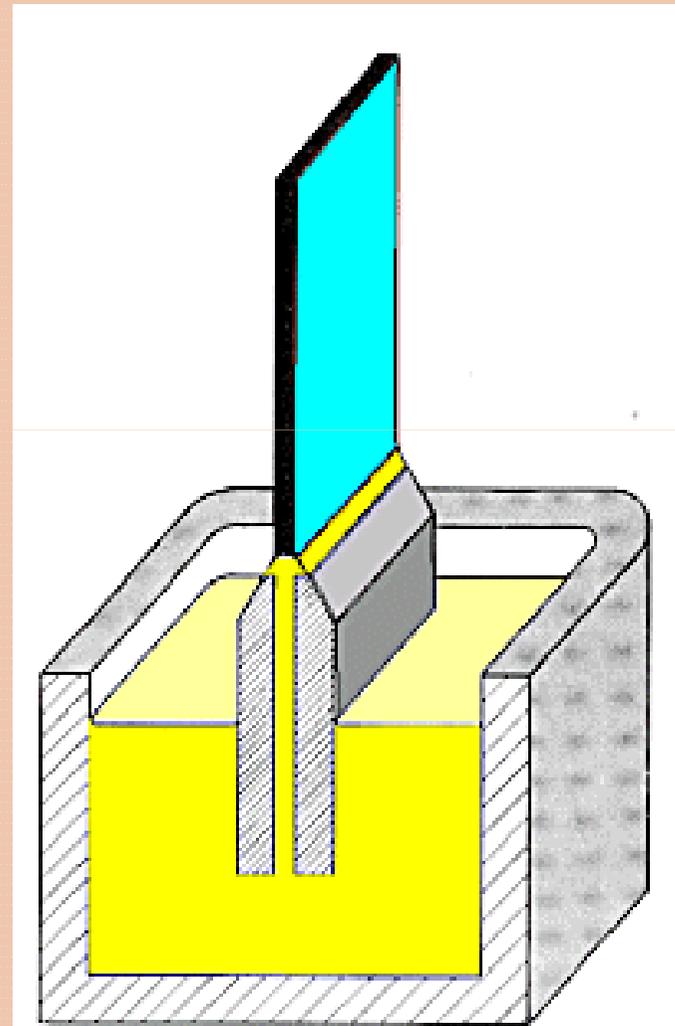
Poly-Si

- Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergivore.
- Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures.



Poly-Si en ruban

Cette technologique combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte matière. Il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium à partir d'un bain de silicium fondu.



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

- Technique de croissance utilisée pour le Si Mono:

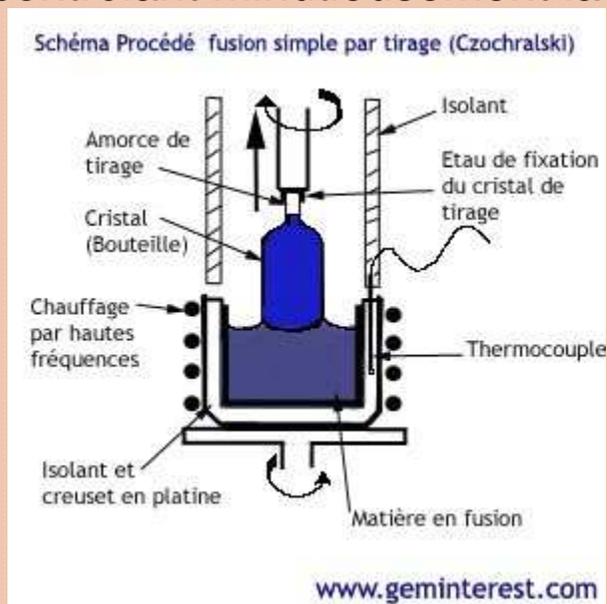
1 - Czochralski (Cz) très utilisé, qualité inférieure à celle FZ, moins cher

Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants.

Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin.

Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique.

On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse.



- ❖ 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)

Pr REGRAGUI

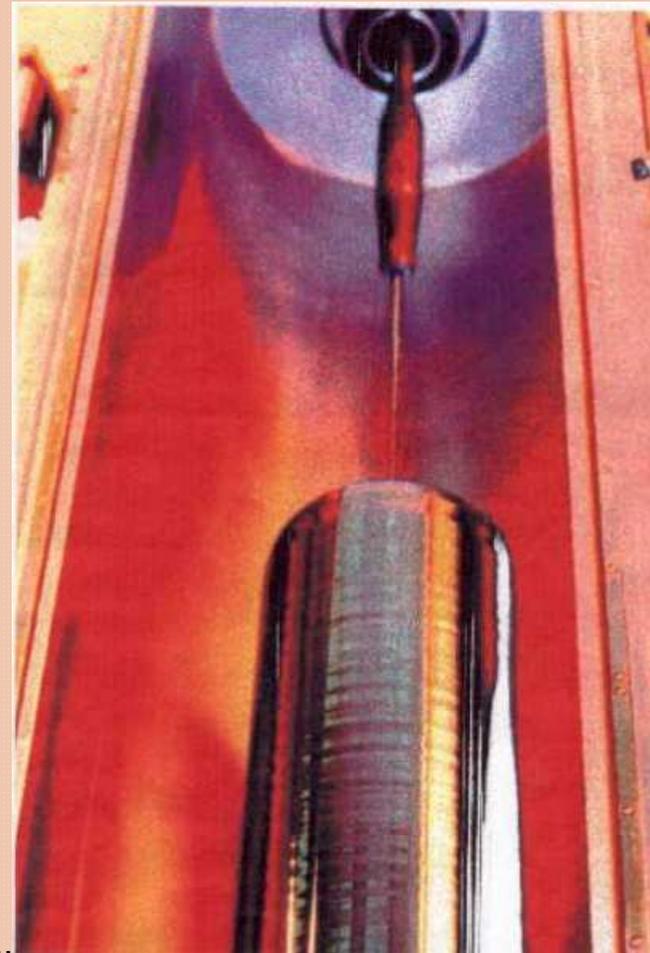
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

- Technique de croissance utilisée pour le Si Mono:

1 - Czochralski (Cz)

- ✓Lingots entiers de silicium est produit comme un gros cristal
- ✓Matériel de très haute qualité avec peu de défauts
- ✓Pas de frontières entre les cristaux, car il est un cristal dans une seule orientation
- ✓Cristal de Si contient inévitablement des impuretés d'oxygène dissous venant du creuset en quartz tenant le silicium fondu



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

1 - Czochralski (Cz) : Taux du tirage

$$V_g = \frac{K_s}{\Delta h_{fus} \cdot \rho_s} \left[\frac{-2}{3} \cdot AB^{-5/3} \right]$$

- $A = \sqrt{\frac{9 \sigma \cdot \varepsilon}{5 R \cdot K_s}}$

- $B = T_m^{-3/2}$

- V_g = Taux de tirage
- K_s = Conductivité thermique
- ΔH_{fus} = Enthalpie de fusion
- ρ_s = Densité du solide
- σ = constante de Stefan Boltzmann
- ε = Emissivité
- R = Rayon
- T_m = Température de fusion

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

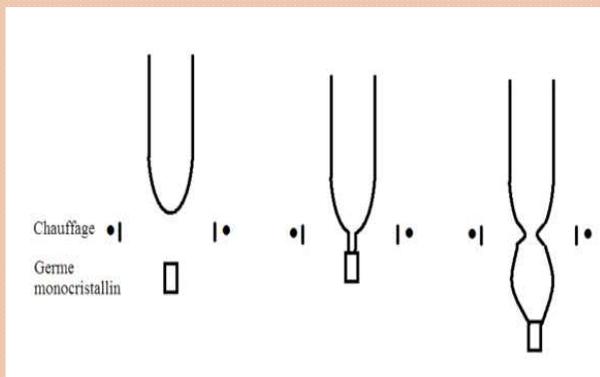
a- 1^{ère} génération: c-Si

- Technique de croissance utilisée pour le Si Mono:

2- Méthode de la zone flottante (FZ).

A partir d'un lingot de silicium polycristallin obtenu dans le réacteur de réduction du trichlorosilane.

- La cristallisation est obtenue en pilotant la croissance à partir d'un germe fixé en extrémité de lingot par le déplacement d'une zone fondue.
- Cette zone est chauffée par induction électromagnétique (une bobine parcourue par un courant haute fréquence (courant de Foucault)). La zone fondue est déplacée lentement d'un bout à l'autre de la barre, toujours dans le même sens.
- Lors de la recristallisation, les impuretés restent préférentiellement dans la zone fondue et les impuretés s'accumulent à l'extrémité de la barre.



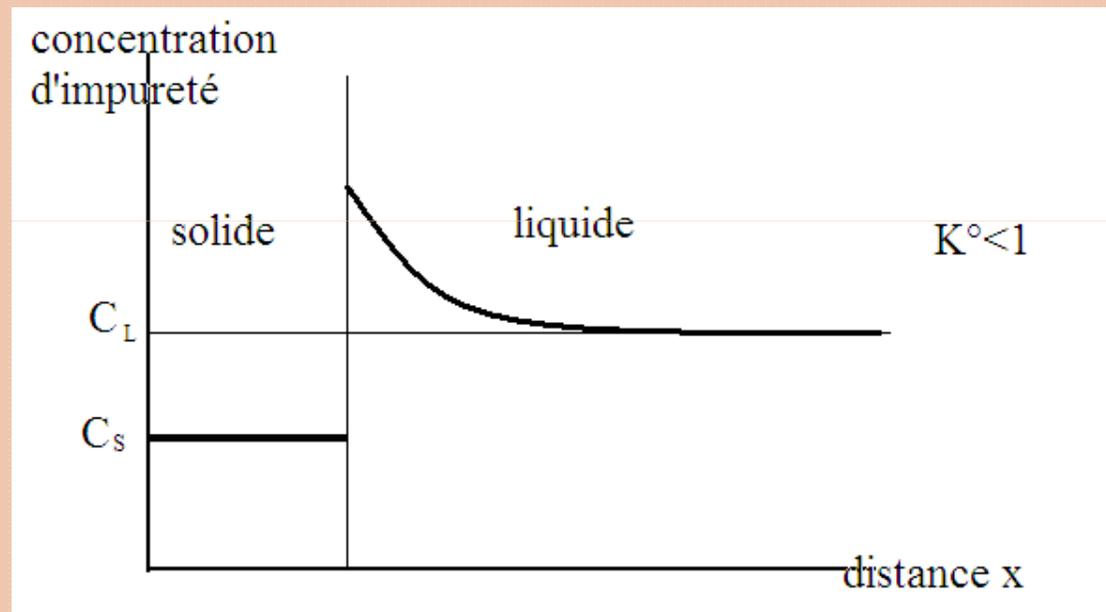
- ❖ Un lingot poly et un germe mono sont nécessaires
- ❖ l'interface entre les deux est assurée par des bobines de chauffage coulissantes
- ❖ Absence du creuset donc pas de contamination extérieure
- ❖ Lingots FZ ont une moindre teneur en oxygène
- ❖ le matériau obtenu à partir de FZ est plus cher que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

Pr REGRAGUI

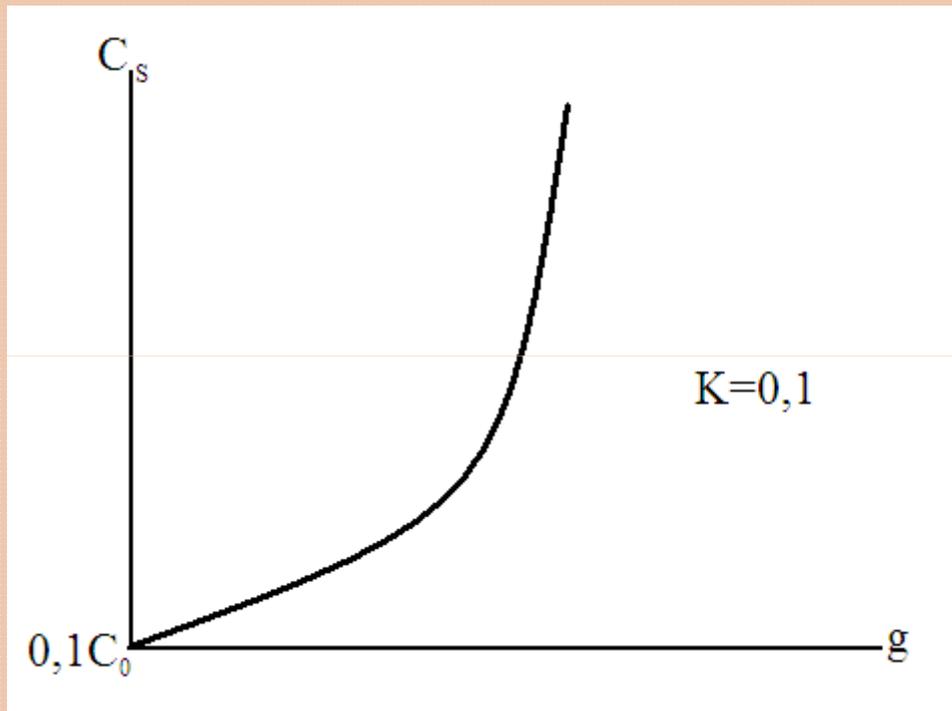
Valeurs de quelques impuretés dans le silicium

Elément	K°	Cs max (at/m ³)	D (m ² /s)
Zn	1 10 ⁻⁵	6 10 ²²	1 10 ⁻³
B	8 10 ⁻¹	1 10 ²⁷	9 10 ⁻⁶
Al	2 10 ⁻³	5 10 ²⁶	1 10 ⁻⁴
N	7 10 ⁻⁴	5 10 ²¹	9 10 ⁻⁵
P	3 10 ⁻¹	1 10 ²⁷	4 10 ⁻⁴
Fe	8 10 ⁻⁶	3 10 ²²	1 10 ⁻⁷
O	1,25	3 10 ²⁴	1 10 ⁻⁵

Variation de la concentration des impuretés

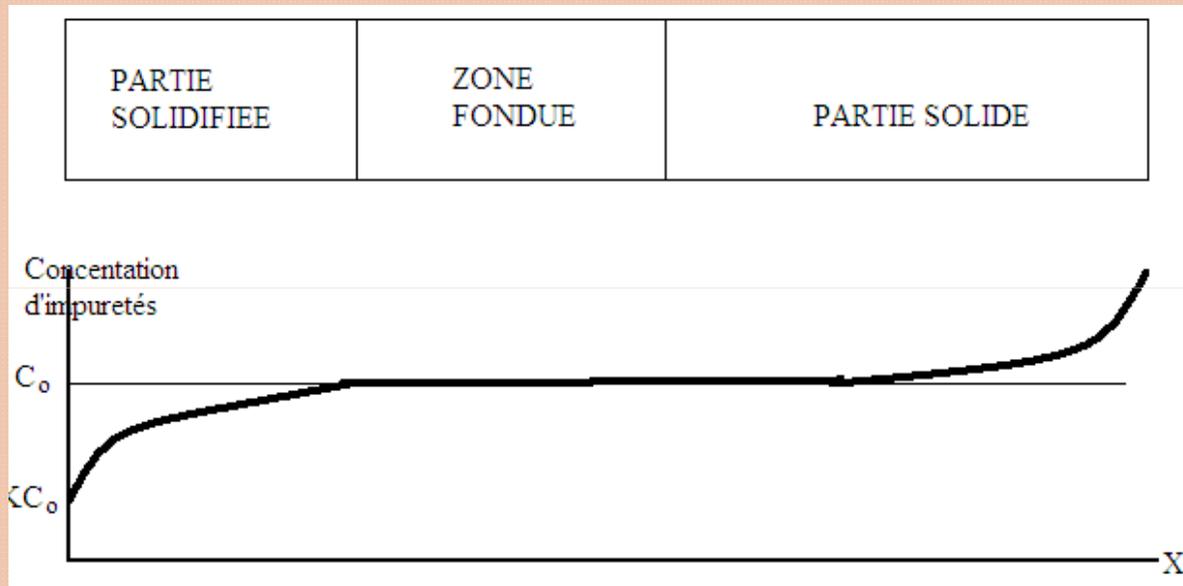


Variation de la concentration des impuretés



$$\frac{C_s}{C_0} = k(1-g)^{K-1}$$

3) Purification Zonale



$$\frac{C_s}{C_L} = 1 - (1 - K)e^{-\frac{Kx}{L}}$$

L : longueur du barreau

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

Lingots Poly:

Cette technologie est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente.

Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

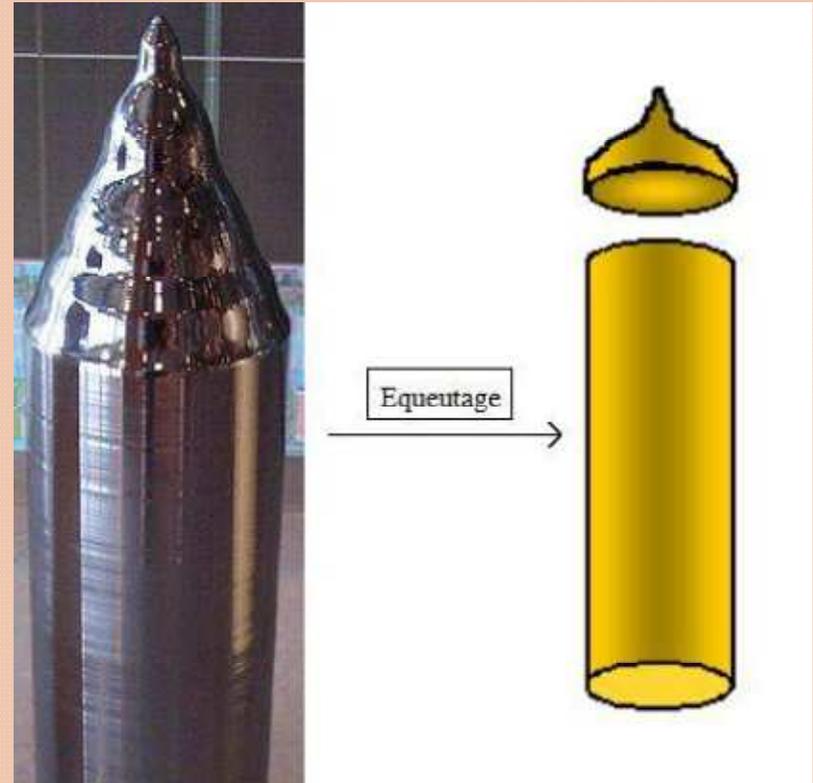


Le silicium polycrystallin



Le silicium monocristallin

- Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise. Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieur. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique.
- L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production.



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

- fabrication de dispositifs
Après tirage de cristal, la boule est façonnée et découpée en tranches de 200 à 300 μm d'épaisseur qui sont appelées « wafers » "galette" et qui sont ensuite polies . La coupe des lingots est effectuée par deux techniques
 - Sciage par fil
 - Sciage par lame de diamant
- Le sciage crée des contraintes mécaniques dans le cristal. Il faut relaxer le cristal par une montée en température (recuit) à des températures de l'ordre de 600°C à 700°C. A ces températures, les énergies propres des atomes sont suffisantes pour leur permettre de se repositionner dans les sites cristallins. sur un côté.



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

- fabrication de dispositifs

Le principal problème du sciage est:

- la perte de découpe. Avec une scie à fil, il faut 570 μm de silicium pour produire une tranche de 350 μm .
- Beaucoup de temps
- Refroidissement à l'eau



VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

Fabrication des wafers

Tri des plaquettes en fonction des épaisseurs : Les épaisseurs après découpe pourront être sensiblement différentes. Il faut donc limiter la quantité de matière à éliminer par le polissage (le tri se fait par gamme de 10 μm par exemple).

Enrobage des plaquettes dans une mixture d'alumine en solution – polissage : Afin d'améliorer l'état de surface des plaquettes, ces dernières subissent un polissage à l'aide d'une mixture contenant des grains d'alumine.

Nettoyage : Cette étape consiste à éliminer les composés abrasifs et les contaminants par des solvants et de l'eau désionisée.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

Fabrication des wafers

Lors des différentes étapes, il s'est formé, en surface des plaquettes, un oxyde natif contenant des impuretés. Ces impuretés sont soit métalliques et sont éliminées par une solution acide, soit organiques et éliminées par une solution basique :

-solutions acides : HNO_3 , CH_3COOH ,

-solutions basiques : KOH .

On n'utilise pas de soude (NaOH) car le sodium est un polluant violent pour les oxydes, plus particulièrement pour les oxydes de grille des transistors MOS.

L'oxyde natif est finalement attaqué par une solution d'acide fluorhydrique (HF). On obtient alors une surface chimiquement neutre avant un polissage "miroir".

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

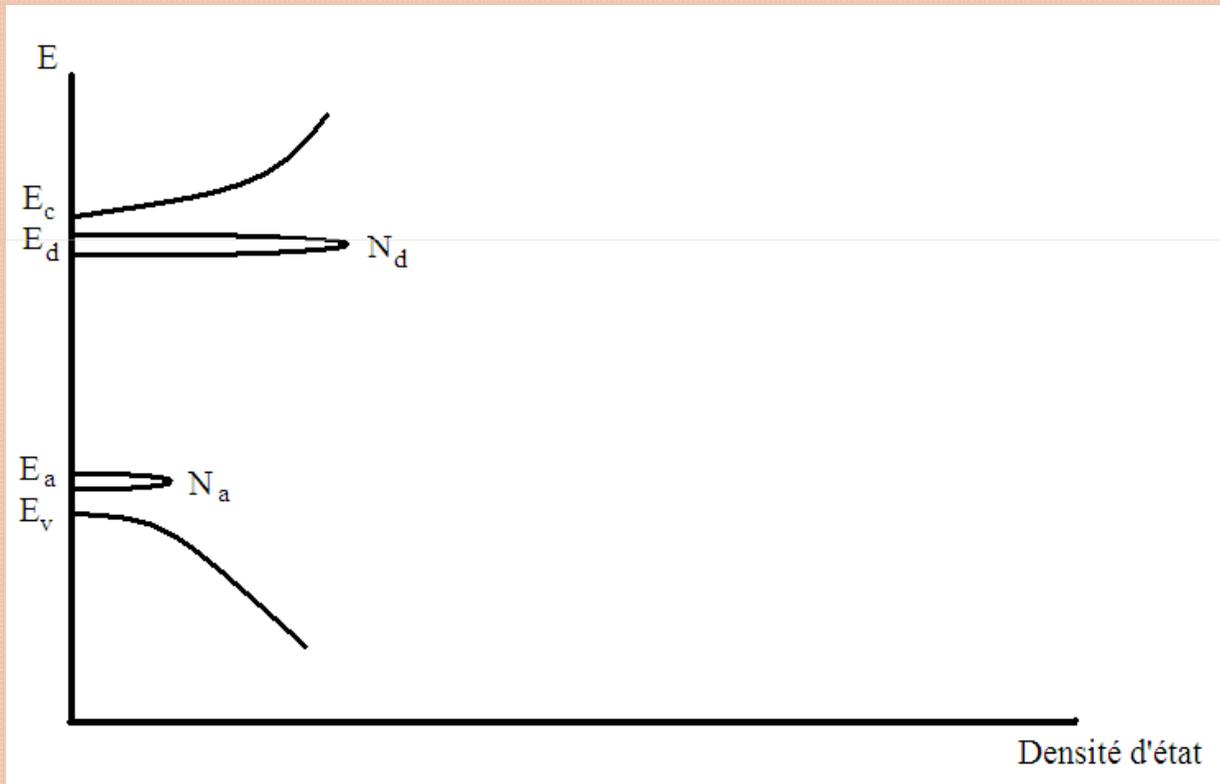
Evolution de la taille des wafers de silicium depuis le début des circuits intégrés

L'évolution de la dimension des lingots a été liée à l'évolution de la maîtrise des procédés et des équipements associés avec comme but l'augmentation du rendement de fabrication et la diminution des coûts de production.

- 1964 : 25 mm
- 1969 : 50 mm
- 1974 : 75 mm
- 1978 : 100 mm
- 1982 : 125 mm
- 1985 : 150 mm
- 1990 : 200 mm
- 1998 : 300 mm

3- Le dopage

- 3-1 Principe du dopage



Dopage

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Accepteurs pour III-V	Accepteurs pour IV		Donneurs pour IV	Donneurs pour III-V

Le Dopage

$$n + \sum_i N_{a_i}^- = p + \sum_j N_{d_j}^+$$

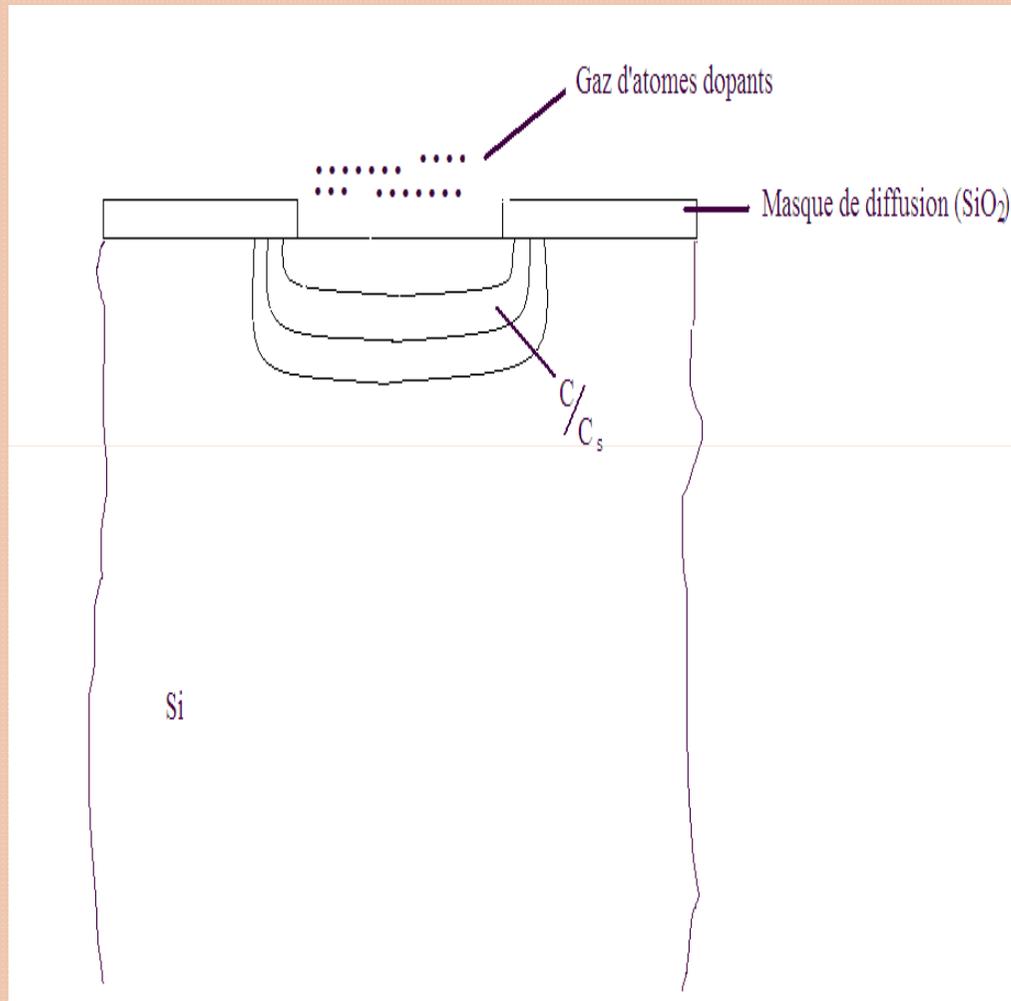
$$N_{a_i}^- = N_{A_i} \frac{1}{[1 + \beta_a \exp(\frac{E_{A_i} - E_F}{KT})]}$$

$$N_{d_j}^+ = N_{d_j} \frac{1}{[1 + \beta_d \exp(\frac{E_F - E_{d_j}}{KT})]}$$

$$n = N_c \exp(-\frac{E_c - E_F}{KT})$$

$$p = N_v \exp(-\frac{E_F - E_v}{KT})$$

3-2: Dopage sélectif par diffusion



- Les atomes diffusent sous l'effet de la T°C,
- Le profil dépend de la T°C et de la durée de diffusion
- Diffusion \Rightarrow pénétration profonde
- Haute température \Rightarrow des lacunes
- Petite taille \Rightarrow interstitielle

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

- Le flux F est égal à:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

D: coefficient de diffusion (cm²/s)

- Expression générale:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} + \langle v \rangle C$$

- Equation de continuité:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x}$$

- Equation de diffusion de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

- 3-2-1: La source de diffusion est une couche mince:

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

- 3-2-2: Concentration superficielle constante:

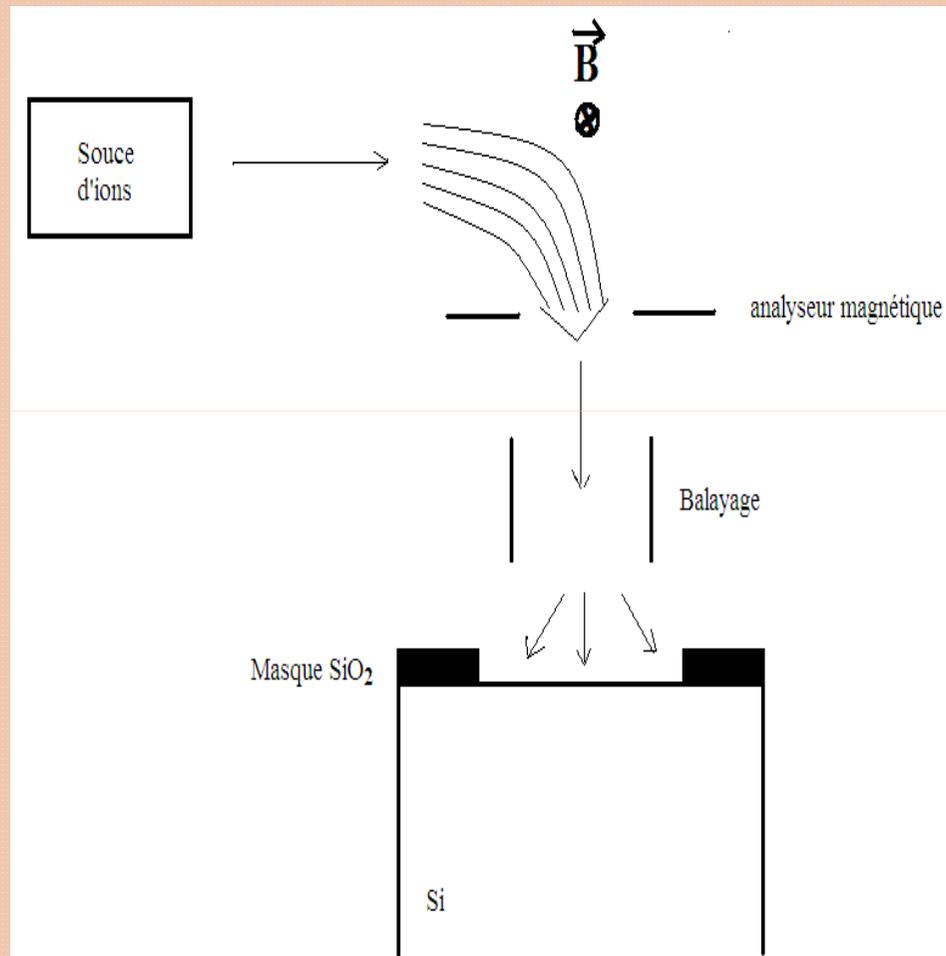
$$\frac{C - C_s}{C_o - C_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

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

- 3-2-3: Placage:

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

3-3: Dopage par implantation ionique



- Maximum sous la surface
- Profondeur fixée par la masse ionique et par l'énergie d'implantation

3-3: Dopage par implantation ionique

- Avantages
 - Contrôle précis de la dose totale de dopage
 - Reproductibilité du profil
 - Réalisation à température plus basse que la diffusion

3-3: Dopage par implantation ionique

Mécanismes de collision

- ✓ Interaction électrique avec le nuage électronique, c'est le mécanisme de freinage électronique,
- ✓ Transmission d'une partie de l'énergie à un noyau atomique, c'est le mécanisme de freinage nucléaire

3-3-1: Perte d'énergie d'une particule dans une cible

a. Cas d'une cible monoatomique:

$$\frac{dE}{dx} = N(S_e(x) + S_n(x))$$

b. Cas d'une cible polyatomique:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{total} = a\left(\frac{dE}{dx}\right)_X + b\left(\frac{dE}{dx}\right)_Y$$

E: énergie de l'ion incident

N: nombre d'atomes par centimètre cube de la cible

S: pouvoir d'arrêt

3-3-2: Distribution des ions après implantation

La perte d'énergie:

$$\frac{dE}{dx} = N(S_e(x) + S_n(x))$$

Le parcours total est égal à:

$$R = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}$$

3-4: LE RECUIT

Dégradation due à l'implantation

- ✓ Les impuretés implantées sont placées dans la maille en sites quelconques,
- ✓ Les défauts créés modifient les propriétés électroniques de la région implantée.

3-4: LE RECUIT

But du recuit

- ✓ Une recristallisation qui permettra d'annuler les concentrations de défauts,
- ✓ Remettre en place les ions implantés dans des sites réguliers du réseau cristallin.

3-4: LE RECUIT

La température et la durée du traitement thermique dépendent des ions de dopage et des doses implantés.

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

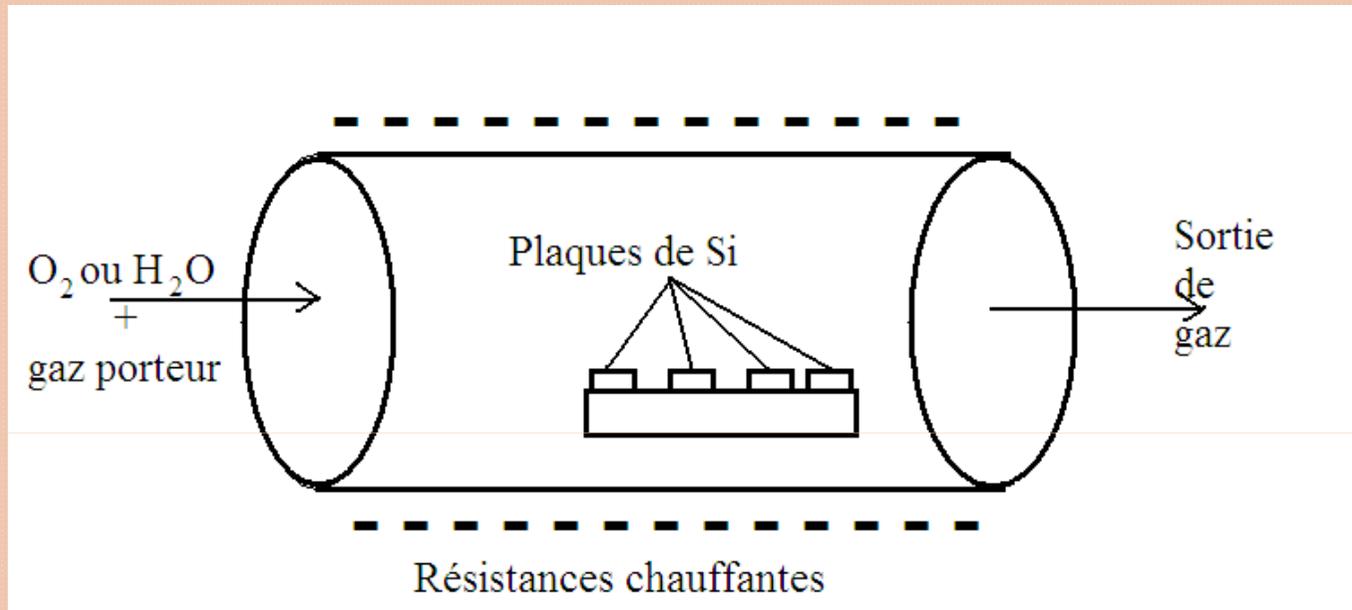
$$\Delta R_p \rightarrow [(\Delta R_p)^2 + 2Dt]^{1/2} = \Delta R'_p$$

$$N_p \rightarrow N'_p = \frac{D_i}{\sqrt{2\pi\Delta R'_p}}$$

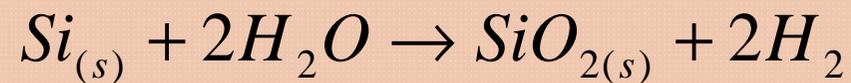
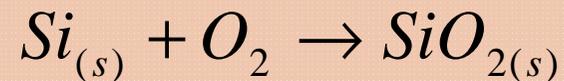
La concentration de dopant devient:

$$N_{(x)} = N'_p \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R'_p}\right)^2\right]$$

4- L'OXYDATION THERMIQUE



Les réactions chimiques de base sont:



4- L'OXYDATION THERMIQUE

$$d_{ox} = \frac{M_{SiO_2}}{\rho_{SiO_2}} * \frac{\rho_{Si}}{M_{Si}} d_{Si} = 2,3d_{Si}$$

Les espèces oxydantes doivent franchir:

- ✓Elles doivent être transportées du volume gazeux jusqu'à l'interface oxyde/gaz,
- ✓Elles doivent diffuser à travers la couche d'oxyde déjà présente,
- ✓Elles doivent réagir à la surface de Si.

4- L'OXYDATION THERMIQUE

Le flux à travers l'oxyde est :

$$F_1 \approx D \frac{C_0 - C_i}{x}$$

Le flux à l'interface SiO₂-Si est :

$$F_2 = KC_i$$

K est la constante du taux de réaction chimique en surface pour l'oxydation.

La condition de l'état d'équilibre: $F_1 = F_2$

$$KC_i = D \frac{C_0 - C_i}{x} \Rightarrow C_i = \frac{DC_0}{Kx + D} \Rightarrow F = \frac{DC_0}{x + \frac{D}{K}}$$

4- L'OXYDATION THERMIQUE

L'équation de continuité permet d'écrire que le flux oxydant atteignant l'interface oxyde-silicium :

$$N_1 \frac{dx}{dt} = F = \frac{DC_0}{x + D/K}$$

L'épaisseur d'oxyde est une fonction du temps :

$$\frac{x}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2/4B}} - 1$$

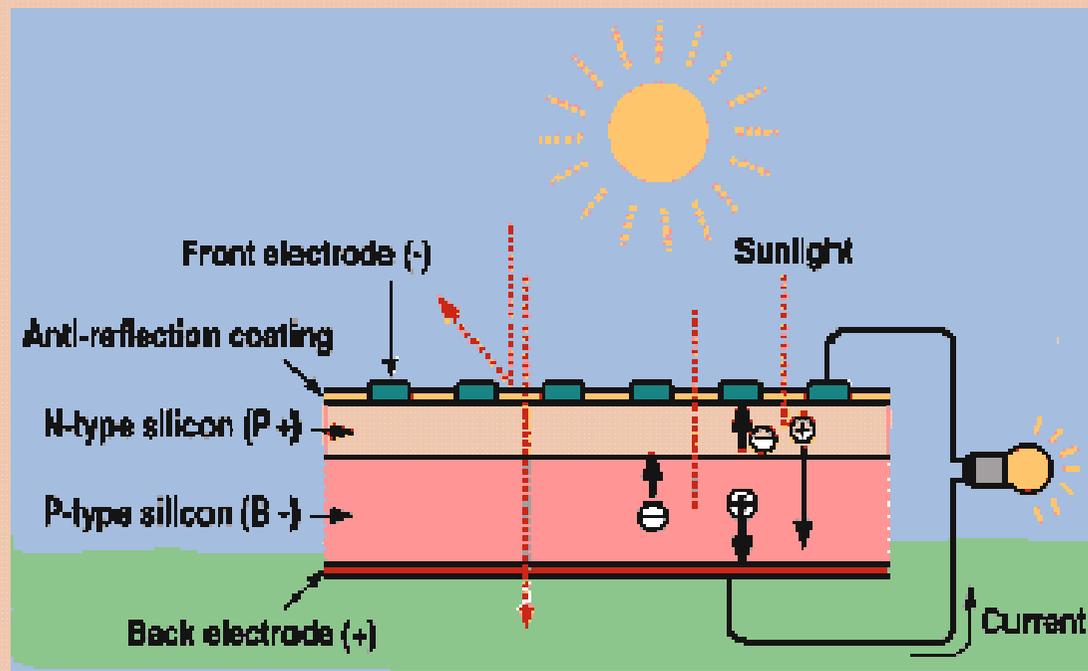
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- 1^{ère} génération: c-Si

fabrication de dispositifs

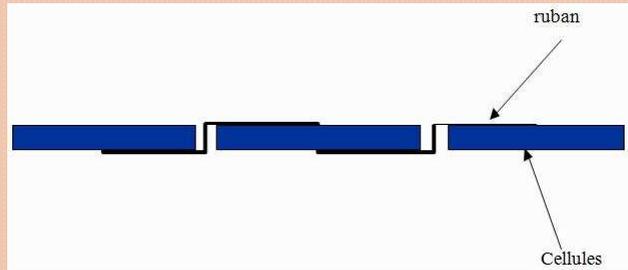
3. Métallisation: pole positif sur la totalité de la face p et pole négatif sur la face n (doit tenir compte d'un compromis entre insolation et collecte des porteurs),

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

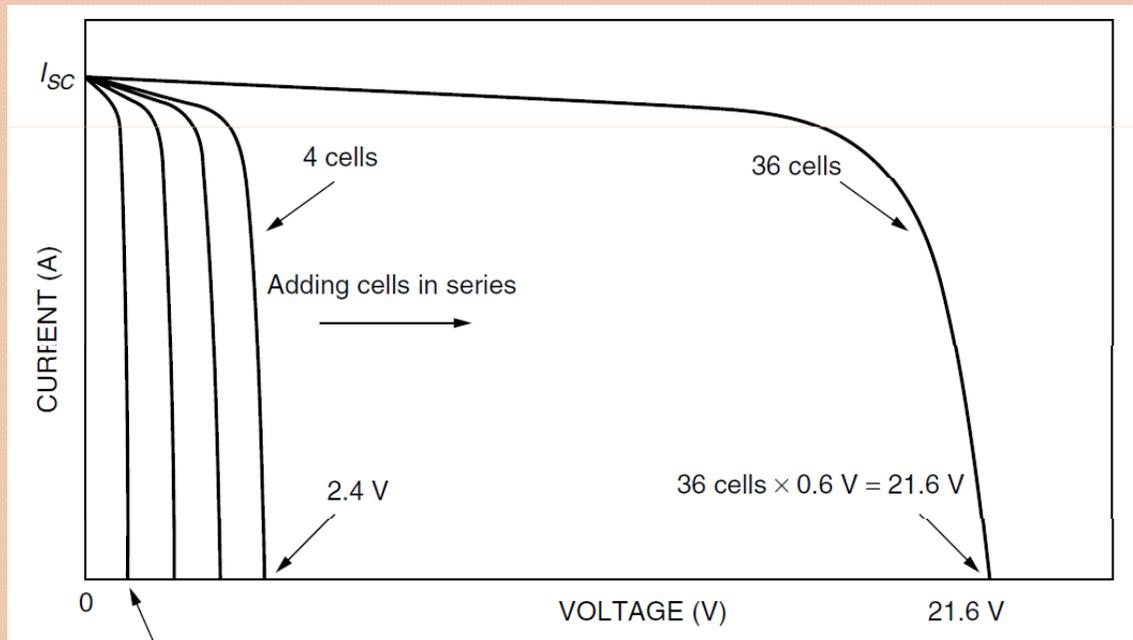
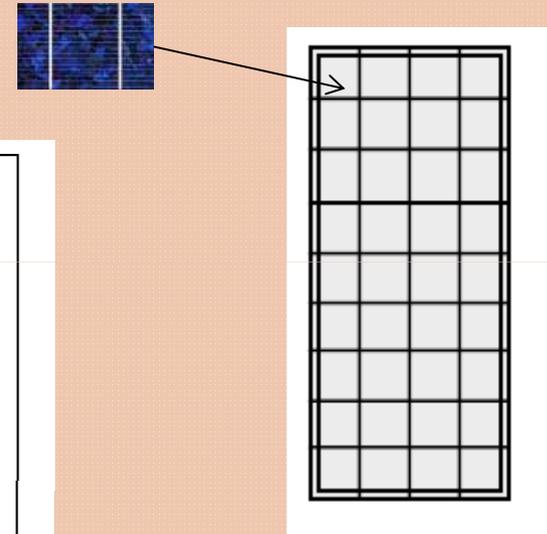


Pr REGRAGUI

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

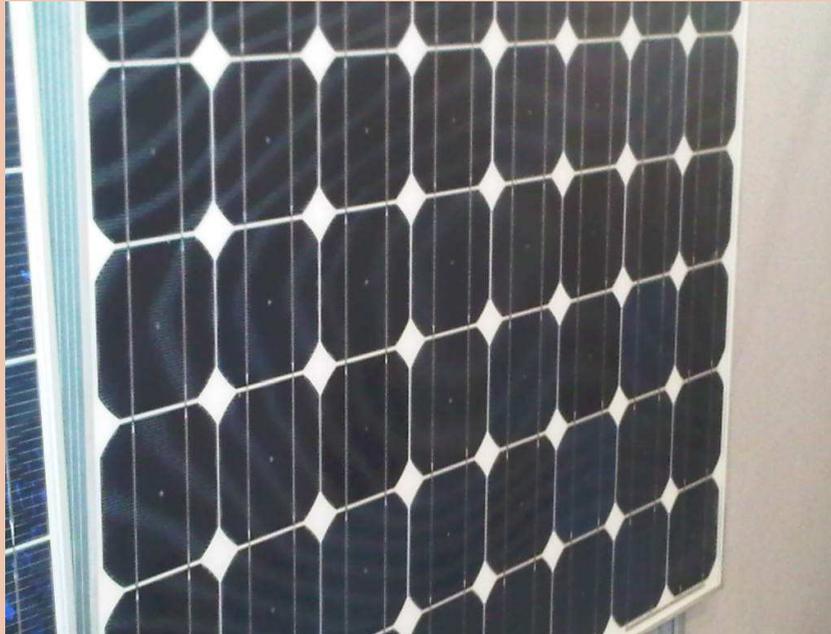


Pr REGRAGUI



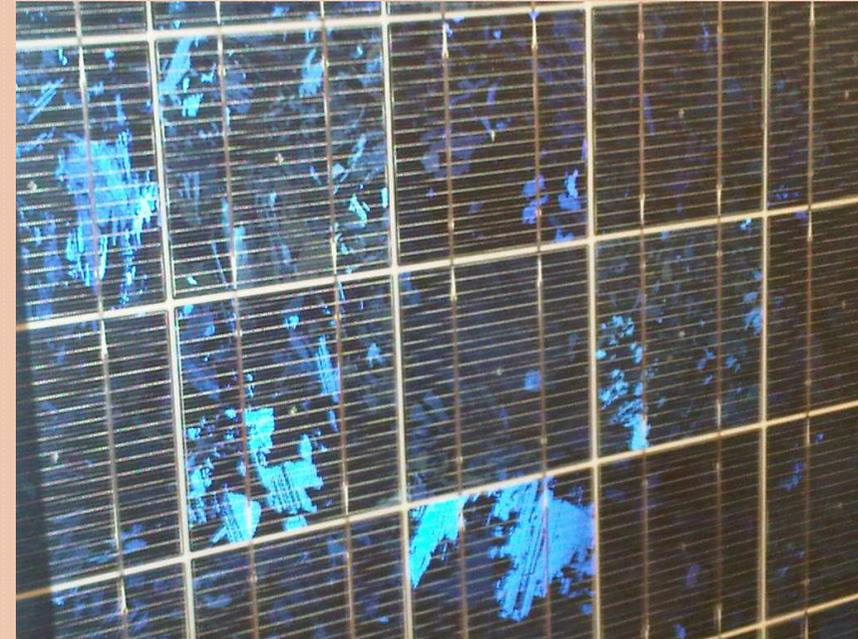
VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

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

Avantages:

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

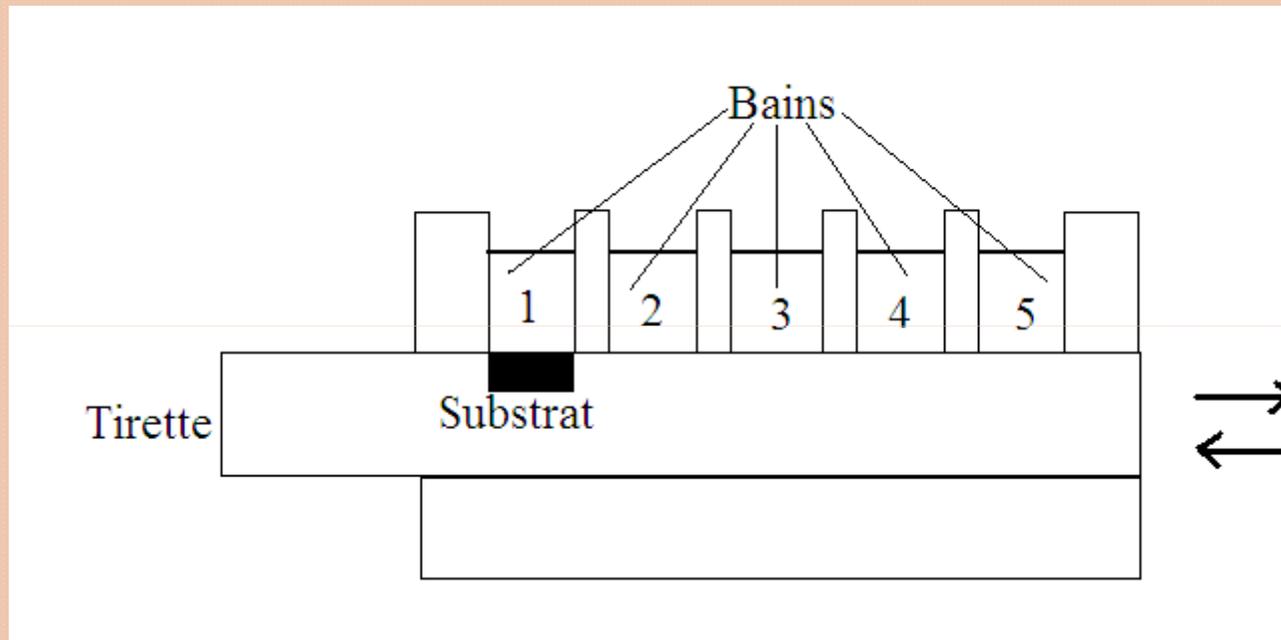
La croissance épitaxiale

- Elle consiste à faire croître une couche monocristalline sur un support monocristallin servant de germe et donnant son orientation à la couche.
- Sert à élaborer des structures de couches.
- Les techniques épitaxiales se divisent en trois familles:
 - Épitaxie en phase liquide,
 - Épitaxie en phase vapeur,
 - Épitaxie par jets moléculaire.

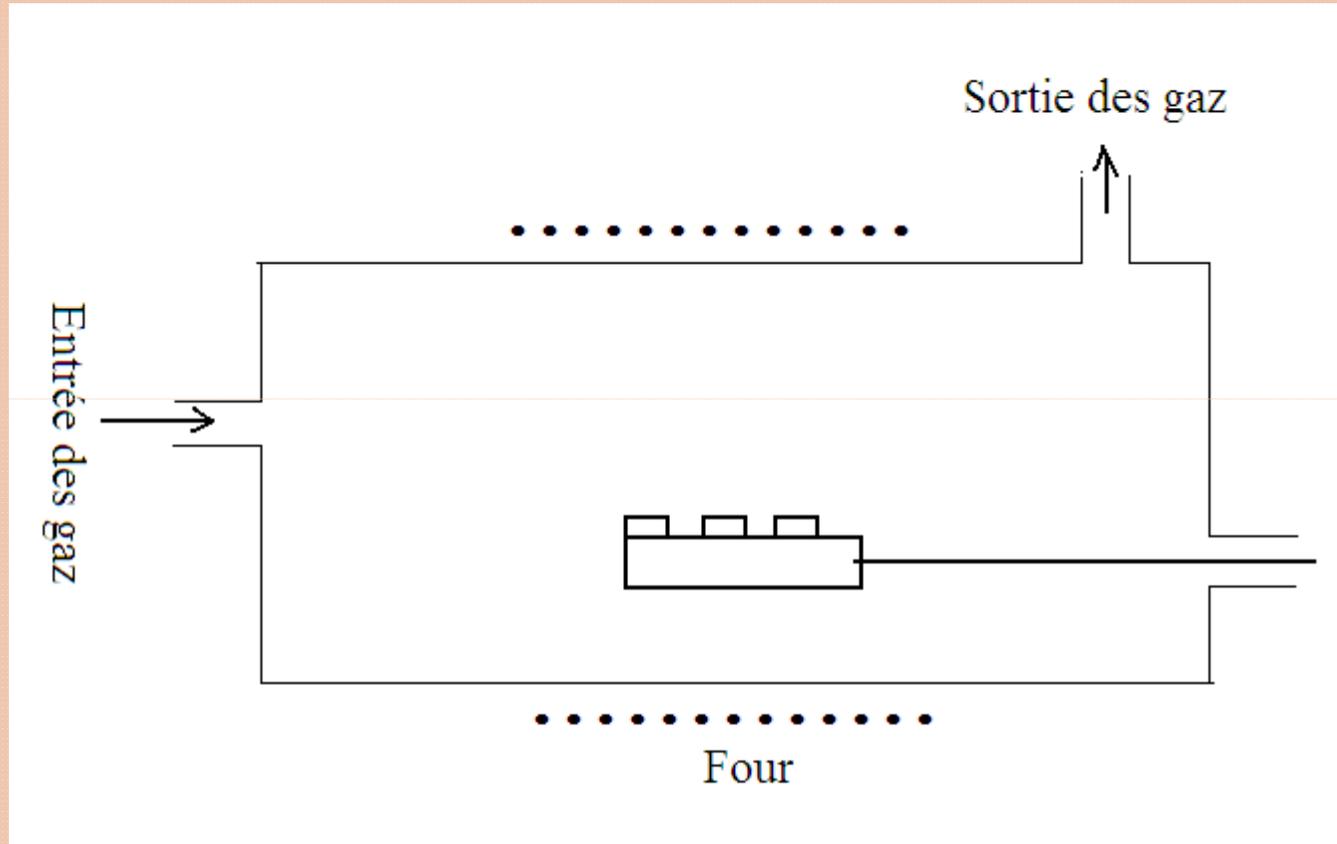
Épitaxie en phase liquide

- Elle utilise le principe de la méthode de Czochralsky.
- Le substrat est mis en contact avec une phase liquide sursaturée.
- Pour obtenir une solution sursaturée, on chauffe le solvant, on dissout le maximum de soluté et on laisse refroidir.
- La solution se précipite et cristallise sur le substrat.

Épitaxie en phase liquide

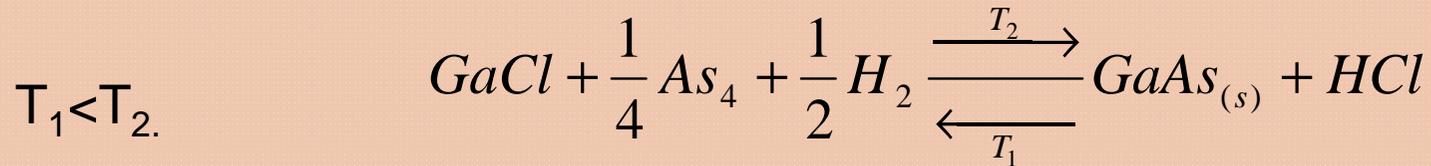


Épitaxie en phase vapeur

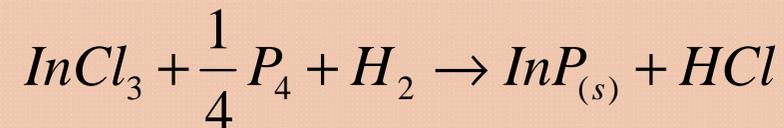


Épitaxie en phase vapeur

- Méthode des hydrures:
 - Elaboration de GaAs



- Elaboration de InP



Épitaxie en phase vapeur

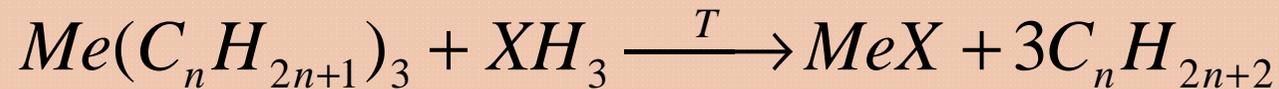
- Méthode des Chlorures:

Dans cette méthode, le chlorure d'arsenic (AsCl_3) attaque directement une source de Ga.

La région où il y a réaction chimique est portée à une température inférieure à la température de la région d'épitaxie.

Épitaxie en phase vapeur

- Méthode des Organométalliques:



Caractéristiques du procédé:

- ✓ Ne nécessite qu'une zone chaude (substrat),
- ✓ Contrôle facile de la stœchiométrie,
- ✓ Obtention de couches fines (100 Å)
- ✓ Pratiquement tous les Sc peuvent être déposés par cette méthode.

Épitaxie par jet moléculaire (MBE)

- La croissance s'effectue sous ultravide.
- Elle fait interagir des flux contrôlés d'atomes ou de molécules provenant de cellules d'évaporation sur un substrat porté à température convenable.
- La croissance des couches (III-V) est possible si $T_V < T_S < T_{III}$.

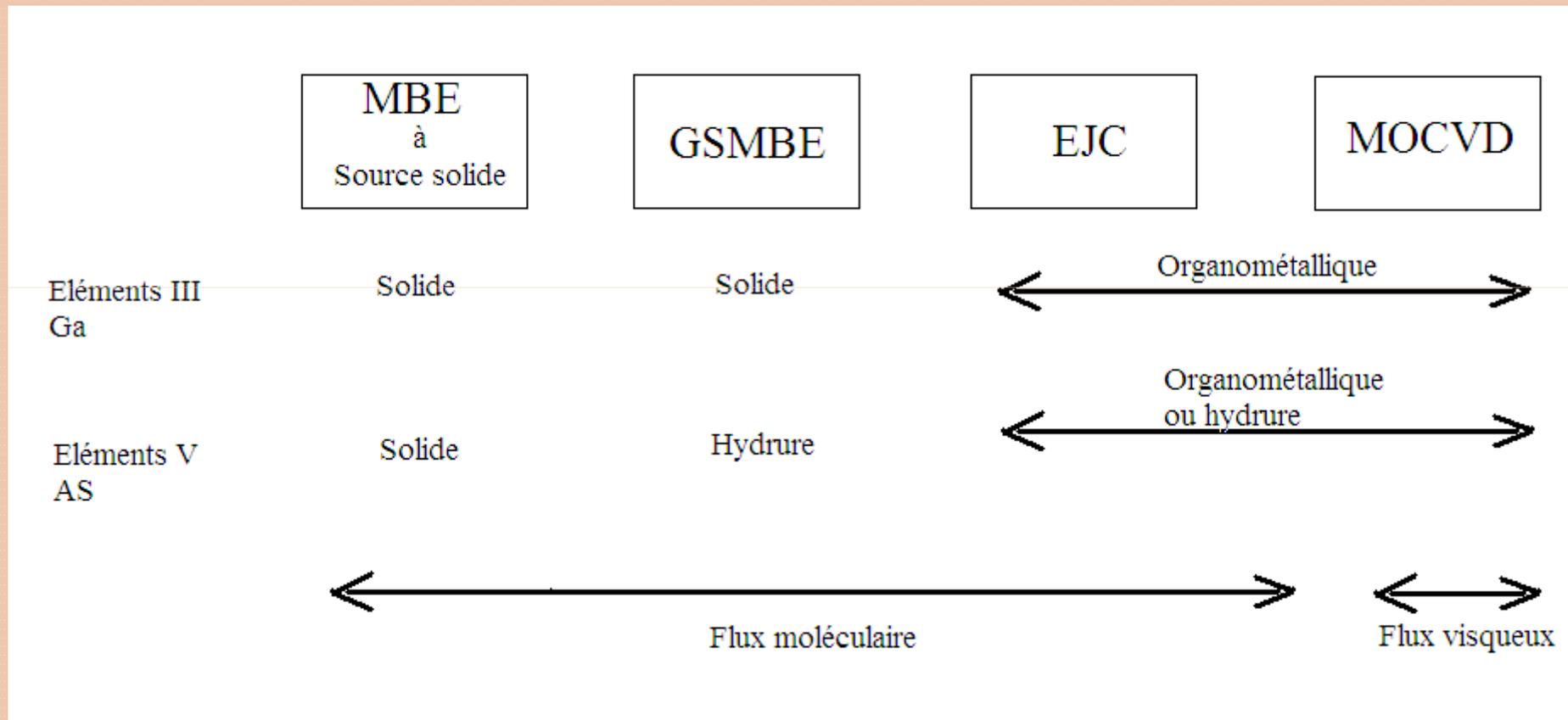
Épitaxie par jet moléculaire à sources gazeuses (GSMBE)

- Elle est née du mariage de la MOCVD et de la MBE,
- Elle consiste en la substitution des cellules standards solide par les gaz

Épitaxie par jet chimique (EJC)

- Elle reprend le principe de la MOCVD et l'utilisation des organométalliques ou des hydrures pour toutes les sources d'éléments mais dans une enceinte sous ultravide.

MBE et dérivées



MBE

- **Avantages:**
 - Bon état de surface,
 - Variation de dopage,
 - Température du substrat relativement faible,
 - Bon contrôle de la vitesse de croissance,
 - Pureté du dépôt.

Le vide

- Les pompes à vide servent à extraire l'air ou un autre gaz contenu dans une enceinte afin d'en diminuer la pression.
- Les gaz à évacuer sont:
 - Ceux présents au début de la mise sous vide,
 - Ceux émanant du dégazage des parois de l'enceinte

Le vide

- Le vide parfait n'existe pas, un vide considéré comme excellent (10^{-8} Pa) contient encore 2 millions de molécules/cm³.

Domaine du vide	P (en Pa)
primaire	1000-1
moyen	1- 10^{-3}
secondaire	10^{-3} - 10^{-7}
Ultra-vide	10^{-7} - 10^{-12}

1Pa~7,5 10^{-3} mmHg ou Torr
=10⁻⁵bar
~9,869 10^{-6} atm

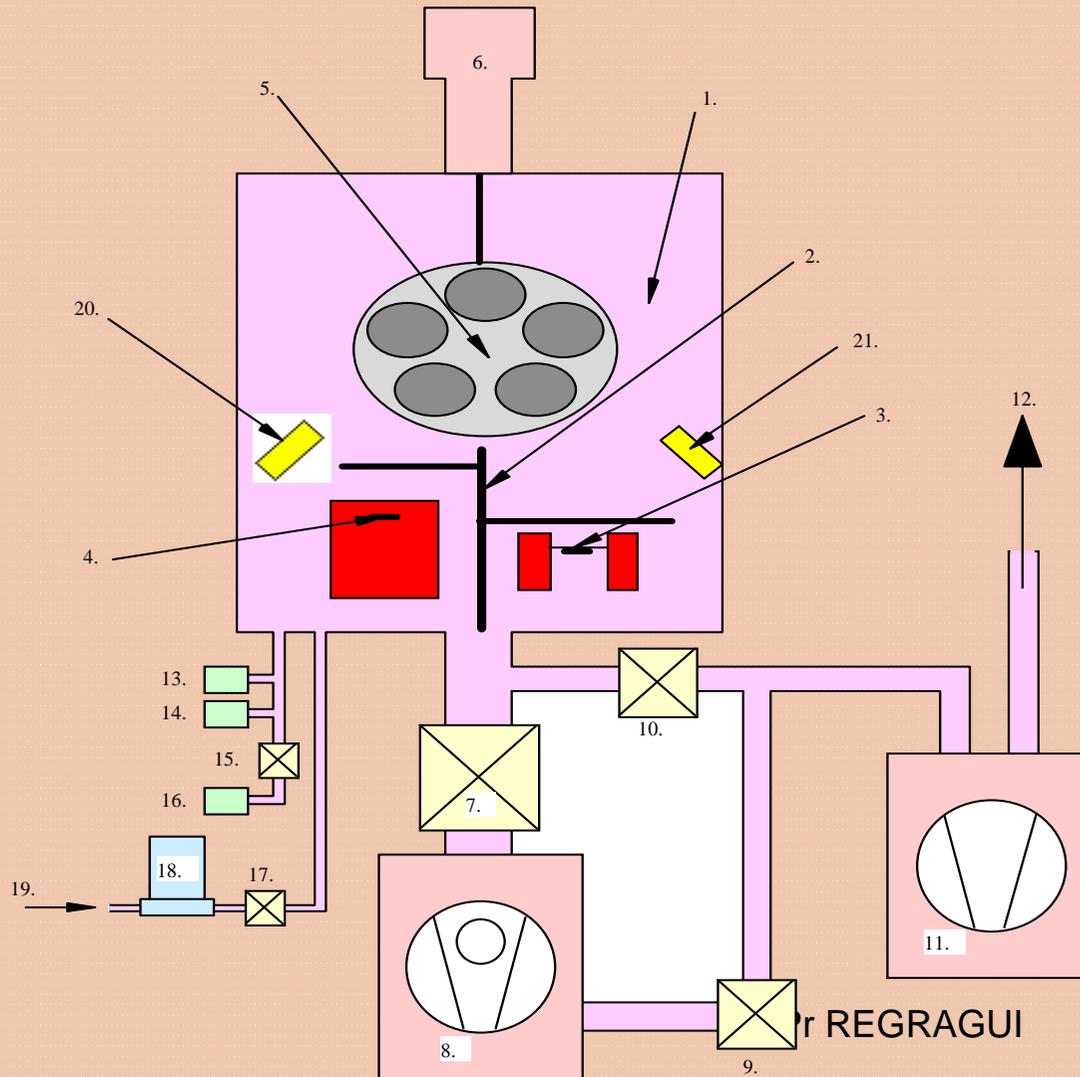
Le vide

- Suivant le vide recherché, on utilise différentes technologies pour les pompes à vide:
 - Pompes à palettes pour le vide primaire et moyen.
 - Pompes à diffusion ou pompes turbo moléculaires pour le vide secondaire.
 - Pompes turbo moléculaires ou ioniques pour l'ultravide.

Dépôt par évaporation

- Technique très simple: elle consiste à chauffer un matériau qui, vaporisé, va se déposer sur le substrat.
- La température d'évaporation du métal à évaporer est inférieure à celle de fusion du creuset.
- Afin d'améliorer l'homogénéité des couches déposées, on déplace en permanence les substrats.
- La balance à quartz sert à contrôler l'épaisseur des couches déposées.
- La pression dans l'enceinte doit être suffisamment faible ($\sim 10^{-6}$ Torr) pour que la probabilité de rencontre d'un atome résiduel soit quasi nulle.

Dépôt par évaporation



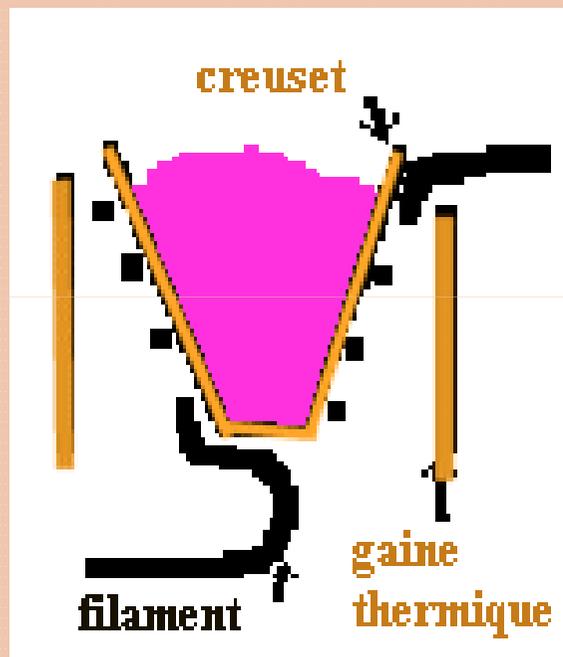
1. Chambre.
2. Obturateur (shutter).
3. Sources Effet joule.
4. Canon à électrons.
5. Porte-substrats.
6. Moteur pour la rotation des porte-substrats.
7. Vanne d'isolation de la pompe turbomoléculaire et la chambre.
8. Pompe turbomoléculaire.
9. Vanne d'isolation de la pompe primaire et la pompe turbomoléculaire.
10. Vanne d'isolation de la pompe primaire et la chambre.
11. Pompe primaire à palettes.
12. Evacuation.
13. Jauge Pirani.
14. Jauge cathode froide.
15. Vanne d'isolation de la jauge à membrane.
16. Jauge à membrane
17. Vanne d'isolation débitmètre chambre.
18. Débitmètre.
19. Arrivée de O₂.
20. Balance de mesure d'épaisseur du canon à électrons.
21. Balance de mesure d'épaisseur de l'effet joule.

Dépôt par évaporation

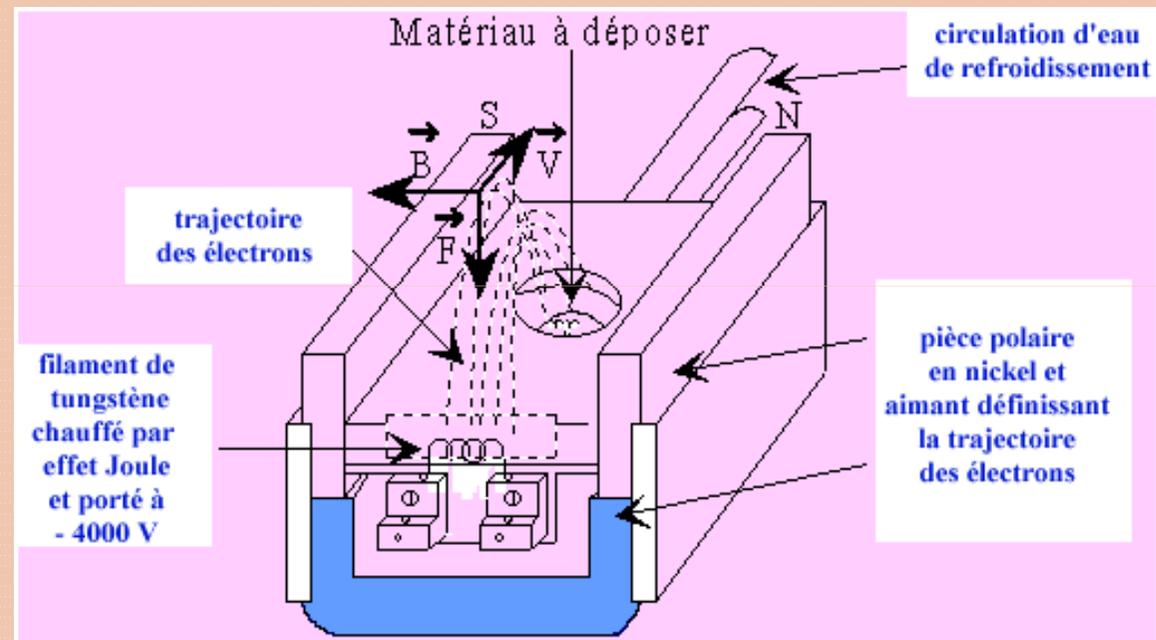
Il existe plusieurs façons de chauffage du matériau.

- évaporation par effet Joule: matériaux s'évaporant à relativement basse température.
- évaporation par faisceau d'électrons: évaporation de tout matériau (même réfractaire).
- évaporation par un faisceau laser (source thermique est externe au système).

Systemes de chauffage



PAR EFFET JOULE



PAR CANON A ELECTRONS

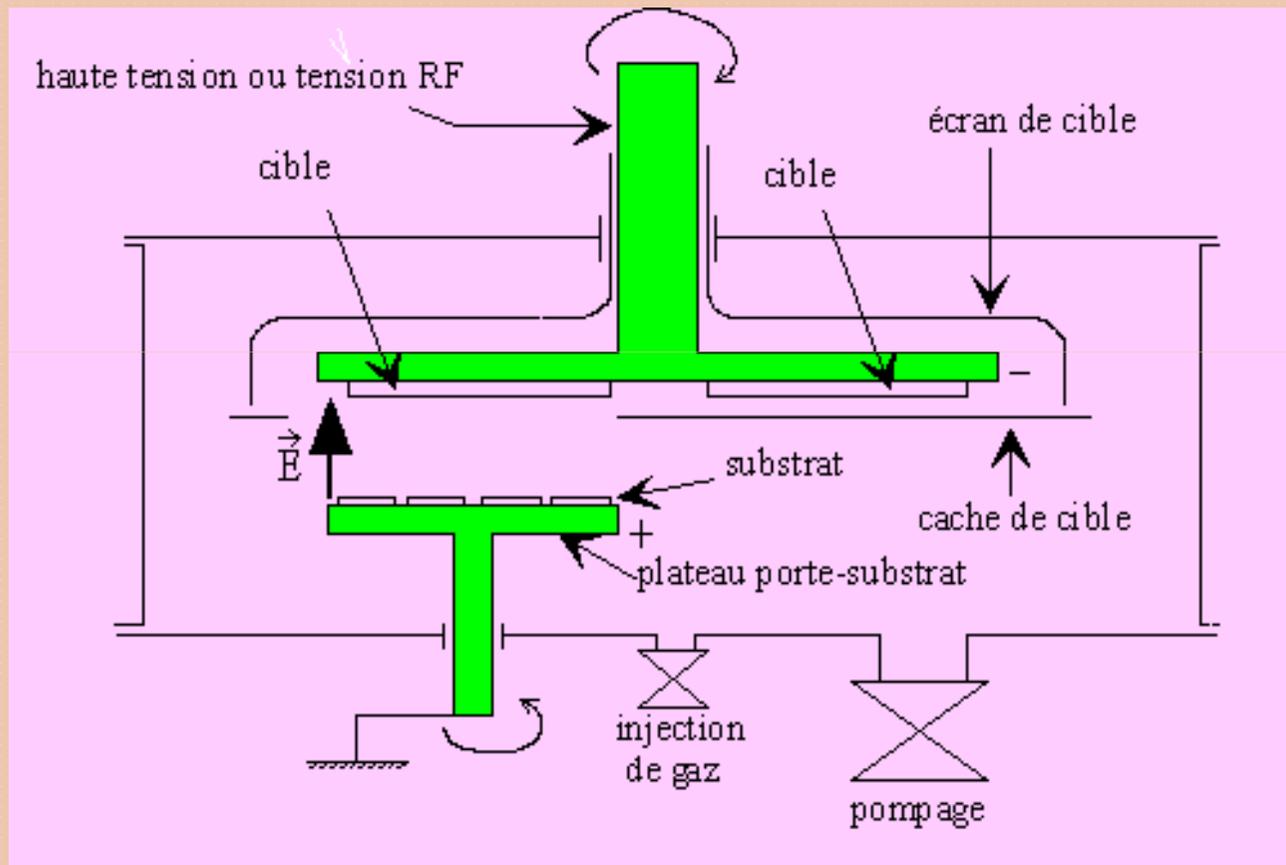
Pulvérisation cathodique

- La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid dans un gaz maintenu à pression réduite ($\sim 10^{-1}$ Pa).
- Il permet de déposer tous les matériaux, simples ou composés, réfractaires ou non, conducteurs ou diélectriques.

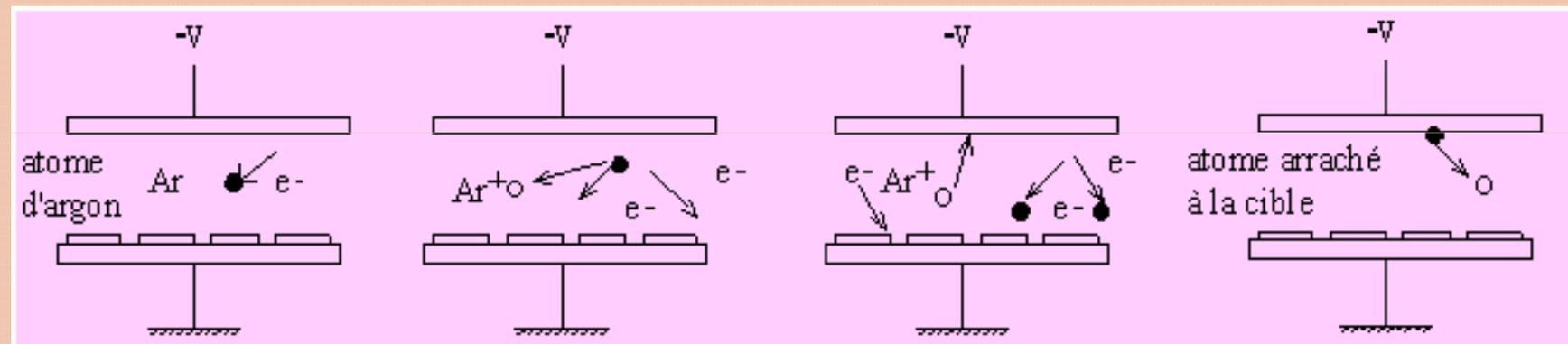
Pulvérisation cathodique

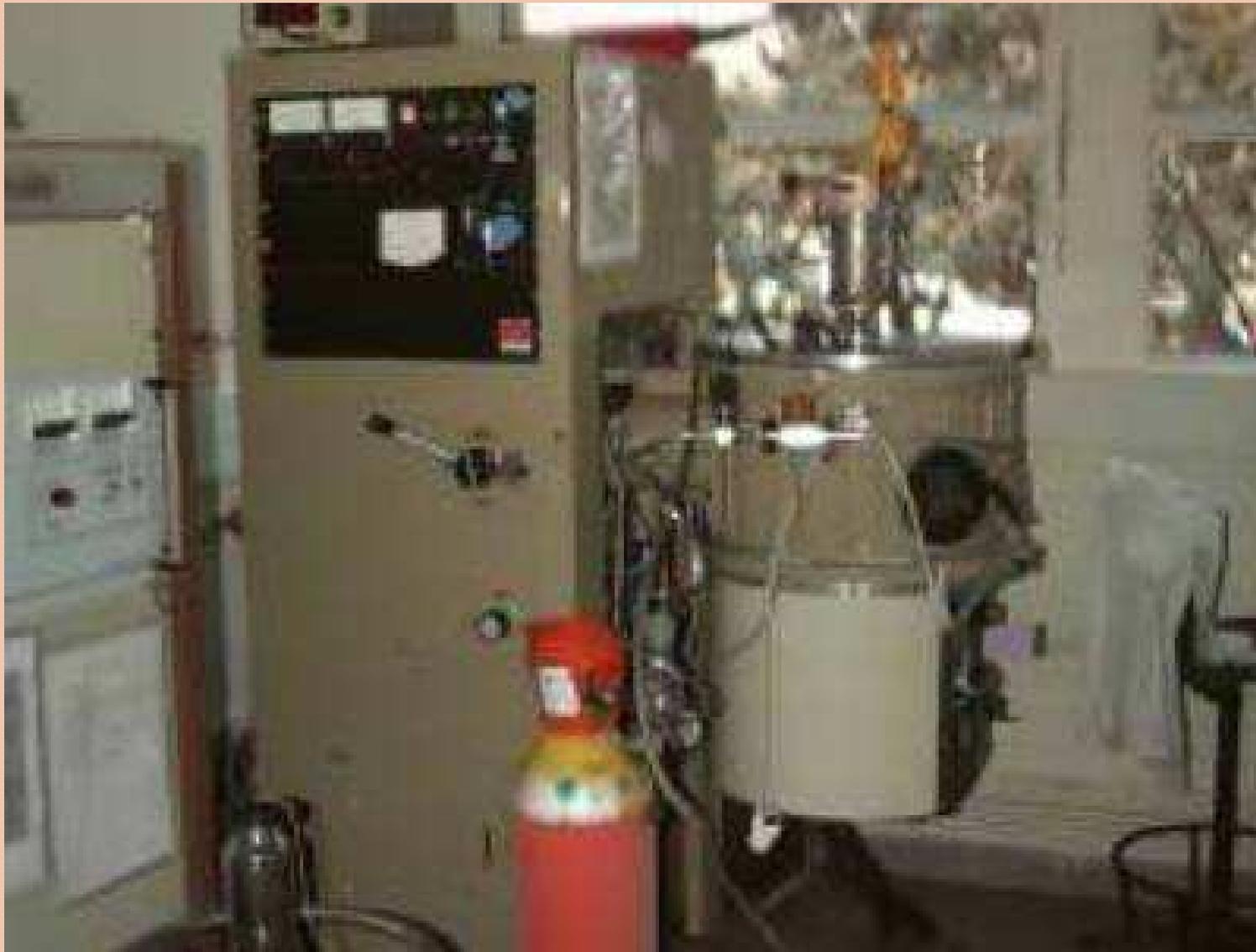
- La cible de pulvérisation est constituée du matériau à déposer (cathode).
- Le substrat (anode).
- Le champ électrique accélère des électrons qui ionisent Ar (introduits dans la chambre)
- Les ions pulvérisent des atomes de la cible qui vont se déposer sur le substrat

Pulvérisation cathodique



Pulvérisation cathodique





Pr REGRAGUI

Pulvérisation cathodique

- L'énergie des particules pulvérisées est considérablement plus élevée qu'en évaporation. Une quantité non négligeable est expulsée avec des énergies $> 10\text{eV}$ ce qui entraîne une meilleure adhérence des couches aux substrats que les couches évaporées.
- L'énergie des atomes pulvérisés est suffisante pour provoquer une désorption des gaz faiblement absorbés à la surface.
- La répartition uniforme et la plus grande densité d'ilots de croissance font que l'on obtient une couche continue de plus faible épaisseur.
- Il est fréquent d'obtenir des couches amorphes.

Pulvérisation cathodique

- Seuil de pulvérisation:
 - L'effet de pulvérisation n'est sensible qu'à partir d'un certain niveau d'énergie de l'ion incident appelé seuil de pulvérisation.
 - Ce niveau d'énergie dépend de l'ion incident et du matériau bombardé

Pulvérisation cathodique

- Seuil d'énergie de pulvérisation (eV) :

Ci ble	Ion	Ne	Ar	Kr	Xe
Al		13	13	15	18
Ni		23	21	25	20
Fe		22	20	25	23
Mo		24	24	28	27
Ag		12	15	15	17
Au		20	20	20	18
W		35	33	30	30

Pr REGRAGUI

Pulvérisation cathodique

- Rendement de pulvérisation :

$$S = \frac{\text{Nombre d'atomes expulsés}}{\text{Nombre d'ions incidents}}$$

- ✓ S dépend du gaz utilisé: plus le gaz est lourd plus il est efficace.
- ✓ S dépend de l'énergie des ions: plus elle est grande plus S est grand.
- ✓ S dépend du matériaux bombardé: L'or ou l'argent se pulvérisent plus rapidement que le nickel.
- ✓ S est peu dépendant de la température.

Pulvérisation cathodique

- Procédé diode en tension continue ou diode DC:
 - Même procédé que précédemment.
 - Ce procédé est peu utilisé: équipement de métallisation en très faible épaisseur.
 - Il permet de déposer tous les matériaux conducteurs (métaux et alliages) y compris certains matériaux faiblement conducteurs (C, Si, Ge...).
 - Il permet de déposer des matériaux composés (oxydes, nitrures) en utilisant un gaz de décharge réactif.
 - Il ne permet pas de pulvériser les matériaux diélectriques.

Pulvérisation cathodique

- Pulvérisation en radiofréquence ou procédé diode RF:

Le Plasma contenant autant d'ions que d'électrons, la polarisation alternative de la cible fait que pendant l'alternance négative, la cathode attire les ions qui la pulvérisent, en la chargeant positivement.

Pendant l'alternance positive, elle attire les électrons qui la déchargent.

En pratique, on utilise une fréquence de 13,56MHz.

Pulvérisation cathodique

- Pulvérisation magnétron :
 - La cathode magnétron est un perfectionnement de la cathode classique.
 - Ce perfectionnement résulte de la combinaison d'un champ magnétique intense perpendiculaire au champ électrique c'est-à-dire parallèle à la cible.
 - Il permet d'accroître la vitesse de dépôt.

Méthode de dépôt par ablation laser

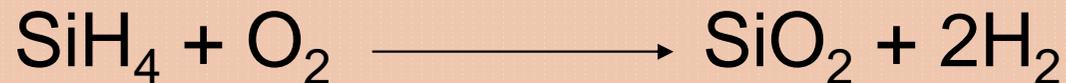
- Un faisceau laser pulsé est dirigé sur une cible constituée du matériau à déposer; au contact de ce faisceau, de la matière va s'arracher pour venir se déposer sur le substrat placé en face de l'impact du laser.
- Permet de déposer des couches minces de tous matériaux (isolants, métaux, oxydes, réfractaires...).
- Le laser doit être UV et non IR pour éviter de surchauffer le matériau.
- L'impact doit être court (laser nano, pico ou femto seconde).

Méthode de dépôt par ablation laser

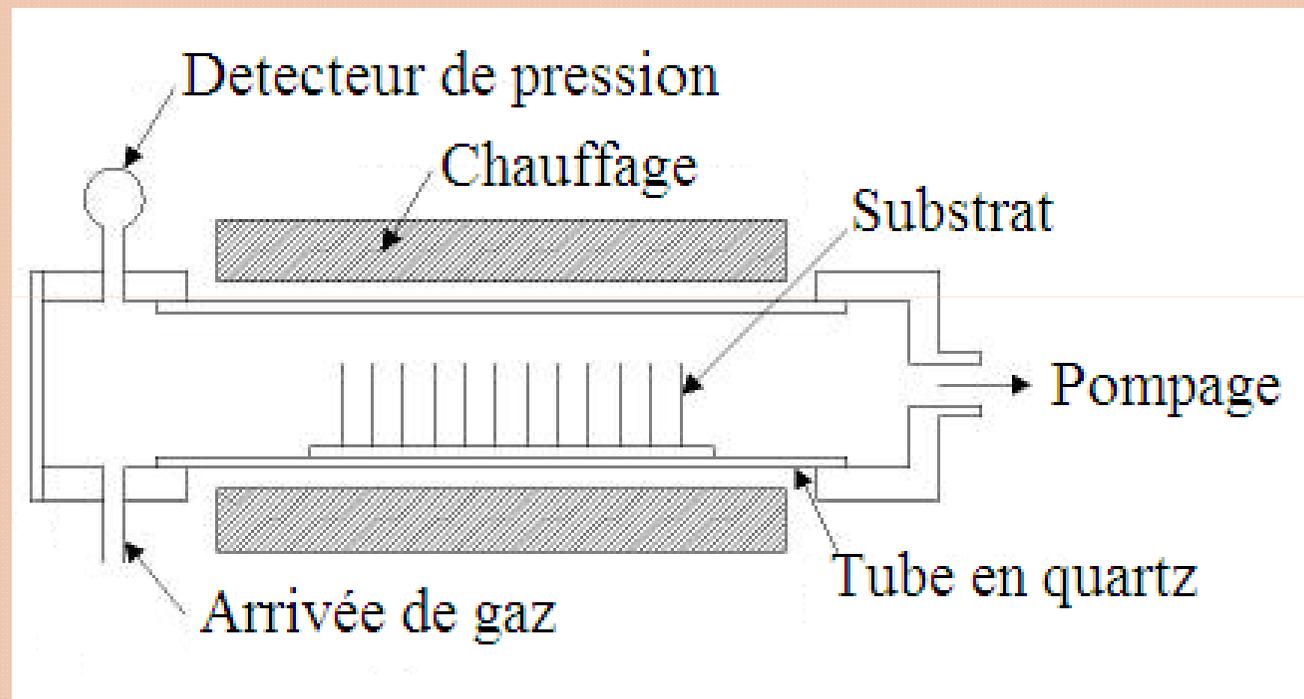
- Les caractéristiques physico chimiques des dépôts obtenus dépendent :
 - Des propriétés de la cible irradiée,
 - Des conditions d'irradiation (densité d'énergie, longueur d'onde, durée de l'impulsion laser),
 - De la température du substrat de dépôt,
 - De la nature et de la pression du gaz ambiant.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

- Elle s'effectue dans un four dans lequel on introduit les espèces réactantes. Ces précurseurs réagissent ou se décomposent sur la surface du substrat pour produire le matériau désiré.
- Exemples:



Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)



Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

- Il existe plusieurs formes de CVD:
 - Pression de dépôt:
 - CVD: Dépôt s'effectue à pression atmosphérique.
 - LPCVD: Technique à basse pression, elle permet d'améliorer l'uniformité de la couche.
 - UHVCVD: Technique à très basse pression ($<10^{-6}$ Pa).
 - Plasma enhanced CVD (PECVD): Ce procédé utilise un plasma pour améliorer le taux de réaction des précurseurs et permet des dépôts à faible température.
 - MOCVD: Utilise un précurseur organométallique.

Pulvérisation chimique réactive en phase liquide dite « spray »

- Elle consiste à pulvériser, sous forme de fines gouttelettes, sur un substrat préalablement chauffé une solution de réactifs contenant tous les éléments capables de se recombinaison pour former le composé désiré.
- Sous l'effet de la température, il y a réaction et par conséquent formation d'un dépôt sur le substrat.
- Exemple: $WCl_6 + 3H_2O \longrightarrow WO_3 + 6HCl$

Pulvérisation chimique réactive en phase liquide dite « spray »

- On peut classer les types d'unité de dépôt en deux catégories:
 - Celles s'opérant sans intervention d'un agent extérieur; elles utilisent soit l'air ou un gaz inerte (N_2) comme gaz porteur,
 - Celles assistées par un agent extérieur (champ électrique, bombardement du dépôt par un laser)

Pulvérisation chimique réactive en phase liquide dite « spray »

- Principaux paramètres de fabrication:
 - Température de substrat: Favorise la réaction chimique, contrôle la mobilité des atomes sur le substrat et les réarrange dans un ordre donné donc influence sur le mode de croissance de la couche mince.
 - Le débit de la solution à pulvériser: les débits de la solution et du gaz porteur permettent d'avoir un jet continu et par conséquent des couches d'épaisseurs homogènes.
 - La distance substrat-gicleur: elle permet de limiter la surface de dépôt. Elle varie suivant la nature du matériau à déposer et le solvant utilisé pour dissoudre le précurseur de base.

Pulvérisation chimique réactive en phase liquide dite « spray »

- Paramètres liés à la solution à pulvériser:
 - Le précurseur: ce sont en général soit des sels minéraux ou organiques. Ces composés sont introduits dans la solution avec une certaine molarité (M).
 - Le solvant: le choix du solvant est important car il doit être capable de dissocier complètement le composé source. L'eau et les alcool (méthanol, éthanol,...) sont les plus utilisés.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

a- couches minces

la filière silicium en couches minces a-Si:H

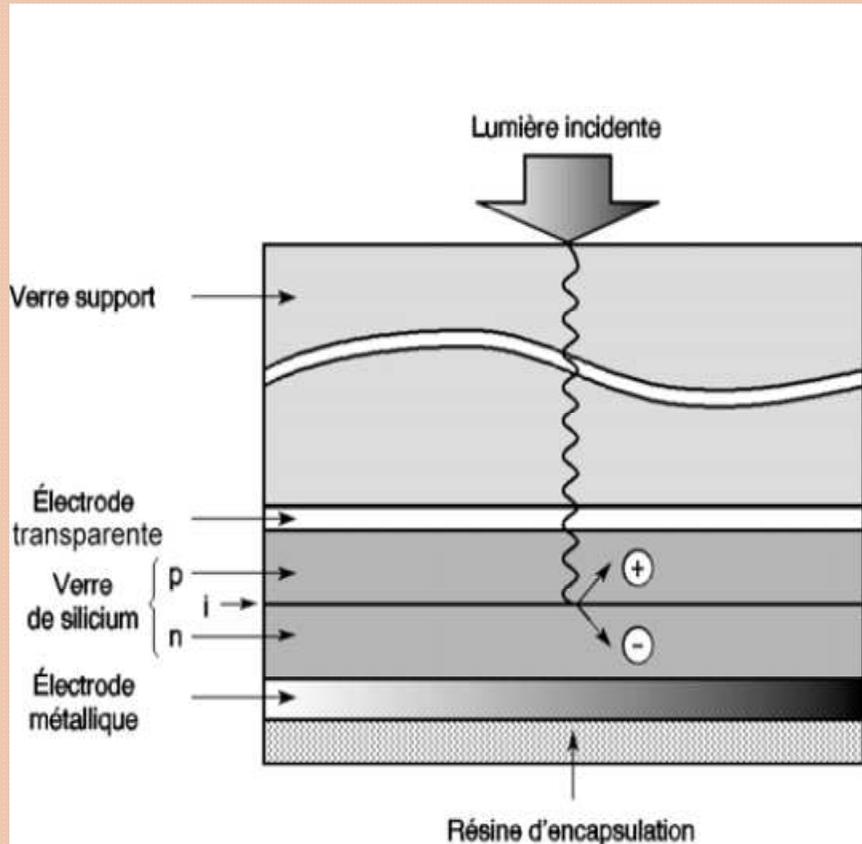
- Faible mobilité des porteurs, rendement faible et durée de vie courte
- Meilleur rendement aux éclairagements faibles et diffus
- Son rendement baisse moins que le cristallin quand la température augmente
- A cause du désordre, les liaisons covalentes sont coupées d'où présence de liaisons pendantes (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 varie avec la concentration de H liés, il dépend aussi du dopage pour le type p (varie inversement au dopage)
- La zone p est utilisée comme fenêtre

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

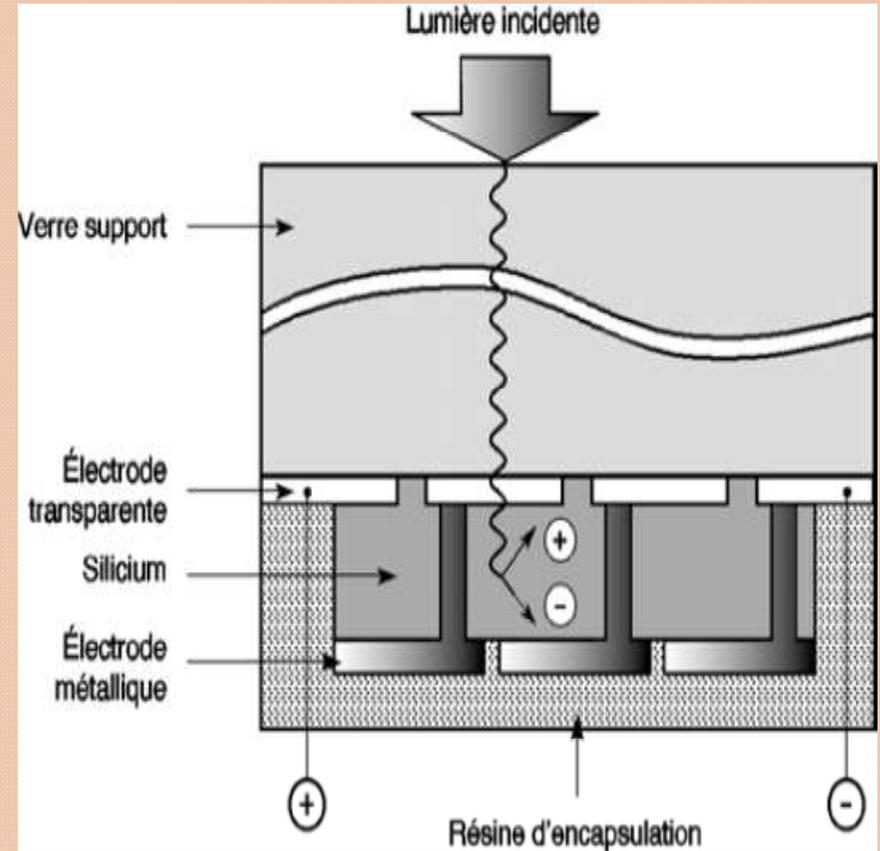


- Fonctionne avec un éclairage faible (calculatrices)
- Si déposé sur une feuille de verre

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 éclairage

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

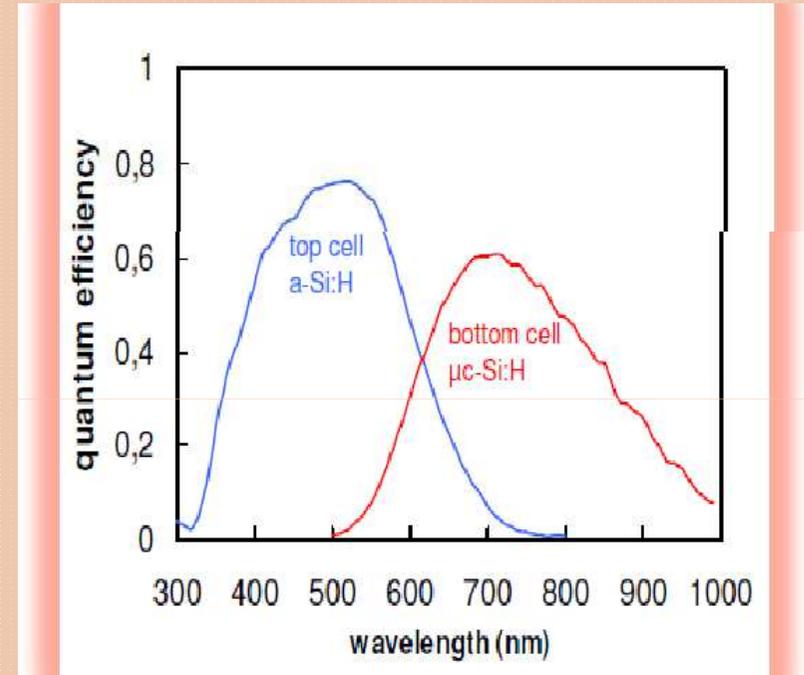
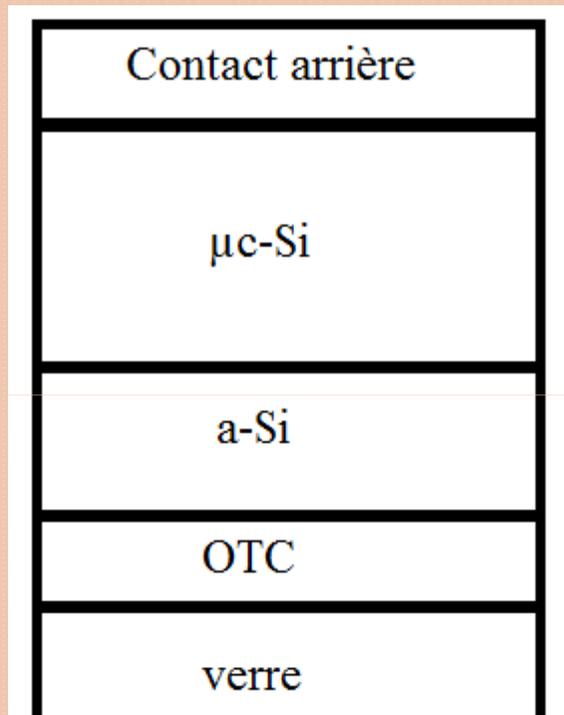
L'épaisseur de la couche intrinsèque doit être optimisée

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



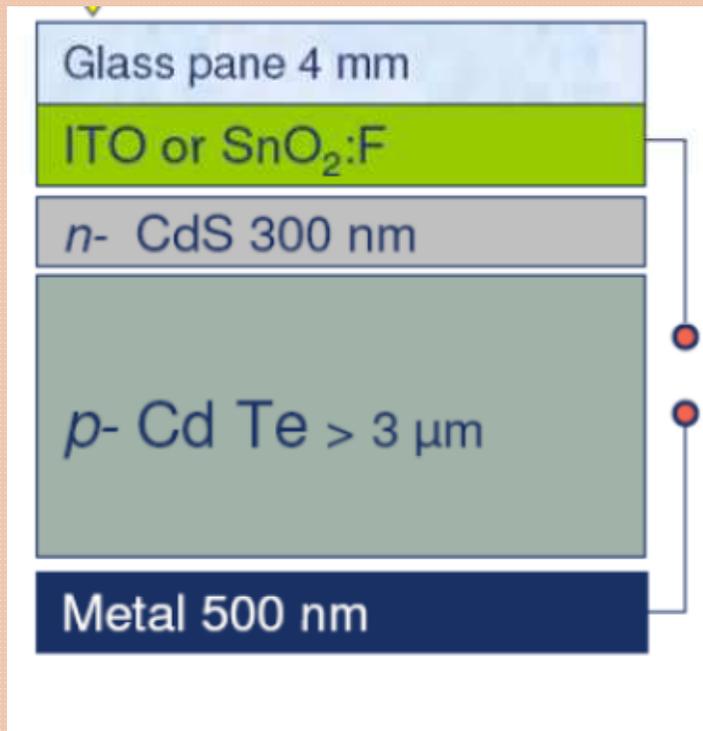
a-Si:H/ μcSi / rendement 2012 \approx 10.8% , coût \approx 0.35 \$/W

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



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

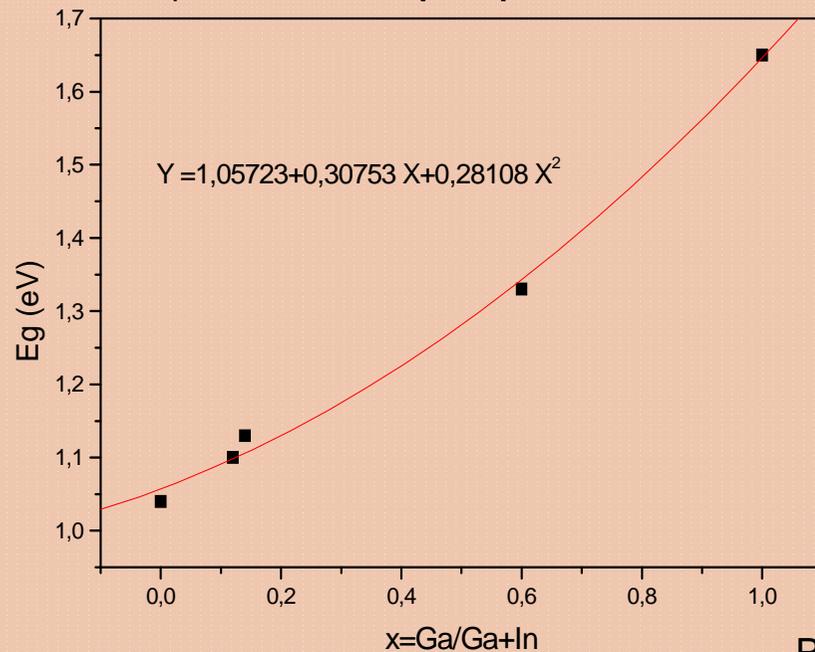
Dr. REGRAÛ

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.



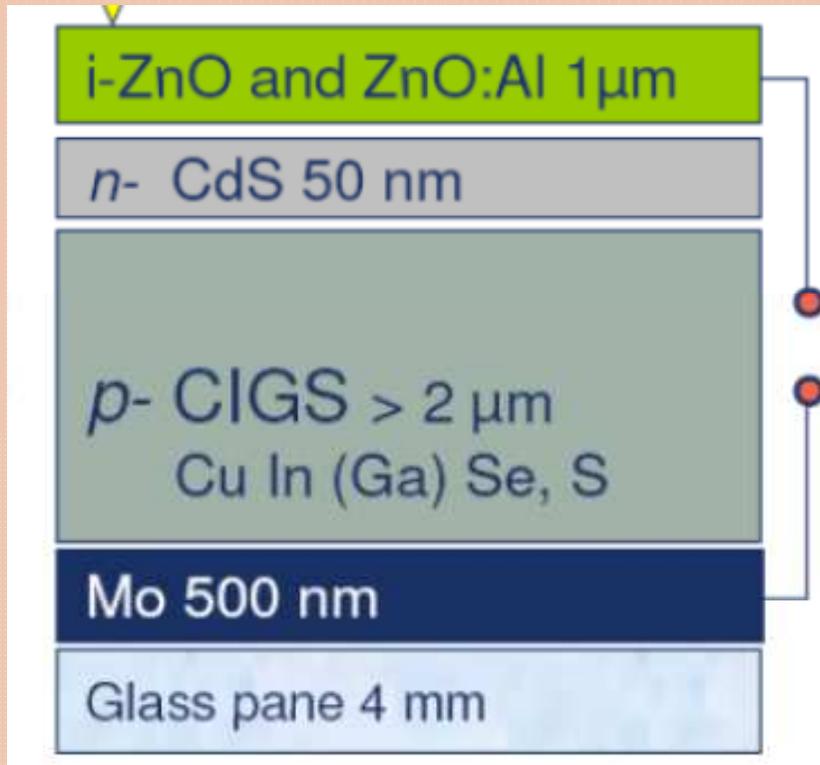
introduction du Ga

Rareté de In désavantage cette filière

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

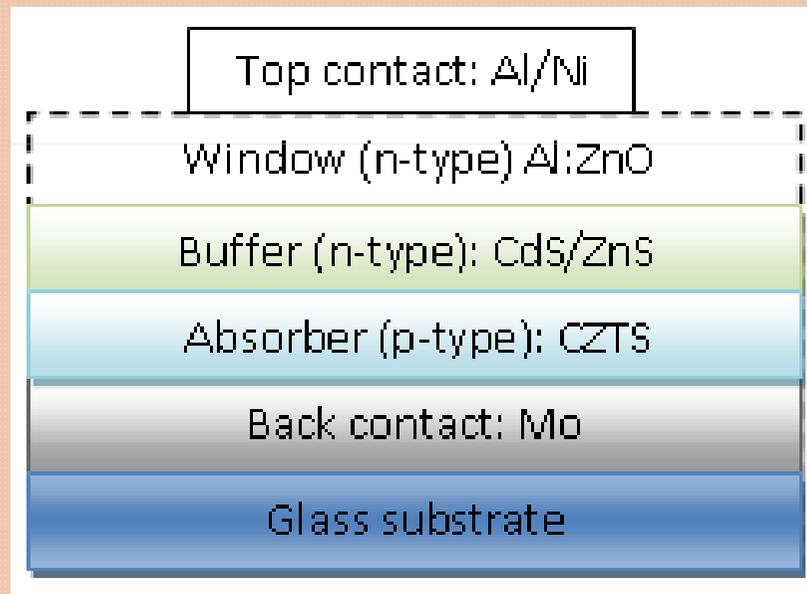
Pr REGRAGUI entre 0,42 et 0,55 euro.

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

- 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
- Déposition 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 un 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 d CuCl , ZnCl_2 , SnCl_4 et thiourée dans un mélange d'eau désionisée et d'éthanol.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

b- couches minces

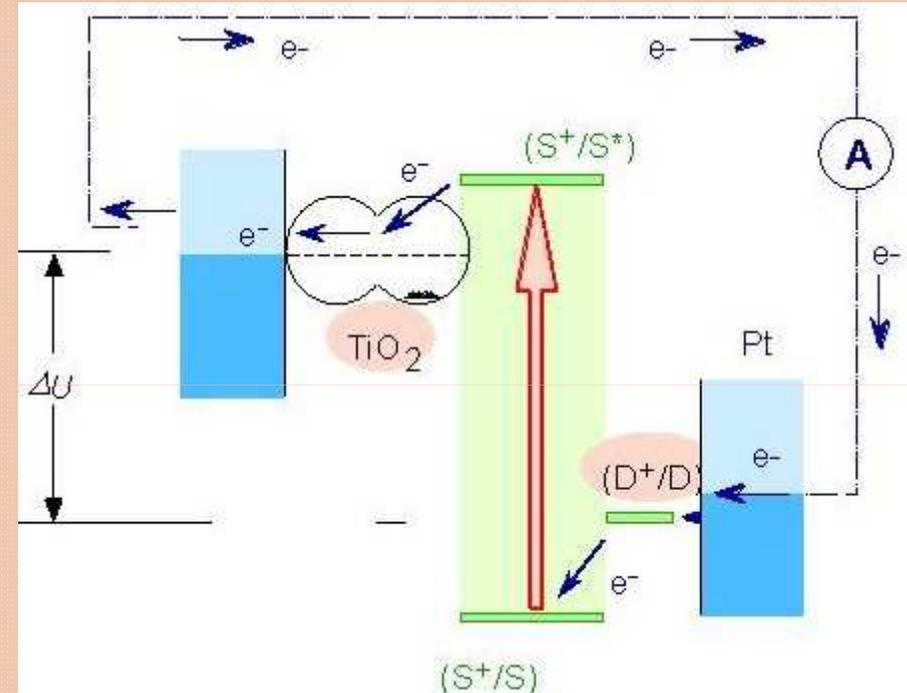
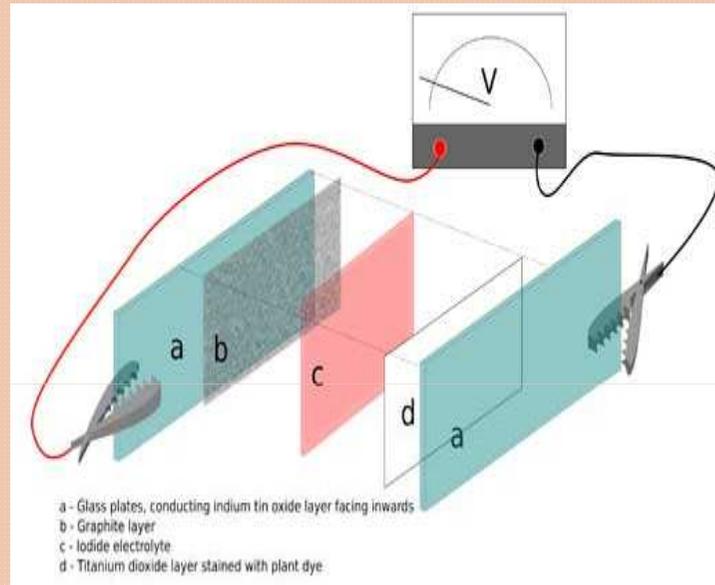
La filière $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$

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

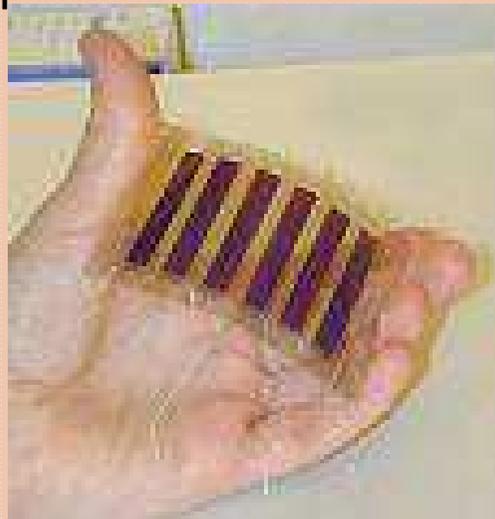
c- cellule de Graetzel

- Les électrodes :Ce sont des plaques de verre dont une face est recouverte d'un oxyde métallique transparent en FTO (Fluorine-doped Tin Oxide), où en ITO (oxyde d'indium-étain).
- Le colorant : il absorbe les photons de la lumière solaire afin de passer à un état excité, c'est-à-dire un niveau d'énergie supérieur au niveau fondamental. Il peut alors libérer un ou plusieurs électrons.
- Le graphite : c'est un empilement de feuillets dans lequel les atomes de carbone forment des mailles hexagonales. Il est utilisé comme conducteur électrique. Un atome de carbone peut former quatre liaisons, or dans le graphite chaque atome de carbone ne se lie qu'à trois autres atomes de carbone, des électrons peuvent alors se déplacer facilement.
- L'oxyde de Titane (TiO_2) : C'est un matériau poreux, non toxique, chimiquement stable et n'absorbe pas dans le domaine visible. Il capte efficacement la lumière grâce à sa couche de quelques dizaines de nanomètres.
- L'électrolyte: est une solution conductrice car il est constitué d'ions. Le couple le plus performant: $\text{I}^- / \text{I}^{3-}$ couple oxydant/réducteur doit être soluble dans le solvant présent qui doit être liquide et peu volatil dans les conditions d'utilisations (température dans la cellule entre 40 et 80°C)

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

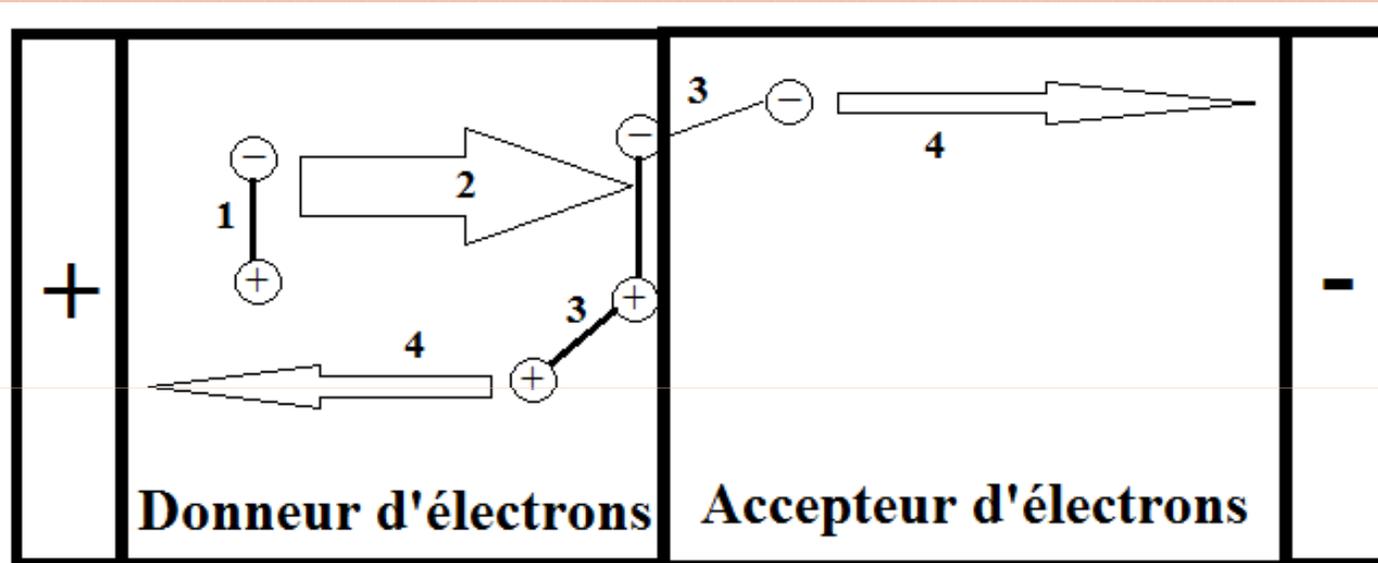
c- cellule de Graetzel

- 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 (bipyridine de ruthenium) doit être compatible avec le Semi-conducteur et l'électrolyte 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

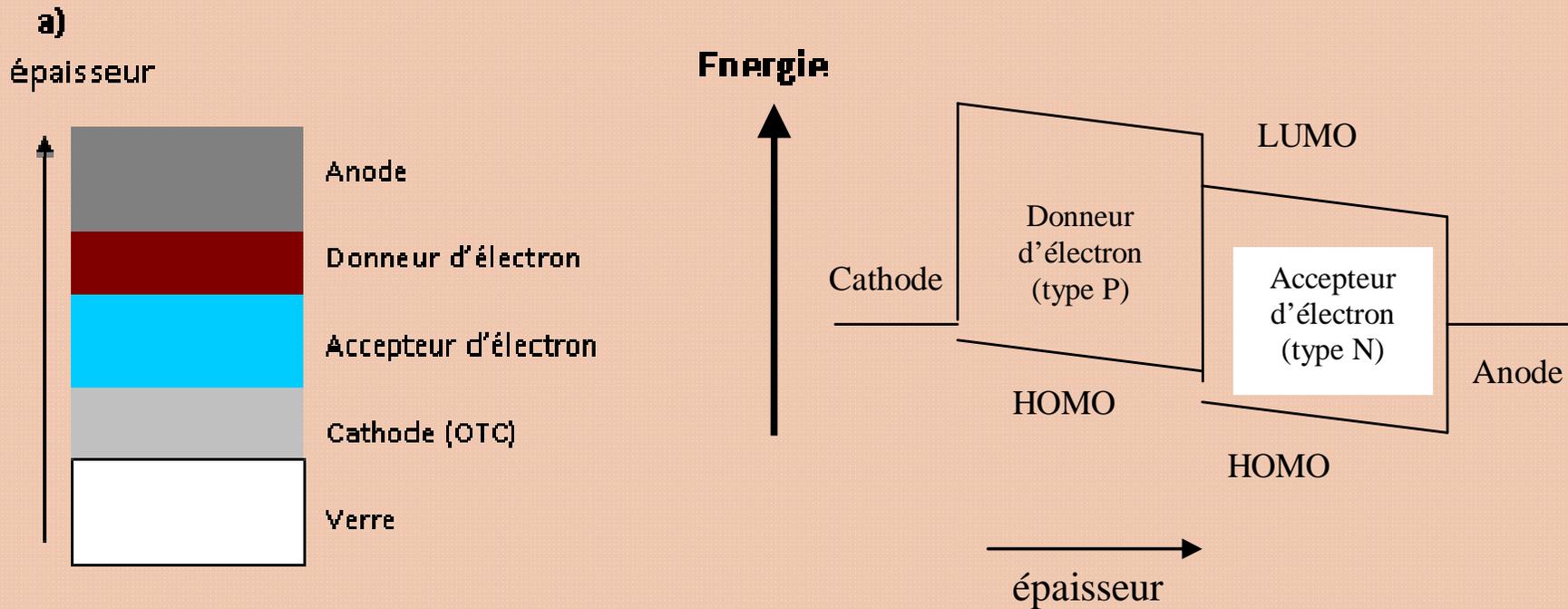


- 1: absorption de photons et création d'excitons**
- 2: diffusion des excitons**
- 3: dissociation des excitons**
- 4: transport des électrons et des trous**

Principe de fonctionnement

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

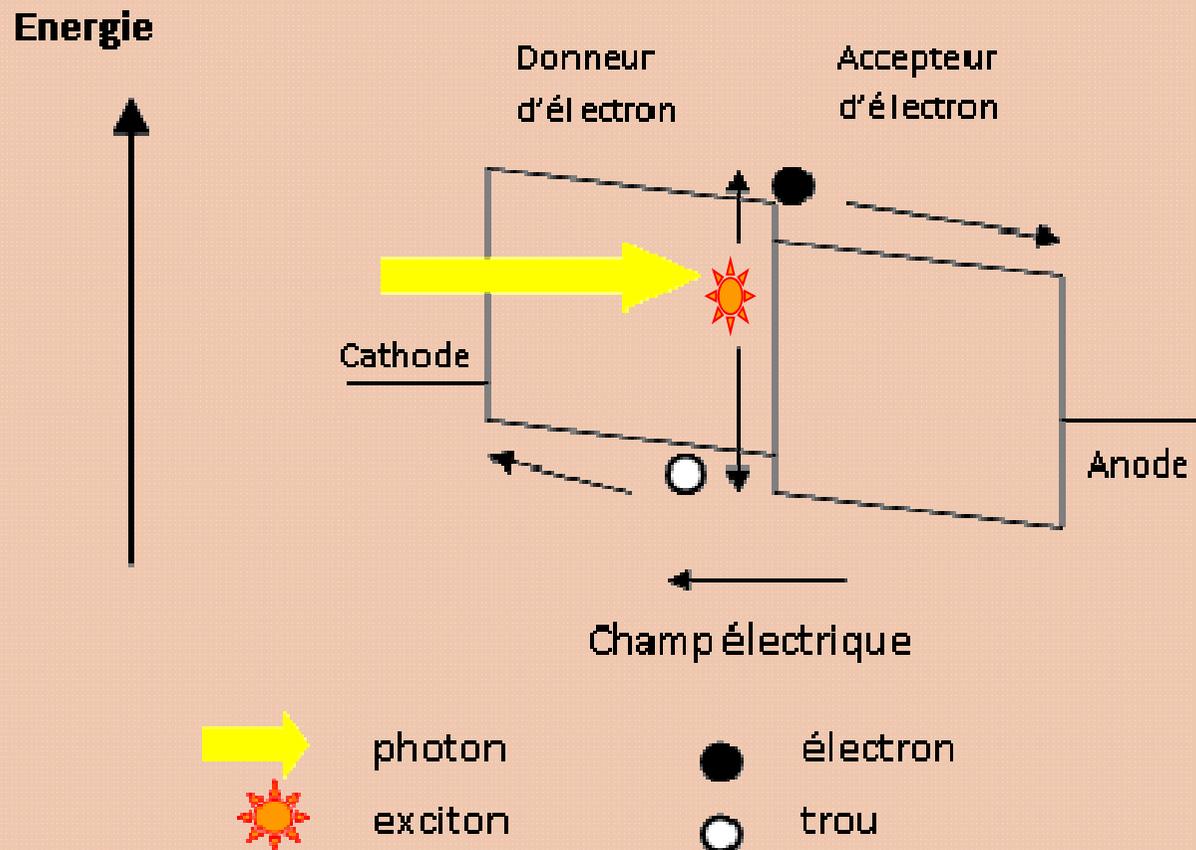
d- cellules organiques



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

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

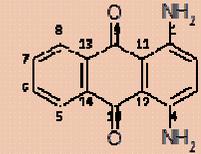
d- cellules organiques



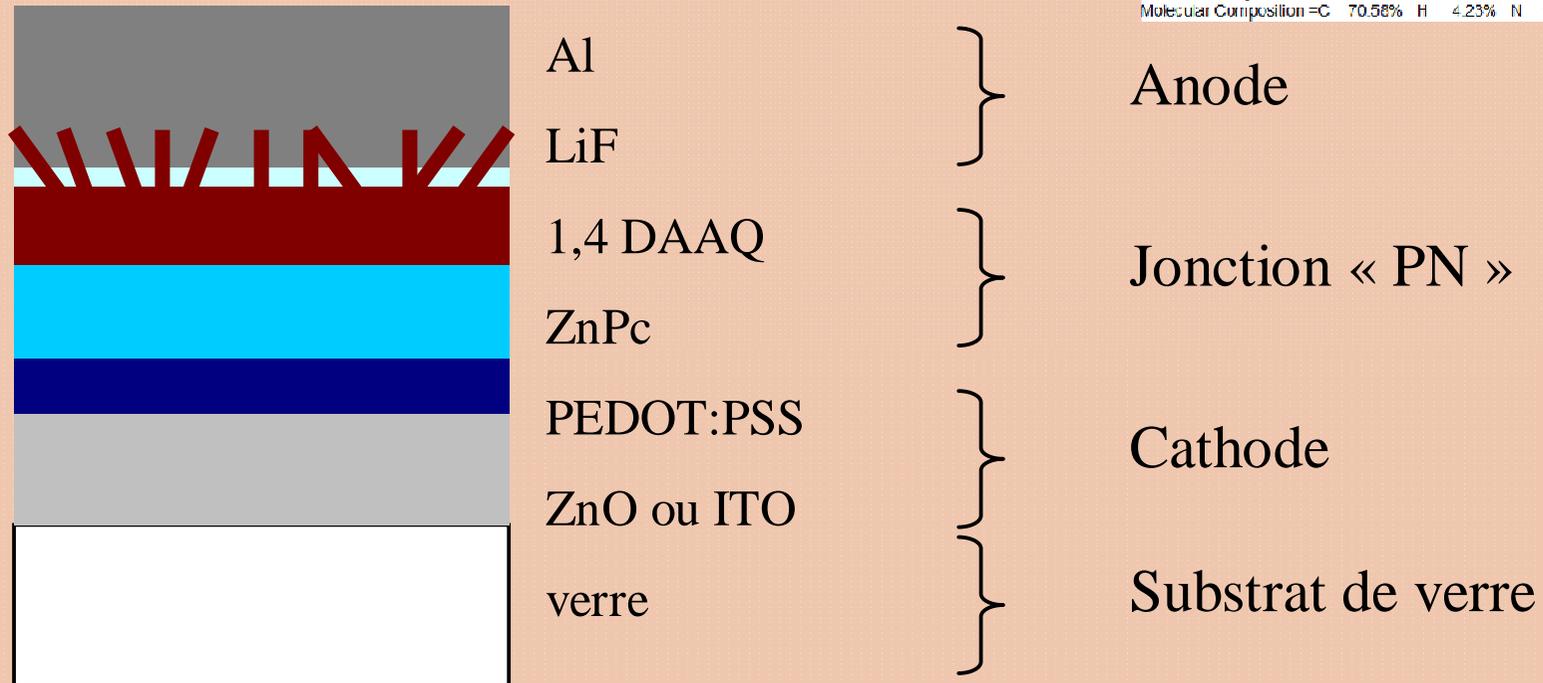
Principe de fonctionnement d'une photopile organique à jonction PN.

VI: FILIÈRES PHOTOVOLTAIQUES

d- exemple de cellule organique

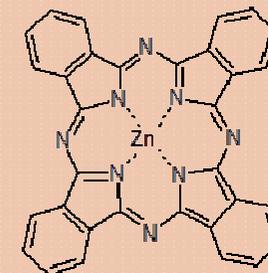


Molecular Weight =200.25
 Molecular Composition =C 70.58% H 4.23% N 11.76% O 13.43%



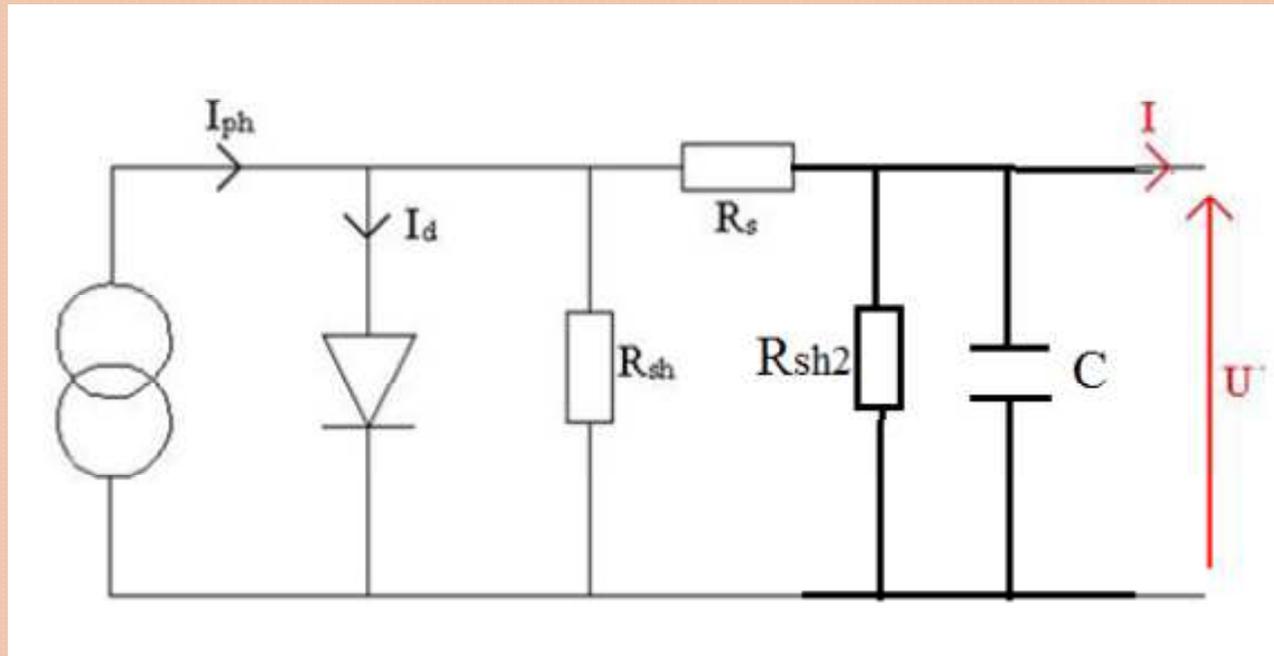
Structure « classique » de photopile.

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}

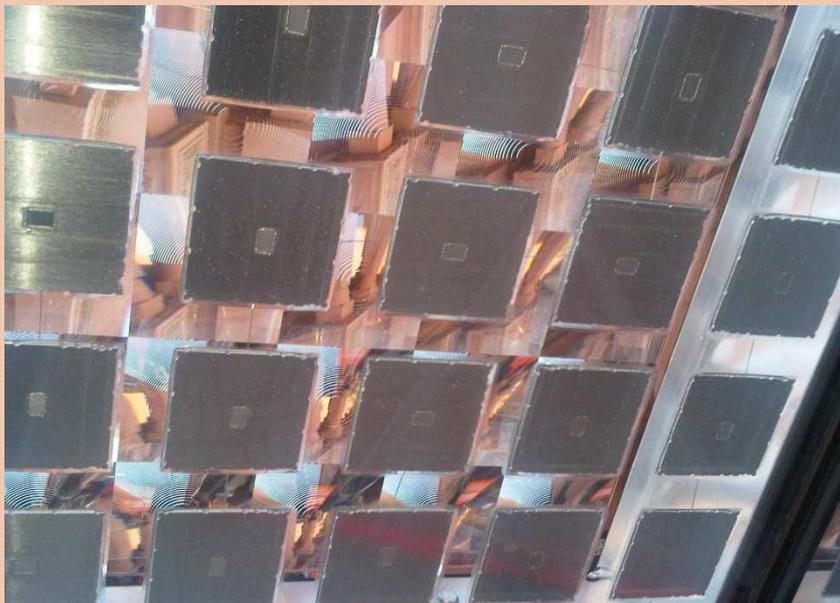
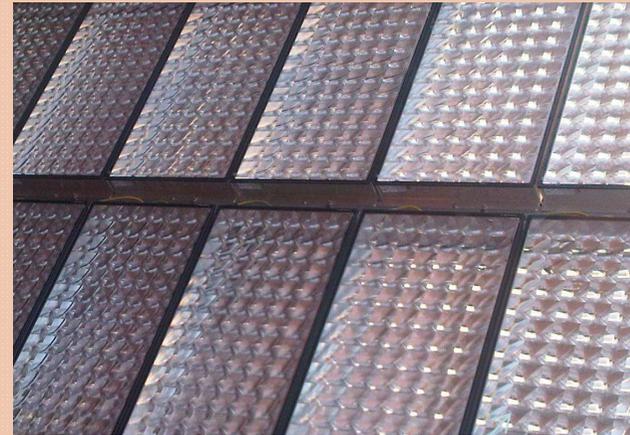
Solution:

Milieux interpénétrés, Copolymers...etc au niveau de D/A le transfert d'électrons est plus

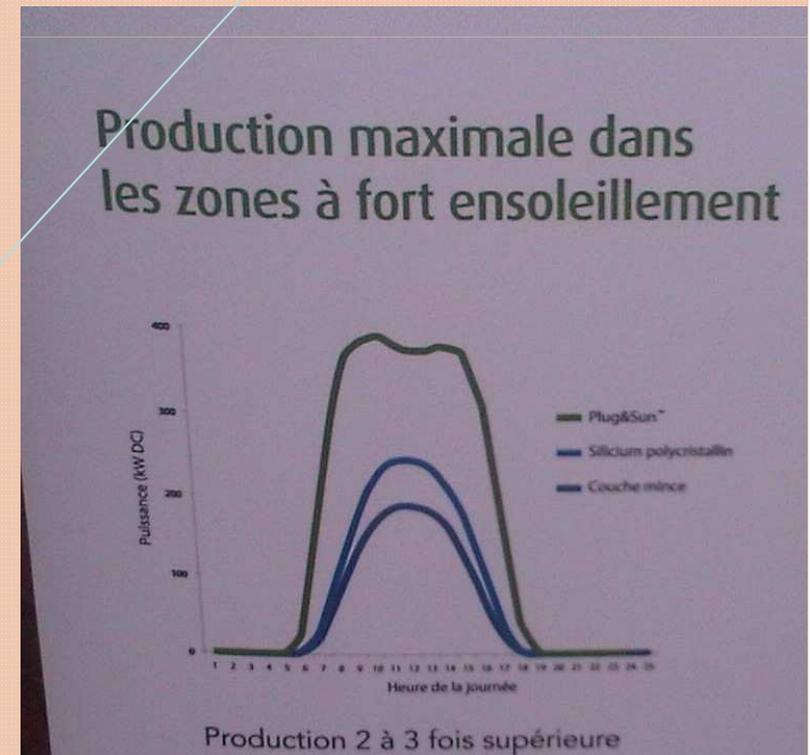
Pr REGRAGUI

rapide que la désexcitation de l'exciton

Photovoltaïque à concentration CPV

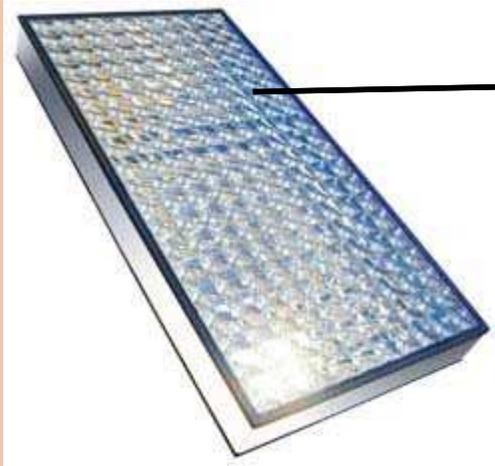


REGRAGUI

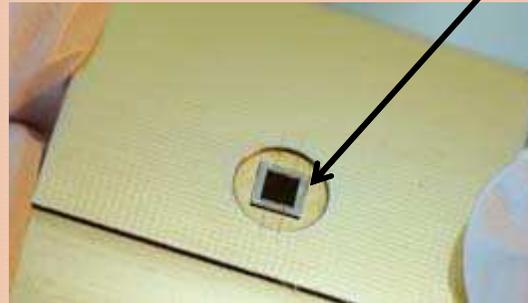


Photovoltaïque à concentration CPV

Module CPV



Concentrateur à lentille



Cellule PV multi-jonctions III-V

Pr REGRAGUI