

## CHAPITRE 3

# Cellules Solaires: Principes, technologies et matériaux

**Abdelkader OUTZOURHIT**

**Ecole ECOMAT, Bouznika**

# Introduction

## Contexte General

- Demande en énergie croissante
  - Réserve en pétrole limitées
  - Changement climatiques (Emission des GES)
- source alternative d'énergie
- Terre reçoit  $1376 \text{ W/m}^2$  d'énergie solaire (absorption par l'atmosphère négligée)
  - L'exploitation de l'énergie solaire s'avère nécessaires (technologies matures)

-Energie solaire absorbée par la terre (atmosphère et océans inclus): 3850000 exajoules (EJ) ( $10^{18}$  joules) par ans. (70% de l'énergie incidente)  
-- Energie primaire utilisée en 2005 487 EJ (**0.0126%**)  
- Electricité (2005): 56.7 EJ (**0.0015%**)

## Contexte du Maroc

- Forte dépendance énergétique
- Très bon ensoleillement moyenne:  $5\text{kWh/m}^2/\text{jours}$

Energie électrique solaire Photovoltaïque et thermodynamique reste encore non-complétive avec les sources traditionnelles

→ R&D pour développer de nouvelles générations de cellules solaires

# Classification des cellules solaires

- 1ere génération:
  - Une seule jonction à base de Silicium monocristallin (16-19% de rendement) ou poly cristallin (rendement 14-15%)
  - 89.6% de la production de 2007
  - approche le rendement théorique limite de 33%

- **2eme génération:**

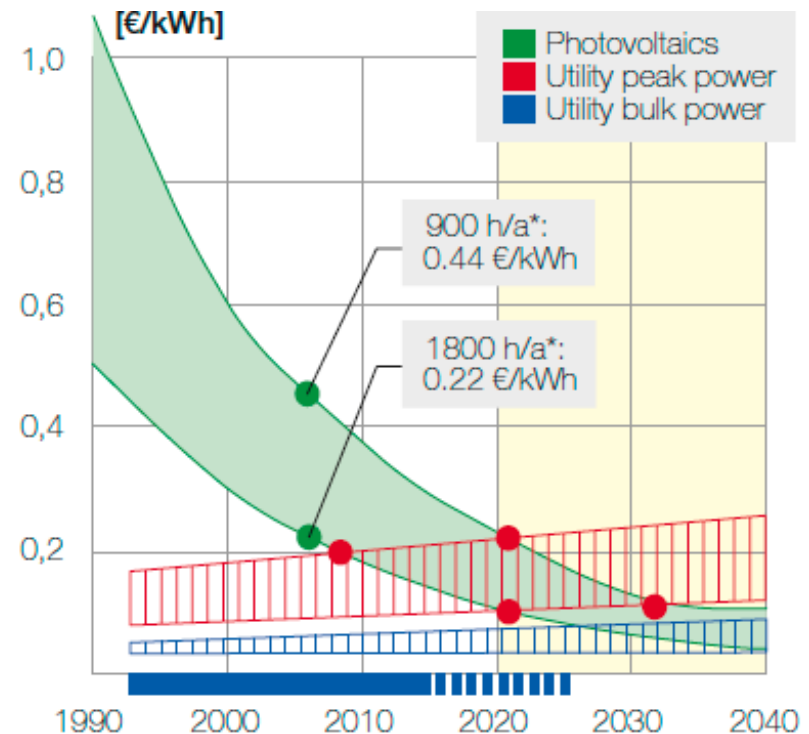
Couches minces

CdTe 4.7% & CIGS 0.5% de la production Mondiale de 2007

- **3eme Génération:**

Multi-jonctions avec ou sans concentration  
30 à 43% de rendement

## Evolution des couts d'électricité PV



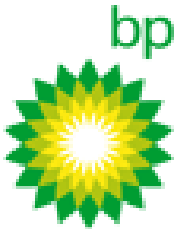
\*h/a: Hours of sun per annum

900 h/a corresponds to northern countries of Europe

1800 h/a corresponds to southern countries of Europe

Note: The blue band indicates that market support programmes will be necessary until about 2020 in some markets.

# Producteurs de cellules Solaires



Rest of the World  
47%

Q-Cells 9%

**Q.CELLS**

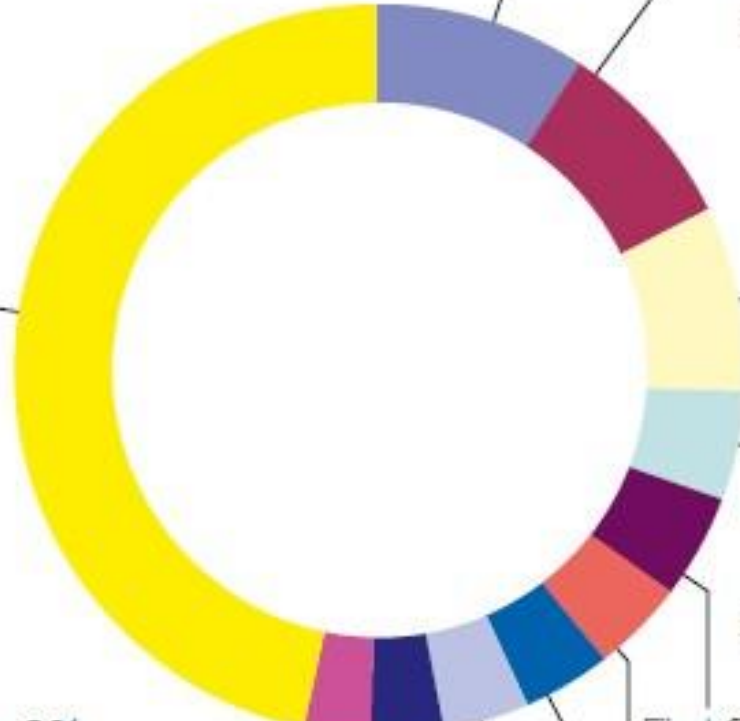
Sharp 8%

**SHARP.**

Suntech  
8%

**SUNTECH**

**SUNPOWER™**



**UNI-SOLAR.**  
United Solar Ovonix

**Siliken**  
renewable energy

Kyocera  
5%

**KYOCERA**

First Solar 5%



Motech 4%

Ja Solar 3%

Yingli 3%

Sanyo 4%

SolarWorld 4%

Source : Photon International



# Exemple de centrale PV Waldpolenz Solar Park, Allemagne

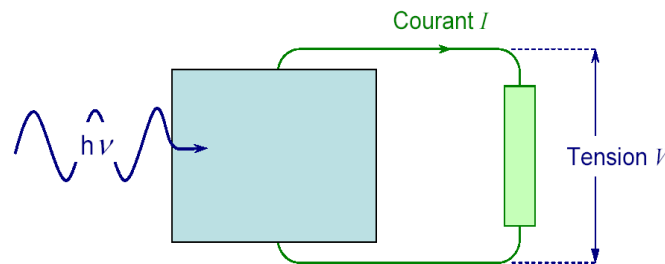


40 megawatts, couches minces

# Conversion Photovoltaïque

**Effet photovoltaïque: Découvert par** Alexandre-Edmond Becquerel en 1839  
1eres cellules: fabriquées vers les années 60

- Une **cellule photovoltaïque** est un composant électronique, qui exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité (courant continu).
- Le courant est fonction de l'éclairement, de la composition spectrale de la lumière et de la température de la cellule.
- Les processus impliqués dans la conversion photovoltaïque
  - Absorption de la lumière et génération de porteurs de charges libres
  - Séparation de ces porteurs pour éviter leur recombinaison
  - Collection des porteurs et passage dans un circuit externe

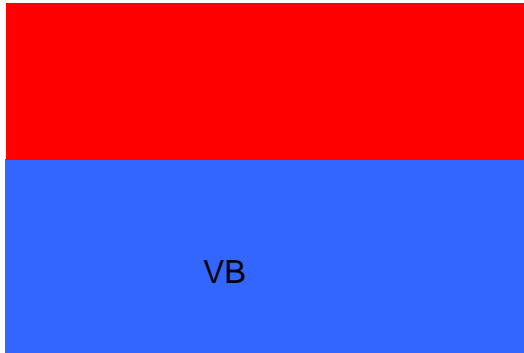


• cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de jonctions PN (homo-jonction ou hétérojonctions) à base **de semi-conducteurs**

# Conducteurs/ Semi-conducteurs/isolants

Métaux: électrons sont libres → sont dans la bande de conduction

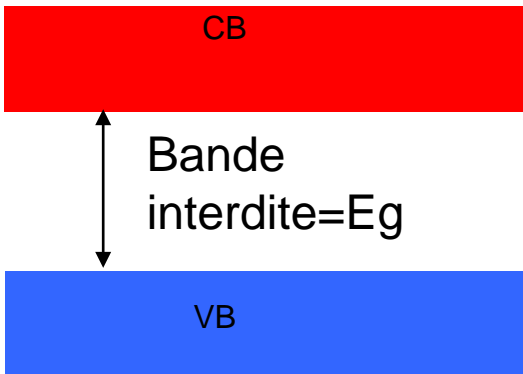
CB



$E_F$ =niveau de Fermi:  
dernier niveau rempli

Les deux bandes se chevauchent  
Ou band partiellement rempli ( $E_g=0$ )  
Electrons de valence complètement délocalisés → ils appartient à la bande de conduction

CB



$E_c$  (LUMO)

$E_v$  (HOMO)

Band de conduction ou les électrons peuvent se déplacer librement est séparée de la BV par une bande interdite de largeur  $E_g$ .

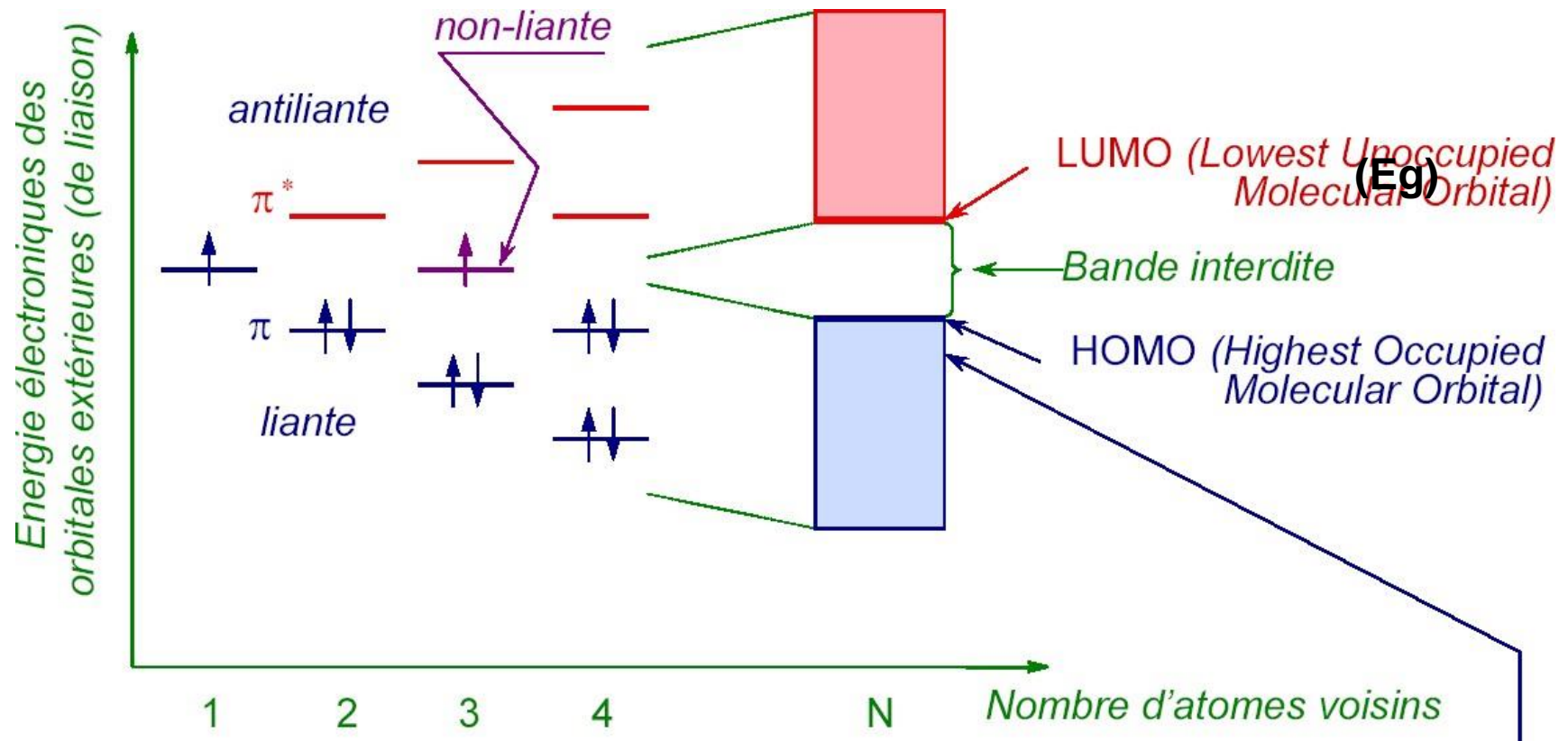
$E_g < 3,5$  eV: semi-conducteur

$E_g > 3,5$  eV isolant: électrons de valence sont fortement liées → appartient à la bande de valence

Electrons de la BV peuvent être excités vers la BC, et laissent derrière un trou qui se déplace librement dans la BV

# Formation des Bandes d'énergies Aspect qualitatif

## Cas des solides des chaines polymères

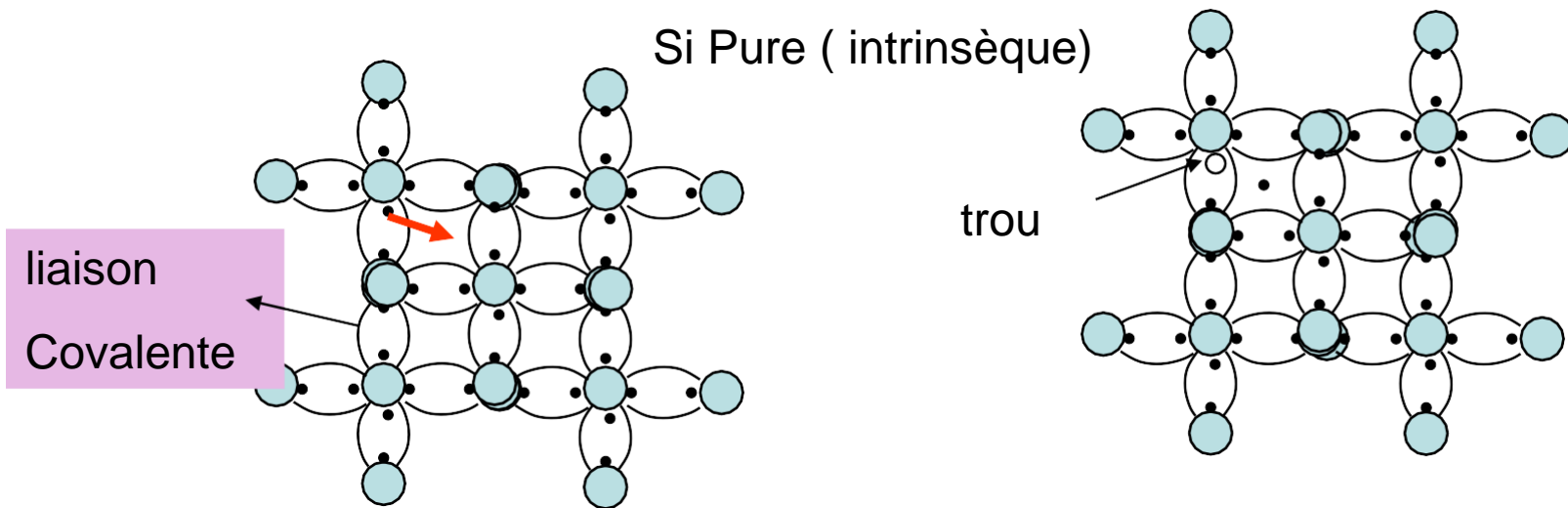




# Semi-conducteurs Intrinsèques

- Silicium (Si) le semi-conducteur est le plus utilisé
- Il a 4 électrons de valence
- Dans le cristal Si les 4 électrons sont impliqués dans des liaisons covalentes (mise en commun de 2 électrons) avec les 4 atomes avoisinant pour satisfaire la règle de l' **Octet**

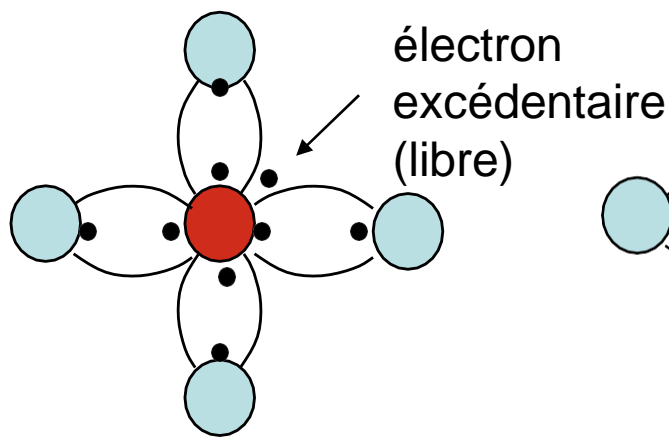
Si Pure ( intrinsèque)



Electrons de valences peuvent être libérés par l'énergie thermique →  
et devient libres (se trouve dans la BC) en laissant derrière un trou  
(aussi libre) leurs nombre augmente avec la température →  
conductivité augmente avec la température

# Dopage

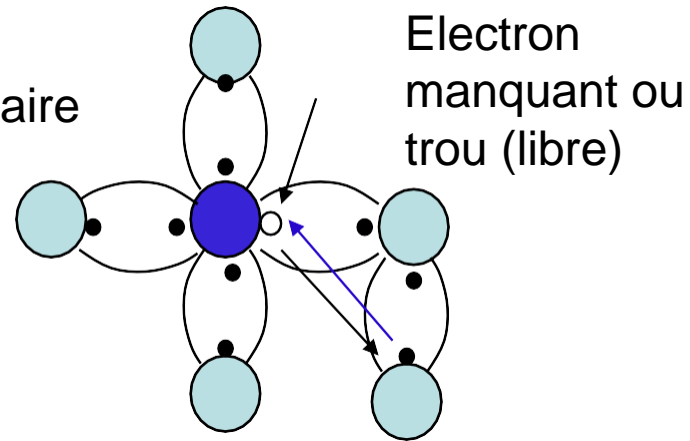
- Pour augmenter la concentration des porteurs libres (conductivité des semi-conducteurs)
- Dans le cas de Si: introduction de petites quantités d'éléments du group III ou VI dans le réseau de Si (substitution)



Dopage avec des éléments ayant 5 électrons valence (donneur) → type N

Electrons: porteurs majoritaires

Trous: porteurs minoritaires



Dopage avec des éléments ayant 3 électrons de valence (accepteur) → type P

Trous: porteurs majoritaires

Electrons: porteurs minoritaires

**Pour Si et GaAs: le dopage est effectué par diffusion ou implantation ionique**

**CdTe, CIGS, CZTS: structures défectueuse, naturellement dopé type p.**

# Autres Semi-conducteurs

Periodic Table of the Elements © www.elementsdatabase.com

Legend:

- hydrogen
- alkali metals
- alkali earth metals
- transition metals
- poor metals
- nonmetals
- noble gases
- rare earth metals

1	H	2	He																																
3	Li	4	Be																																
5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																								
11	Na	12	Mg																																
13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																								
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac	104	Unq	105	Unp	106	Unh	107	Uns	108	Uno	109	Une	110	Unn																

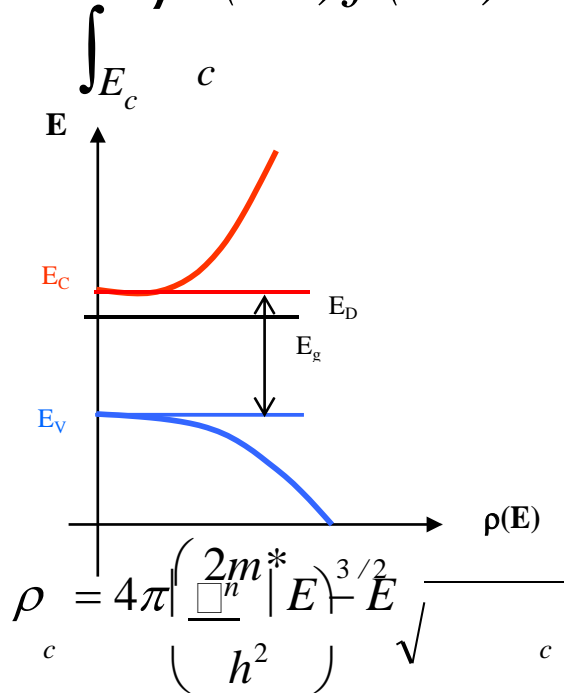
58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr

Matériau	$E_g$ , eV
Si	1.11
Ge	0.67
GaAs	1.43
CdS	2.42
CdTe	1.48

# Concentration des porteurs à l'équilibre

- Electrons (BC)

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) f(E) dE$$



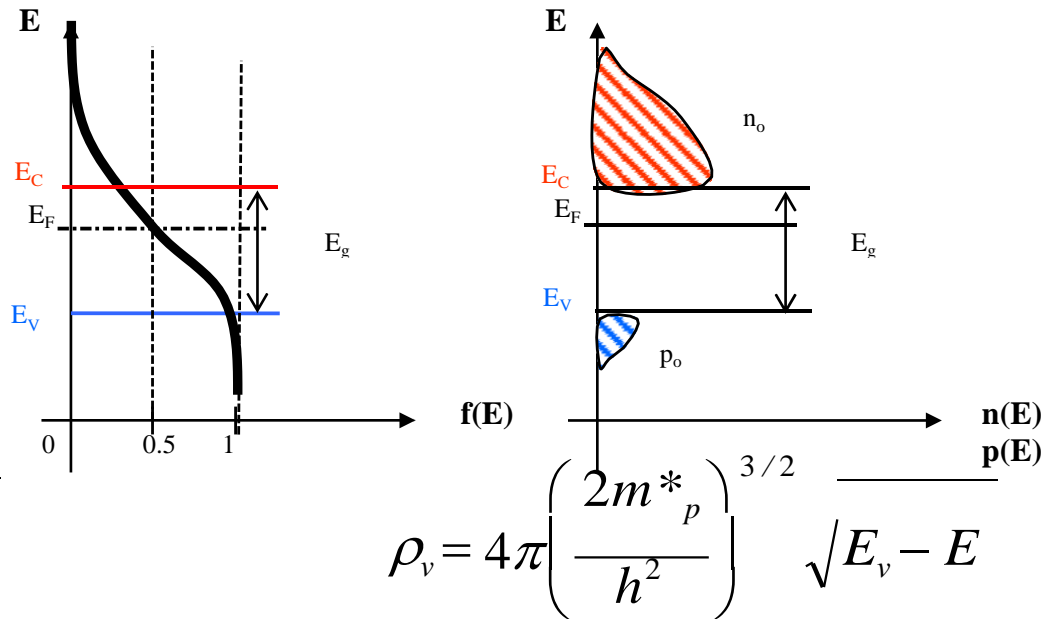
$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$N_{C(V)} = 2 \left( \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} (\text{cm}^{-3})$$

- Trous (BV)

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) [1 - f(E)] dE$$



$$f_v(E) = \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

# Niveau de Fermi

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right) = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_V}{kT}\right) = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$E_i$ : niveau de Fermi intrinsèque)

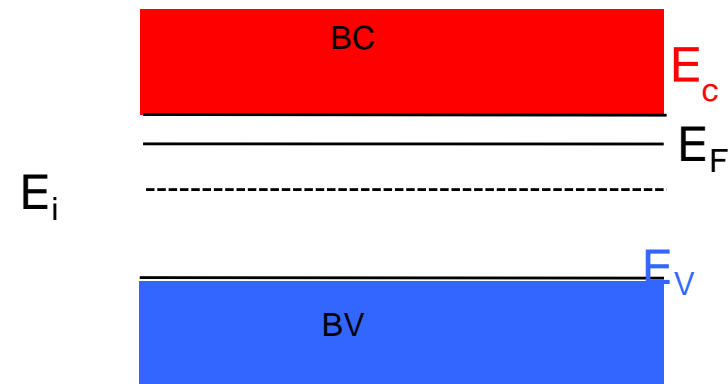
- **Neutralité électrique** :  $p + N_d^+ = n + N_a^-$
- Fixe la position du niveau de Fermi. Il est du côté de la bande la plus peuplée..

- A l'équilibre thermodynamique :  $p - n = N_a - N_d$
- $(p + n)^2 = (p - n)^2 + 4pn = (N_a - N_d)^2 + 4n_i^2$
- Trouver n et p..

## • Approximations :

- SC. Type N :  $n \approx Nd$ ,  $p \approx n^2 / N_a$
- SC. Type P :  $p \approx N_a$ ,  $n \approx n^2 / N_a$

- On utilise généralement la notation :  $n_{no}$  et  $p_{po}$ ,  $n_{po}$  et  $p_{no}$



SC type N

# Transport de charge

- Conduction: derive (drift), en presence d'un champ E
- Diffusion: gradient de concentration

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\text{Electrons}} \\
 \boxed{J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n} \\
 \swarrow \quad \searrow \\
 \text{Conduction} \quad \text{diffusion}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{c}
 \boxed{\text{trous}} \\
 \boxed{J_p = qp\mu_p E - qD_p \nabla p} \\
 \text{(A/cm}^2\text{)}
 \end{array}$$

$\mu$ : mobilité ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $D$ : coefficient de diffusion ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$q=e$ =charge élémentaire= $1,610^{19} \text{ C}$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad \text{(Relation d'Einstein)}$$

En 1-d

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Conductivité:  $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$  ( $\Omega \text{ cm}$ )<sup>-1</sup>

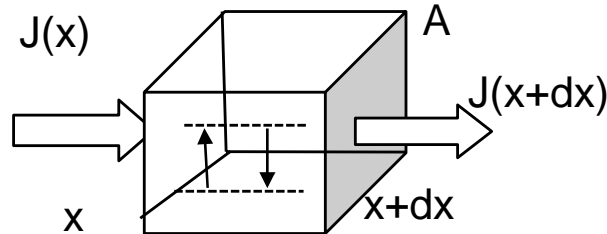
Résistivité:  $\rho = 1/\sigma$  ( $\Omega \text{ cm}$ )

# Equation de continuité

Conservation de la charge

Variation de la charge dans l'élément de volume = charge nette qui entre + la charge nette 'générée'

Electrons



Trous

$$\frac{\partial n}{\partial t} A dx = \left[ \frac{AJ(x)}{-q} - \frac{AJ(x+dx)}{-q} \right] + (G-U) A dx$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} A dx = \left[ \frac{AJ(x)}{q} - \frac{AJ(x+dx)}{q} \right] + (G-U) A dx$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} + G - U$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} + G - U$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_n \frac{d(nE)}{dx} + D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + G - U$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\mu_p \frac{d(pE)}{dx} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2} + G - U$$

$$G - U = G_{ext} - \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

$$G - U = G_{ext} - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Externe (rayonnement)

$\tau$  = durée de vie des porteurs

# Absorption/photo-génération / photoconduction

- Energie lumineuse est quantifiée  $E=N_{ph}h\nu$
- Energie d'un photon

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad (eV)$$

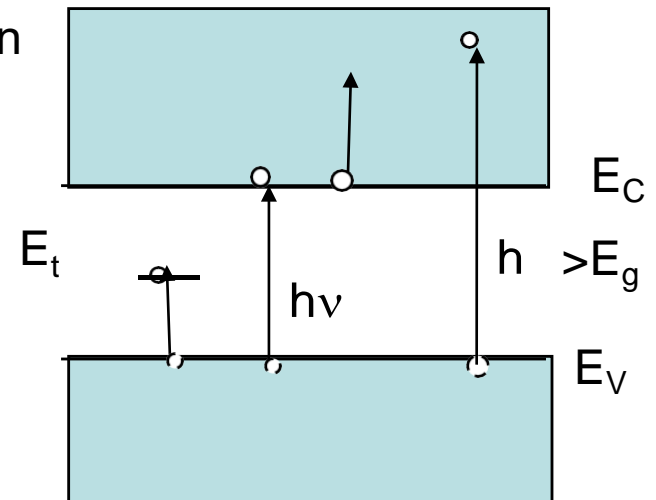
Relie l'aspect corpusculaire à l'aspect ondulatoire.

- **Absorption de la lumière**

- Transition bande à bande (inter bande) : l'excitation des électrons de la BV vers la BC (création de paire électron trou),  $h\nu \geq E_g$
- Transition de/vers un niveau piège
- Porteurs libres (Transition intra-bande)

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  est une mesure de la probabilité pour qu'un photon soit absorbé.  
 $1/\alpha$  est la profondeur d'absorption.

$$\alpha = 4\pi \frac{\kappa}{\lambda} = 4\pi \frac{\kappa\nu}{c} \quad (cm^{-1})$$



$\kappa$  coefficient d'extinction



# Transitions directe et indirecte

Conservation de l'énergie et d'impulsion (vecteur d'onde,  $P = k$ )

- Vecteur d'onde d'un photon:
- Vecteur d'onde d'un électron:

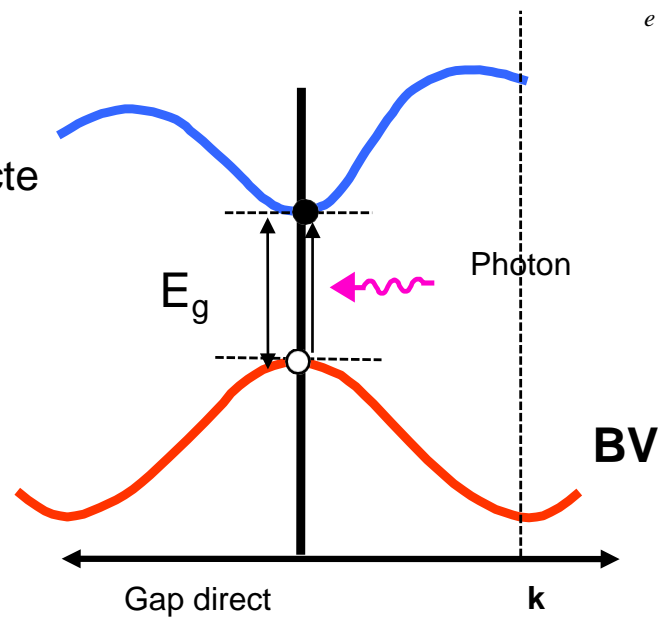
$$k_{ph} = \frac{2\pi}{\lambda} \approx 10 \mu\text{m}^{-1}$$

$$0 \leq k_e \leq \frac{\pi}{a} \approx 10^4 \mu\text{m}^{-1}$$

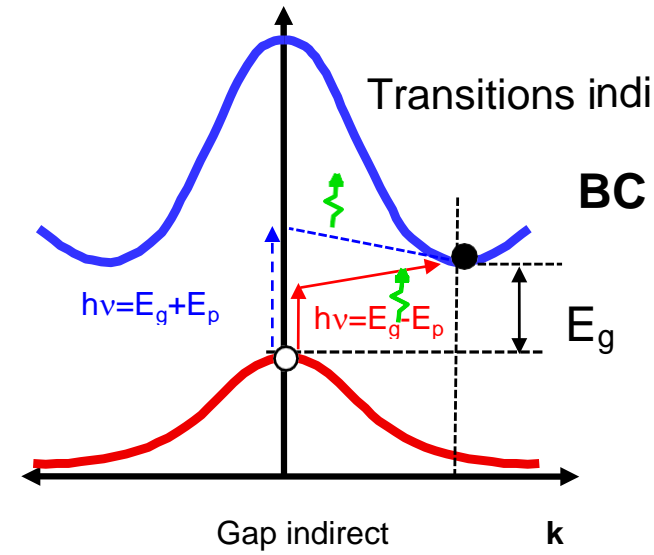
$$\rightarrow k_{ph} = (k_f - k_i) \approx 0$$

Transitions verticales

Transition directe



Transitions indirectes



Au voisinage du gap :  
 SC à gap direct (GaAs):  
 SC à gap indirect (Si) :

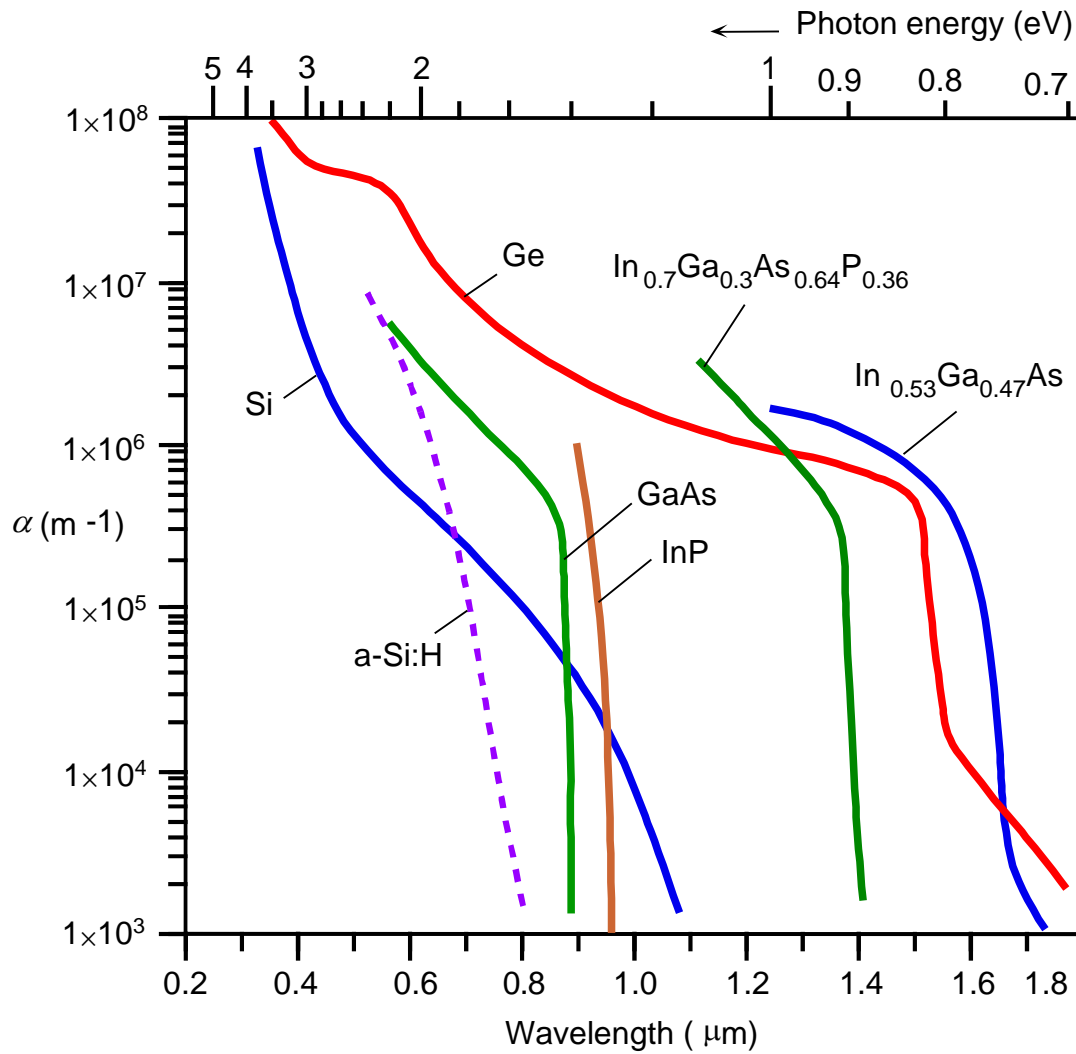
$$\alpha = A (h\nu - E_g)^{1/2}$$

$$\alpha = B (h\nu - E_g \pm E_p)^2$$

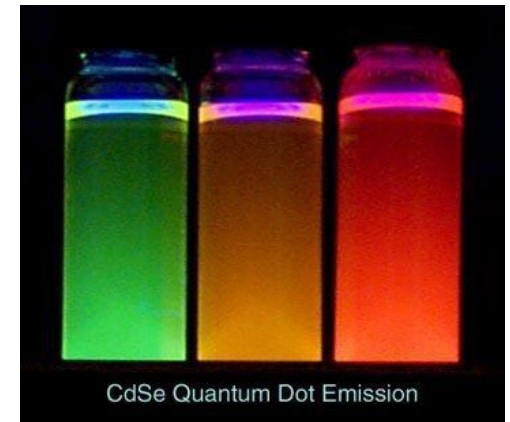
$E_p$  énergie du phonon mis en jeu

→ Détermination du gap..

# Exemples



Largeur de la bande interdite dépend dimensions particules



Fluorescence des points quantiques (Qdots) de  $CdS_e$

# Photo-génération des porteurs de charges

- Densité de flux de photons incidents sur le SC:  $\Phi_i = \frac{P_i}{h\nu}$   
(photons/unité de surface/unité de temps)

Le flux de photons qui pénètrent dans le SC est

$$\Phi(x=0) = (1-R) \frac{P}{h\nu}$$

- R est le coefficient de réflexion de la surface

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \quad (\text{en incidence normale})$$

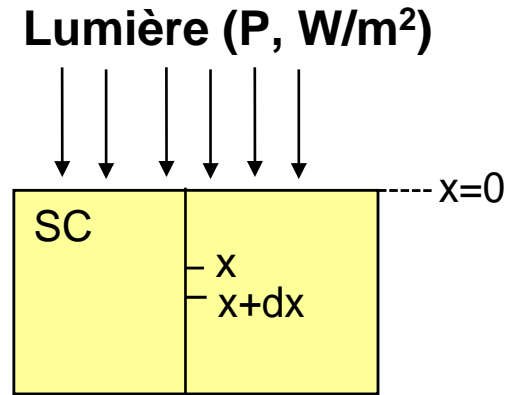
- Le flux de photons  $d\Phi$  absorbé dans la tranche  $dx$  en  $x$  est:

$$-\frac{d\Phi}{\Phi(x)} = \alpha dx$$

- Le taux volumique d'absorption est  $G_p = -\frac{d\Phi}{dx}$   $\Phi(x) = \Phi(x=0) \exp^{-\alpha x}$

- Si chaque photon génère une paire électron-trou alors le taux de génération G des paires est:

$$G(x) = \alpha \Phi(x=0) e^{-\alpha x} = (1-R) \frac{P}{h} \alpha e^{-\alpha x} = G_o e^{-\alpha x}$$



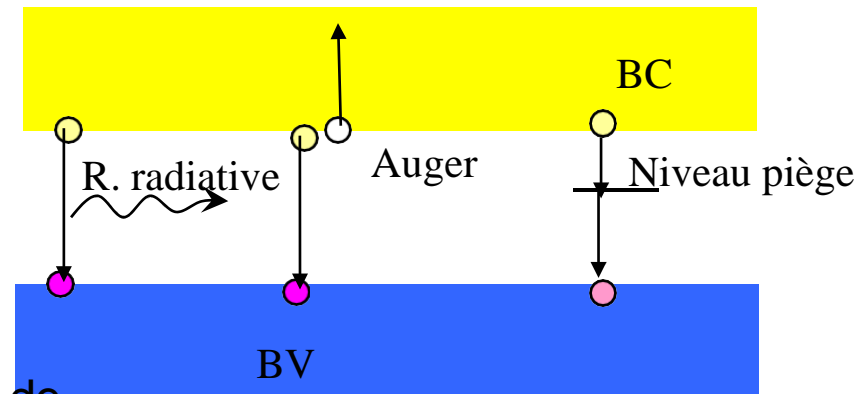
# Recombinaison des porteurs excédentaires

## Annihilation d'une paire électron - trou

- Recombinaison radiative (bande à bande)
  - Plus probable dans les SC à gap directe

→ Emission d'un photon

- Recombinaison non radiative
  - Gap indirecte
  - Auger
  - Assisté par des pièges (SRH)



- Taux de recombinaison défini par la durée de vie des porteurs minoritaires.

**SC Type N**  $U_{rad} = \frac{\Delta p}{\tau_{rad}}$      $U_{nrad} = \frac{\Delta p}{\tau_{nrad}}$      $\frac{1}{\tau_{nrad}} = \sum_i \frac{1}{\tau_{nrad,i}}$

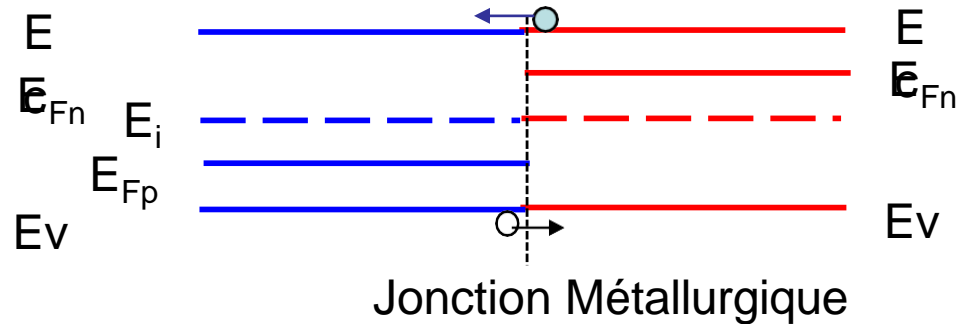
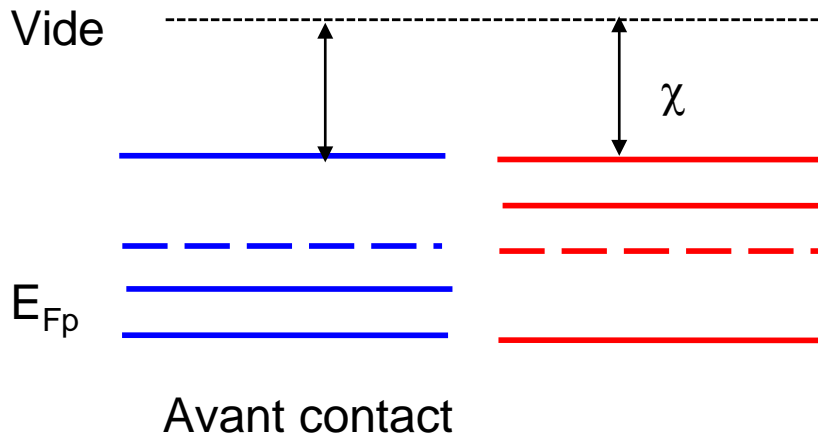
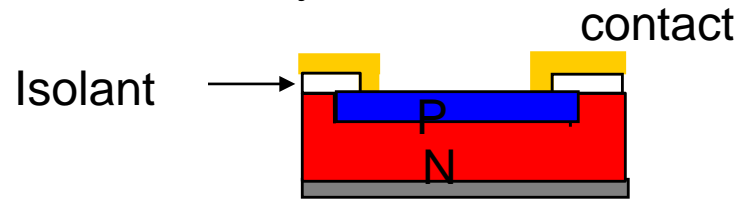
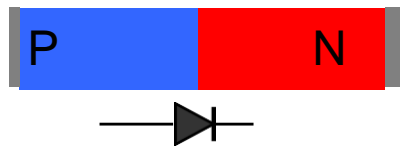
$\Delta p$  concentration des porteurs en excès ( $p-p_0$ )

**Durée de vie des porteurs:**  $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nrad}}$

Porteurs majoritaires: excès est très inférieur à la concentration d'équilibre.

# Jonction PN

- Une Jonction PN est formée lorsque un SC de type P est en contact intime avec un SC de type N.
- Si les deux SC sont identiques (eg. Si type P en contact avec Si Type N) on a une homo-jonction; autrement on a une hétérojonction.

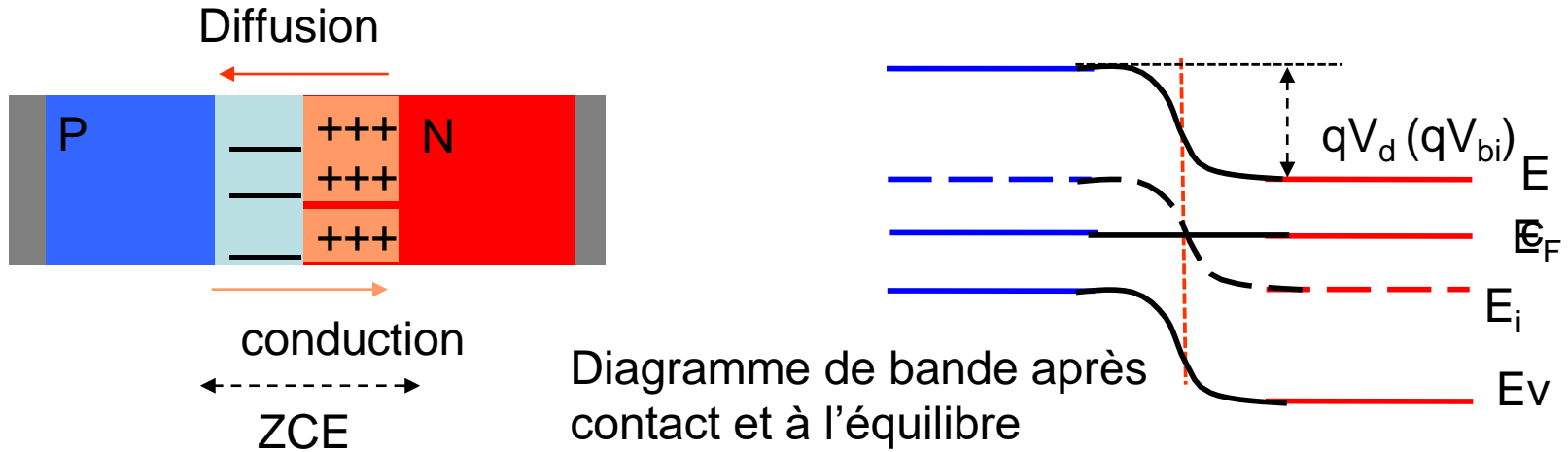


Juste après contact (bandes plates)

- Lorsque les deux SC sont mis en contact intime:
- Diffusion des  $e^-$  vers la région P et des trous vers la région N
- Recombinaison avec les porteurs majoritaires dans ces régions

# Tension de diffusion

- Apparition d'impuretés ionisées non compensées et fixes (chargées positivement dans la région N et négativement dans P au voisinage de la jonction).



- Formation d'une zone de charge d'espace (ZCE) (zone où il y a charges fixes)
- Apparition d'un champ interne (barrière) qui s'oppose à la diffusion et qui est responsable de la courbure des bandes.
- Le processus continu jusqu'à l'alignement des deux niveaux de Fermi,
- La hauteur de barrière ( $qV_d$ ) est l'énergie nécessaire pour égaliser les deux niveaux de Fermi
- $V_d (V_{bi})$  est appelée tension de diffusion

$$qV_d = E_{Fn} - E_{Fp} = q(V_n - V_p) = kT \text{Log} \left( \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

# Electrostatique de la ZCE

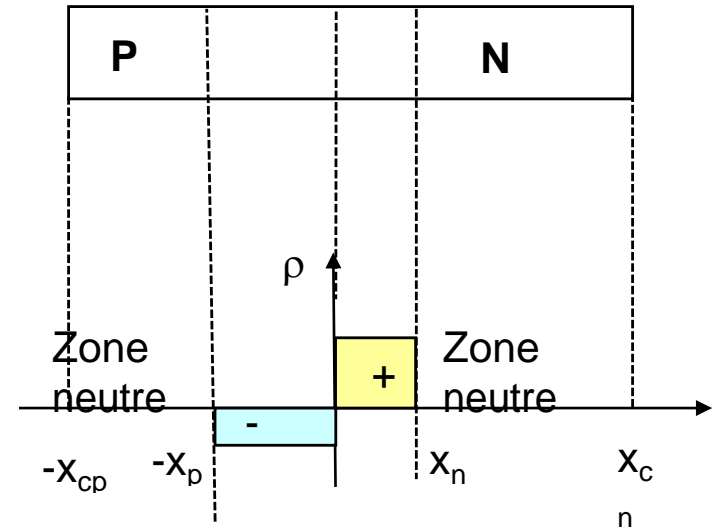
- **Approximations:**

- Déplétion (désertion) complète
- Toutes les impuretés sont ionisés
- Jonction Abrupte

**Densité de Charge :**  $\rho = q(p - n + N_d^+ - N_a^-)$

Région P :  $\rho = -qN_a$  pour  $-x_p < x < 0$

Région N :  $\rho = qN_d$  pour  $0 < x < x_n$



**Neutralité électrique :**  $x_p \cdot N_a = x_n \cdot N_d$

→ La zone de charge d'espace s'étend principalement du côté le moins dopé.

**Largeur de la zone de CE :**  $W = x_n + x_p$

Résolution de l'équation de Poisson dans chaque région:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{dE}{dx}$$



# Largeur de la ZCE

- Résolution de l'équation de Poisson:
- On suppose que  $E=0$  dans les régions neutres

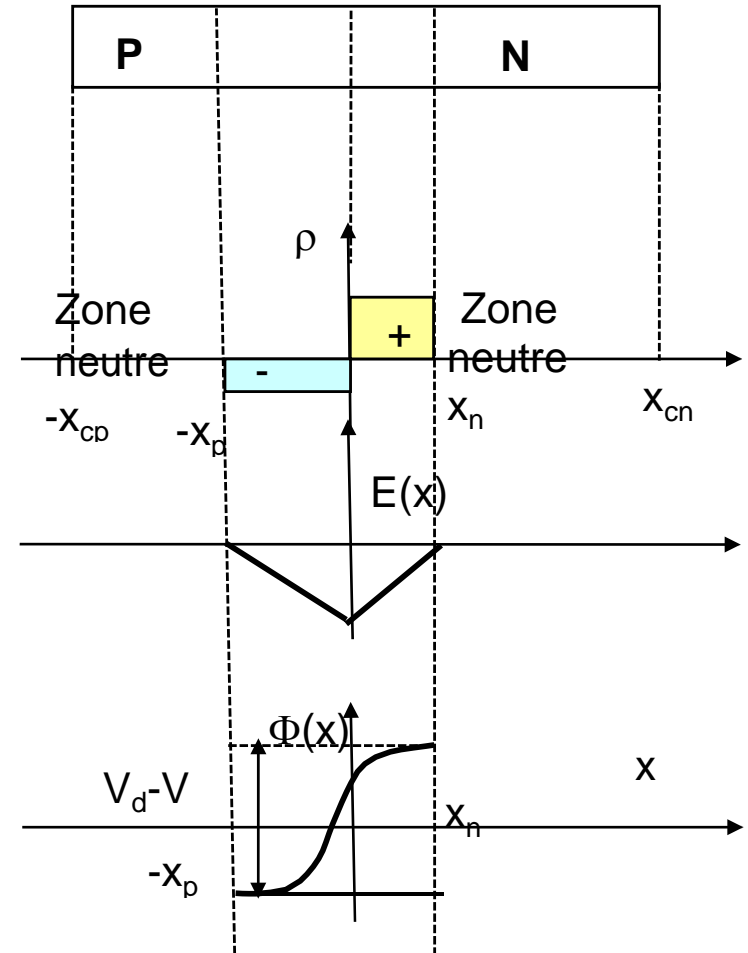
- $-x_p < x < 0$  : 
$$\Phi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon} (x + x_p)^2 + V_p$$

- $0 < x < x_n$  : 
$$\Phi(x) = -\frac{qN_D}{2\epsilon} (x - x_n)^2 + V_n$$

$$E_{max} = -\frac{qN_A x_p}{\epsilon} = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN} (V_d - V_j)}$$

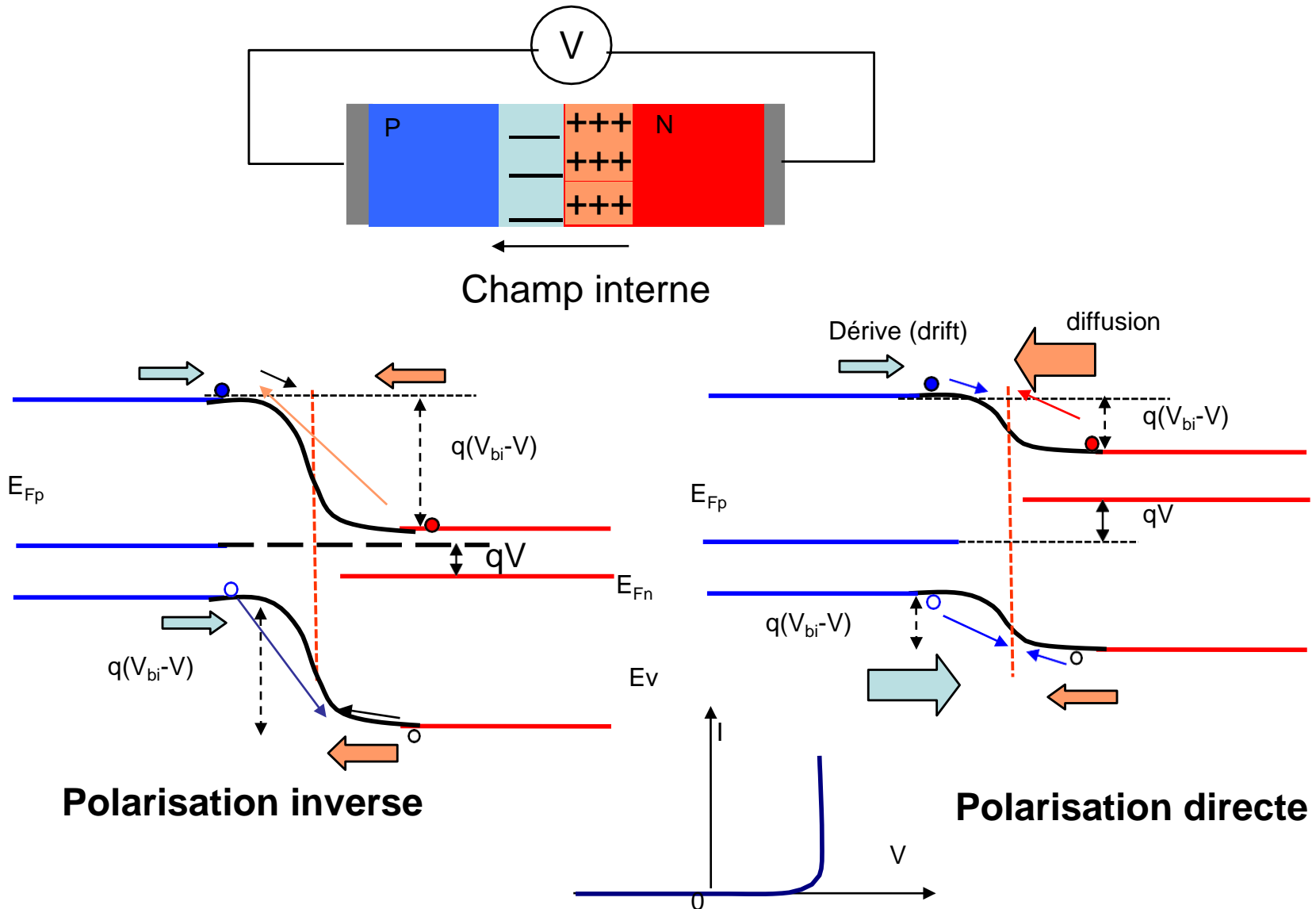
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN} \left( V_d - V - \frac{2kT}{q} \right)}$$



$$C = \frac{dQ_{ZCE}}{dV} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A}{W}$$

**C=f(V): capacité variable**

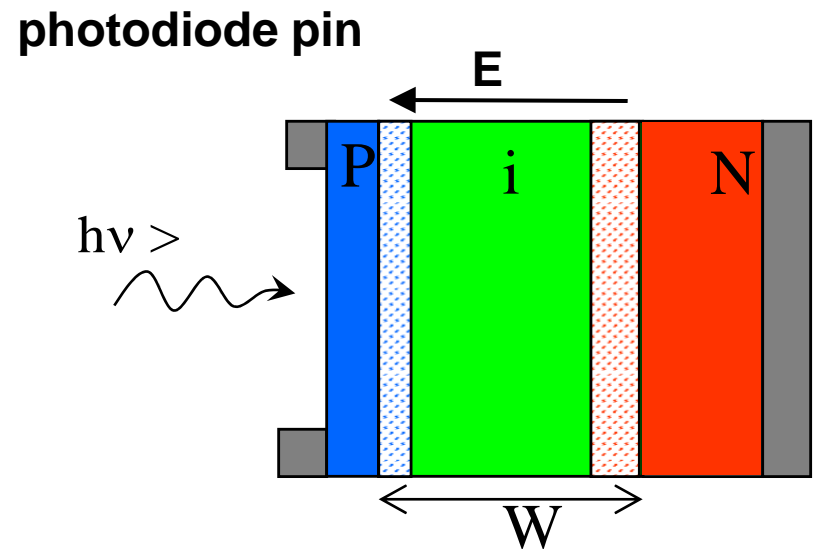
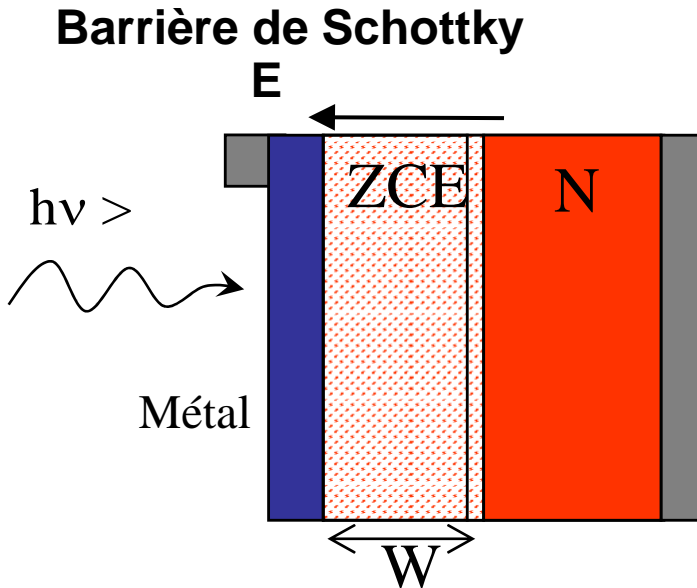
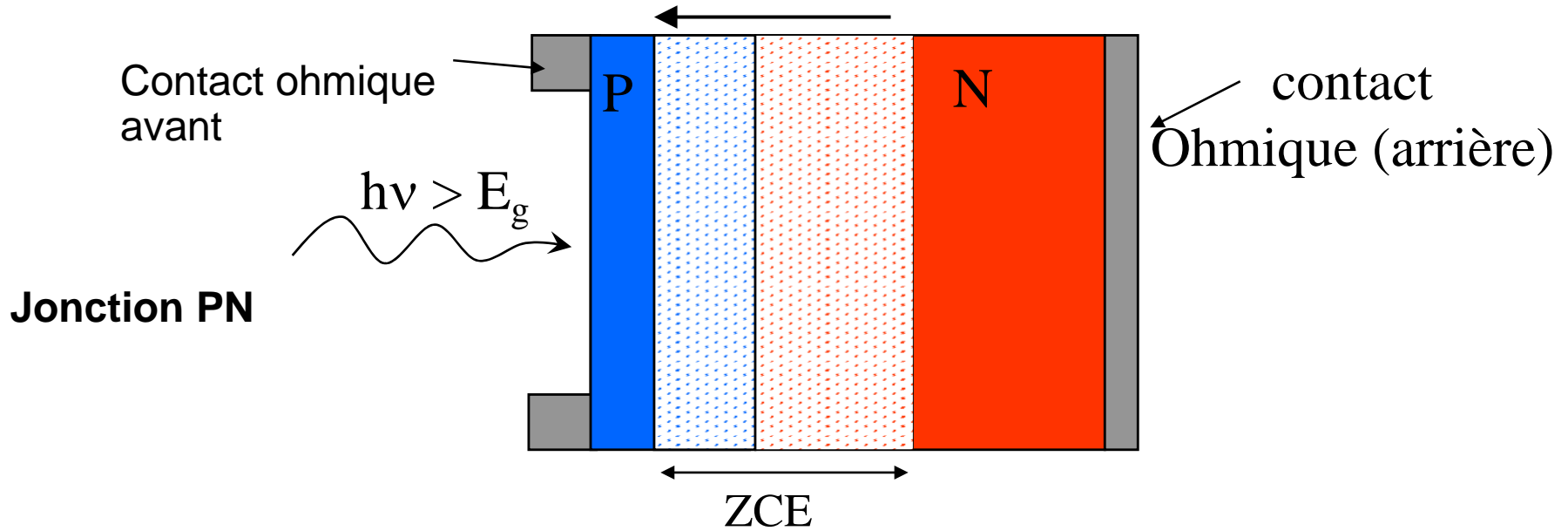
# Origine du caractère rectifiant



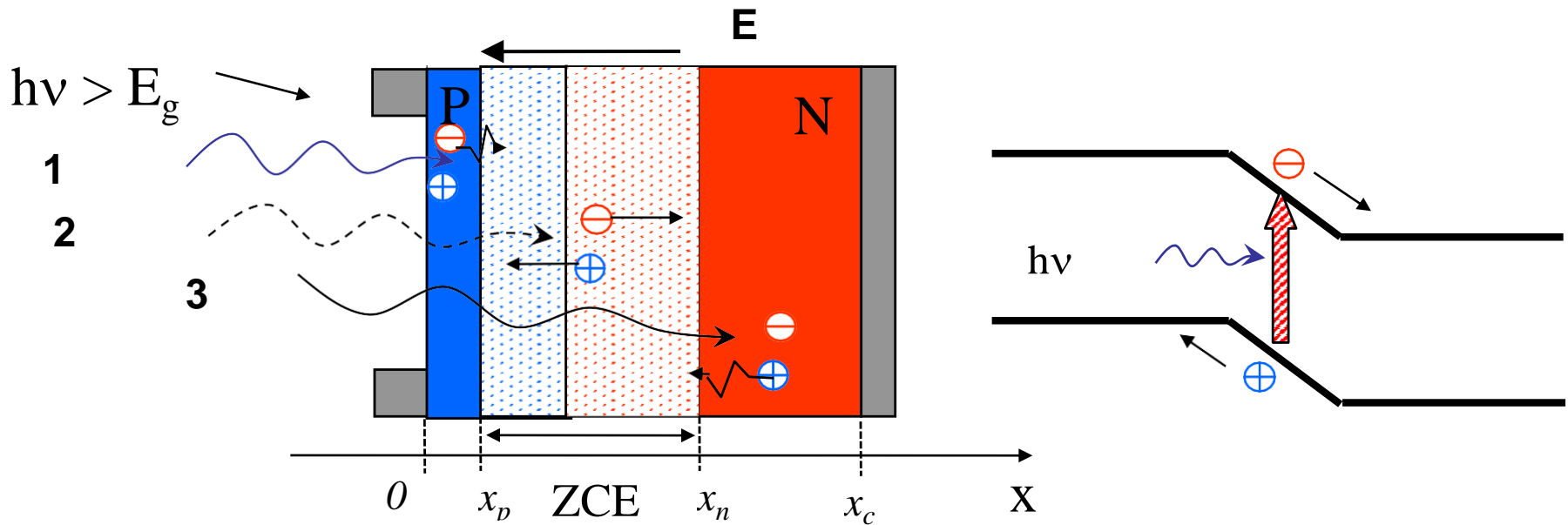
# Jonction PN sous éclairement (Cellule solaire/photodiode)

- Une Photodiode est une diode (jonction PN, PiN, hétérojonction ou contact MS) qui est sensible à la lumière. → détection de la lumière
  - La Cellule solaire est une photodiode ayant une surface active assez large pour permettre de produire des courants importants et donc des puissances conséquentes..
- production de l'énergie électrique

# Structures de base: JONCTION PN



# Contributions au Photocourant



-Dans la ZCE les paires électron-trous (excitons) photo-générées sont dissociées par le champ électrique interne  $E$  qui règne dans cette zone (courant de génération,  $J_g$ )

-Dans les régions neutres, les porteurs minoritaires créés ne peuvent contribuer au courant que si ils sont susceptibles d'atteindre la ZCE par diffusion. Ils sont ensuite propulsés par le champ  $E$  de la ZCE vers des zones où ils sont majoritaires.

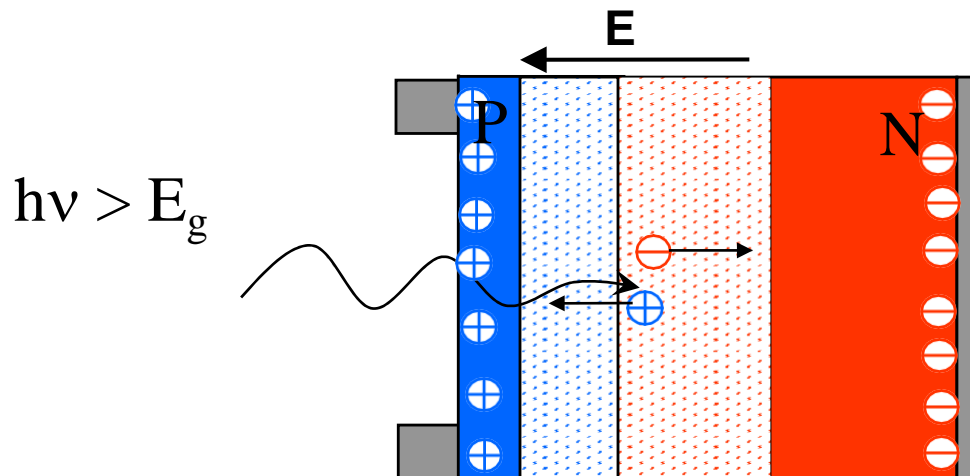
➔ Seuls les porteurs minoritaires photo-générés à une distance égale à  $L_n$  ou  $L_p$  des limites de la ZCE seront collectés. Autrement ils recombinaient.

Cette composante du photo-courant est appelée courant de diffusion ( $J_d$ )

Courant inverse augmente sous éclaircissement

# Effet photovoltaïque

- Sous l'effet du champ interne de la ZCE, les électrons photo générés sont propulsés vers des vers la région N et les trous vers la région P.
  - En circuit ouvert, cette séparation de charge entraîne l'apparition d'un champ électrique qui s'oppose à celui qui existe dans la jonction.
- apparition d'une différence de potentiel aux bornes de la cellule



# Calcul du Photo-courant

- $J_{ph} = J_{nd}(x_p) + J_{pd}(x_p) + J_g = J_{nd}(x_n) + J_{pd}(x_n) + J_g$

On néglige le courant de recombinaison dans la ZCE

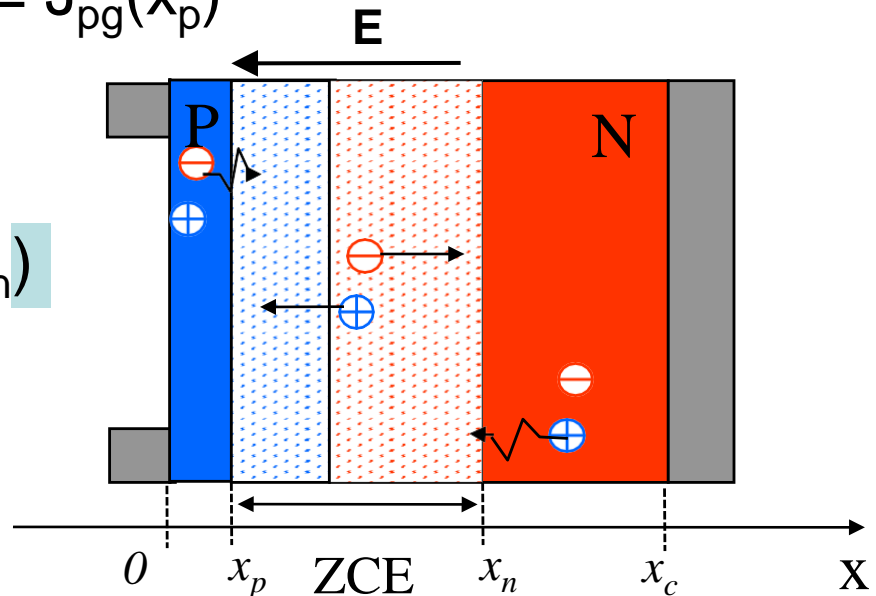
→  $J_{nd}(x_n) = J_{nd}(x_p)$  et  $J_{pd}(x_p) = J_{pd}(x_n)$

- mais  $J_g(x) = J_{ng}(x) + J_{pg}(x)$

→  $J_g(x_n) = J_{ng}(x_n)$  et  $J_g(x_p) = J_{pg}(x_p)$

$$J_{ph} = J_{nd}(x_p) + J_{pd}(x_n) + J_{gn}(x_n)$$

Equation de base pour le calcul du photo courant





# Photo-Courant de génération

Equation de continuité  $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_{ext} - U$   $\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_{ext} - U$

Régime stationnaire et on néglige la recombinaison

$$J_{gn}(x_n) - J_{gn}(x_p) = -q \int_{x_p}^{x_n} G(x) dx \quad J_{gn}(x_p) = 0$$

$$J_g(x) = J_{gn}(x) = -q \int_{x_p} G(x) dx$$

$$G(x) = (1-R) \frac{P}{h\nu} \alpha e^{-\alpha x} = G_0 e^{-\alpha x}$$

$$J_g = -q \frac{G_0}{\alpha} \left( e^{-x_p \alpha} - e^{-x_n \alpha} \right) = -q \frac{G_0}{\alpha} e^{-\alpha x_p} \left( 1 - e^{-W\alpha} \right)$$

# Photo courants de diffusion

- Diffusion des trous dans la région N ( $J_{pd}(x_n)$ )

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} = -\frac{\Delta p_n}{L_p^2} \square G(x)/D_p \quad \Delta p_n = A'e^{x/L_n} + B'e^{-x/L_n} + \frac{G_0 \tau_p e^{-\alpha x}}{1 - (\alpha L_p)^2}$$

## Conditions aux limites:

- On Suppose que la région neutre est beaucoup plus longue que la longueur de diffusion (**semi-infinie**)  $\rightarrow A'=0$

- En  $x=x_n$  les trous photo-générés qui atteignent ce point sont attirés par le champ électrique de la jonction à travers la ZCE.

$$\Delta p_n(x_n) = p_n(x=x_n) - p_{no} = 0 \quad \text{ou} \left( \Delta p_n = p_{no} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \right) \text{ Pour inclure le courant d'obscurité}$$

$$\Delta p_n = \frac{G_0 \tau_p e^{-\alpha x_n}}{1 - (\alpha L_p)^2} \left( e^{-\alpha(x-x_n)} - e^{-(x-x_n)/L_p} \right)$$

$$J_{pd}(x_n) = -qD_p \left. \frac{\partial \Delta p_n}{\partial x} \right|_{x=x_n}$$

$$J_p = -\frac{qD_p G_0 \tau_p e^{-\alpha x_n}}{1 - (\alpha L_p)^2} \left( -\alpha + \frac{1}{L_p} \right) = -\frac{1}{L_p} \frac{qD_p G_0 \tau_p e^{-\alpha x_n}}{1 + (\alpha L_p)} = -\frac{qL_p G_0 e^{-\alpha x_n}}{1 + (\alpha L_p)}$$

# Photo courants de diffusion

## Courant Diffusion des électrons dans la région P

- Pour simplifier on suppose que la région P est mince (Shallow Junction). Ce qui est toujours le cas pour que la lumière soit absorbée principalement dans la ZCE.
  - concentration quasi constante, pas de diffusion,  $J_{nd}=0$
- C'est le cas de la jonction dite P sur N
- On fait l'inverse pour une jonction N sur P (région N est mince)
- En plus dans le cas des hétérostructures, la couches avant à un gap assez grand (fenêtre optique) → l'absorption est négligeable (CdS, ZnO,...)

# Densité de courant total

$$J_{ph} = J_{dp}(x_n) + J_g = -\frac{qL_p G_0 e^{-\alpha x_n}}{1 + (\alpha L_p)} - q \frac{G_0}{\alpha} e^{-\alpha x} (1 - e^{-W\alpha})$$

- On suppose que  $x_p \approx 0 \rightarrow x_n = W$

$$J_{ph} = -\frac{qL_p G_0 e^{-\alpha W}}{1 + (\alpha L_p)} - q \frac{G_0}{\alpha} (1 - e^{-W\alpha})$$

$$J_{ph} = -\frac{qL_p G_0 e^{-\alpha W}}{1 + (\alpha L_p)} - q \frac{G_0}{\alpha} (1 - e^{-W\alpha}) = -\frac{qG_0}{\alpha} \left[ \frac{\alpha L_p e^{-\alpha W}}{1 + (\alpha L_p)} + 1 - e^{-W\alpha} \right]$$

$$\rightarrow J_{ph} = -\frac{qG_0}{\alpha} \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + (\alpha L_p)} \right]$$

$$J_{ph} = -\frac{qG_0}{\alpha} = -q(1-R) \frac{P}{h}$$

Courant de N vers P (même sens que le courant inverse)

Pour obtenir un photo courant important on a intérêt à avoir  $\alpha W \gg 1$

$\rightarrow$  photo courant est maximal.

→ d'où l'intérêt d'avoir une ZCE large (photodiode PIN)+temps de réponse

# Paramètres des Cellules solaires

**Cellule idéale:**  $I = I_{ph} - I_s (exp^{qV/E} - 1)$  (Générateur)

- Le courant de court-circuit (charge nulle)

$I_{sc} = 30$  à  $60$  mA ( $2$  cm<sup>2</sup> de surface) à  $1000$  W/m<sup>2</sup>

- La tension de circuit ouvert :  $V_{oc} = kT/q \ln(I_{ph}/I_s + 1)$

$V_{oc} = 0,5$  à  $0,6$  V pour le Si

- La puissance débitée est :

$$P = VI = V(I_{ph} - I_s (e^{eV/kT} - 1))$$

Point de puissance maximal:  $dP/dV = 0$

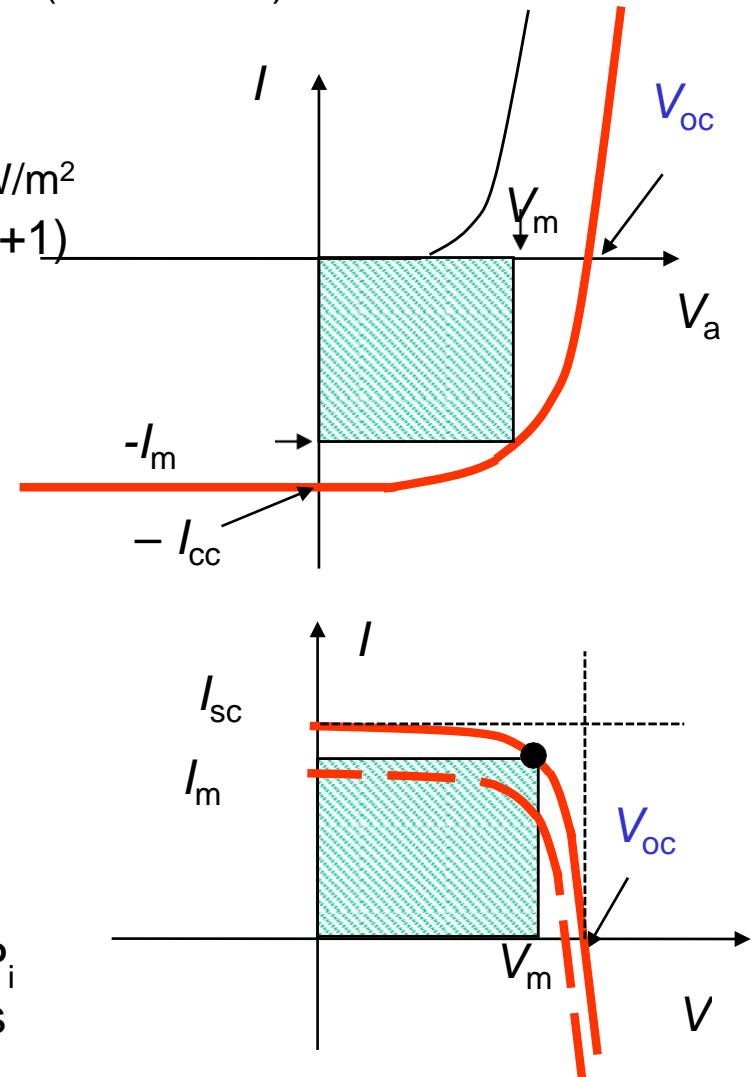
→  $(V_m, I_m)$  et  $P_m = I_m V_m$

- Le facteur de forme :  $FF = P_m / I_{sc} V_{oc}$

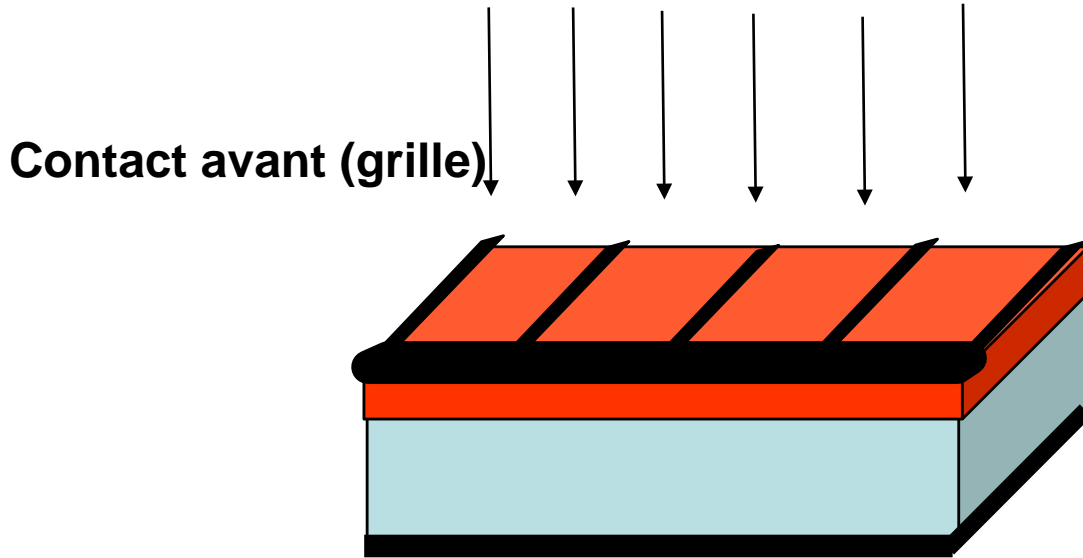
- Le rendement de conversion :  $\eta = I_m V_m / P_i$

$$= FF V_{oc} I_{sc} / P_i$$

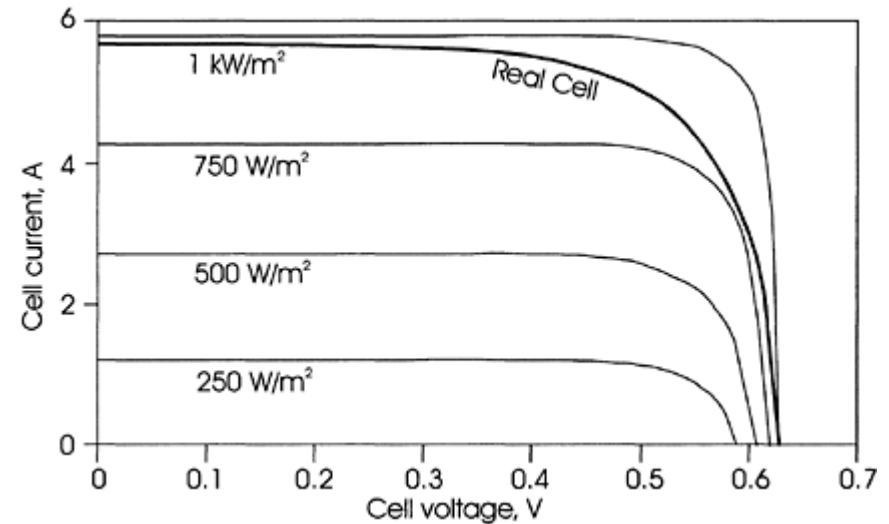
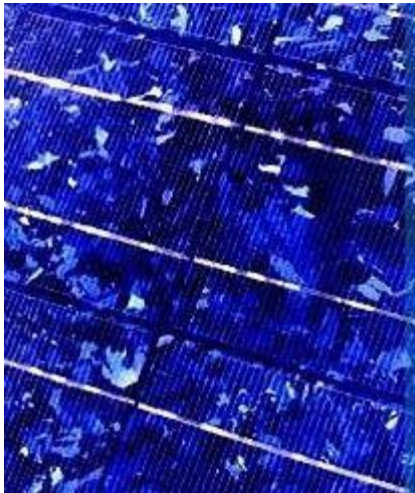
$\eta = 15\%$  pour le Si,  $22\%$  pour le GaAs dans les conditions STC



# Configuration



Contact arrière



# Limitations du rendement

- Pertes optiques (Réflexion → couches anti-reflet, texturation de la surface)
- Recombinaison en volume: Pour le Si, elle peut résulter en une réduction de 25% du rendement.
- Recombinaison en surface et en joints de grains (facteur d'idéalité  $n$  de la diode est différent de 1)
- Résistance série et résistance Shunt (diminution de  $P_m$ )
- $R_s$  Dépend du taux de dopage, profondeur des zones neutres, et la résistance de contact
- Température (plus de 80% de la lumière incidente est transformée en chaleur):

$$dV_{oc}/dT = -0,23 \text{ mV/}^\circ\text{C pour Si}$$

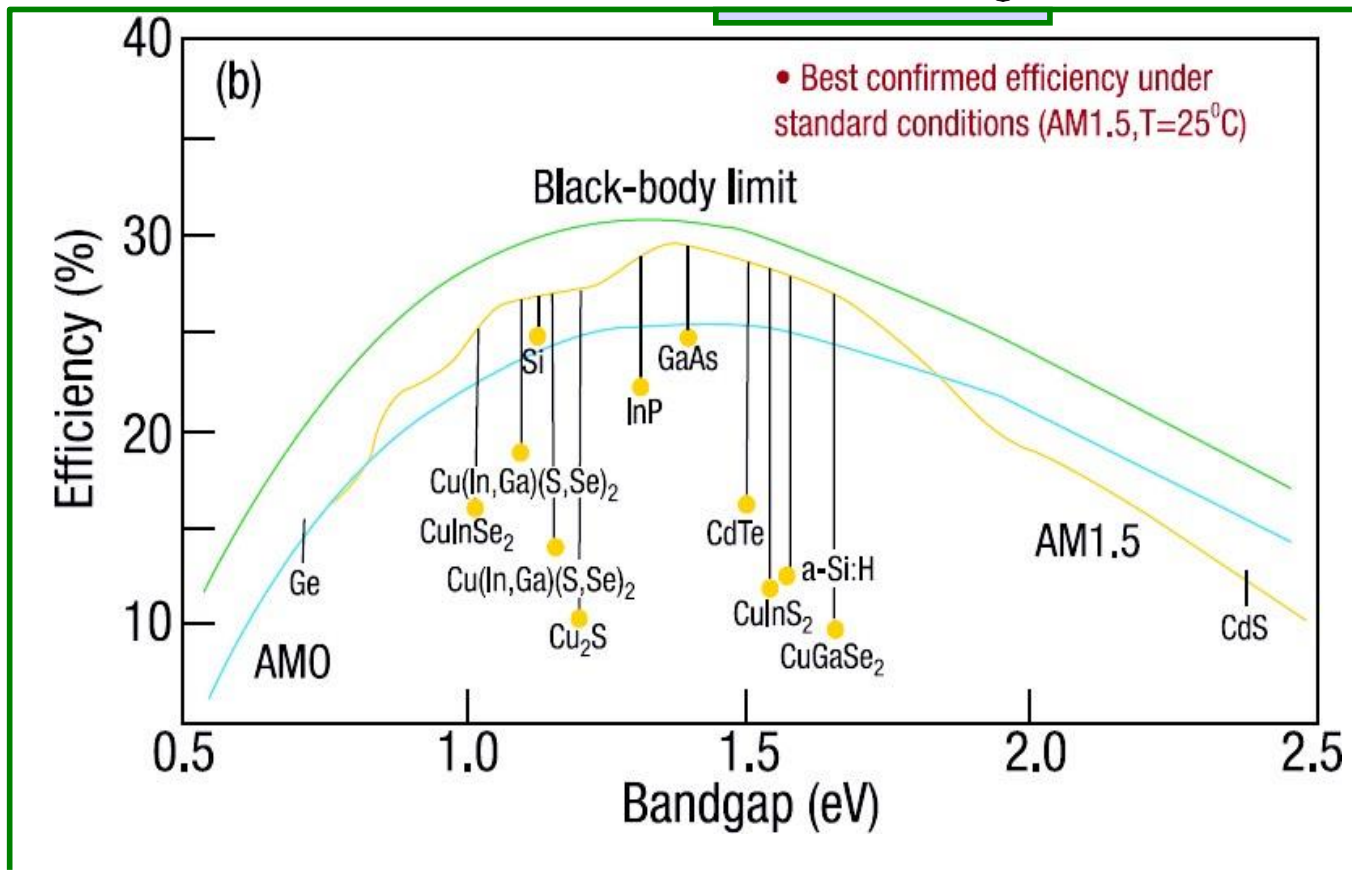
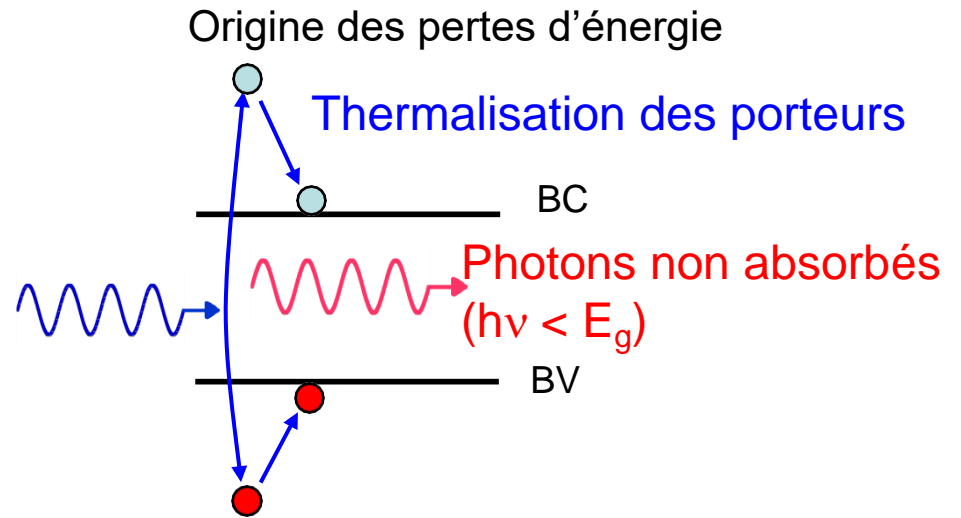
$$\text{Température de la cellule} = T_A + (\text{NOCT} - 20) * P_i (\text{kW/m}^2) / 0.8$$

Si NOCT=40°C alors  $T_c=55^\circ\text{C}$  à  $T_A=30^\circ\text{C}$  sous un éclairage de 1kW/m<sup>2</sup> !!!



# Limitations du rendement

- Photons d'énergie  $< E_g$
- Photons d'énergies très grande devant  $E_g$  (chauffage de la cellule)



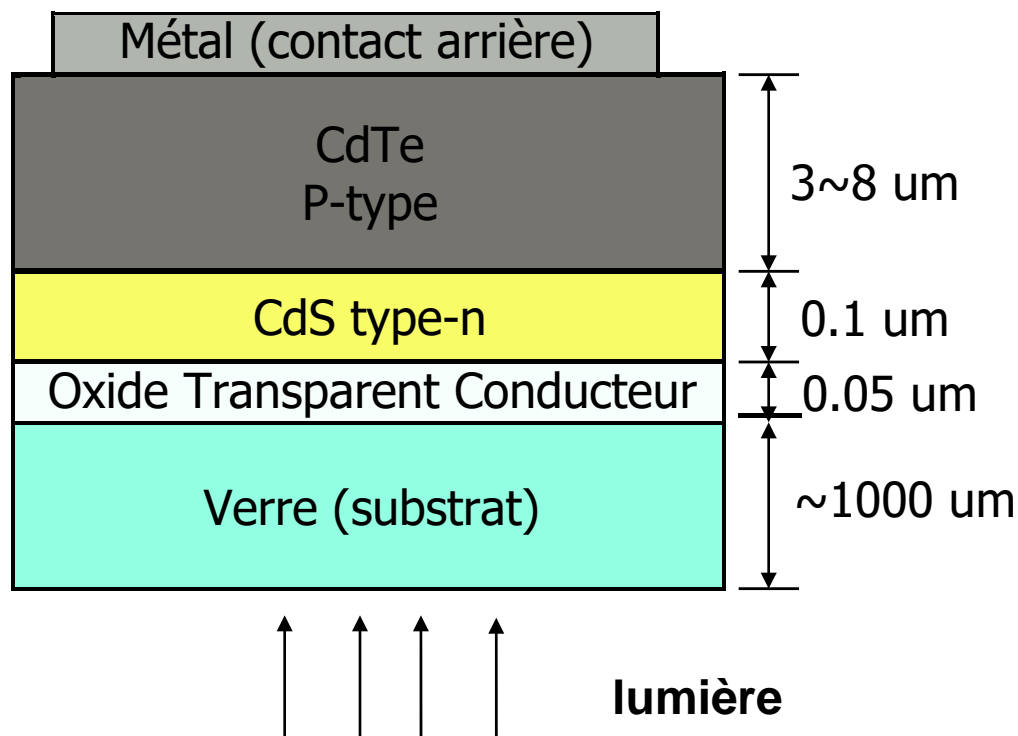
# Cellules photovoltaïques en couches minces (2eme genartion)

- Couches minces déposées par des méthodes à faible cout: électrodéposition, évaporation, spin coating, dépôt par bain chimique.. Sur un substrat
- Moins de matière est utilisé
- Cellules peuvent être fabriquées sure des substrats flexibles .

Structure de la cellule  
CdS/CdTe

**Problème: toxicité de Cd**  
**Abondance de Te**

-CdTe  
- CIGS ( $\text{CuInGaSe}_2$ )  
-Si amorphe et microcristallin  
- CZTS

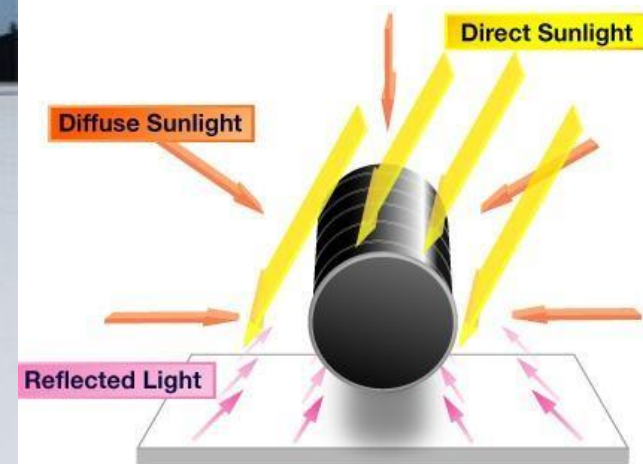


# Cellules à base $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ (CIGS)

- CIGS: gap peut être varié de 1.1 à 1.4 selon la valeur de x.
- 
- Rendement record = 20.0 %.
- Préparation: évaporation, impression, sputtering and électrodéposition
- Cellules industrielles (nanosolar par exemple).
- Problèmes:
  - composés quaternaires
  - Coût des éléments (In, Ga, Se..) de plus en plus rares;

ZnO,ITO - 2500Å
CdS - 700Å
<b>CIGS</b> 1-2.5µm
Mo - 0.5-1µm
Glass, Metal Foil, Plastics

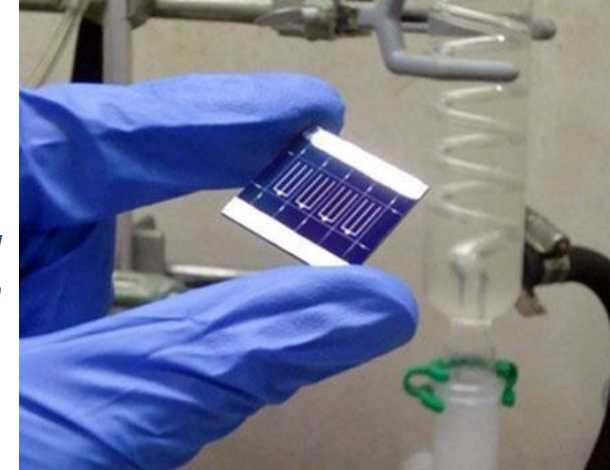
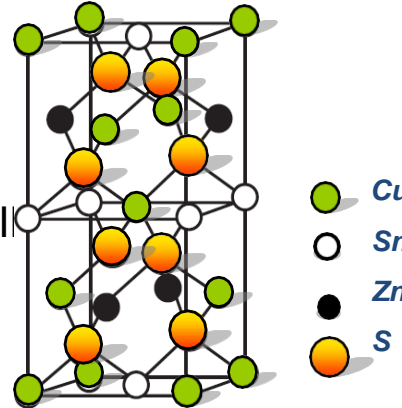
**Nouvelle architecture des modules**



# Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS)

## Recherche de Matériaux abondants et moins chers

- Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS):
  - 1.45 eV E<sub>g</sub>
  - rendement: 6.7% (Katagiri et al.)
  - Rendement record: 9.6% en 2010 par IIT Bombay
- CZTS a la structure kesterite



(Photo IBM)

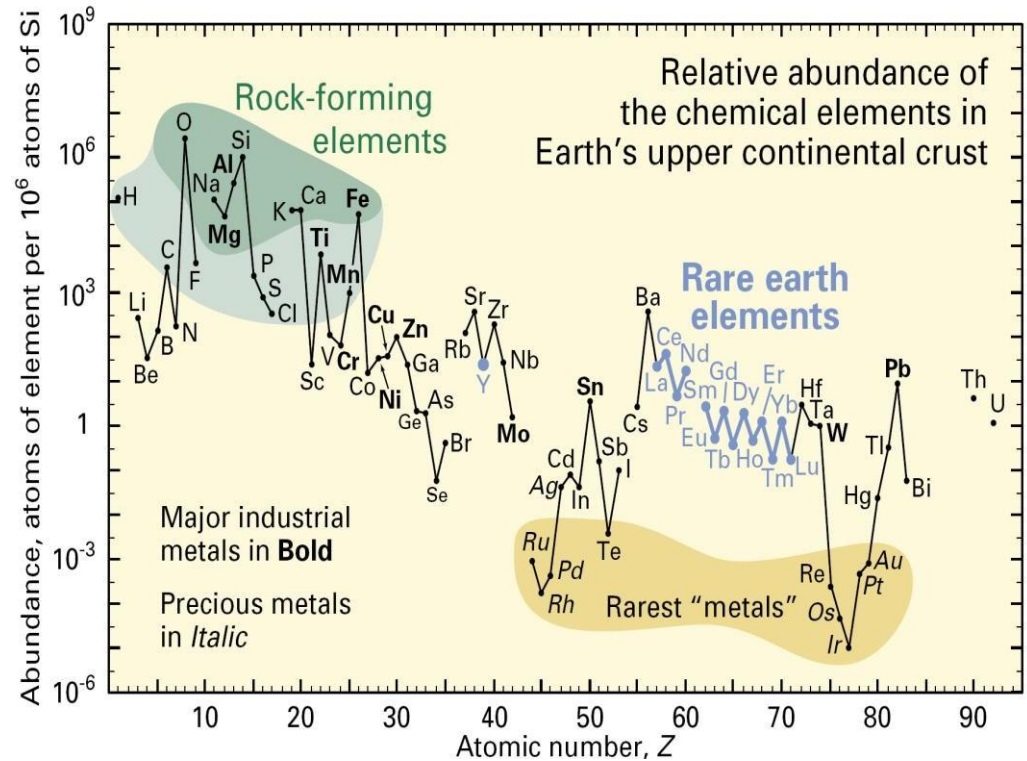
## Cout des materiaux

Cu - \$3.35/lb
Zn - \$1.59/lb
Sn -
\$6.61/lb S -

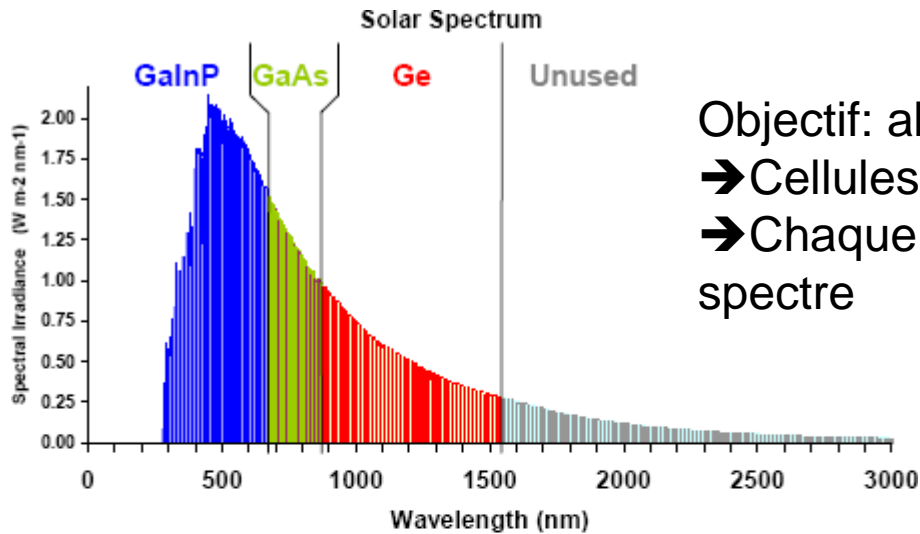
Ga - \$209/lb  
 In - \$361/lb  
 Se - 2002 \$4, 2007 \$33/lb

Source: [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) (2007 data)

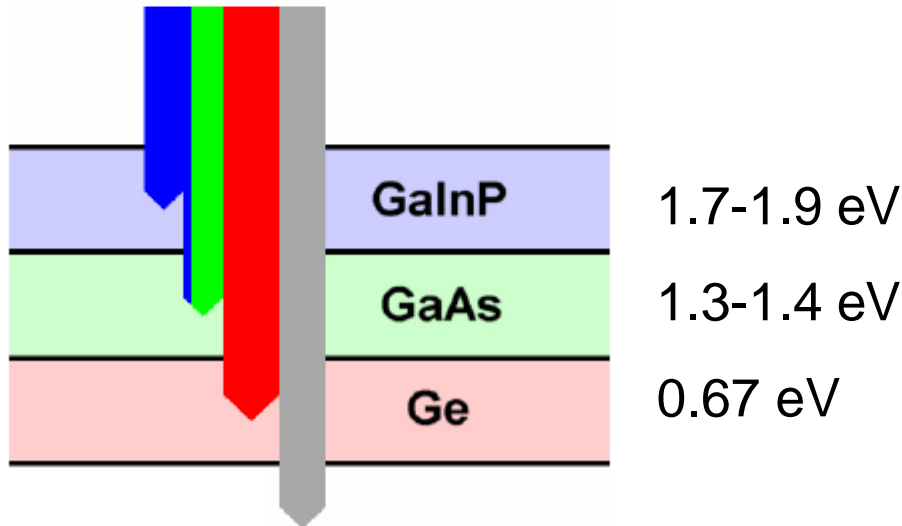
U.S. Geological Survey Fact Sheet 087-02



# Cellules à jonction Multiples



Objectif: absorber et convertir tout le spectre solaire  
→ Cellules à jonction multiples  
→ Chaque cellule utilise une région spécifique du spectre



- Les cellules sont en séries;
- l'absorbeur ayant le gap le plus grand est exposé à la lumière le 1er
- Courant limités par celle qui produit le courant les plus.
- Tensions s'ajoutent

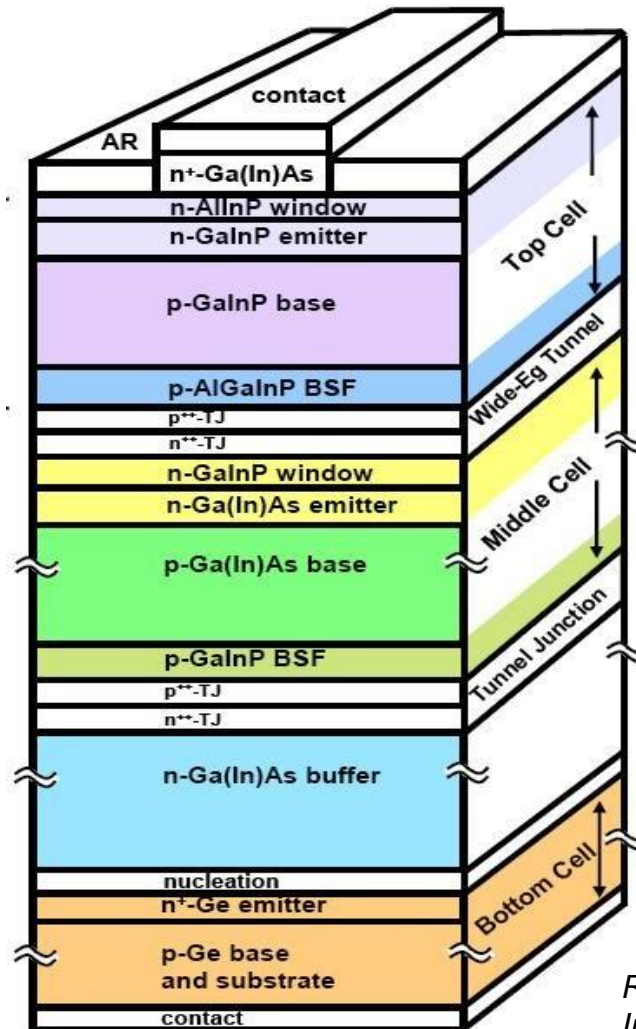
Nouveau Record: 41.6% avec une concentration de 346 suns!

# Configuration d'une cellule à 3 jonction

$\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}$ : cellule Sup.

$\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ : cellule intermédiaire

substrat de Ge : Cellule inférieure



- Rendement record 41.6 %
- Croissance par MBE

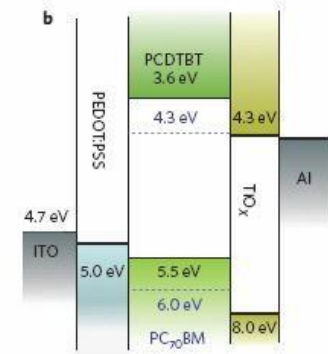
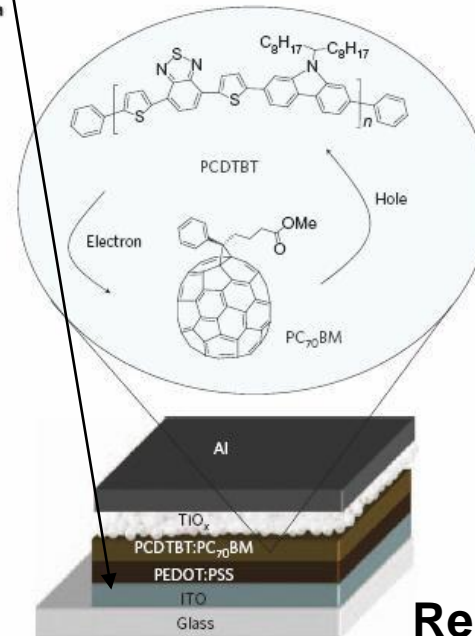
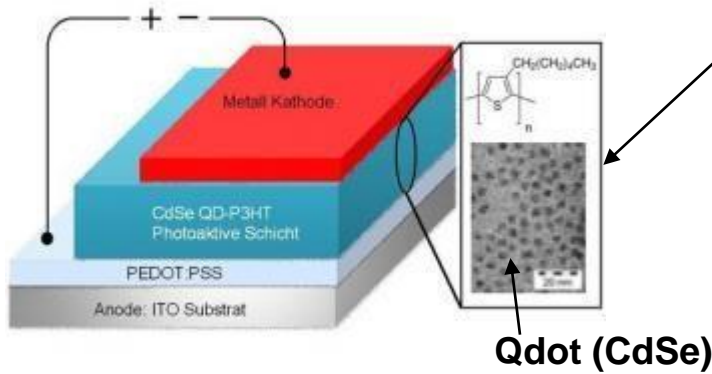
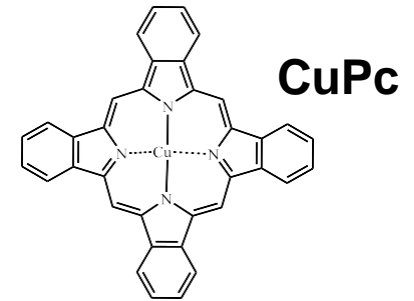
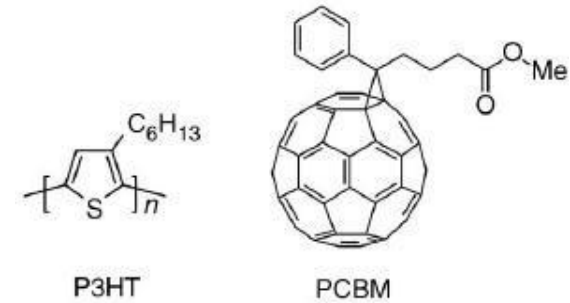
*R.R. King; Spectrolab Inc., AVS 54th International Symposium, Seattle 2007*

# Cellules organiques

- **Avantages:**
  - abondance de la matière
  - Faible cout (matière première et pour la fabrication)
  - Non-toxique

## Problèmes

- rendements très faibles
  - Faible mobilité des électrons dans les polymères
  - dégradation des composés organiques,
- Une des solutions envisagées consiste en un matériau hybride



Heeger, LeClerc et al *Nature Photonics* 3 (2009) p. 297

**Rendement 6.1%**

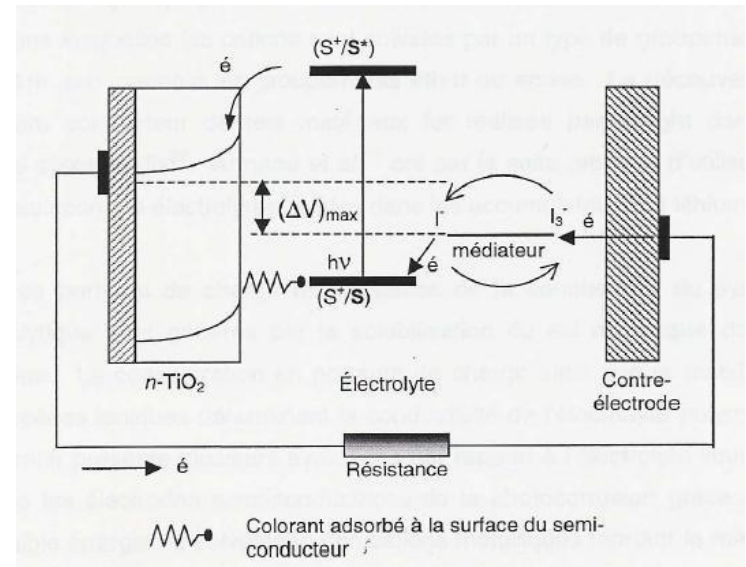
Solarmer (record): 7.9% en 2009  
Pour des cellules toutes organiques (0.1 cm<sup>2</sup>)

# Autres configurations

Cellules de Gratzel

**Nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  sensibilisées par des pigments**

**Cellule thermo photovoltaïques**



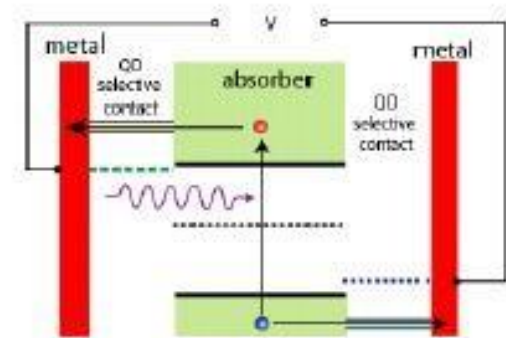


# Nanostructures

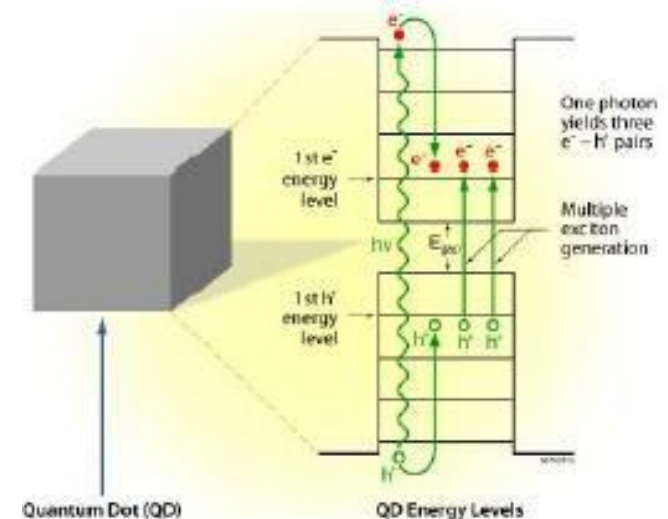


## Qdots Nanoparticules 2 à 6 nm de semi-conducteurs

- Gap modulable en fonction de la taille des particules
- Possibilité d'utiliser tout le spectre solaire
- Minimisation des pertes par thermalisation
- Injection des porteurs chauds à partir de niveaux excités



## nanofills





# Cellules Solaires: types

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
<b>1ère génération</b>				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
<b>2eme génération</b>				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle (dégradation)
Silicium microcristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS/CIGS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Production industrielle
<b>3eme génération</b>				
Cellules organiques	5,70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions/concentration	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement pour applications spatiales

