

# Eléments de Physique des matériaux semi-conducteurs

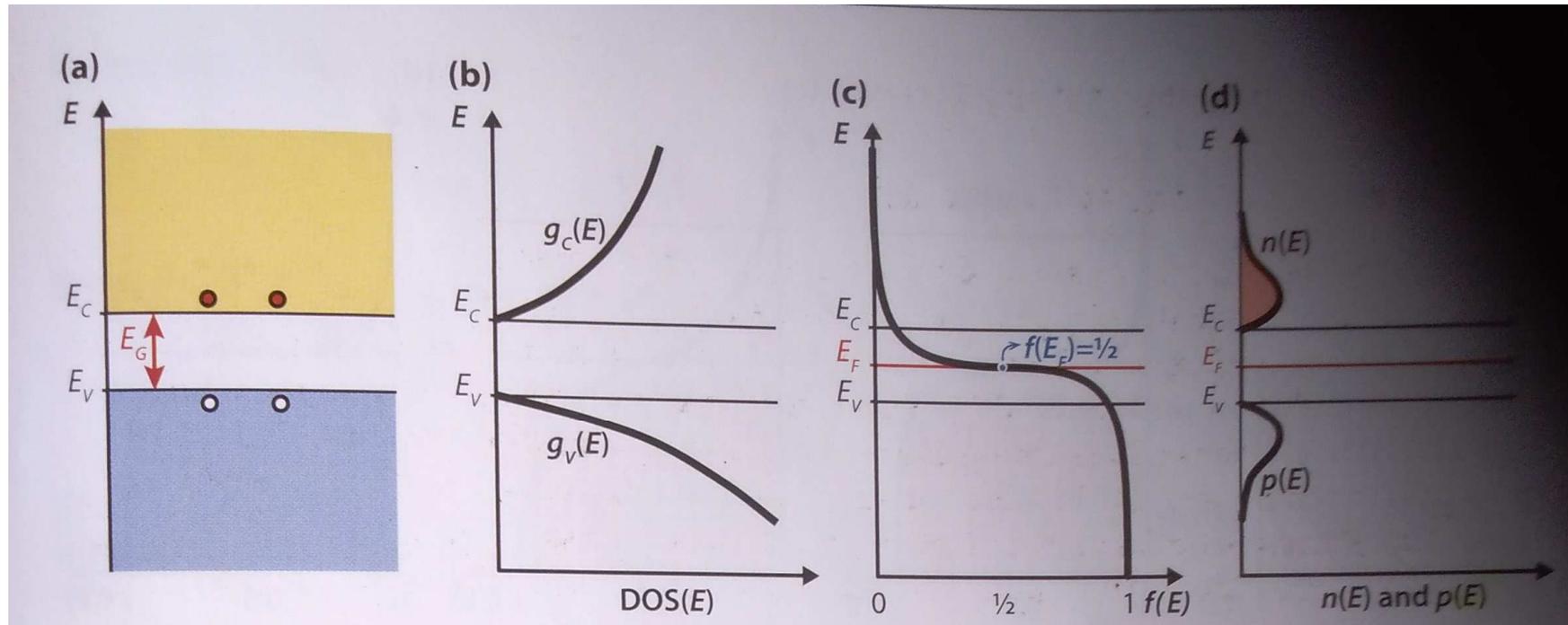
# Concentrations des porteurs

## Semi-conducteurs intrinsèques

La concentration est fonction de:

- densité d'énergie,  $g(E)$ , décrit le nombre d'état permis par unité de volume et par unité d'énergie. DoS (***Densité of state fonction, en Anglais***).
- la fonction de distribution de Fermi- Dirac,  $f(E)$ : elle donne, pour une énergie donnée, le nombre d'états occupés par des électrons par rapport au nombre d'états permis;
- la **bande de valence**, avec  $E_v$ : maximum d'énergie;
- la **bande de conduction**, avec  $E_c$ , minimum d' énergie;
- $E_G = E_c - E_v$  : énergie de la bande interdite.

A  $T = 300K$ ,  $E_G = 1,12eV$  pour le silicium



- (a):** diagramme d'énergie des bandes de valence, contenant les trous et de conduction, siège des électrons;
- (b):**  $E$  en fonction de la DoS;
- (c):** la distribution de la fonction de Fermi;
- (d):** la concentration  $n(E)$  des électrons dans la bande de conduction et de trous,  $p(E)$ , dans la bande de valence.

$g_c (E) = 4\pi(2m_n^* / h^2)^{3/2} (E-E_c )^{1/2}$  : densité d'énergie d'un état d'énergie au voisinage de la bande de conduction  $E_c$  ;  $m_n^*$  masse effective des électrons.

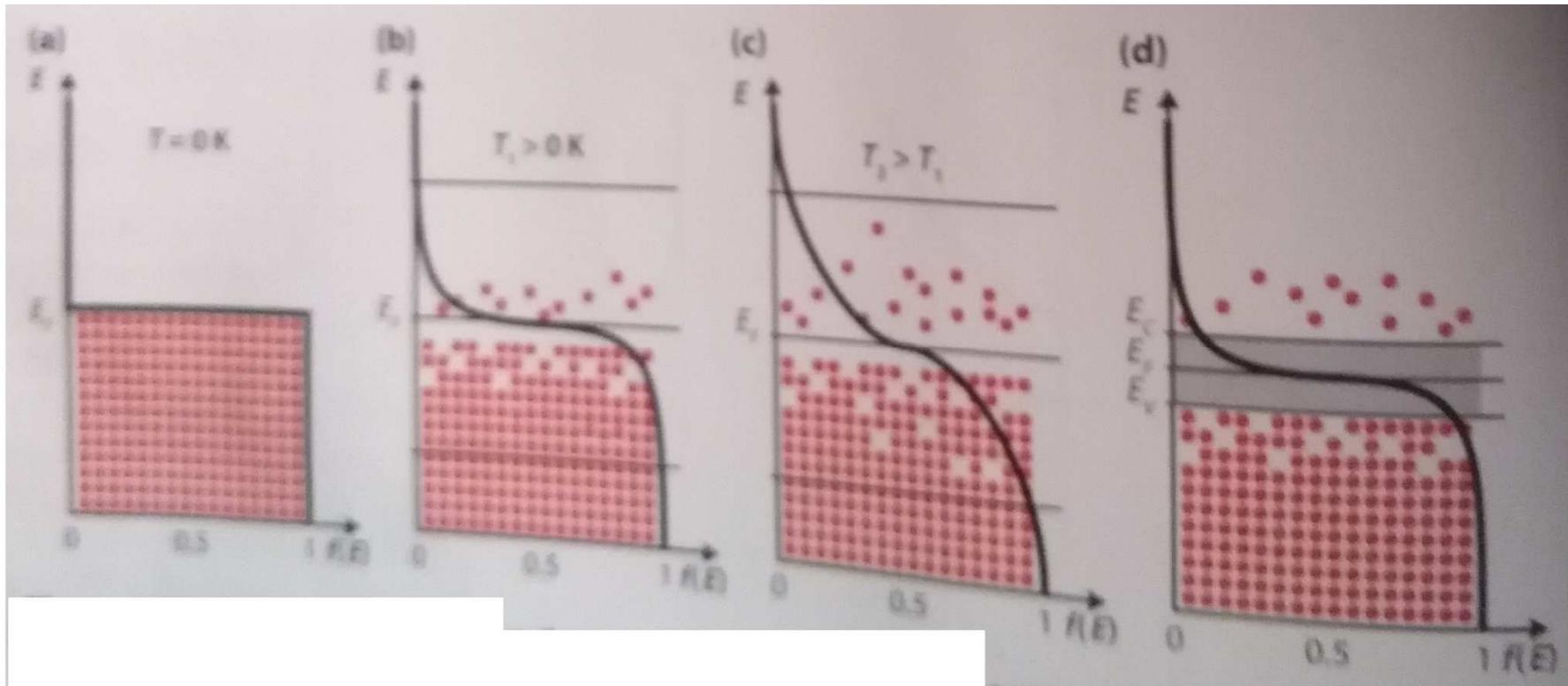
$g_v (E) = 4\pi(2m_p^* / h^2)^{3/2} (E-E_v )^{1/2}$  : densité d'énergie d'un état d'énergie au voisinage de la bande de conduction  $E_c$ ;  $m_p^*$  masse effective des électrons

F (E) est définie par:  $f (E) = 1 / (1 + \exp((E-E_f) / TK_B))$

$E_f$  : énergie de Fermi/ Niveau de Fermi/ potentiel électrochimique des électrons dans le matériel/ énergie moyenne dans le matériau

$$n(E) = g_c (E)f(E)$$

$$p(E) = g_v (E)(1-f(E))$$



**(a):  $T = 0K$** , les états possibles en dessous du niveau de Fermi sont tous occupés;

**(b, c):  $T > 0K$** , tous les états possibles en dessous du niveau de Fermi ne sont pas occupés;

**(d):** bande interdite.

En intégrant, on a:

$$n = N_c \exp (E_F - E_c / T k_B) \text{ avec } E_c - E_F \geq 3 T k_B$$

$$p = N_v \exp (E_v - E_F / T k_B) \text{ avec } E_F - E_v \geq 3 T k_B$$

$N_c$  : densité effective dans la bande de conduction;

$N_v$  : densité effective dans la bande de valence.

$$N_c = 2\pi(2m_n^* T k_B / h^2)^{3/2} \text{ et } N_v = 2\pi(2m_p^* T k_B / h^2)^{3/2}$$

$$N_c = 3,22 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ et } N_v = 1,83 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

**Quand un semi-conducteur intrinsèque est en équilibre thermique:**

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp(E_v - E_c / T k_B) = N_c N_v \exp(-E_g / T k_B)$$

$$n_i = N_c \exp(E_{Fi} - E_c / T k_B) = N_v \exp(E_v - E_{Fi} / T k_B)$$

$$E_{Fi} = E_c + E_v / 2 + (T k_B / 2) \ln (N_v / N_c) = E_c - E_g / 2 + T k_B / 2 \ln (N_v / N_c)$$

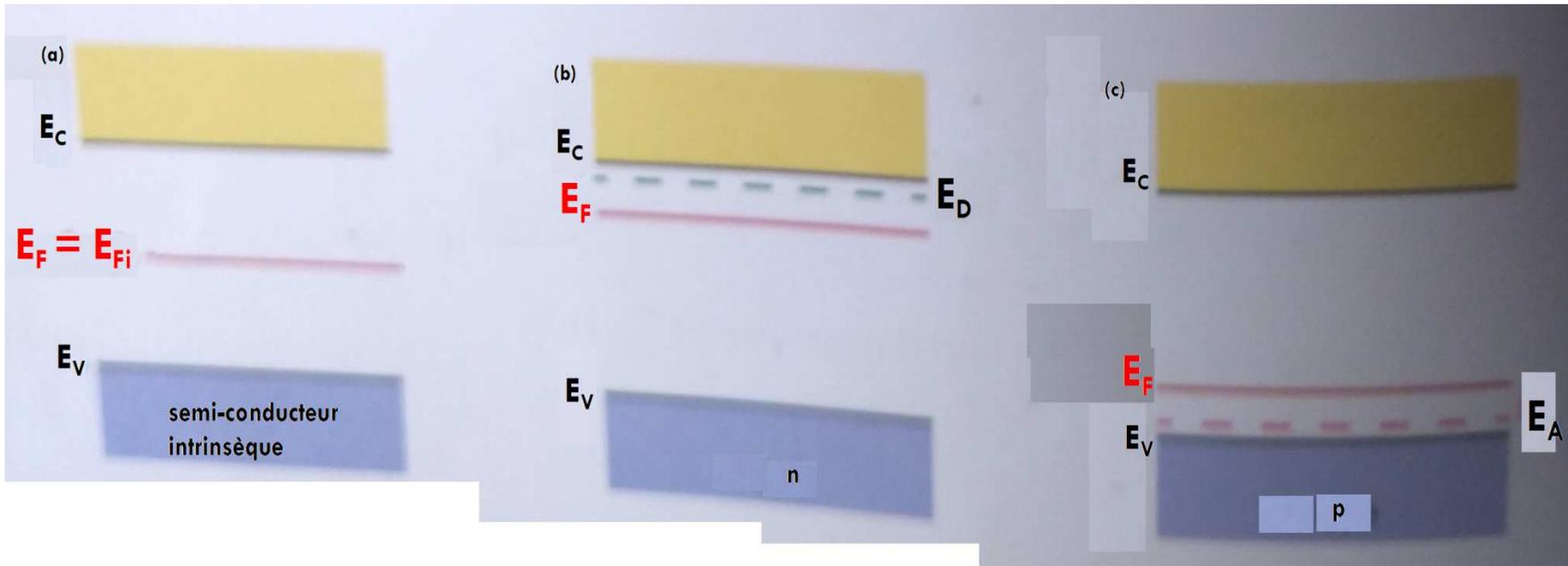
# Concentrations des porteurs

## Semi-conducteurs dopés:

Semi-conducteur de type n:  $n = N_D$  et  $p = n_i^2 / n$ ;  
 $p \ll n$

Semi-conducteur de type p:  $p = N_A$  et  $n = n_i^2 / p$ ;  
 $n \ll p$

Le dopage introduit des niveaux d'énergie dans la bande interdite:  $E_D$  et  $E_A$



**Il est noté:**

- le déplacement du niveau de Fermi selon le type de dopage;
- l'introduction de niveau d'énergie dans la bande interdite.

### Position du niveau de Fermi:

$$E_C - E_F = K_B T \ln(N_c / N_D)$$

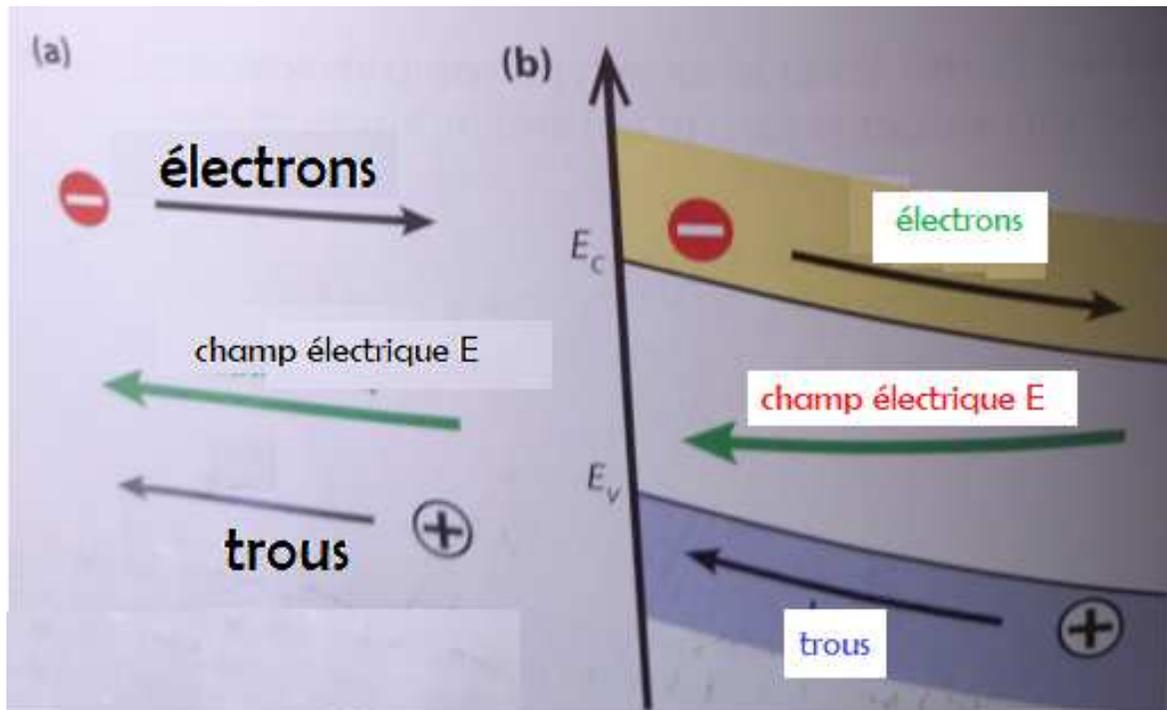
$$E_F - E_V = K_B T \ln(N_V / N_A)$$

# Propriétés de transport

## Influence du champ électrique, $E$ , sur les particules chargés en mouvement

$V_{dn}$ : vitesse de déviation moyenne des électrons:  $V_{dn} = -\mu_n E$ ;

$V_{dp}$ : vitesse de déviation moyenne des trous:  $V_{dp} = \mu_p E$



$$J_{n,dév} = -qnV_{dn} = qn\mu_n E$$

$$J_{p,dév} = qpV_{dp} = qp\mu_p E$$

$$J_{dév} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

# Diffusion

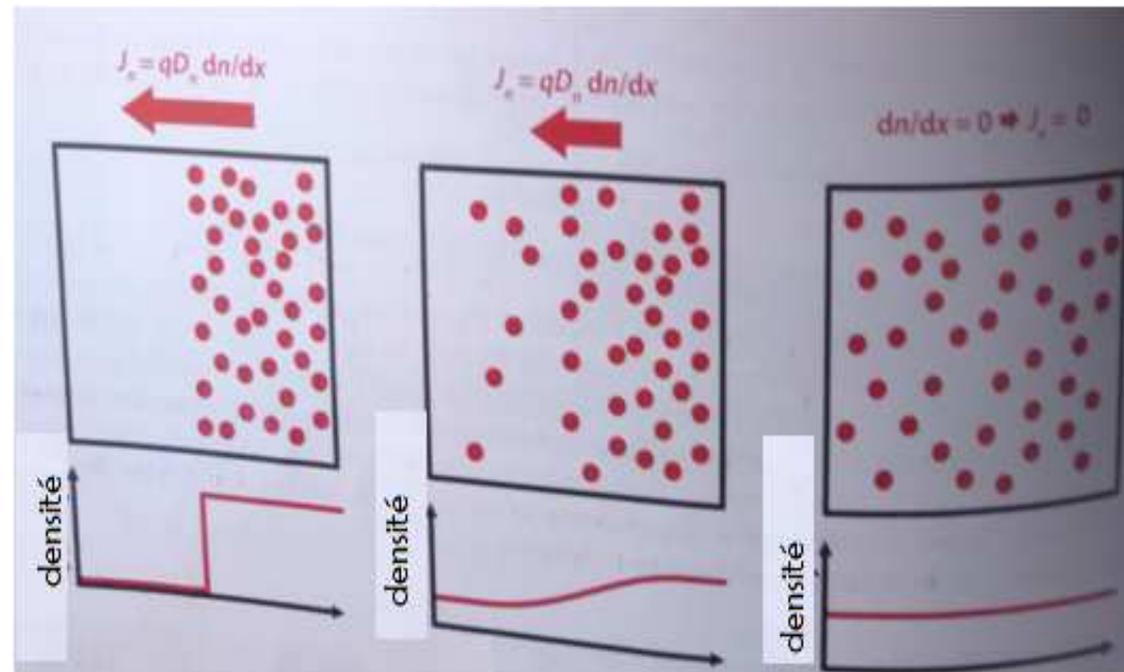
La diffusion est un processus au cours duquel les particules tendent à diffuser des zones à forte concentration vers les zones dépourvues de charge

$$J_{n,dif} = qD_n \nabla n$$

$$J_{p,dif} = -qD_p \nabla p$$

$$J_{dif} = q(D_n \nabla n - D_p \nabla p)$$

$$D_n / \mu_n = D_p / \mu_p = k_B T / q$$



$$J = J_{dév} + J_{dif} = q(p\mu_p + n\mu_n)E + q(D_n \nabla n - D_p \nabla p)$$

## Equation de continuité:

Dans le cas des électrons:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n - R_n + G_n$$

$\frac{\partial n}{\partial t}$  est constitué des termes de diffusion, déviation, de recombinaisons et de génération

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{dév}} + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{\text{dif}} + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_R + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_G$$

$$\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_R = -R_n; R_n : \text{électrons recombines}$$

$$\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_G = G_n; G_n : \text{électrons générés}$$

Dans le cas des trous:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - R_p + G_p$$

$\frac{\partial p}{\partial t}$  est constitué des termes de diffusion, déviation, de recombinaisons et de génération

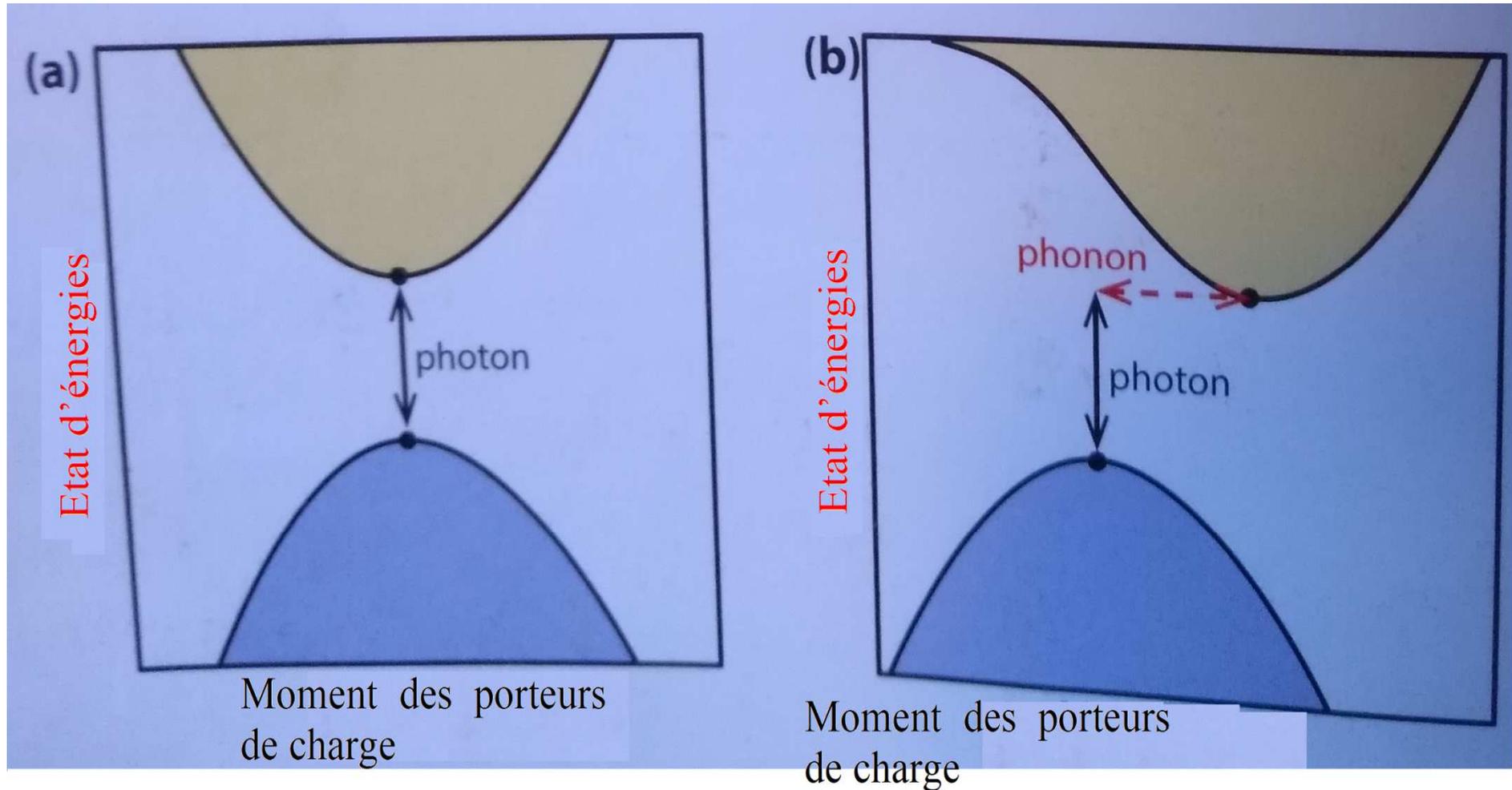
$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{dév}} + \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{dif}} + \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_R + \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_G$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_R = -R_p; R_n : \text{trous recombines}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_G = G_p; G_p : \text{trous générés}$$

# **Génération et recombinaison des paires électrons-trous**

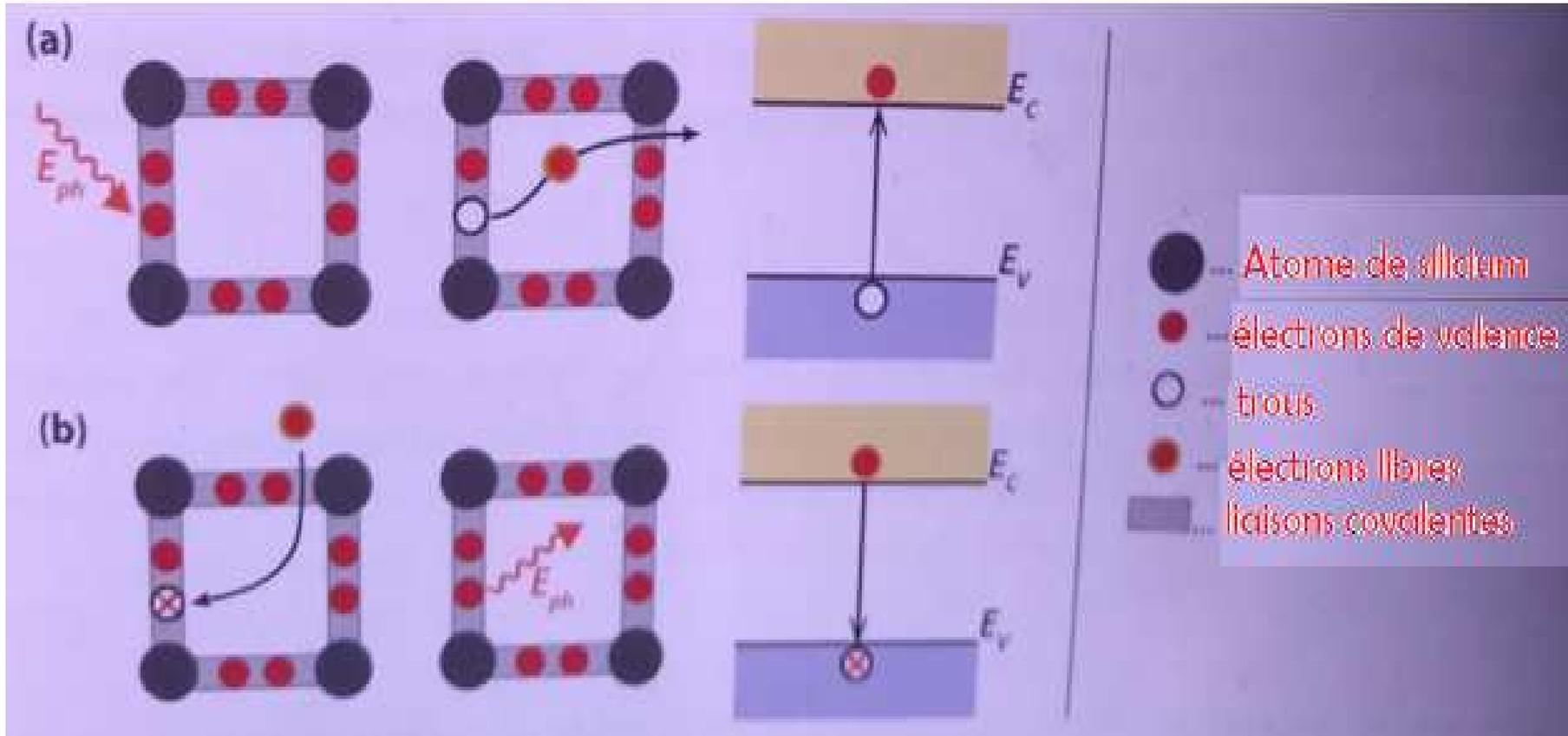
# Diagramme de bandes d'énergies et type de gap



**Gap indirect:** Si (1,12eV soit 1107nm); Ge (0,67eV/ 1850nm)

**Gap direct:** c-Si (3,4eV soit 364nm); GaAs, InP

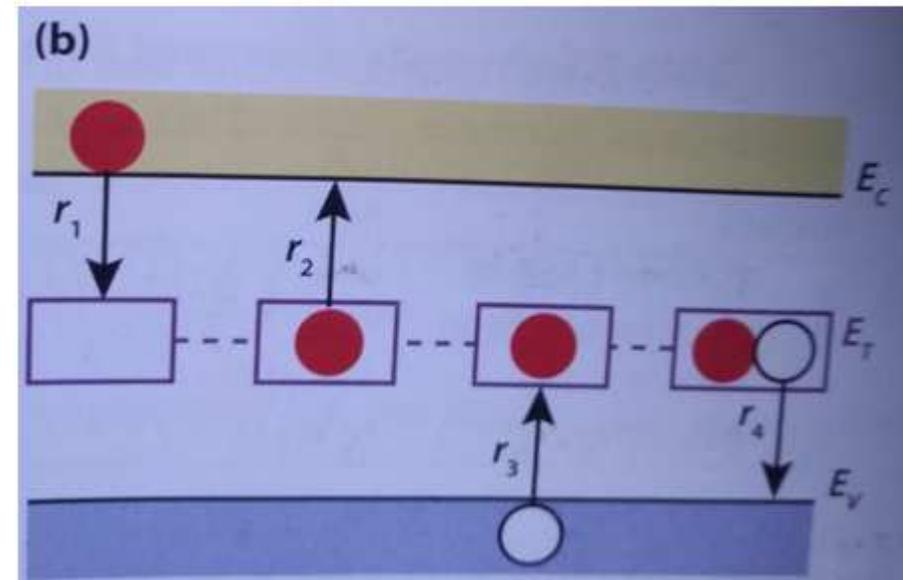
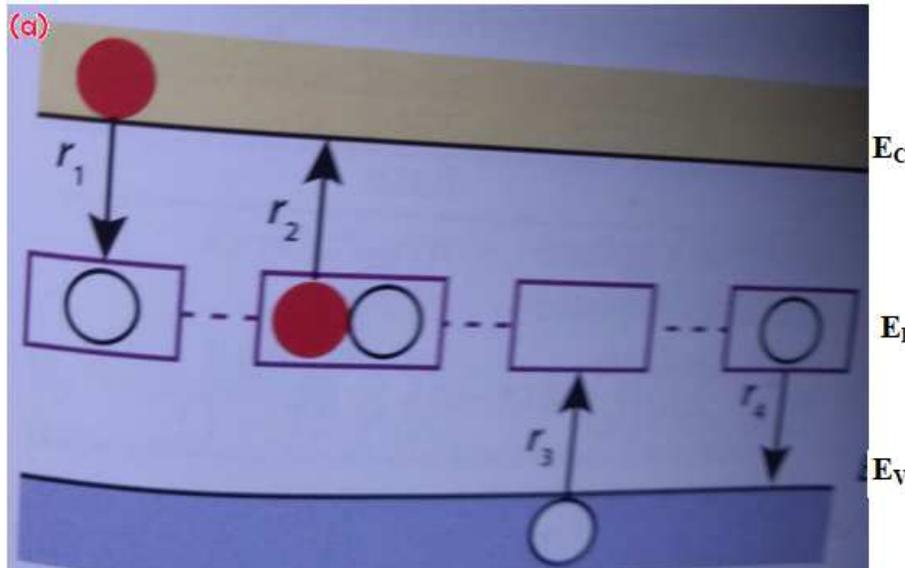
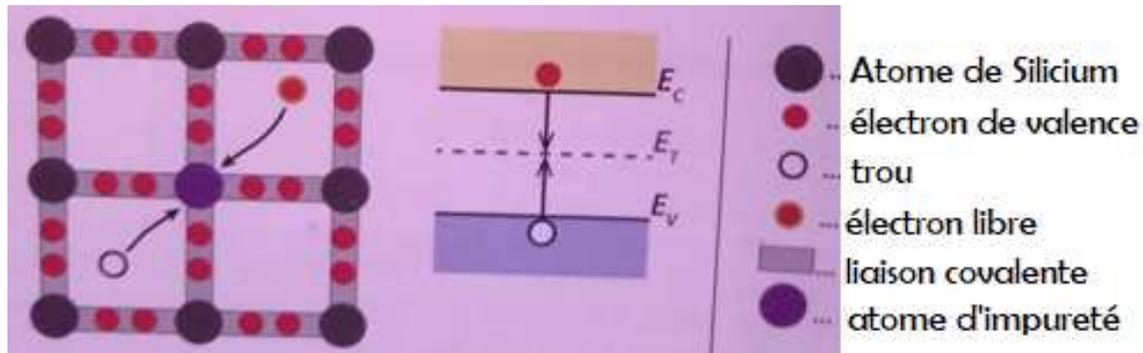
# Génération , Recombinaison bande à bande



**(a)** : photo génération/ génération paire électron-trou;

**(b)** : recombinaison radiative/ recombinaison directe/ GaAs

# Recombinaison Shockley-Read-Hall (1952)



**Cause:** défaut du réseau, atomes d'impureté

**Conséquence:**  $E_T$  dans la bande interdite, état de pièges

Non radiative

**Affecte la détermination du  $V_{co}$**

Deux types de pièges:

**(a): pièges donneurs**, neutres s'ils contiennent des électrons et chargés positivement s'ils ne contiennent pas d'électrons.

**(b): pièges accepteurs** chargé négativement s'ils contiennent des électrons et neutres dans le cas contraire.

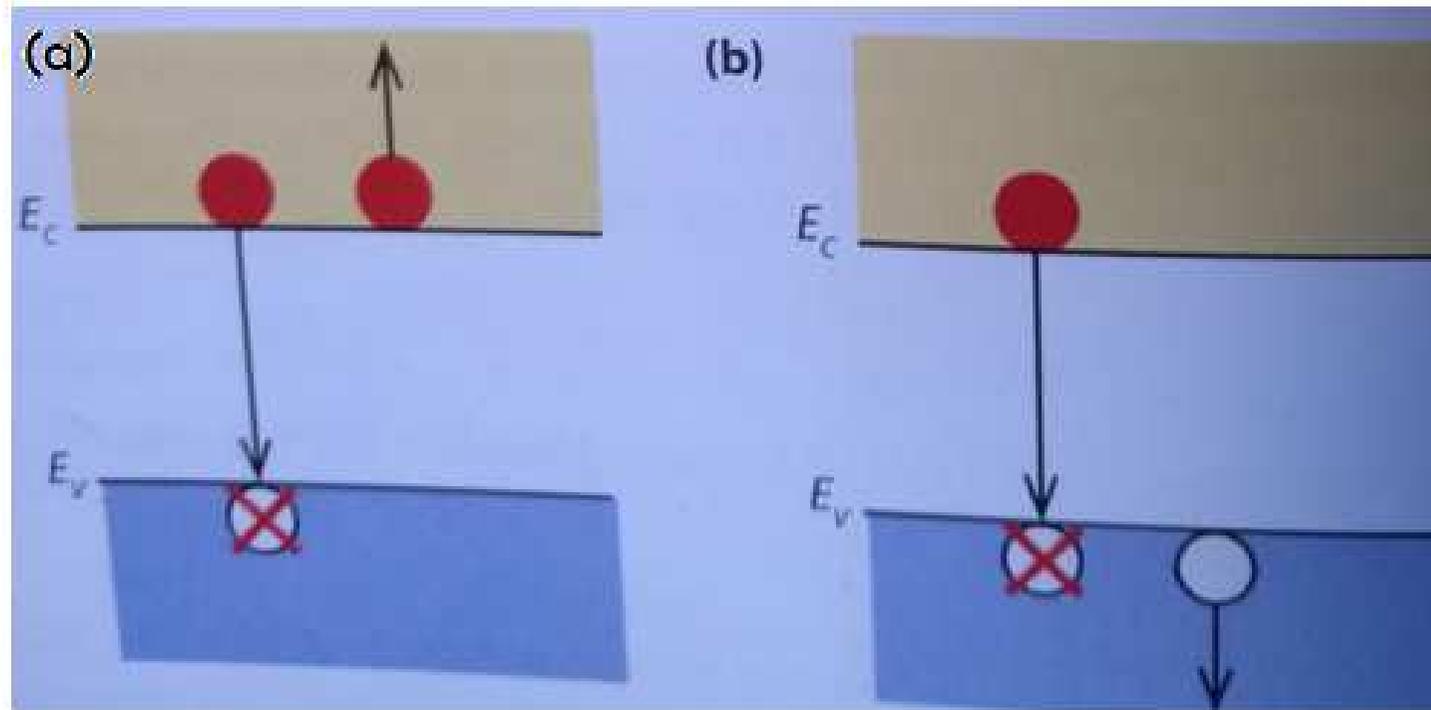
$r_1$ : capture d'un électron de la bande de conduction;

$r_2$ : émission d'un électron dans la bande de conduction;

$r_3$ : capture d'un trou de la bande de valence;

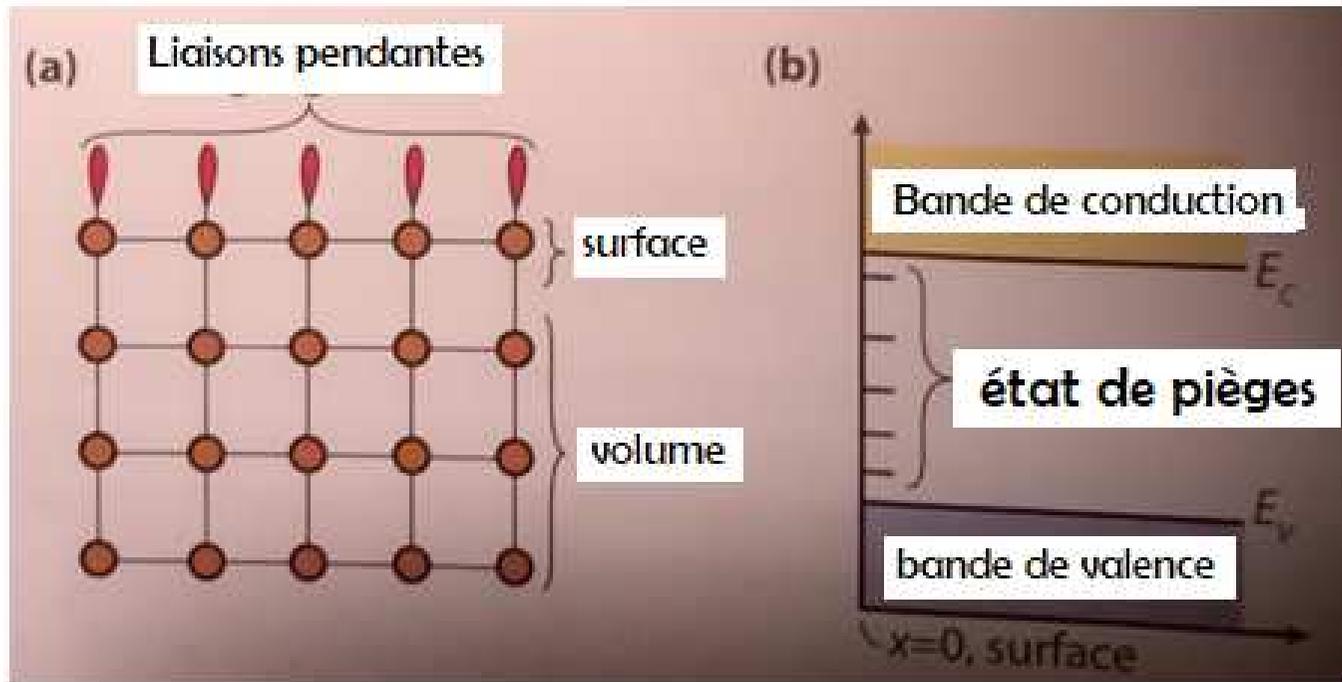
$r_4$ : émission d'un trou à la bande de valence.

# Recombinaison Auger (1922)



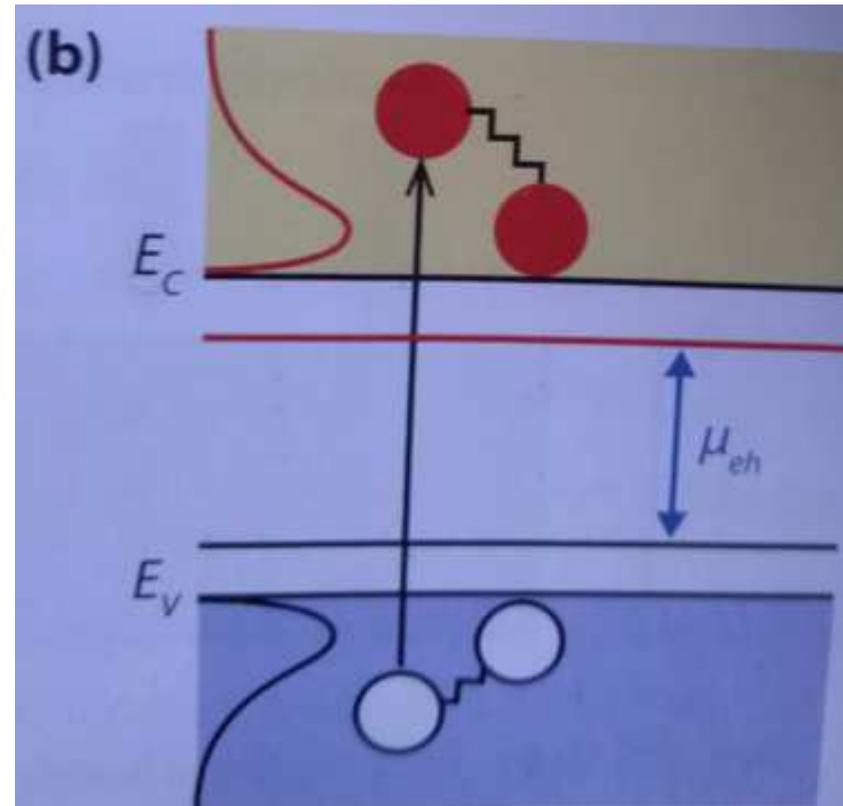
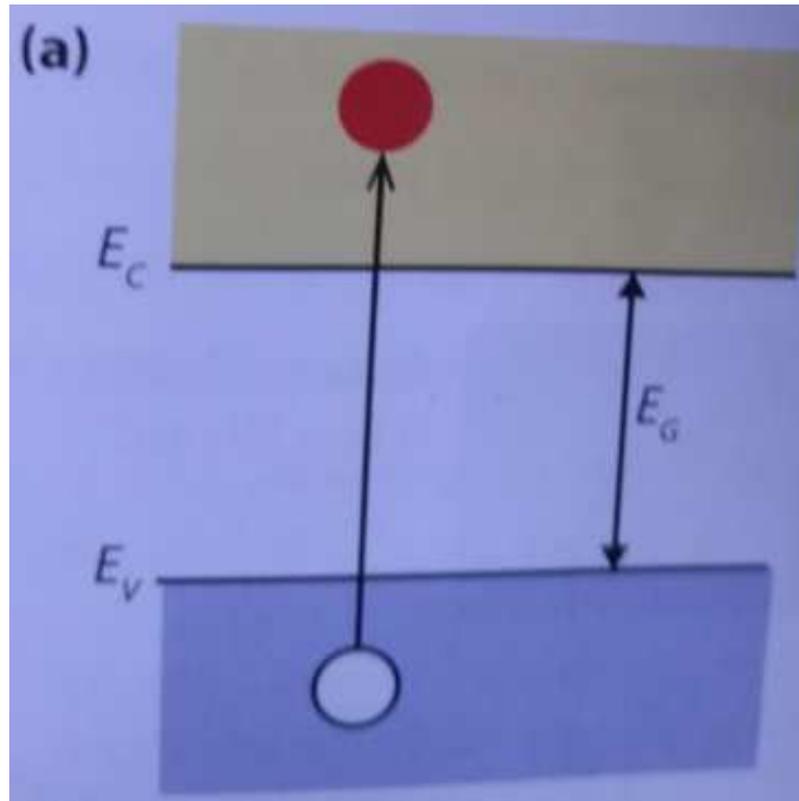
- Silicium: gap indirect sont le siège de recombinaison Auger/ **affecte la  $V_{co}$**
- éclaircissement très intense: GaAs
- trois particules (eet) ou (tte)
- Si la 3<sup>e</sup> particule est un électron (trou) , il est excité vers un état d'énergie supérieur (inférieur) / Après relaxation l'électron (trou) transfère son énergie, sous forme de phonons, au réseau/ Chaleur

# Recombinaison surfacique



- due aux liaisons pendantes;
- liaisons pendantes entraines des états de pièges au sein de la bande interdite/ ce qui entraine les recombinaisons SRH.
- la vitesse de recombinaison  $S_r = v_{th} \sigma N_{sT}$  ;  $\sigma_p$  pour un semi-conducteur de type p; ;  $\sigma_n$  pour un semi-conducteur de type n;  $N_{sT}$  :densité des pièges par une unité de surface
- la passivation: permet de diminuer  $N_{sT}$  et donc  $S_r$
- dopage intense à la surface avant ou arrière (champ arrière (BSF)) crée une barrière diminuant les recombinaisons surfaciques.

# Concentration des porteurs dans un état de non équilibre



Eclairement entraine:

- Interaction entre le réseau et les porteurs photo générés;
- thermalisation ( $10^{-12}$  s) : l'excès d'énergie reçue du photon, une partie assure la transition BV-BC, est transmis au réseau sous forme de chaleur.

-Après la thermalisation, la concentration des porteurs est dans un état stable

- l'état d'équilibre est caractérisé par :

□ deux niveaux de Fermi  $E_{Fn}$  et  $E_{Fp}$ ;

□ l'énergie électrochimique,  $\mu_{et} = E_{Fn} - E_{Fp}$

Il mesure le rendement de l'éclairement solaire.

$$n = N_c \exp(E_{Fn} - E_c / T k_B)$$

$$p = N_v \exp(E_v - E_{Fp} / T k_B)$$

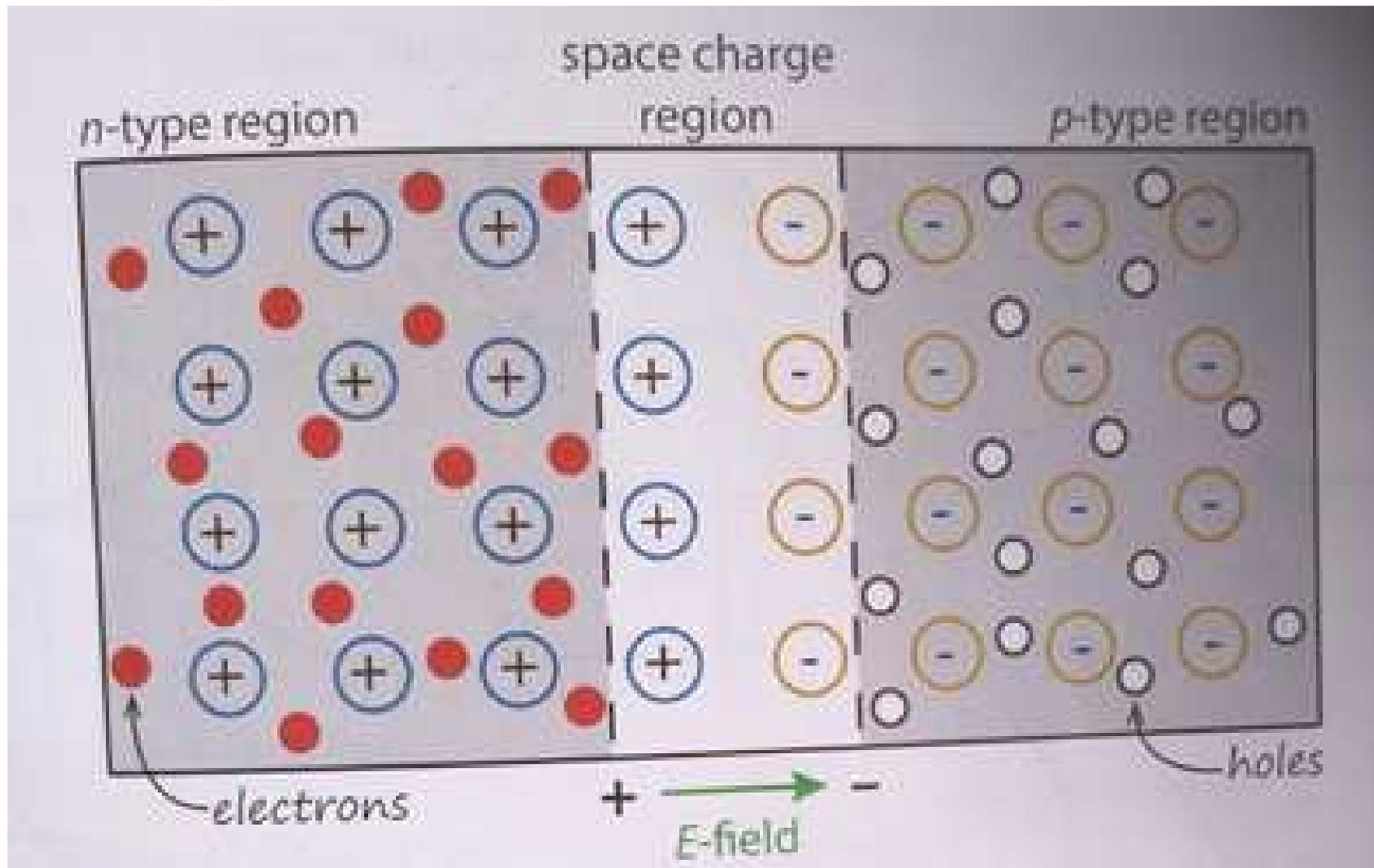
$$np = N_c N_v \exp(E_v - E_c / T k_B) \exp(E_{Fn} - E_{Fp} / T k_B) = n_i^2 \exp(E_{Fn} - E_{Fp} / T k_B)$$

**Courant des électrons dans le semi-conducteurs:  $J_N = n \mu_n \nabla E_{Fn}$**

**Courant des trous dans le semi-conducteurs:  $J_p = p \mu_p \nabla E_{Fp}$**

**Quand la position de Fermi varie avec la position:  $dE_{Fn} / dx \neq 0$  ou  $dE_{Fp} / dx \neq 0$**

# Jonction



# Jonction en équilibre

