

COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

II) Semi-conducteurs à l'équilibre

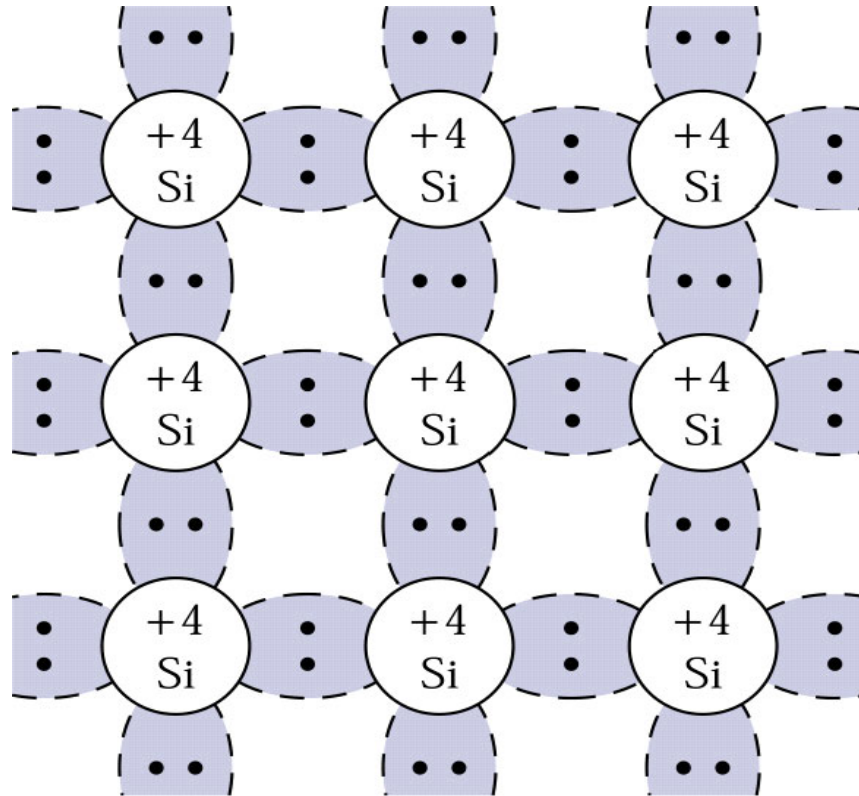
P.A. Besse

EPFL

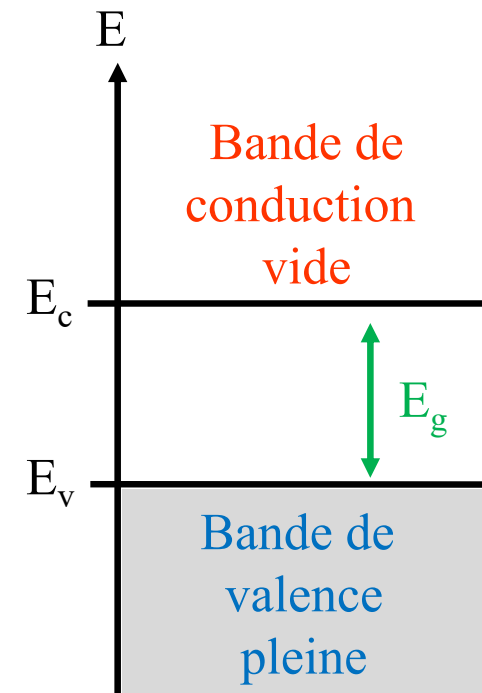
Concepts d'électrons libres et de trous

Semi-conducteur intrinsèque (« pur ») à $T=0K$

À basse température: * toutes les liaisons sont occupées
($T=0$) * la bande de valence est pleine, celle de conduction vide



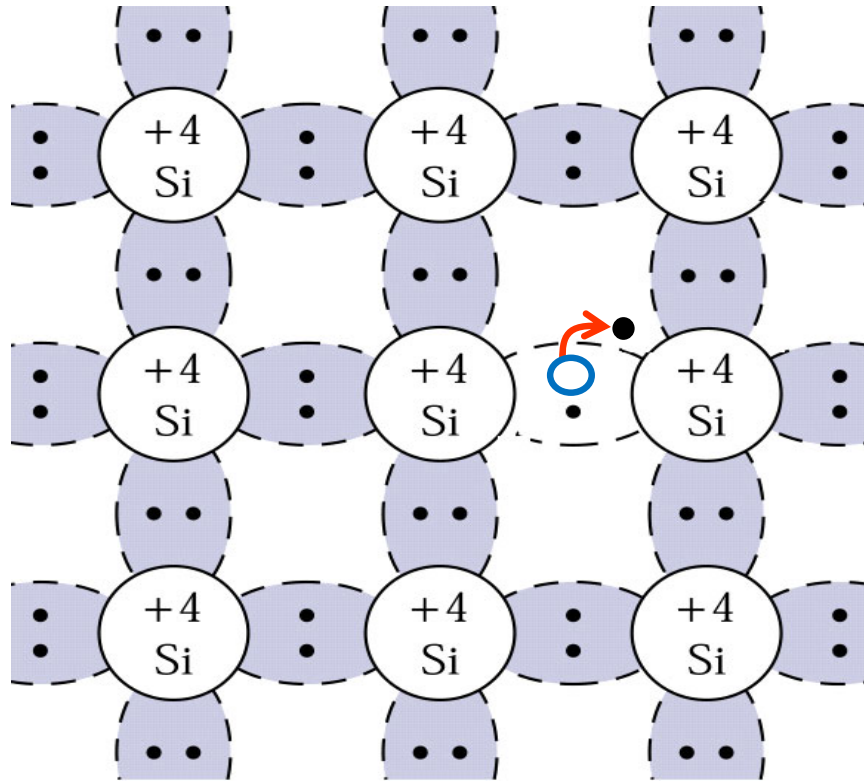
S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Pas de déplacement possible → isolant

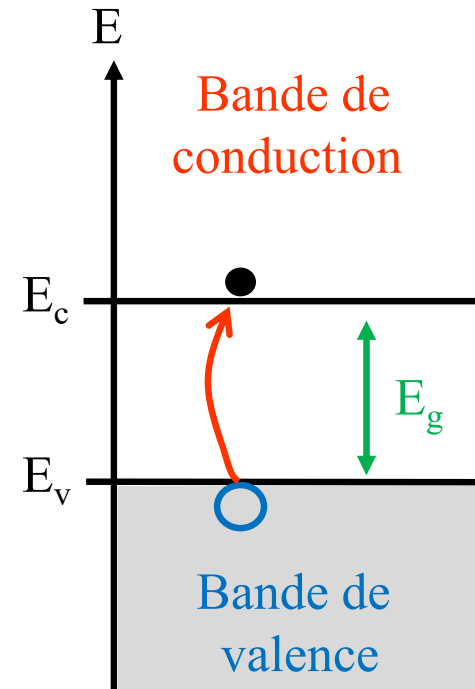
Semi-conducteur intrinsèque: génération thermique

Par excitation thermique :
un électron devient libre
et un trou apparaît



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

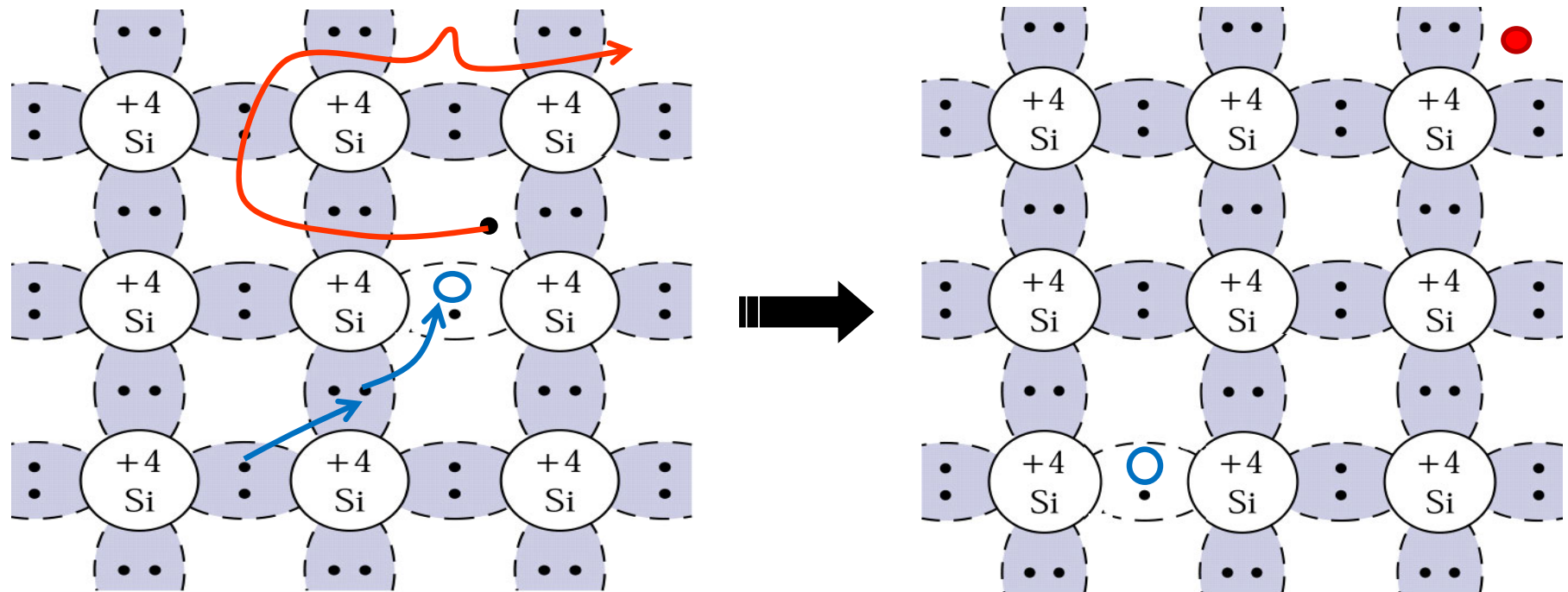
Génération d'une paire
électron + trou



L'électron libre ainsi que le trou se déplacent indépendamment

La zone avec l'électron libre est chargée négativement

La zone avec le trou est chargée positivement



Deux sortes de charges contribuent à la conduction: les électrons libres et les trous

Bandes et porteurs libres

$T=0K$

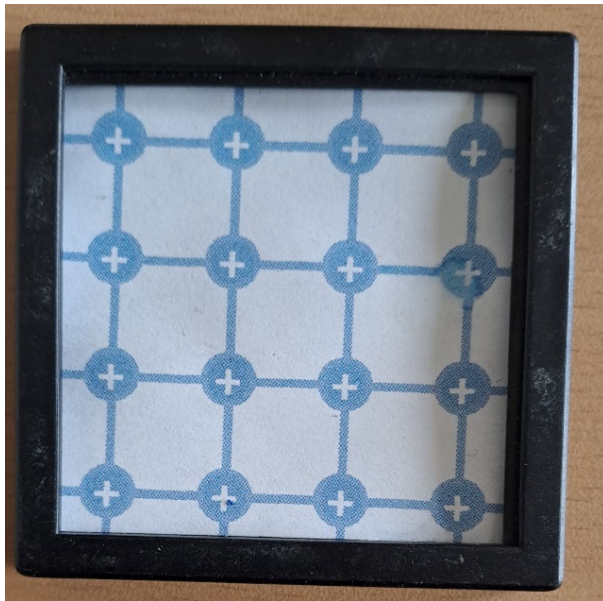


$T=300K$

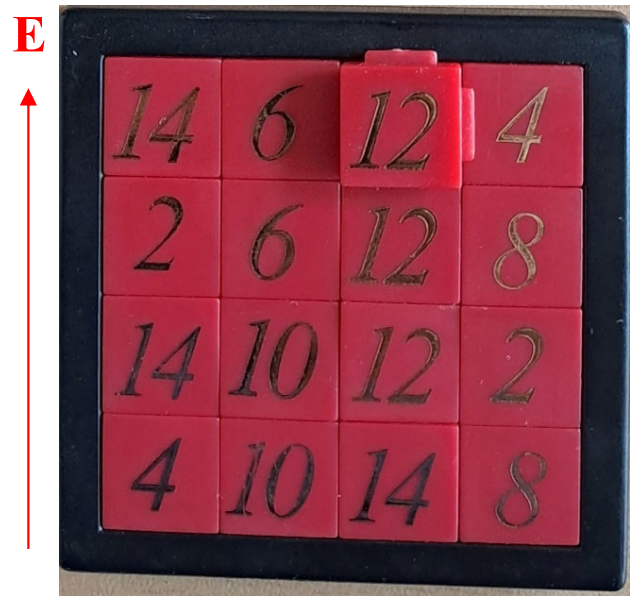


Trou = Charge positive

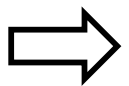
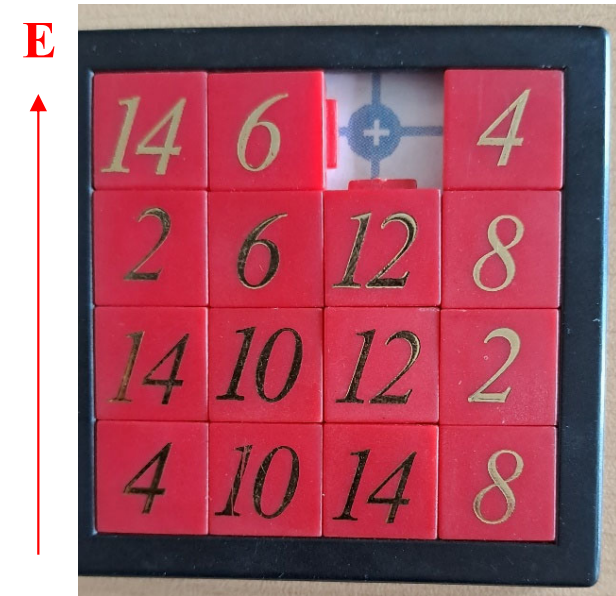
Bande de valence
vide



Bande de valence
pleine



Bande de valence
avec un trou



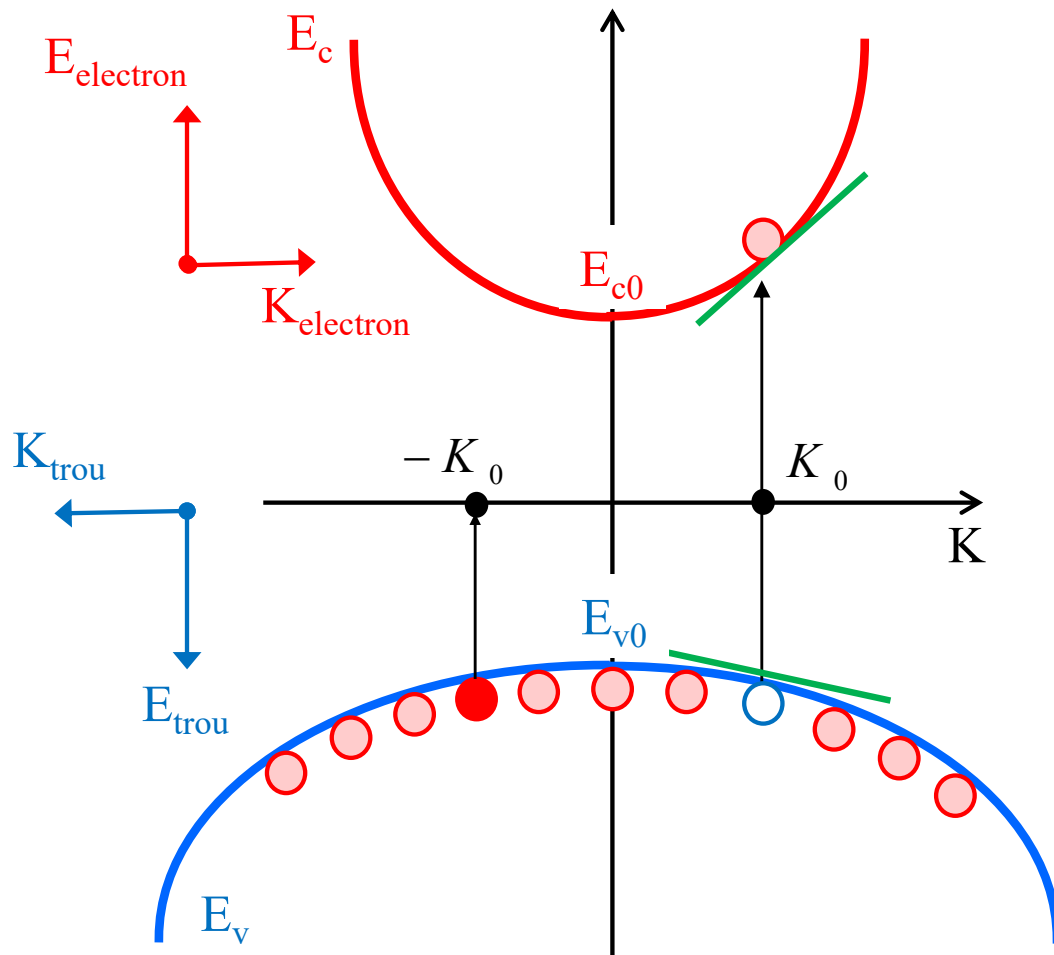
Charge positive du trou = charge du proton non-neutralisée par un électron



Electron libre = électron occupant un état de la bande de conduction (état anti-liant)
porte une charge négative
réagit à une force extérieure avec sa masse effective dans le cristal
cherche à minimiser son énergie,
comme une « bille » dans un pot.

Trou = liaison inoccupée qui se déplace par « substitution »
porte une charge positive
réagit à une force extérieure avec sa masse effective dans le cristal
cherche à maximiser son énergie,
comme une « bulle » dans un liquide.

Passage d'un électron d'une bande à l'autre = évaporation et condensation
→ On peut générer ou faire disparaître une paire électron-trou
donc la charge totale reste neutre.



Electrons

Charge: négative

Impulsion: $P_e = \hbar K_0$

Vitesse groupe: $v_e = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_c}{\partial K}$

Masse effective: $\frac{1}{m_e} \equiv \left| \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E_c}{\partial K^2} \right|$

Trous

Charge: positive

Impulsion: $P_h = -\hbar K_0$

Vitesse groupe: $v_h = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_v}{\partial K}$

Masse effective: $\frac{1}{m_h} \equiv \left| \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E_v}{\partial K^2} \right|$

Calcul

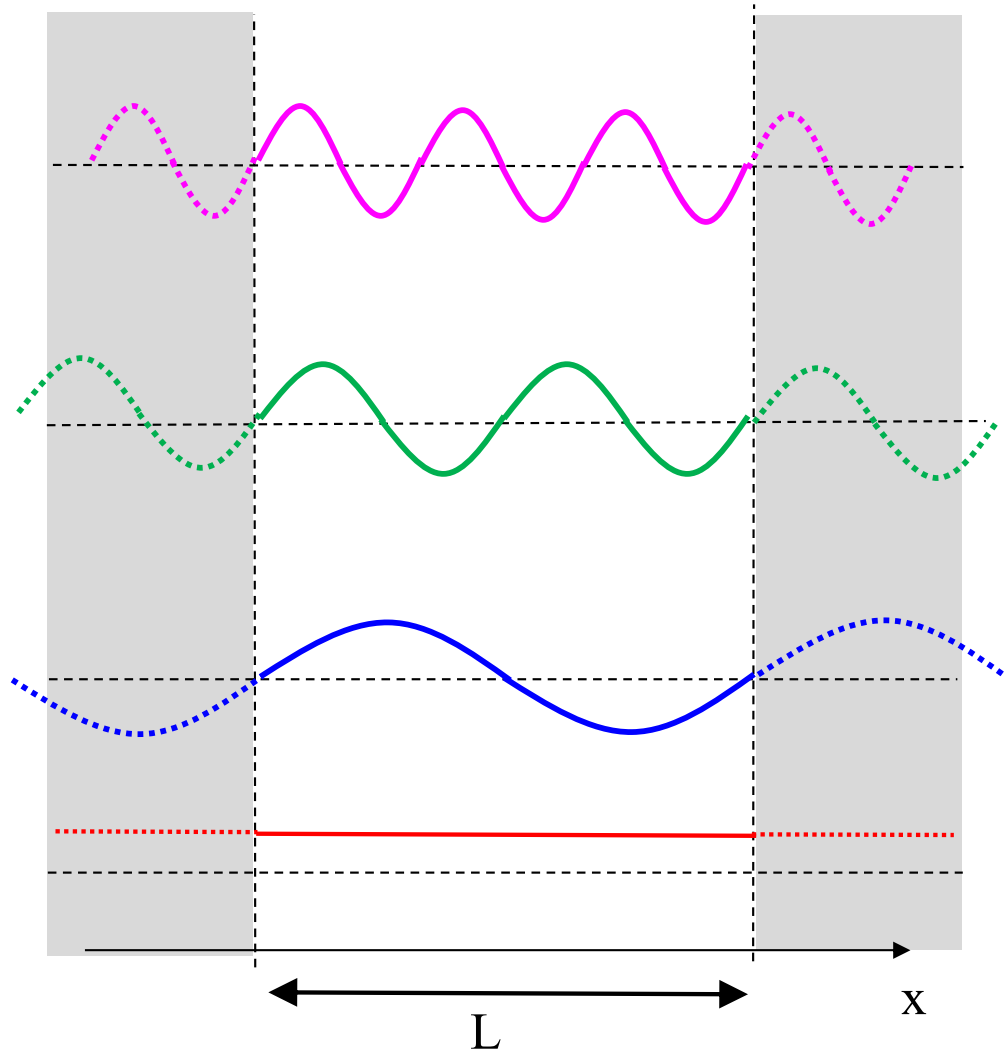
de la densité d'états,
du taux d'occupation
et des concentrations de porteurs

Principe de calcul de la concentration de porteurs libres



- 1) Nombre de places disponibles à chaque étage (densité d'états $\rho(E)$)
- 2) Spin (Up – Down) \rightarrow facteur 2
- 3) Probabilité d'occupation à chaque étage (Fermi-Dirac $F(E)$)

$$\text{Concentration} = 2 \cdot \int \rho(E) \cdot F(E) dE$$

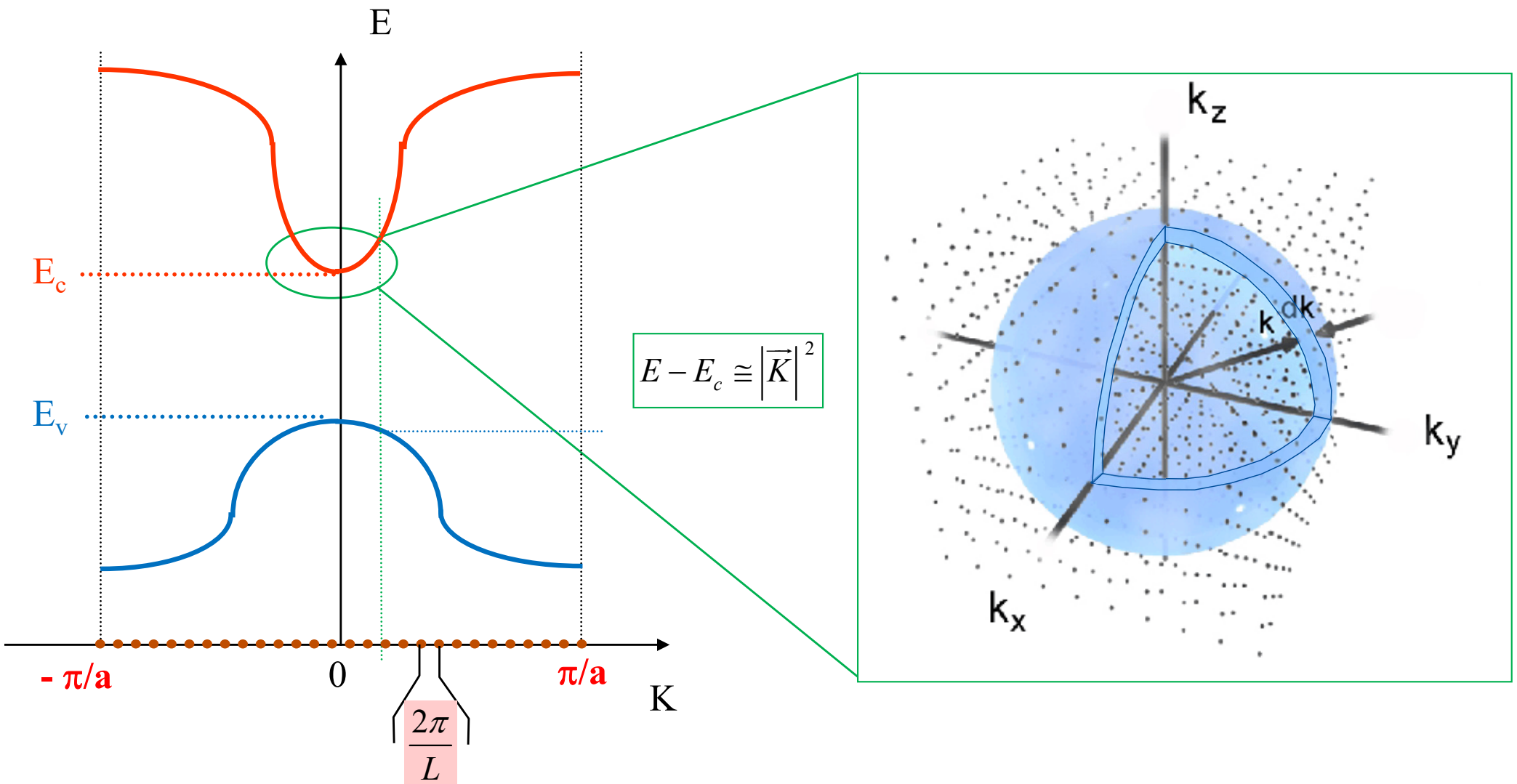


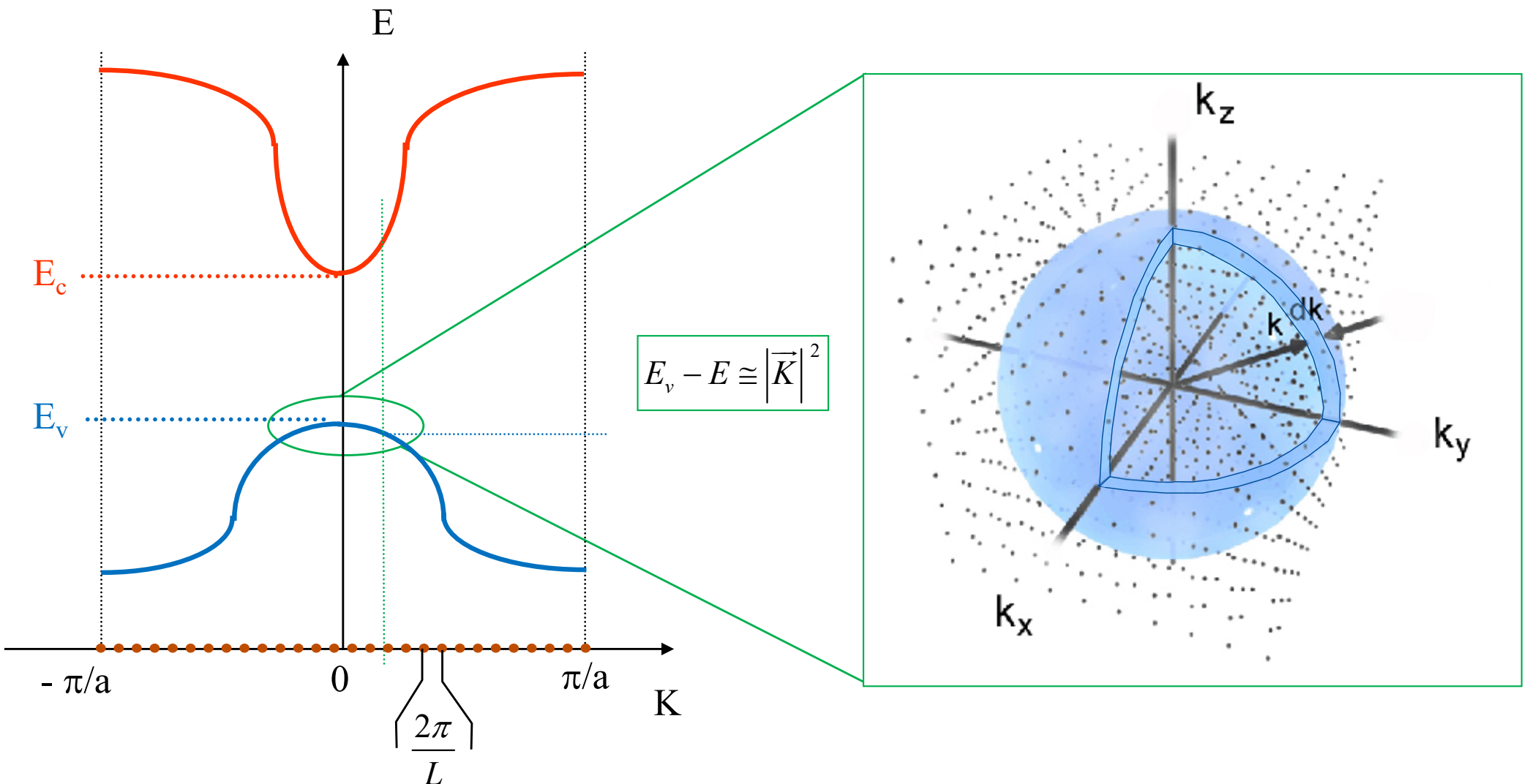
Fonctions périodiques

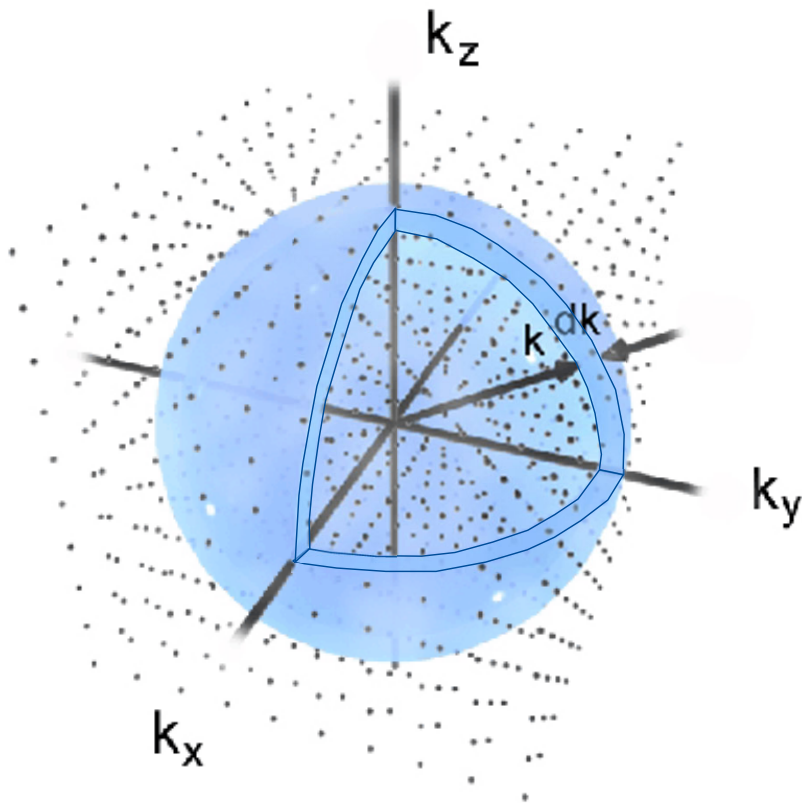
$$n \cdot \lambda_n = L$$



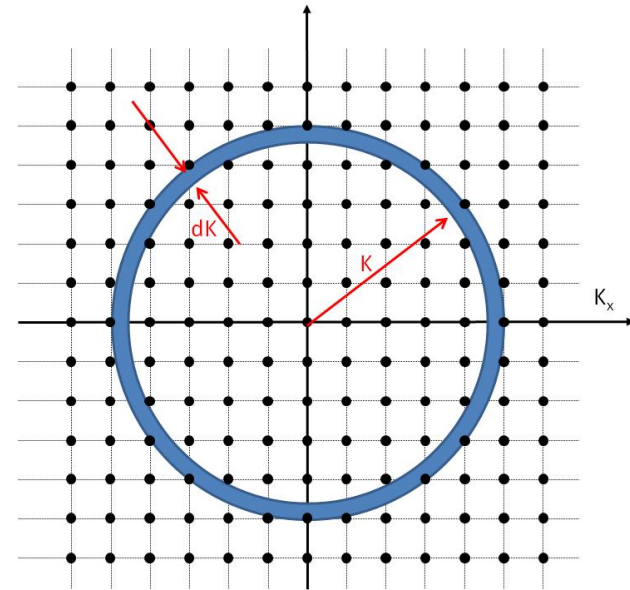
$$K_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = n \cdot \frac{2\pi}{L}$$







$$\Delta K = \frac{2\pi}{L}$$



$$n_K = (4\pi \cdot K^2 \cdot dK) / \Delta K^3$$

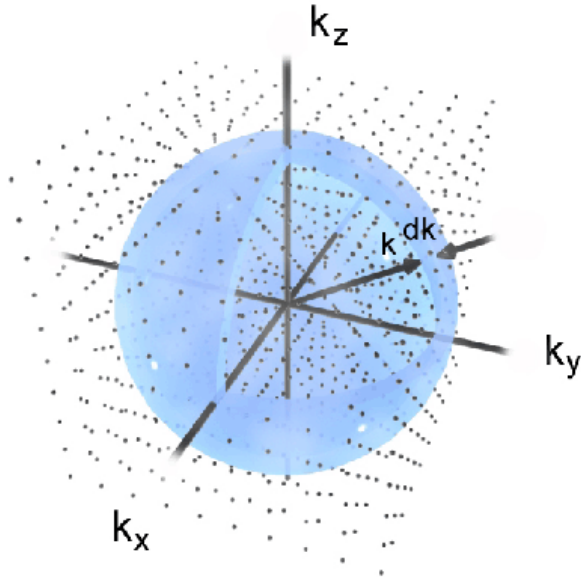
La densité d'états avec la même norme de K:

$$\rho_K \cdot dK \equiv \frac{n_K}{L^3} = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^3 \cdot 4\pi \cdot K^2 \cdot dK$$

La densité d'états avec la même norme de K :

$$\rho_K \cdot dK \equiv \frac{n_K}{L^3} = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^3 \cdot 4\pi \cdot K^2 \cdot dK$$

Dispersion:



$$E_e = \frac{p^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot K^2$$



$$\sqrt{E} \approx K \quad dE \approx K \, dK$$

$$K^2 \cdot dK = K \cdot K \, dK \approx \sqrt{E} \cdot dE$$

Densité d'état en énergie (Electrons):

$$\rho_E \cdot dE = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(m^*)^3}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \sqrt{E - E_0} \cdot dE$$

Densité d'états: bande de conduction et de valence

Silicium:

Cas anisotrope avec plusieurs vallées:

Bande de conduction:

$$\rho_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(m_{dos,n}^*)^3}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \sqrt{E - E_c}$$

6 vallées ellipsoïdes

$$\sqrt{(m_{dos,n}^*)^3} = 6 \cdot \sqrt{(m_l^* \cdot m_t^* \cdot m_t^*)}$$

Bande de valence:

$$\rho_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(m_{dos,p}^*)^3}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \sqrt{E_v - E}$$

2 vallées sphériques

$$\sqrt{(m_{dos,p}^*)^3} = \left(\sqrt{(m_{hh})^3} + \sqrt{(m_{lh})^3} \right)$$

! Chaque état peut être occupé par 2 électrons de spin opposé !

Masses effectives

«Density of States» (dos)

PROPERTY	Si	GAAs
Electron effective mass (m_0)	$m^*_l = 0.98$	$m^* = 0.067$
	$m^*_t = 0.19$	
	$m^*_{dos} = 1.08$	
	$m^*_\sigma = 0.26$	
Hole effective mass (m_0)	$m^*_{hh} = 0.49$	$m^*_{hh} = 0.45$
	$m^*_{lh} = 0.16$	$m^*_{lh} = 0.08$
	$m^*_{dos} = 0.55$	$m^*_{dos} = 0.47$
	$m^*_\sigma = 0.37$	$m^*_\sigma = 0.34$
Bandgap (eV)	$1.17 - \frac{4.37 \times 10^{-4} T^2}{T + 636}$	$1.519 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204}$
Electron affinity (eV)	4.01	4.07

J. Singh “*Semiconductor Devices*”

Masses effectives en unité:
 $m_0 = 0.911 \cdot 10^{-30} \text{ Kg}$

For Si: m^*_{dos} : To be used in calculating density of states, position of Fermi level
 m^*_σ : To be used in calculating response to electric field, e.g., in mobility

Electrons

$F(E)$ doit remplir les limites:

- $F(E) = 1$ si E très bas
- $F(E) = \text{Boltzmann}$ si E élevé

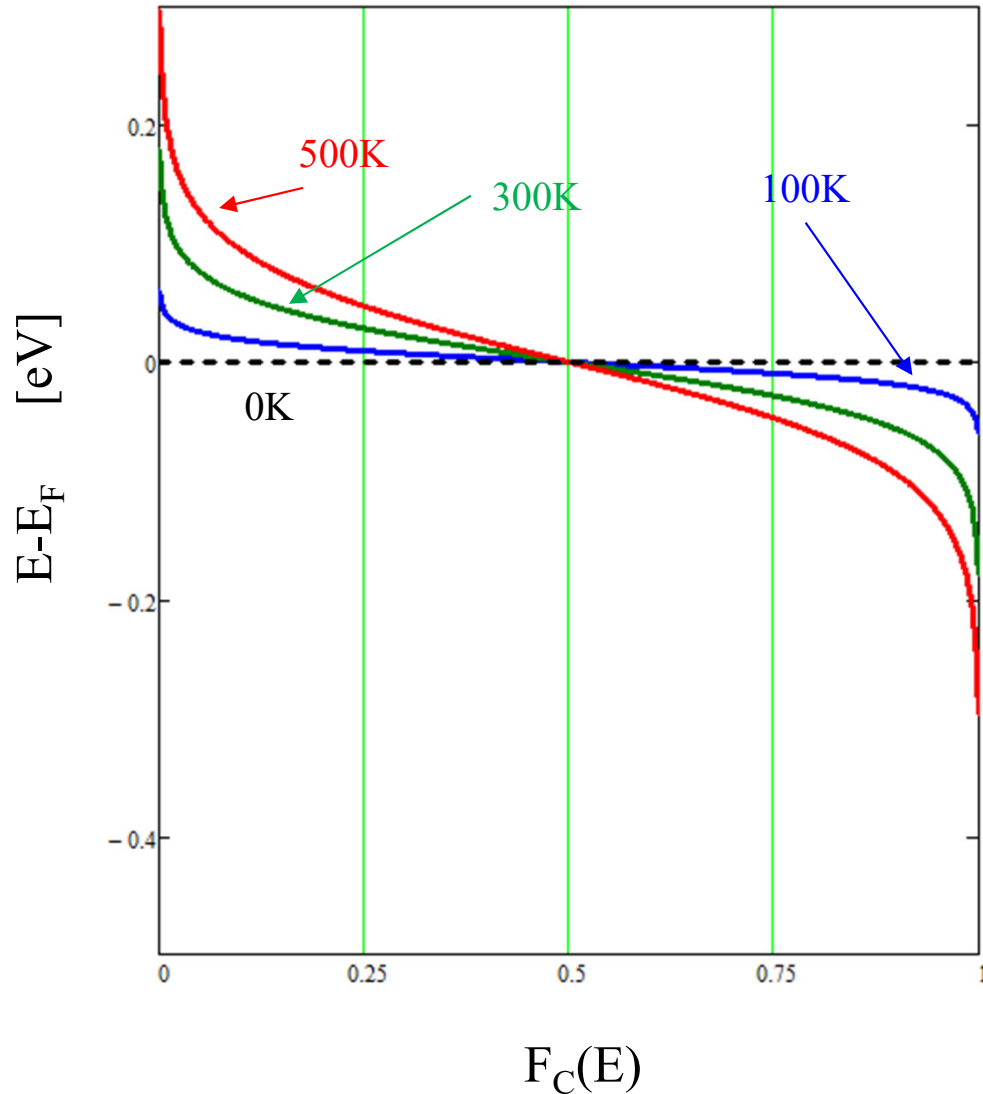
$$F_c(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}$$

→ Fermi-Dirac avec un paramètre le niveau de Fermi

Trous

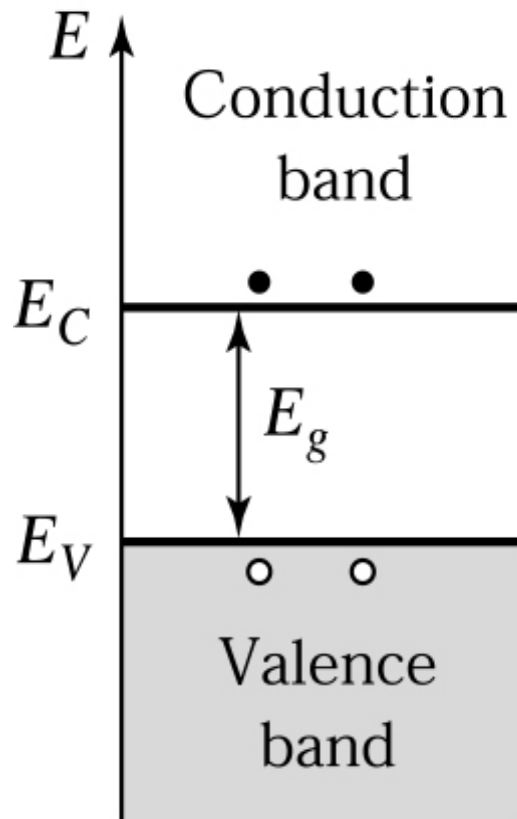
Proba d'occupation d'un trou = 1-proba d'occupation d'un électron

$$F_v(E) = 1 - F_c(E) = \frac{1}{1 + e^{(E_F - E)/kT}}$$



$$F_C(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

Semiconducteur: concentrations de porteurs libres

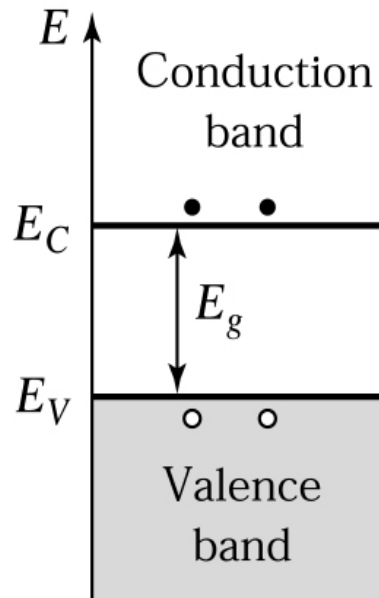


n = concentration d'électrons libres

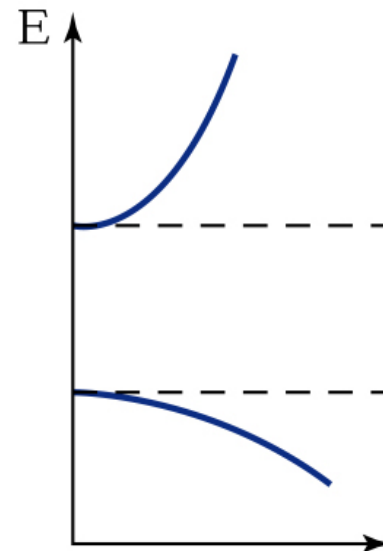
p = concentration de trous

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

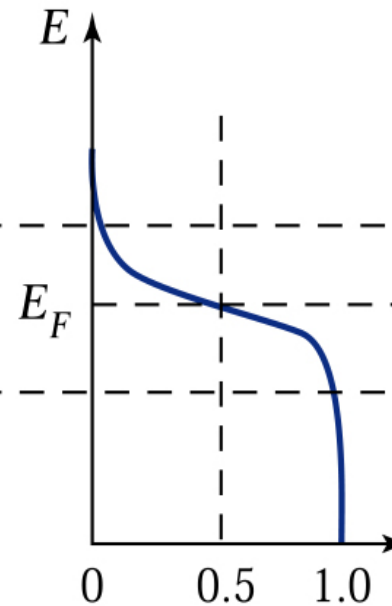
Calcul des concentrations de porteurs: principe



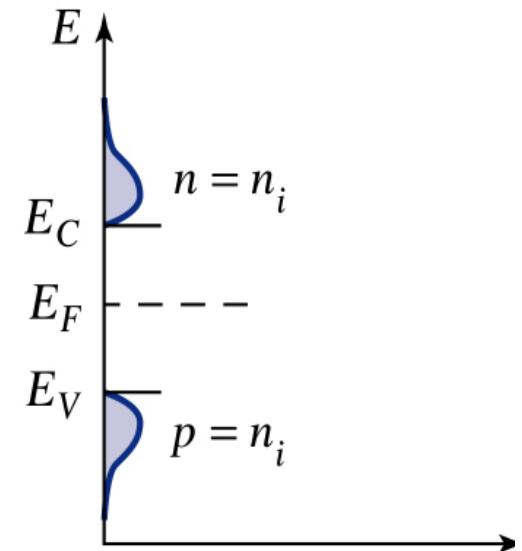
Bandes



Densité d'états



Taux d'occupation



Concentration

$$\text{Concentration} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Spin}}}{2} \cdot \int \rho(E) \cdot F(E) dE$$

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

Concentration d'électron libre et de trous

Concentration d'électrons libre dans les bandes de conduction:

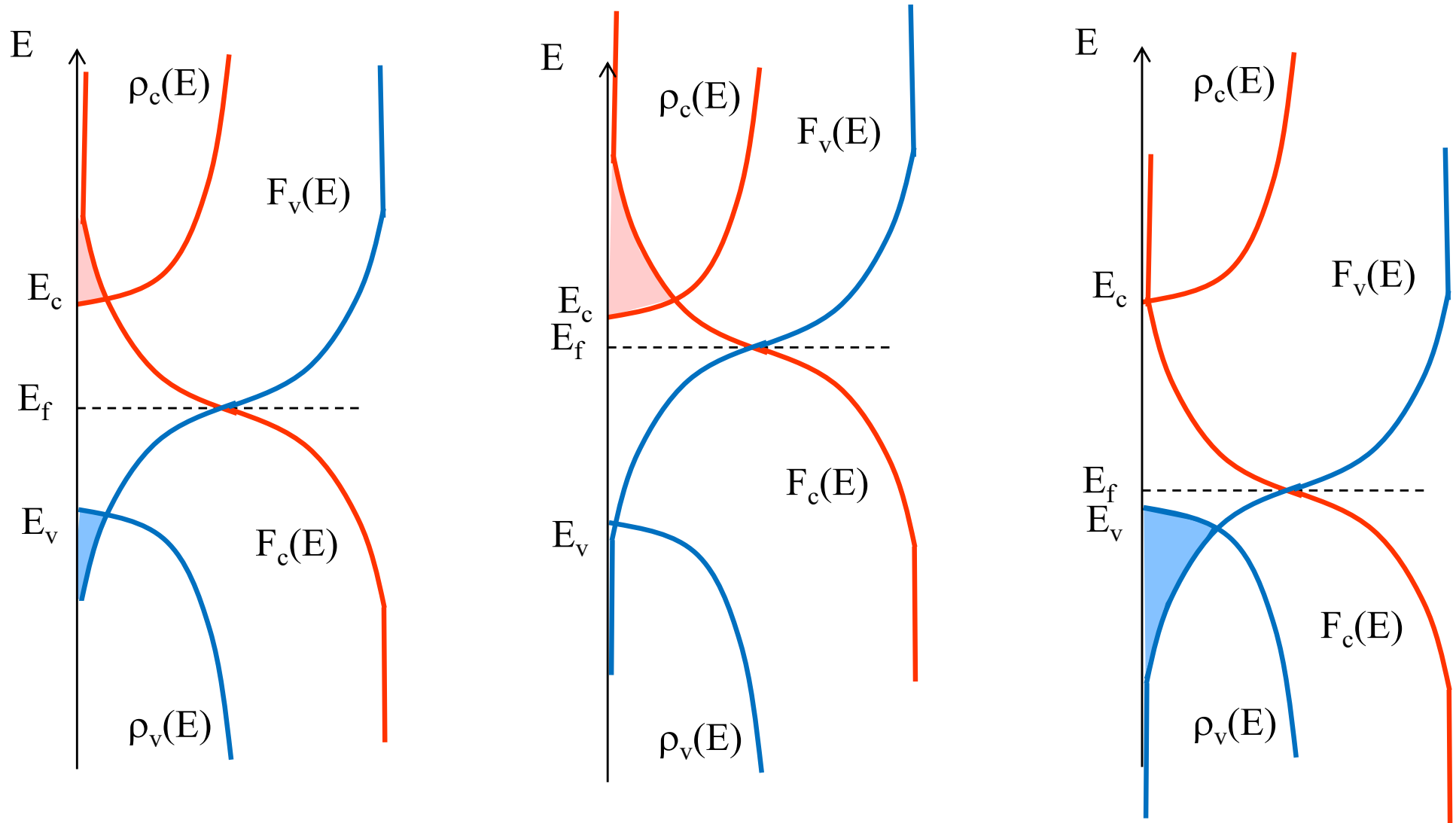
$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE = \sqrt{2} \frac{(m_{dos,n}^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} \sqrt{E - E_c} \cdot \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \cdot dE$$

Concentration de trous dans les bandes de valence:

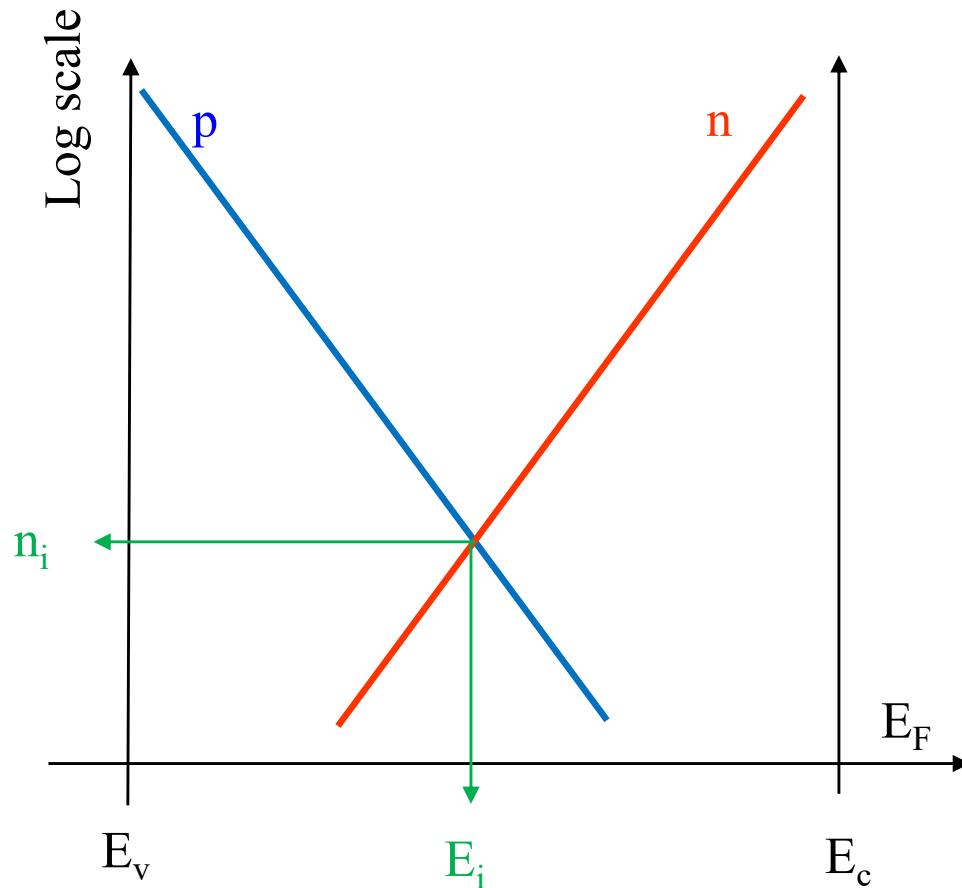
$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE = \sqrt{2} \frac{(m_{dos,p}^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{-\infty}^{E_v} \sqrt{E_v - E} \cdot \frac{1}{1 + e^{(E_F - E)/kT}} \cdot dE$$

Remarques: - Ces équations sont aussi valides pour un semi-conducteur dopé

- Un paramètre est pour l'instant libre: l'énergie de Fermi E_F .



Semi-conducteurs intrinsèques: neutralité

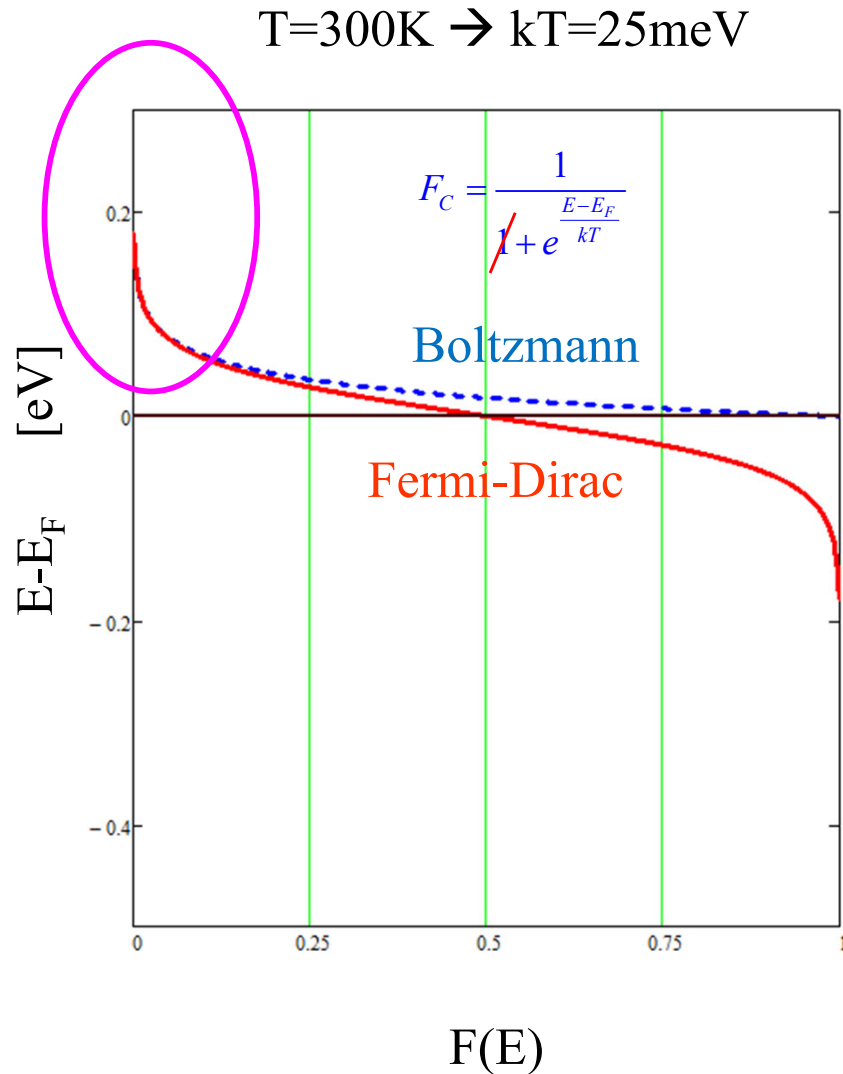


Le semi-conducteur intrinsèque est neutre:

$$\rightarrow n = p = n_i$$

Cette condition de neutralité nous donne la valeur de:
l'énergie de Fermi intrinsèque E_i
et de la concentration n_i

L'énergie de Fermi intrinsèque E_i est proche du milieu du gap
 \rightarrow Approximation de Boltzmann



Pour la bande de conduction:

Si: $E_c - E_F > 3kT$

$$F_c(E) \cong e^{-(E-E_F)/kT}$$

Pour la bande de valence:

Si: $E_F - E_v > 3kT$

$$F_v(E) \cong e^{-(E_F-E)/kT}$$

$$n \cong \sqrt{2} \frac{(m_{dos,n}^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} \sqrt{E - E_c} \cdot e^{-(E - E_F)/kT} \cdot dE$$



$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$p \cong \sqrt{2} \frac{(m_{dos,p}^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{-\infty}^{E_v} \sqrt{E_v - E} \cdot e^{-(E_F - E)/kT} \cdot dE$$



$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

Densités effectives d'états:

$$N_c = \frac{1}{\sqrt{2} \hbar^3} \cdot \left(\frac{kT}{\pi} m_{dos,n}^* \right)^{3/2}$$

$$N_v = \frac{1}{\sqrt{2} \hbar^3} \cdot \left(\frac{kT}{\pi} m_{dos,p}^* \right)^{3/2}$$

Loi d'action de masse:

(valable pour tout semi-conducteur
à l'équilibre)

$$n \cdot p = N_c N_v e^{-E_g/kT} \equiv n_i^2$$

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE$$

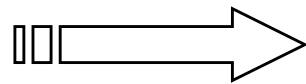
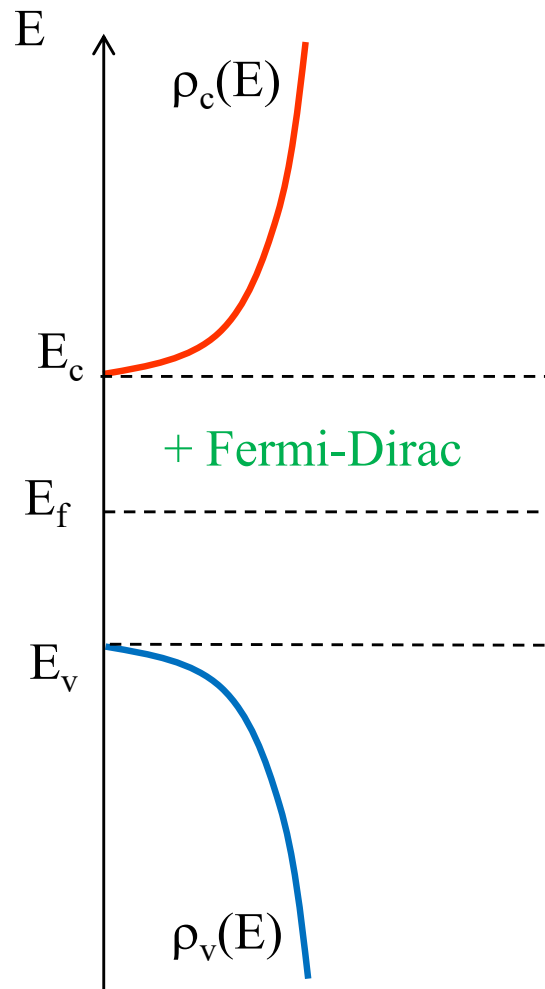
$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE$$

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F) / kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v) / kT}$$

$$n \cdot p = N_c N_v e^{-E_g / kT} \equiv n_i^2$$

Loi d'action de masse



« Système à deux niveaux »

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F) / kT}$$



+ Boltzmann



$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v) / kT}$$

Semi-conducteurs intrinsèques: Condition de neutralité

Intrinsèque

$$\left\{ \begin{array}{l} n_i = n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_i)/kT} \\ n_i = p \cong N_v \cdot e^{-(E_i - E_v)/kT} \end{array} \right.$$

Diviser et prendre le logarithme

$$E_i = \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v}$$

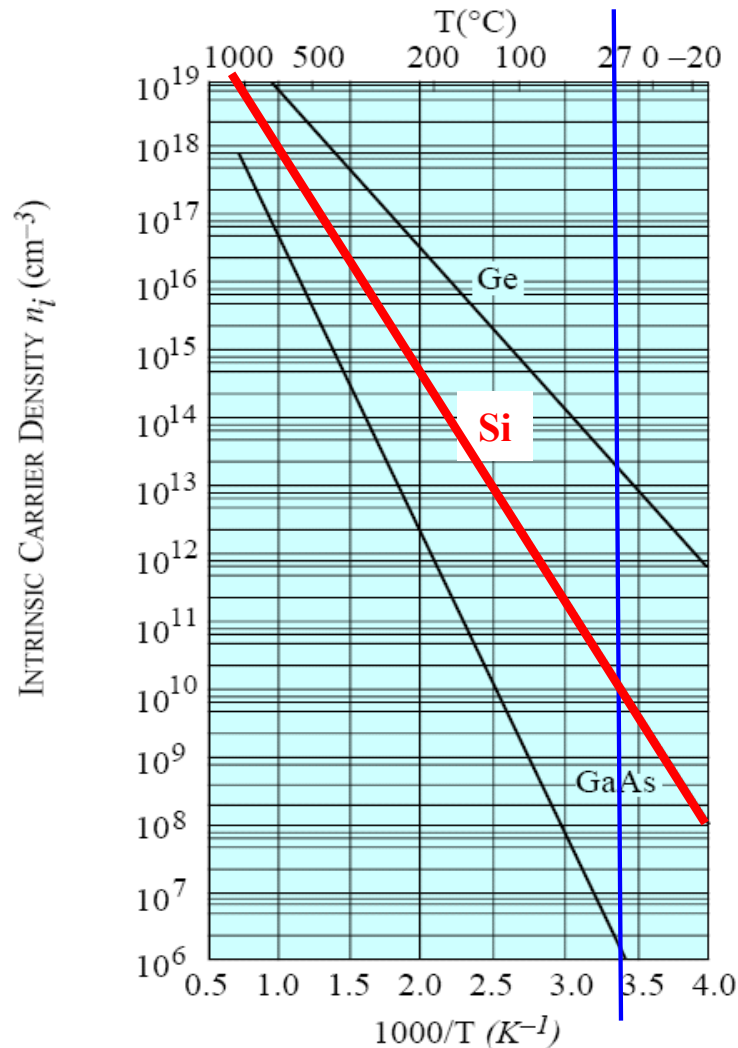
Multiplier

$$n_i^2 = n \cdot p = N_c N_v \cdot e^{-E_g/kT}$$

Pour le silicium à température ambiante:

$$E_i = \frac{(E_c + E_v)}{2} - 11meV \cong \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



$$N_c = \frac{1}{\sqrt{2} \hbar^3} \cdot \left(\frac{kT}{\pi} m_{dos,n}^* \right)^{3/2} \quad N_v = \frac{1}{\sqrt{2} \hbar^3} \cdot \left(\frac{kT}{\pi} m_{dos,p}^* \right)^{3/2}$$



$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-E_g / 2kT}$$

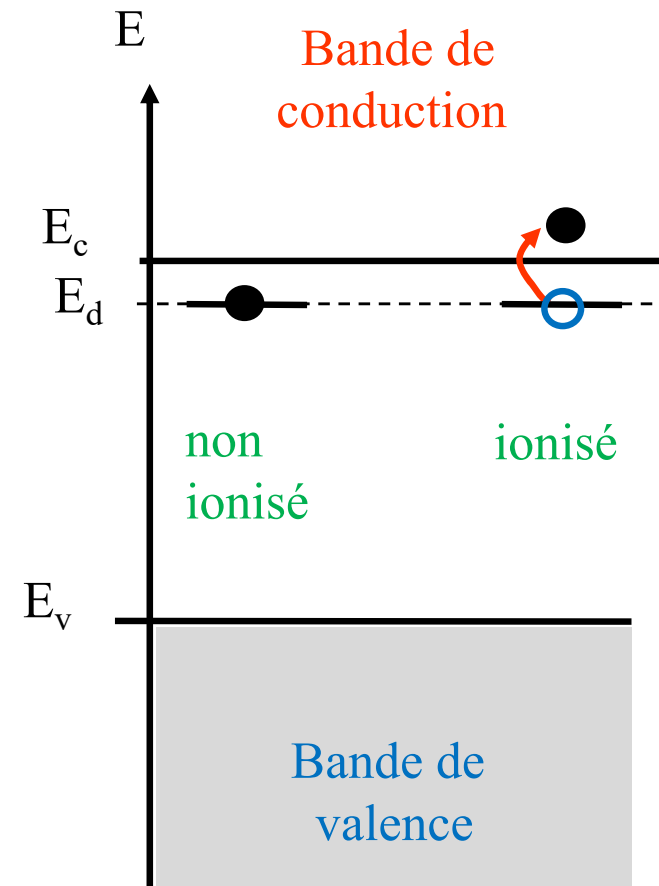
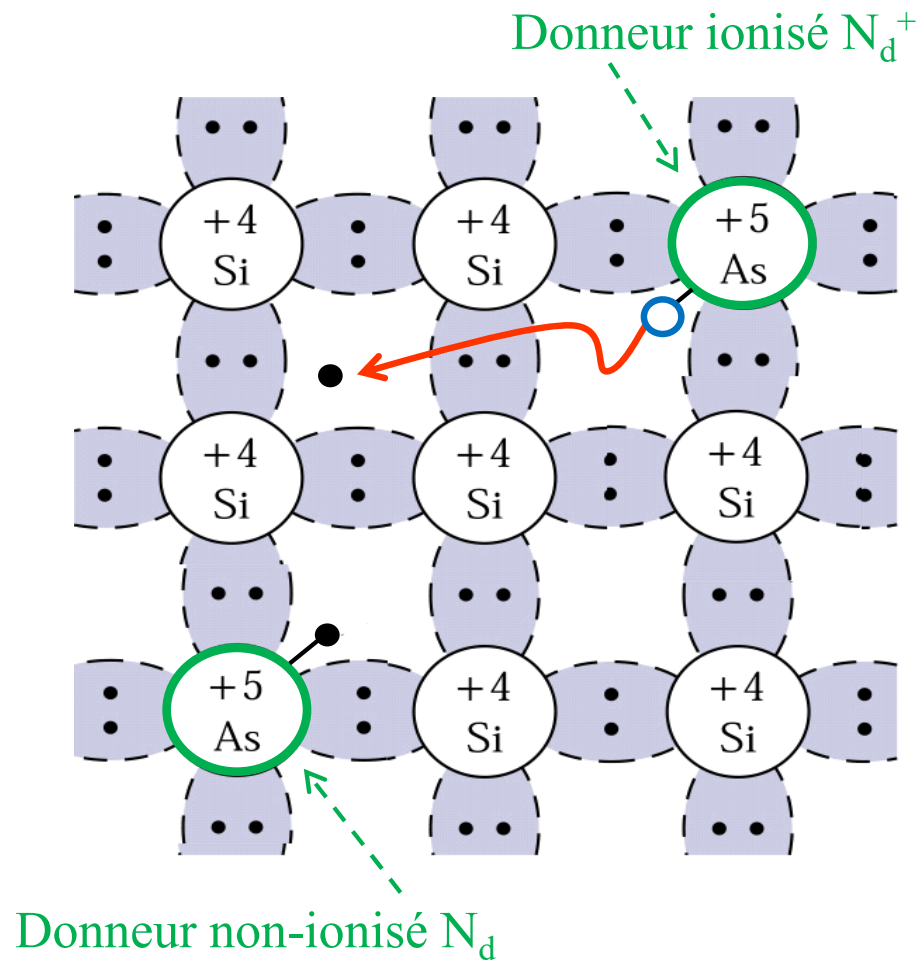
$$E_i = \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v} \cong \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

MATERIAL	CONDUCTION BAND EFFECTIVE DENSITY (N_c)	VALENCE BAND EFFECTIVE DENSITY (N_v)	INTRINSIC CARRIER CONCENTRATION ($n_i = p_i$)	E_g [eV]
Si (300 K)	$2.78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.84 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	1.12
Ge (300 K)	$1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$2.33 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	0.66
GaAs (300 K)	$4.45 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$7.72 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.84 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	1.42

J. Singh "Semiconductor Devices"

Dopage: Donneurs Accepteurs

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

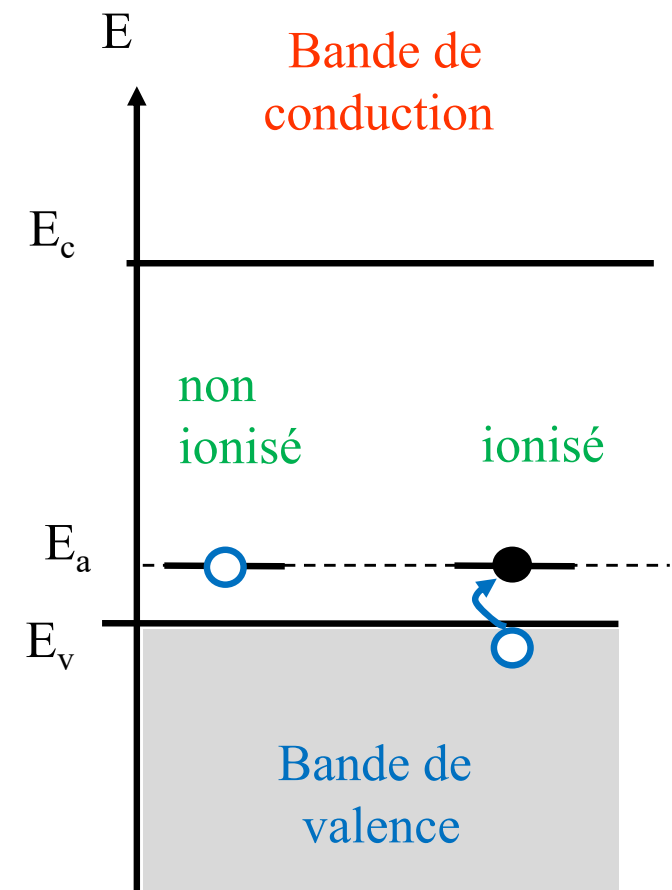
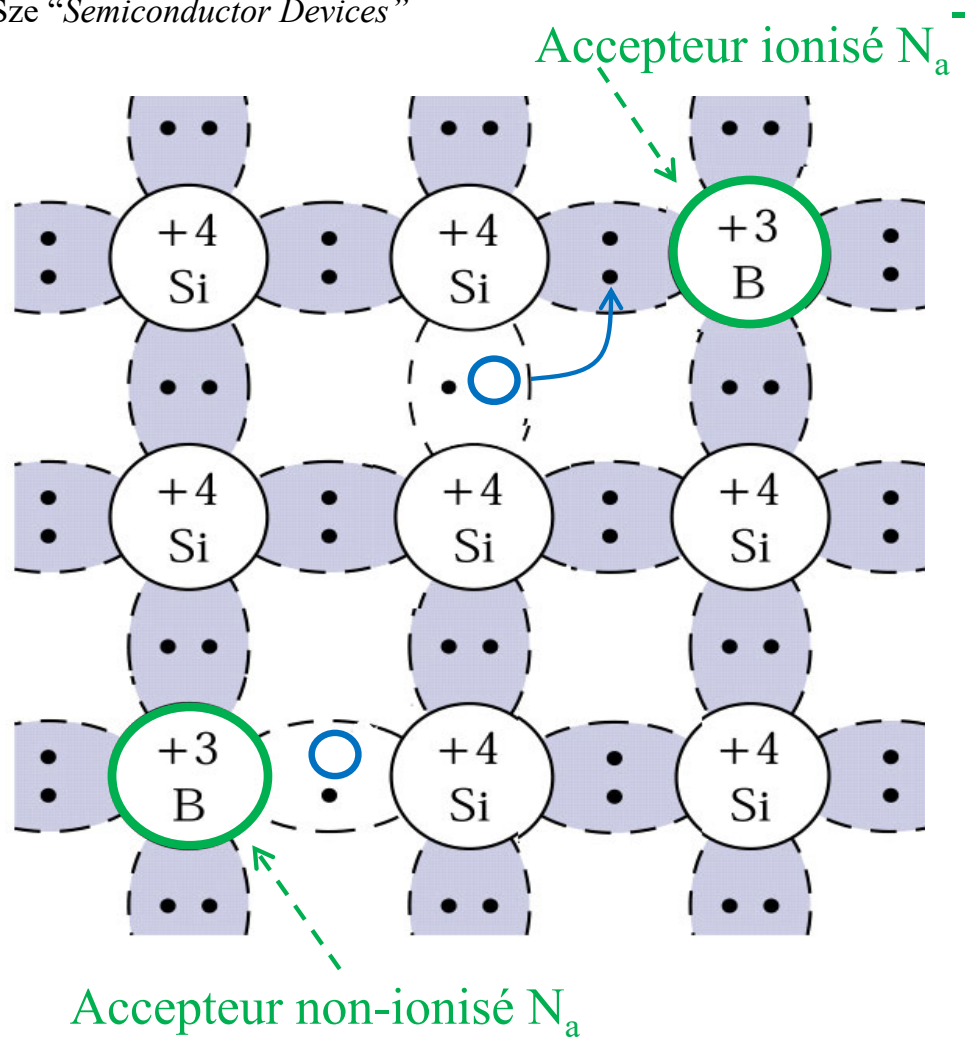


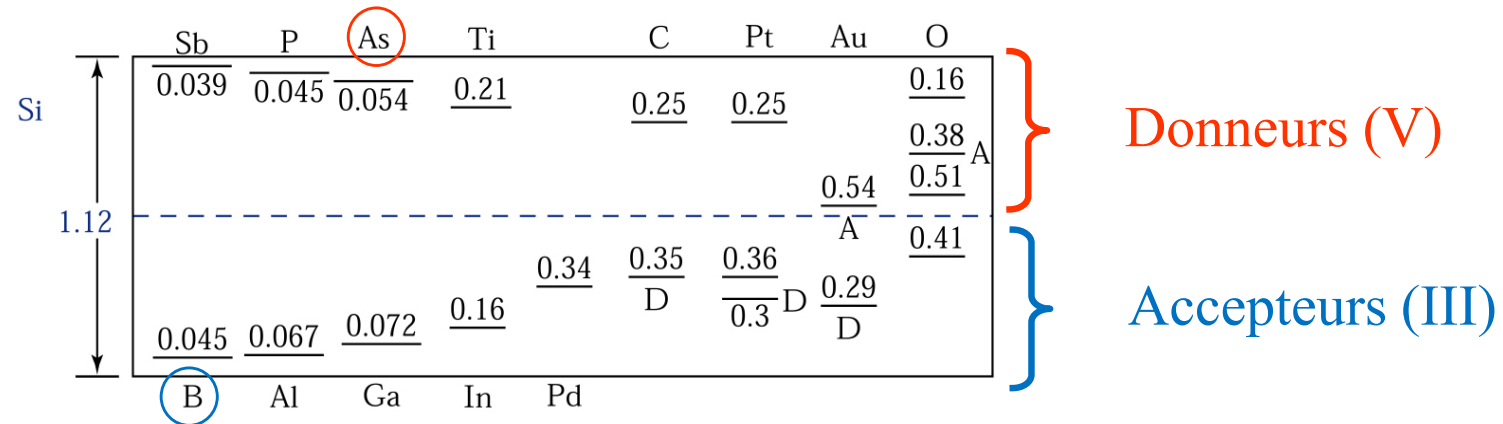
Tableau périodique des éléments

period	group 1*	2											13	14	15	16	17	18
	1a	IIa											IIIb IIIa	IVb IVa	Vb Va	VIb VIa	VIIb VIIa	VIIIb 0
1	1 H	2 He											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
2	3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
3	11 Na	12 Mg	3 IIIa** IIIb***	4 IVa IVb	5 Va Vb	6 VIa VIb	7 VIIa VIIb	8 VIIIa VIIIb	9 VIIIa VIIIb	10 VIIIa VIIIb	11 Ib	12 IIB	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
6	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
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 ****	105 ****	106 ****	107 ****	108 ****	109 ****	110 ****	111 ****	112 ****						
			6 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		
			7 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		

Encyclopaedia Britannica, Inc.

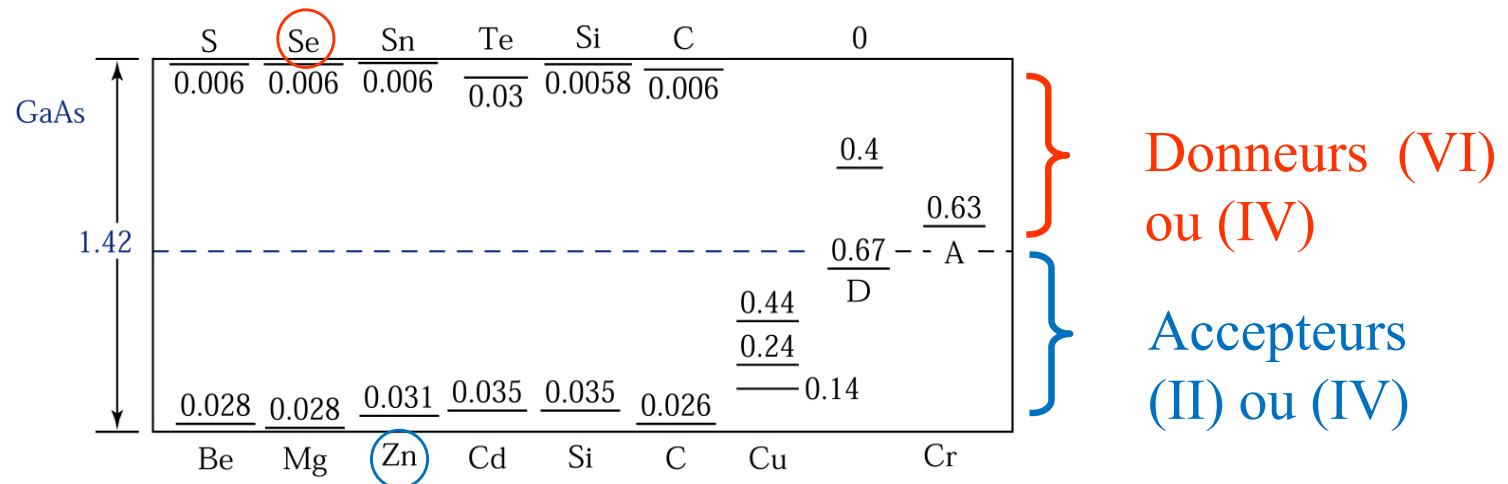
Choix du dopant

Silicium
IV



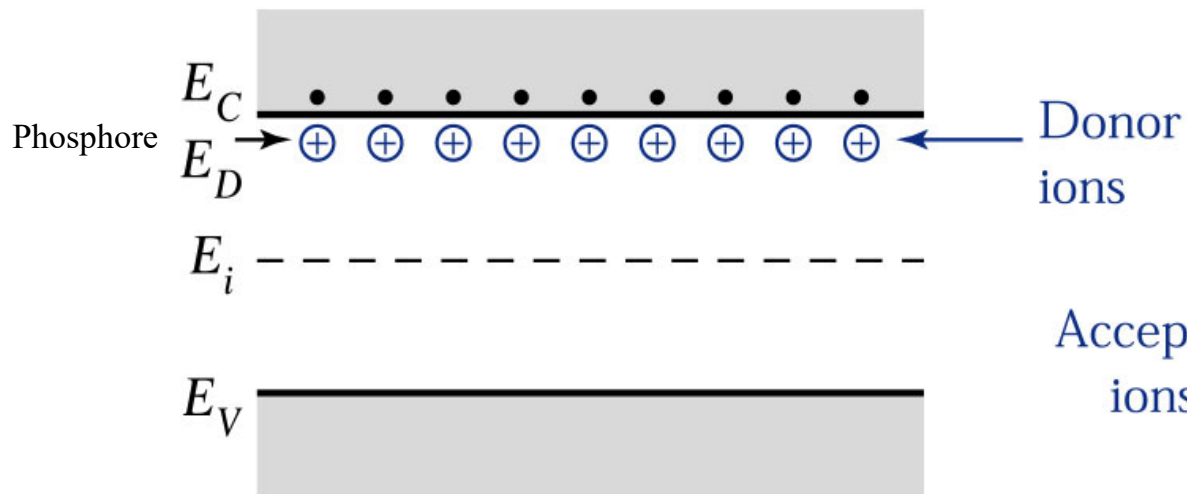
S. M. Sze "Semiconductor Devices"

GaAs
III-V

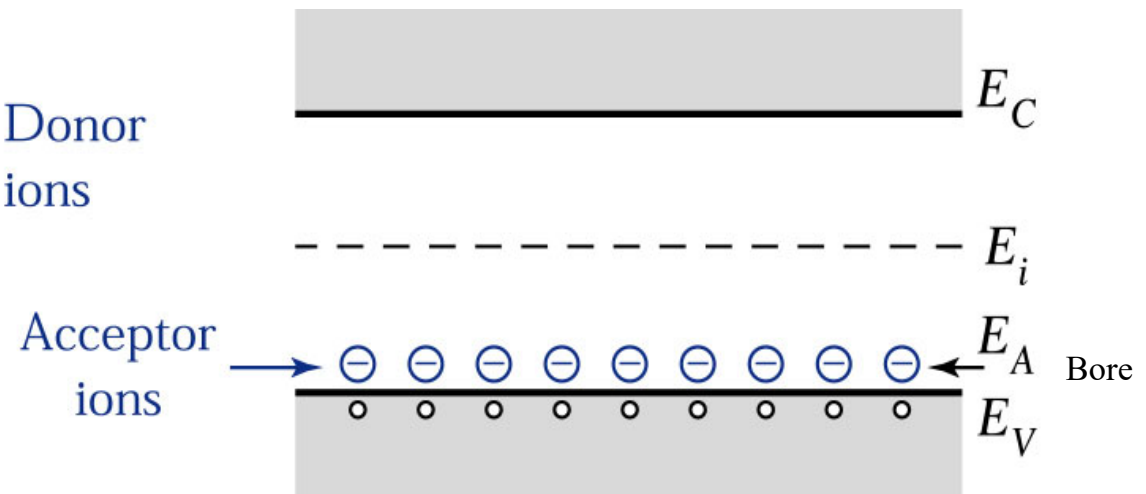


A température ambiante:
Ionisation complète

Type n



Type p



S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Probabilité pour un donneur d'avoir un électron:

$$F_D = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_D - E_F)/kT}}$$

Nombre de donneurs ionisés:
(N_D = densité d'atome donneurs)

$$N_D^+ = N_D (1 - F_D)$$

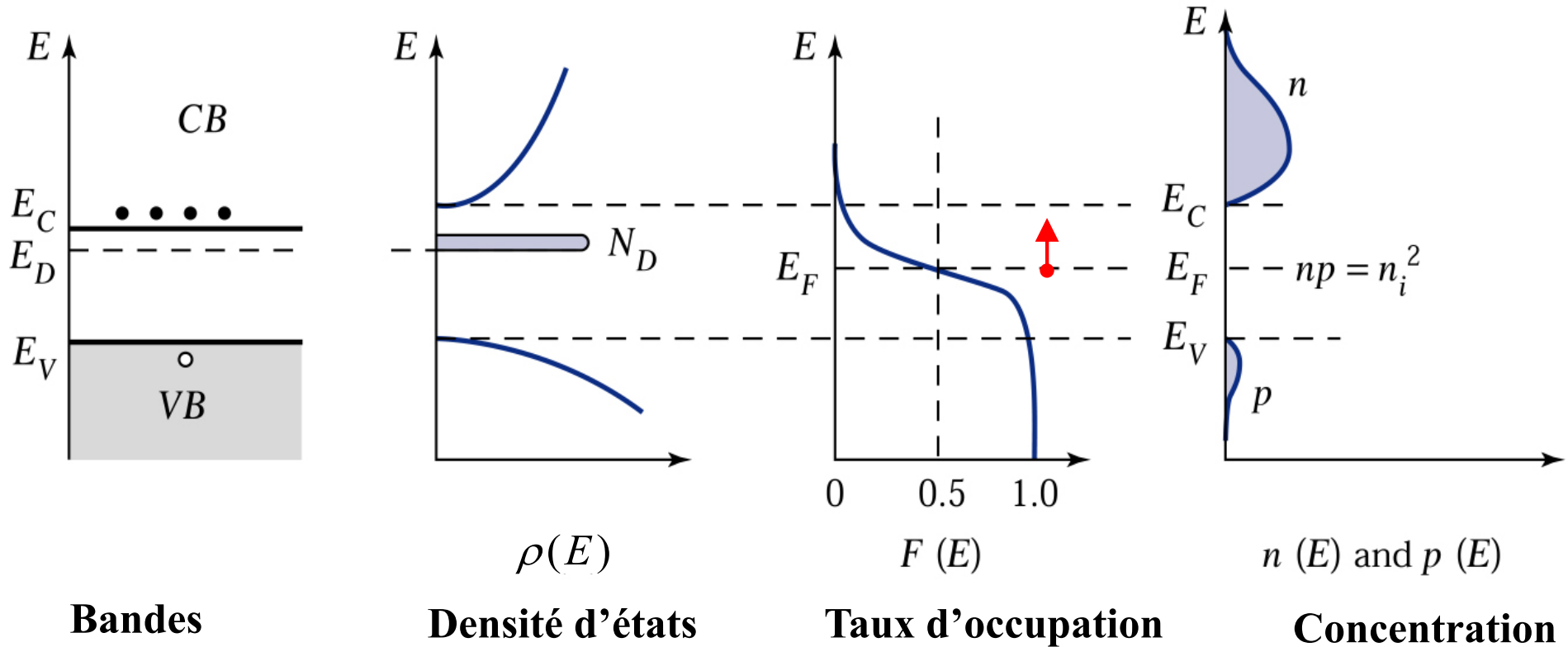
Probabilité pour un accepteur d'avoir un trou:

$$F_A = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} e^{(E_F - E_A)/kT}}$$

Nombre d'accepteurs ionisés:
(N_A = densité d'atome accepteurs)

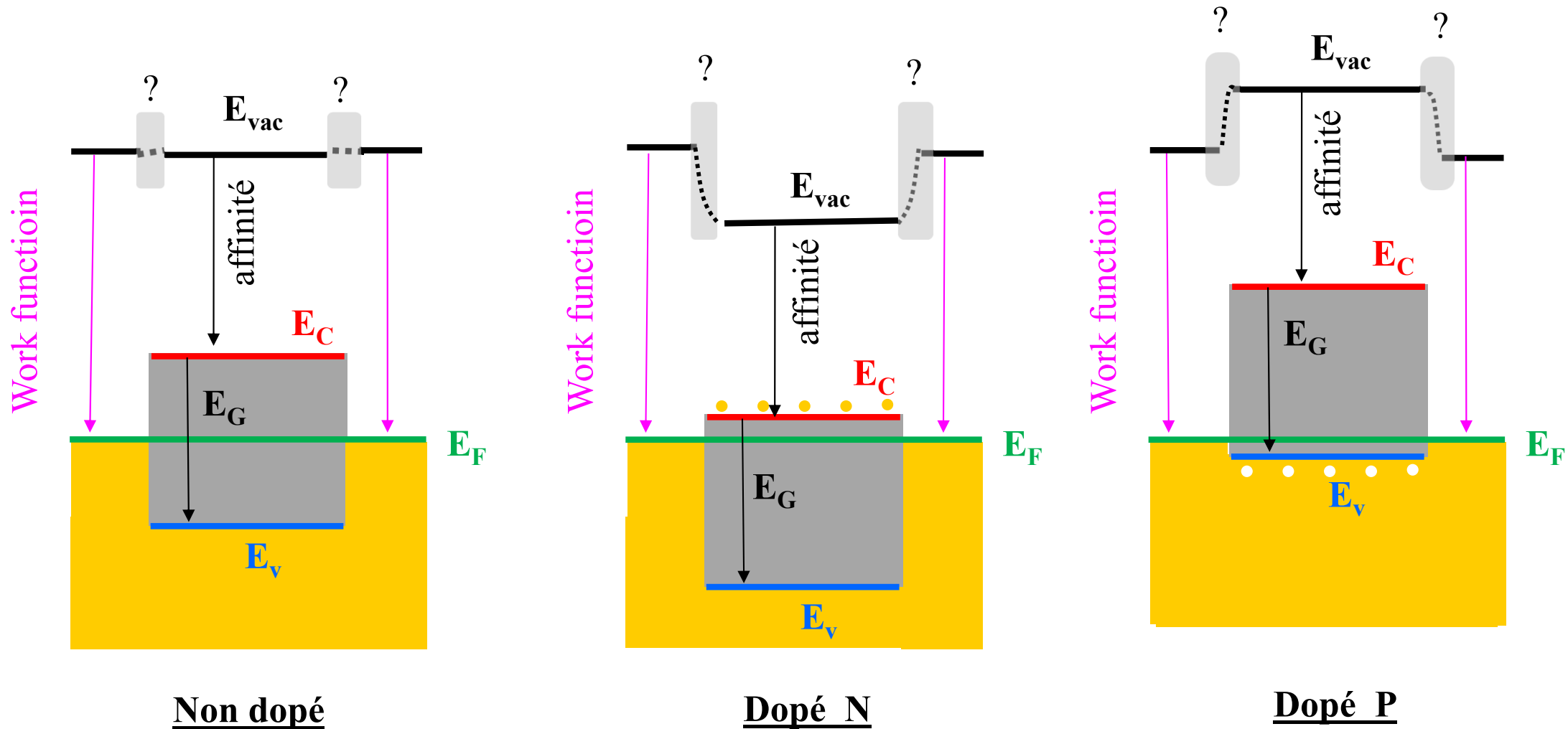
$$N_A^- = N_A (1 - F_A)$$

Concentrations de porteurs: semi-conducteur extrinsèque (« dopé »)



$$\text{Concentration} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Spin}}}{2} \cdot \int \rho(E) \cdot F(E) dE$$

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Concentration de porteurs (2): semi-conducteur extrinsèque

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE$$

$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE$$

!!! Il n'y a formellement pas de différence
entre le cas extrinsèque et le cas intrinsèque !!!

Le dopage n'influence que la position de l'énergie de Fermi E_F .

Ce niveau est déterminé en considérant la condition de neutralité

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE$$

$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE$$

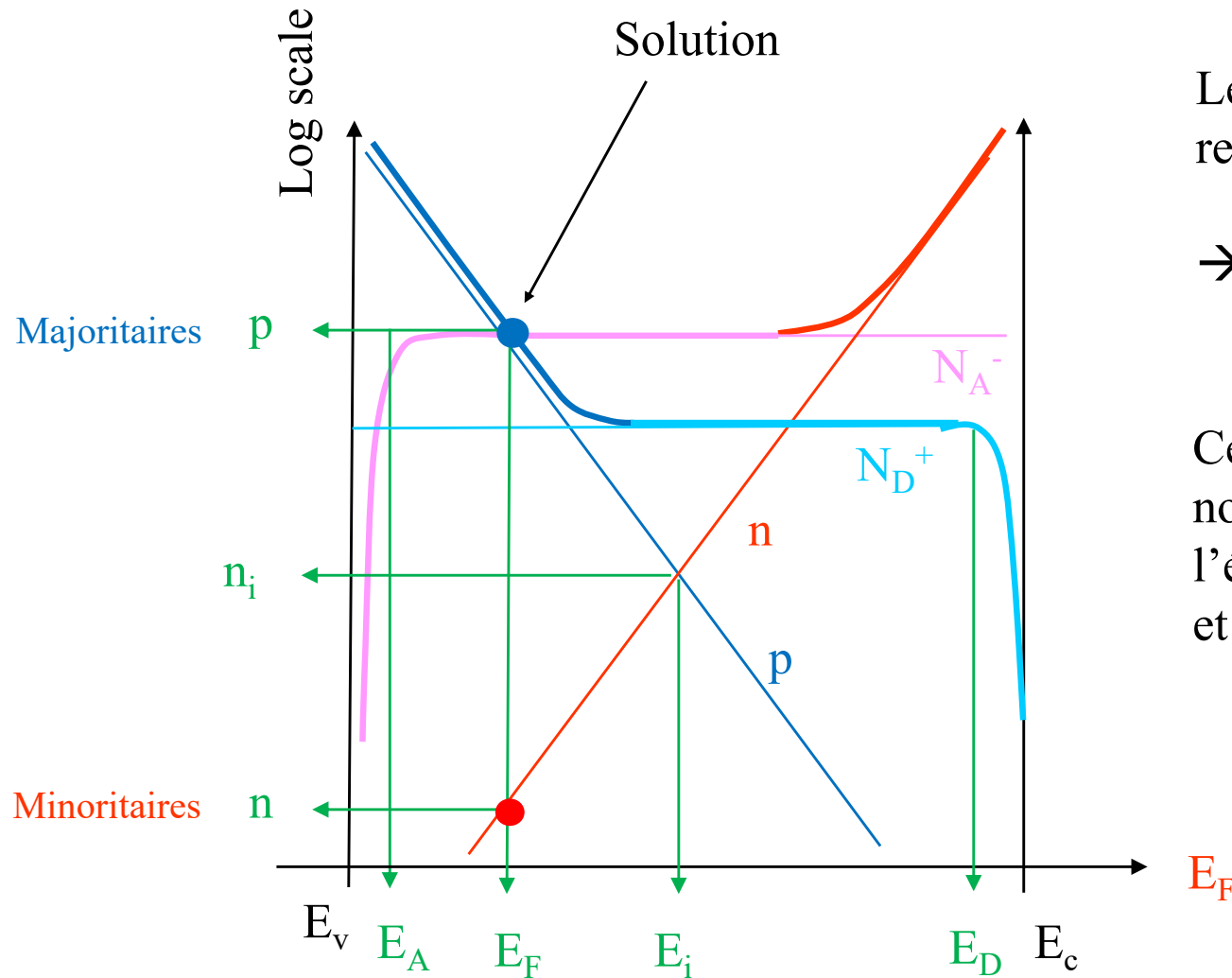
$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F) / kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v) / kT}$$

$$n \cdot p = N_c N_v e^{-E_g / kT} \equiv n_i^2$$

Loi d'action de masse

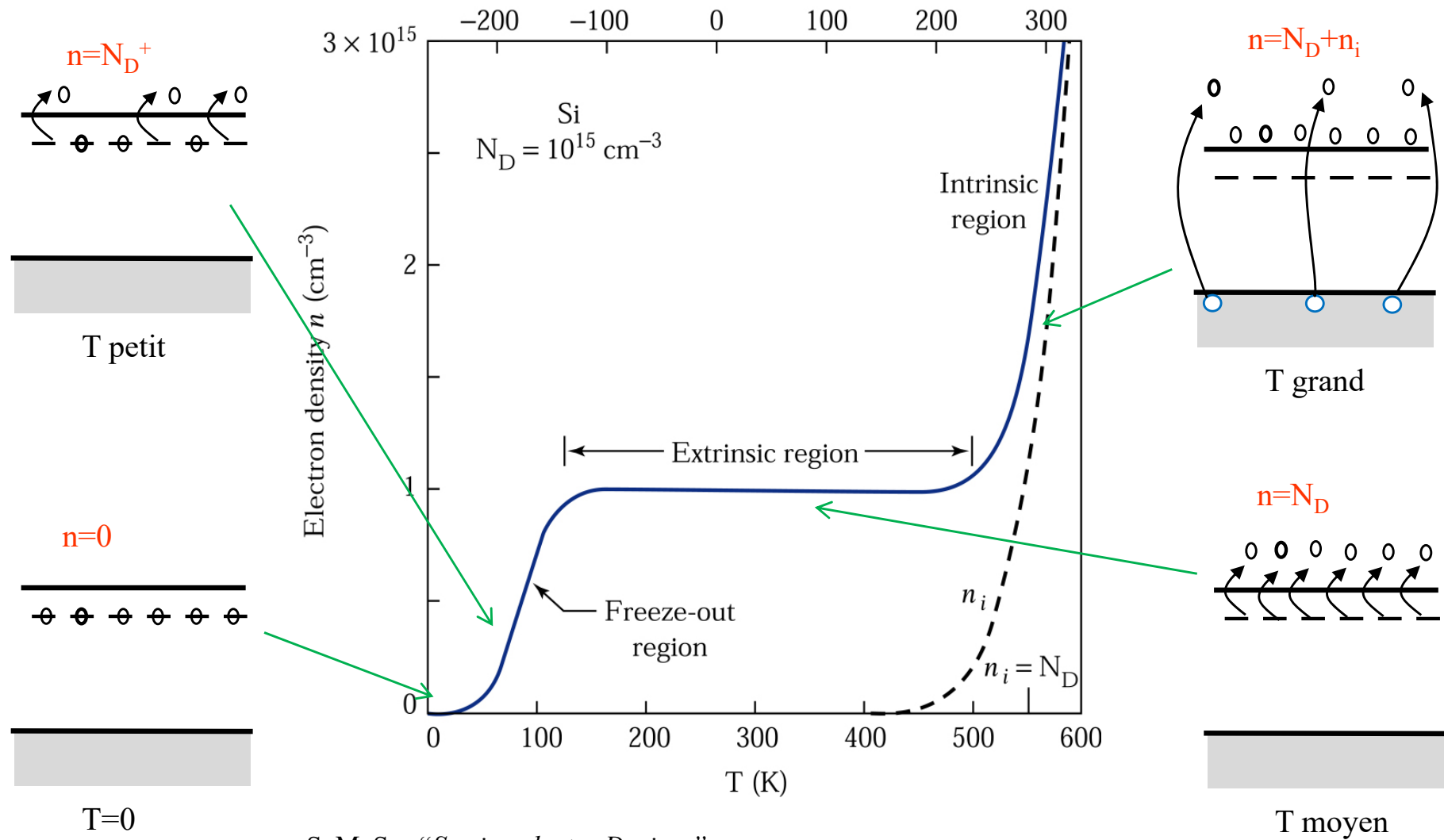
Semi-conducteurs extrinsèques: graphique de Shockley condition de neutralité et niveau de Fermi



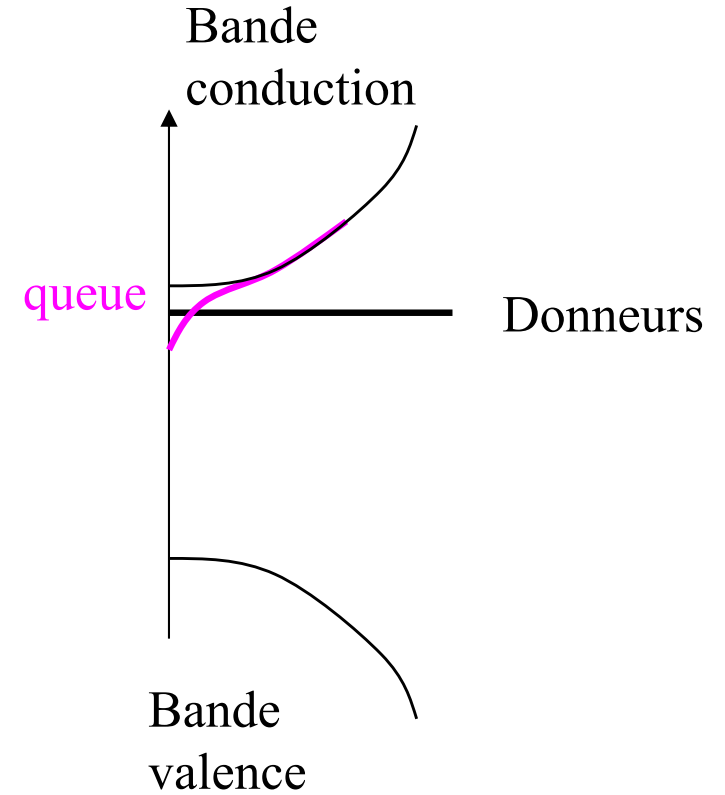
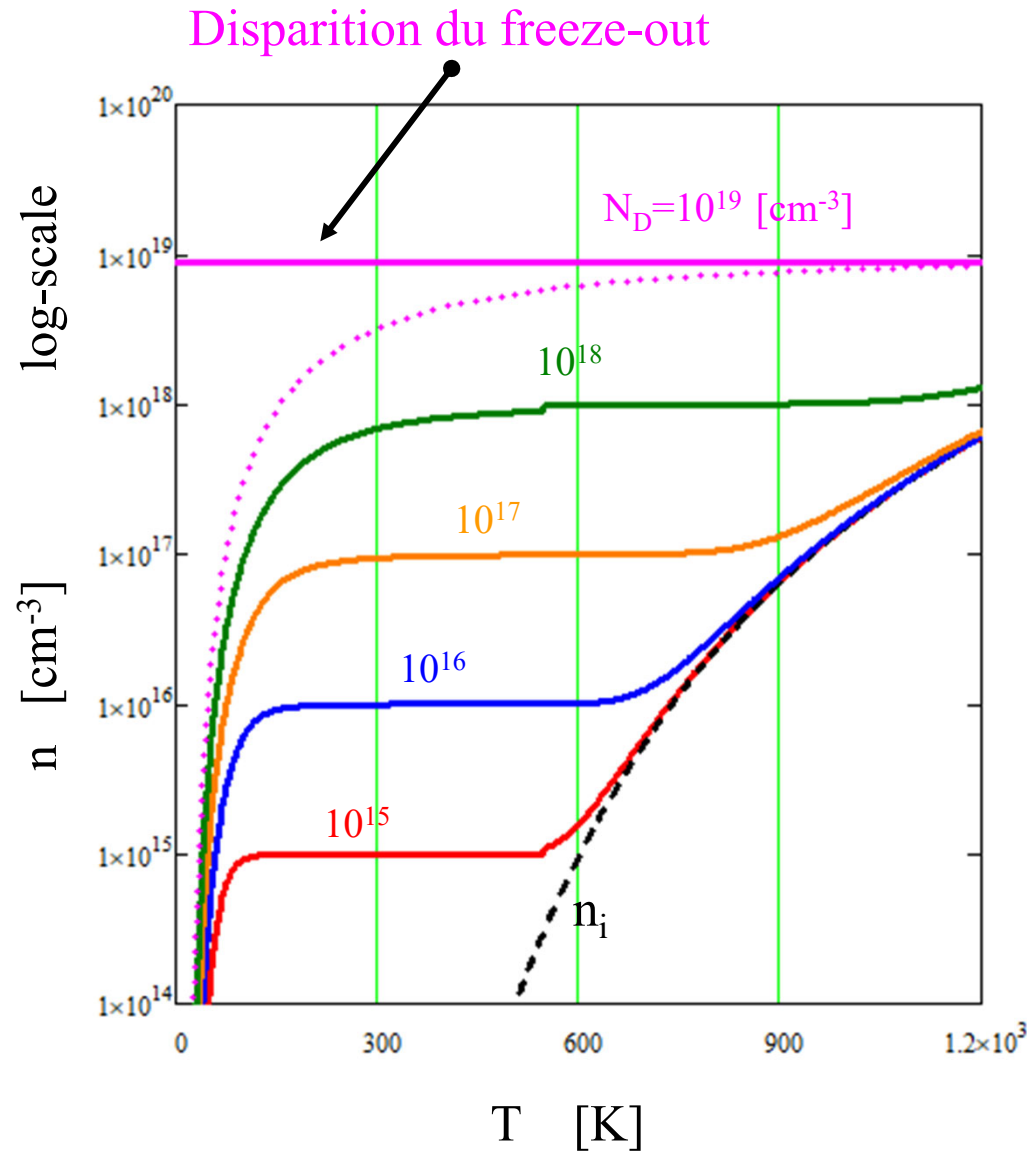
Le semi-conducteur dopé
reste neutre:

$$\rightarrow \underline{n + N_A^- = p + N_D^+}$$

Cette condition de neutralité
nous donne la valeur de:
l'énergie de Fermi E_F
et des concentrations n et p

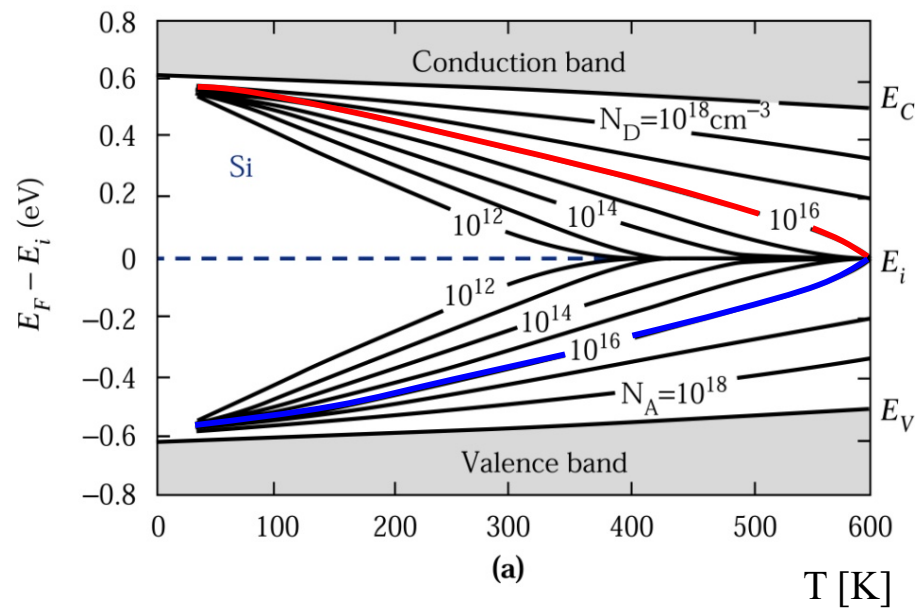


S. M. Sze "Semiconductor Devices"

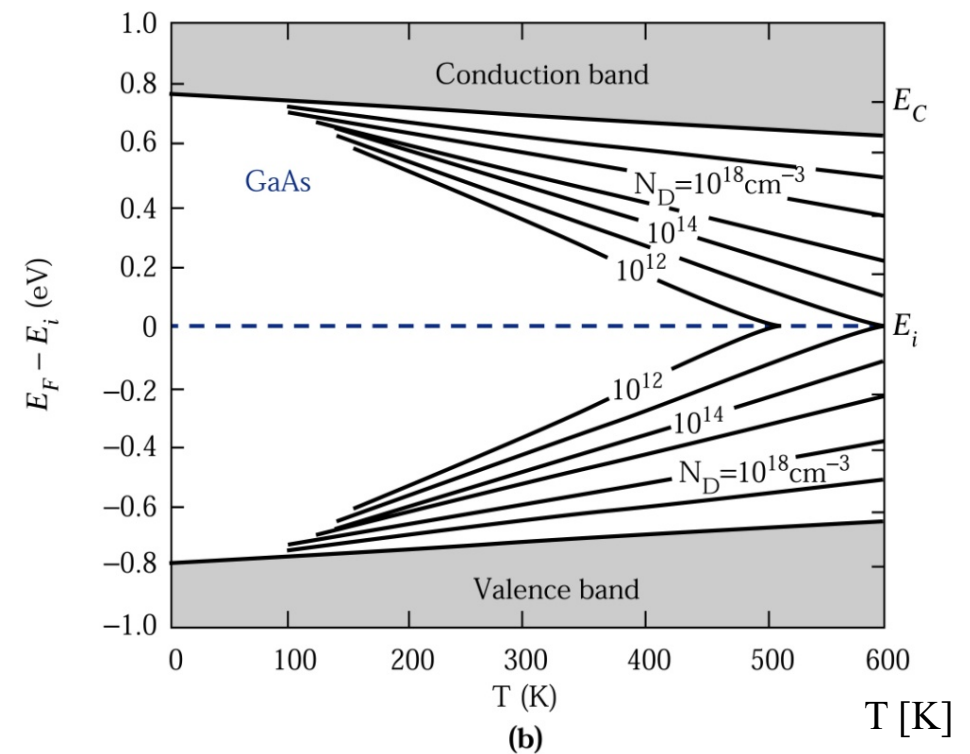


**A très fort dopage ($>10^{19}$ cm⁻³),
les donneurs se touchent et
forment une queue de bande**

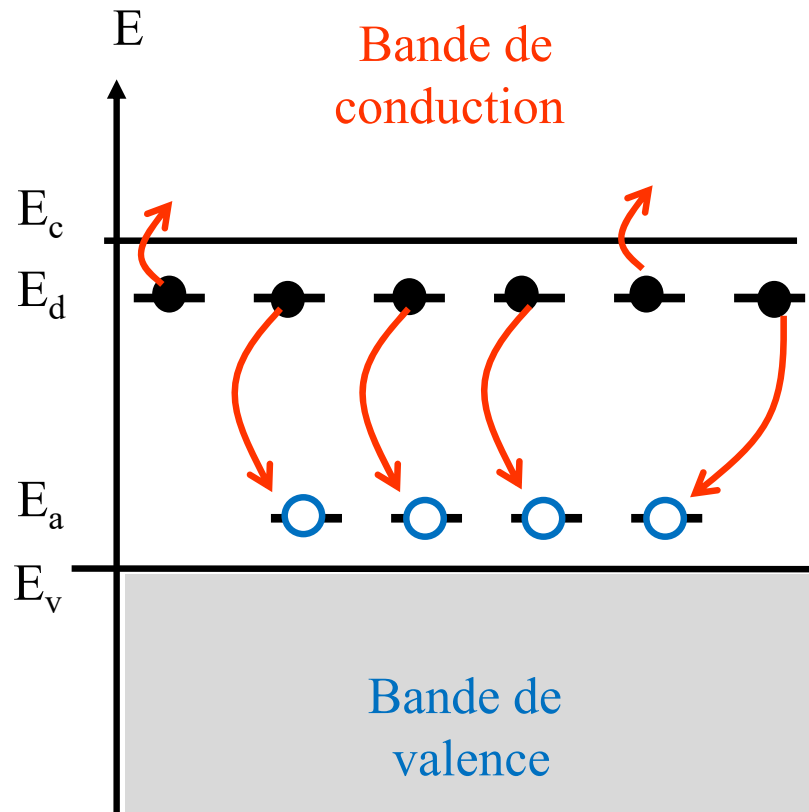
Silicium



GaAs

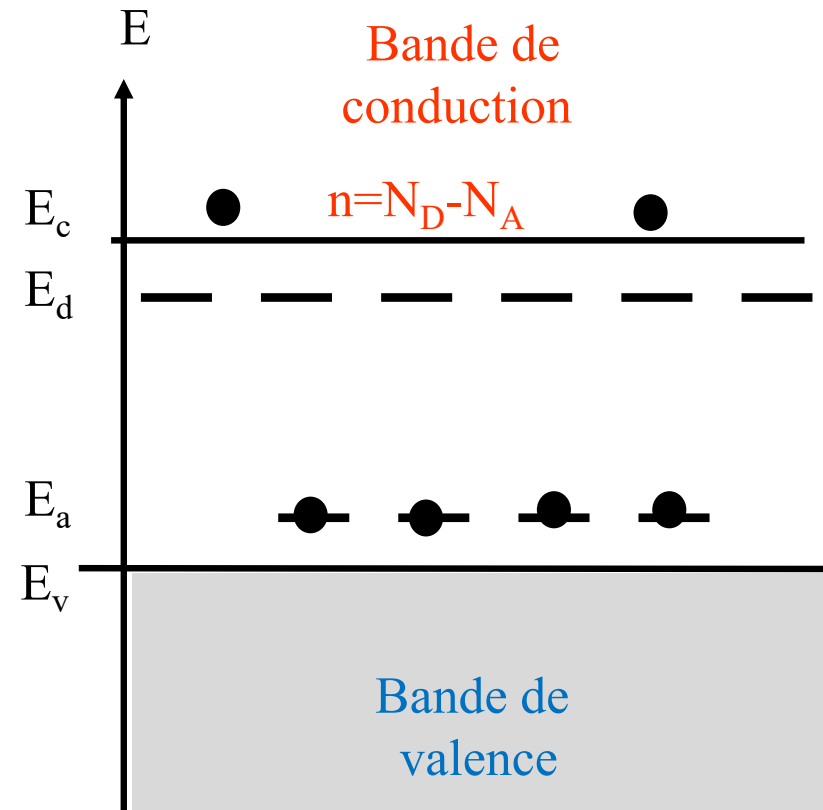
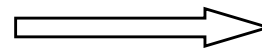


S. M. Sze "Semiconductor Devices"



État de départ

Ionisation complète

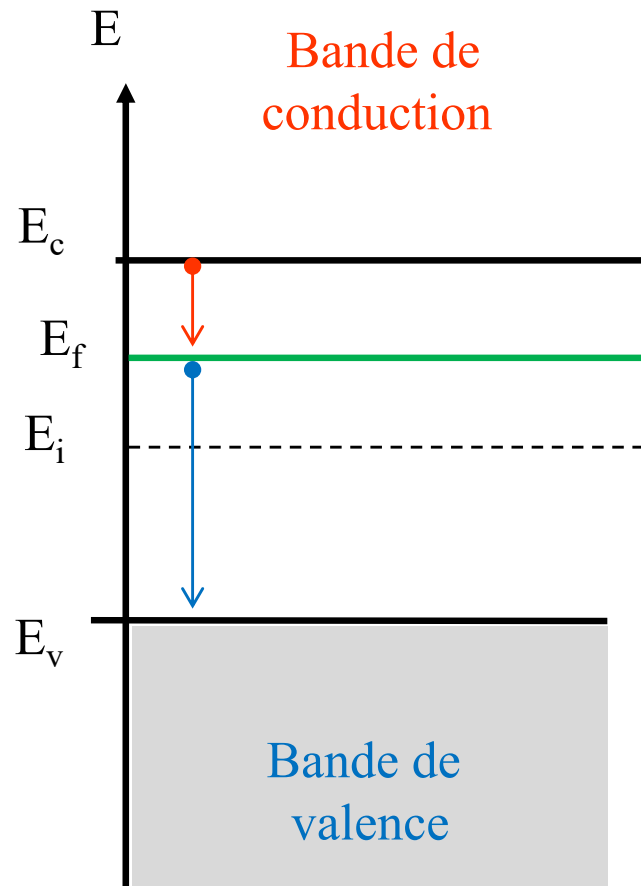


État d'équilibre

Par référence aux
densités effectives d'états

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$



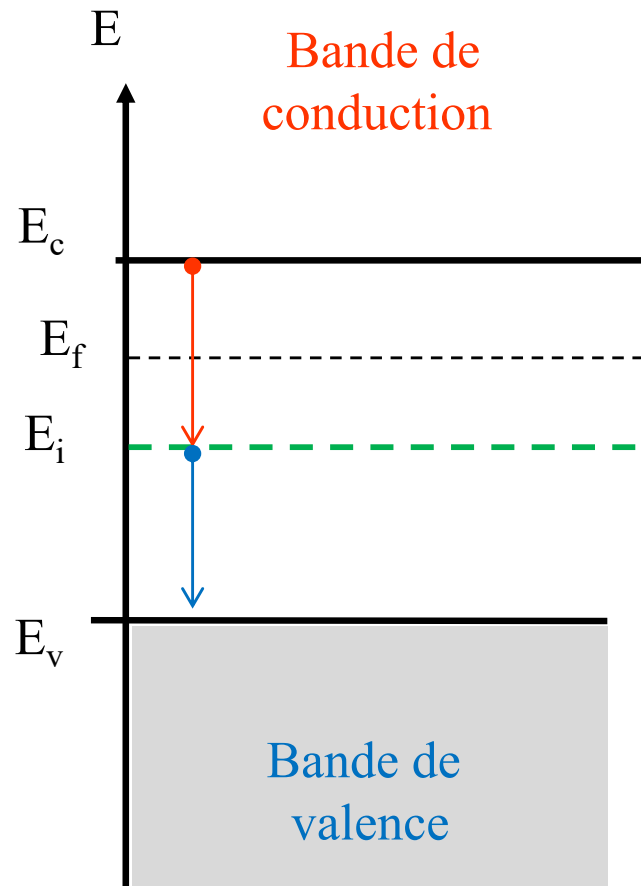
Par référence aux
densités effectives d'états

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$n_i \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_i)/kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

$$p_i = n_i \cong N_v \cdot e^{-(E_i - E_v)/kT}$$



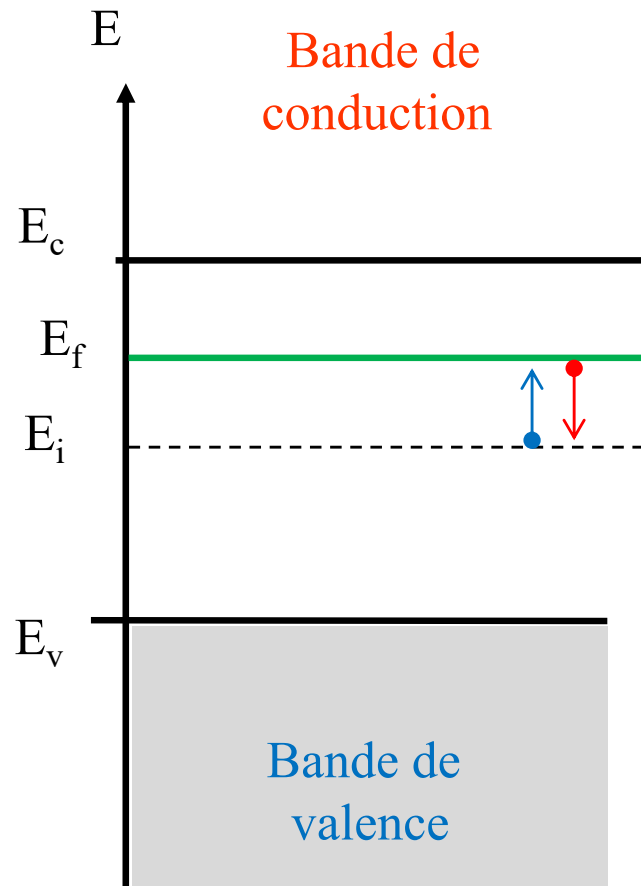
Par référence aux densités effectives d'états

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$n_i \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_i)/kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

$$p_i = n_i \cong N_v \cdot e^{-(E_i - E_v)/kT}$$



Par référence aux caractéristiques intrinsèques

$$n \cong n_i \cdot e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p \cong n_i \cdot e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE$$

$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE$$

$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

$$n \cong n_i \cdot e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p \cong n_i \cdot e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$n \cdot p = N_c N_v e^{-E_g/kT} \equiv n_i^2$$

Loi d'action de masse



En supposant « Boltzmann » et « ionisation complète »:

Type intrinsèque:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g / 2kT}$$

$$E_i \cong \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v} \cong \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

Silicium, $T = 300K$

$$\rightarrow n_i \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rightarrow E_i \cong \frac{E_c + E_v}{2}$$

Type n:

$$N_D \gg N_A$$

$$n = N_D = n_i \cdot e^{E_F - E_i / kT}$$

$$p = n_i^2 / N_D$$

Loi d'action de masse
pour les minoritaires

Type p:

$$N_A \gg N_D$$

$$p = N_A = n_i \cdot e^{E_i - E_F / kT}$$

$$n = n_i^2 / N_A$$



En supposant « Boltzmann » et « ionisation complète »:

Type intrinsèque:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g / 2kT}$$

$$E_i \cong \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v} \cong \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

Silicium, $T = 300K$

$$\rightarrow n_i \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rightarrow E_i \cong \frac{E_c + E_v}{2}$$

Type n:

$$N_D \gg N_A$$

$$n = N_D = n_i \cdot e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$E_F - E_i = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$$

$$p = n_i^2 / N_D$$

Loi d'action de masse
pour les minoritaires

Type p:

$$N_A \gg N_D$$

$$p = N_A = n_i \cdot e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$E_i - E_F = kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

$$n = n_i^2 / N_A$$



(3)	(2)	(1) $N_3=1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$	Bore
		$N_2=2 \times 10^{16} / \text{cm}^3$	Phosphore
		$N_1=6.5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$	Bore

Exercice E2.2: Niveaux de Fermi et température



- 1) *Trouvez le niveau de Fermi d'un silicium dopé avec 10^{16} cm^{-3} atomes de phosphore à 300 K .*
- 2) *Le même matériau est chauffé à 600 K.
Calculez la concentration de porteurs intrinsèques à cette température.
Quel est maintenant le niveau de Fermi ?
Supposez le bangap et les masses effectives constants en température .*
- 3) *Si l'échantillon est refroidi à la température de l'azote liquide (77 K),
quelle hypothèse faut-il reconsidérer ?
(Pour information, l'énergie d'ionisation du phosphore est $E_D = E_C - 0.045 \text{ eV}$).*