

# COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

## II) Semi-conducteurs à l'équilibre

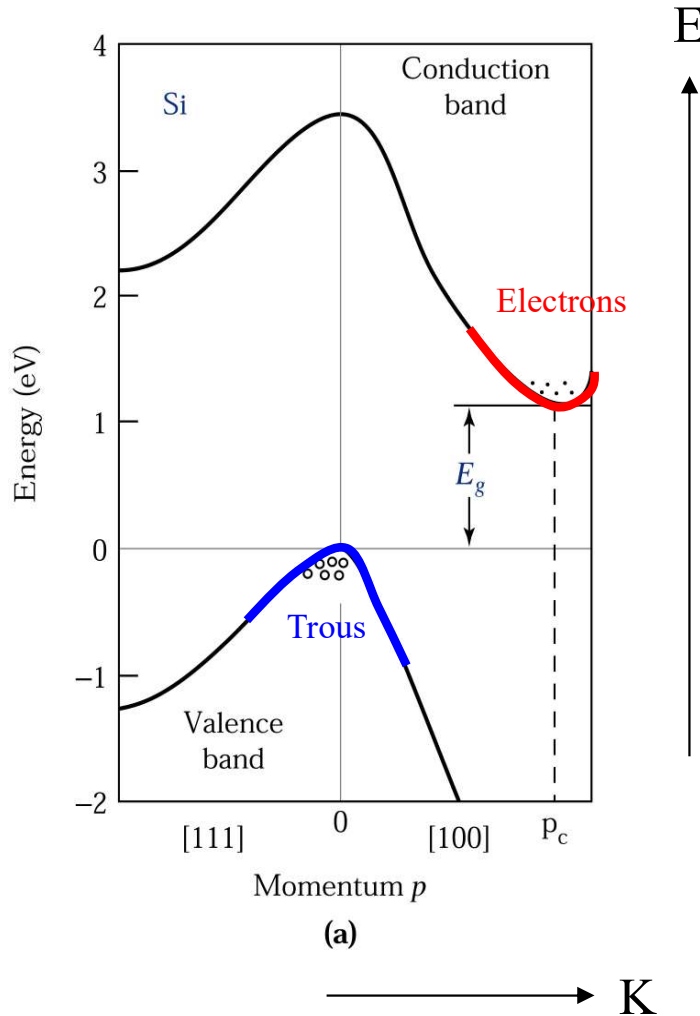
P.A. Besse

EPFL

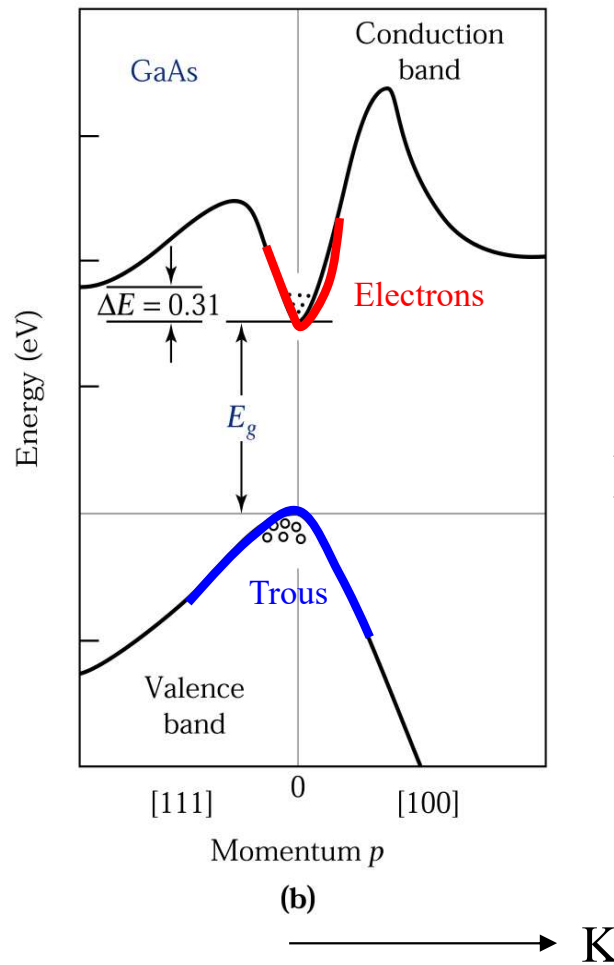
Concepts  
d'électrons libres  
et  
de trous

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

## Indirect (Si)

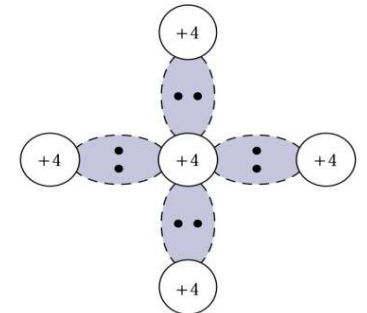


## Direct (GaAs)



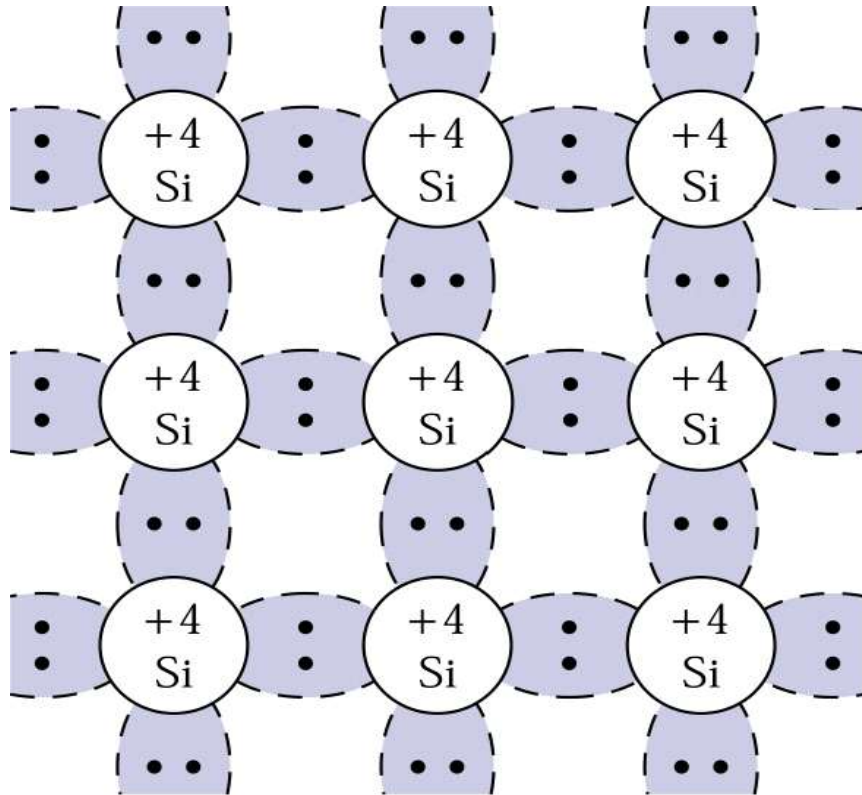
Bande de conduction  
basée sur des états libres  
(anti-liants)

Bande de valence  
basée sur des  
liaisons tétraédriques

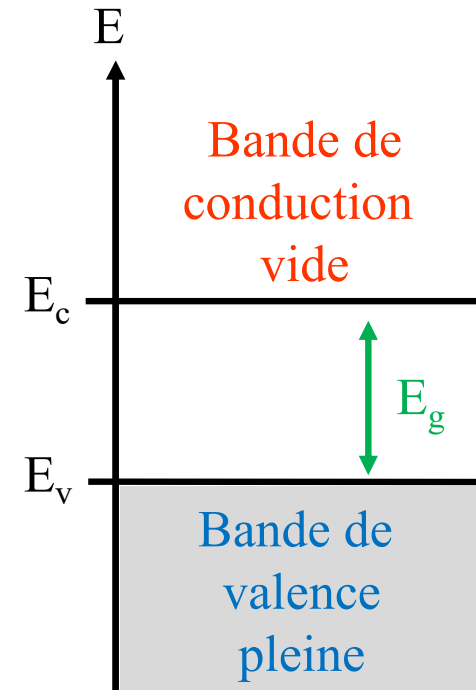


# Semi-conducteur intrinsèque (« pur ») à $T=0K$

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



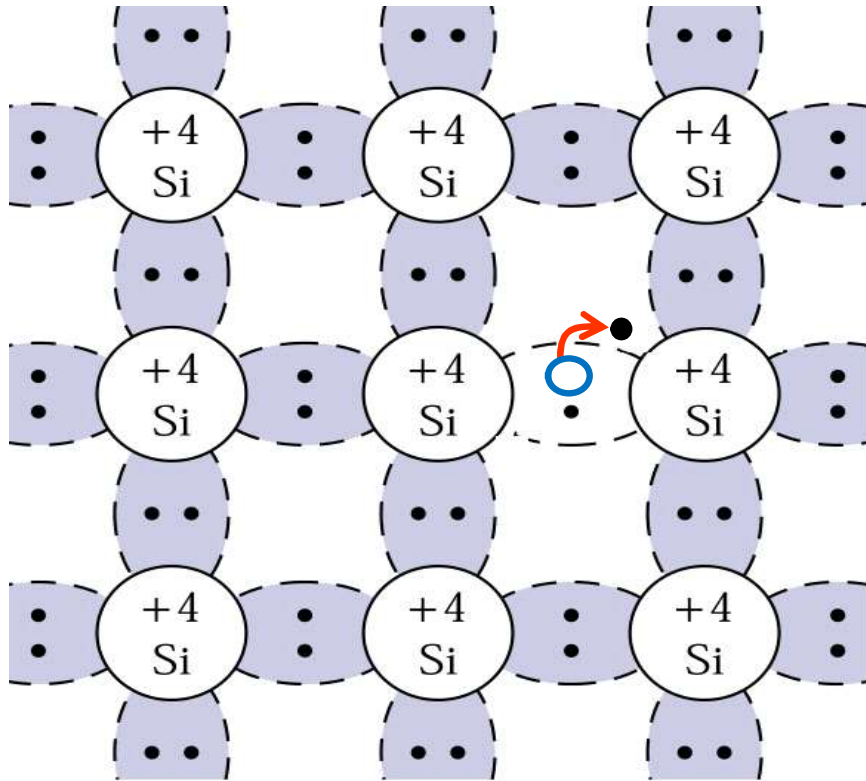
S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Pas de déplacement possible → isolant

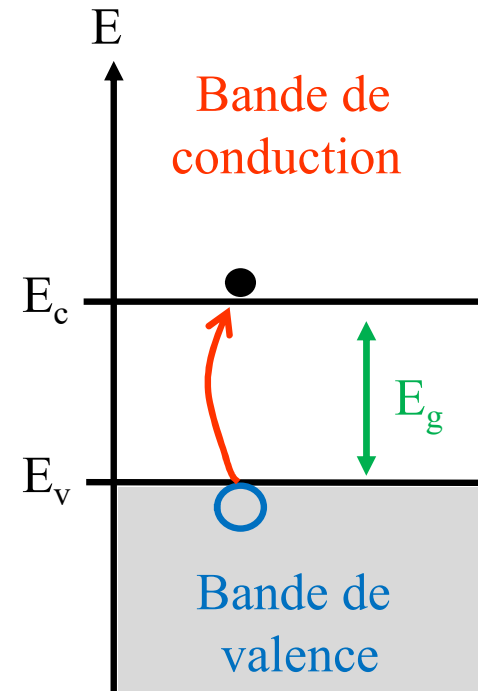
# Semi-conducteur intrinsèque: génération thermique

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



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

Génération d'une paire  
électron + trou

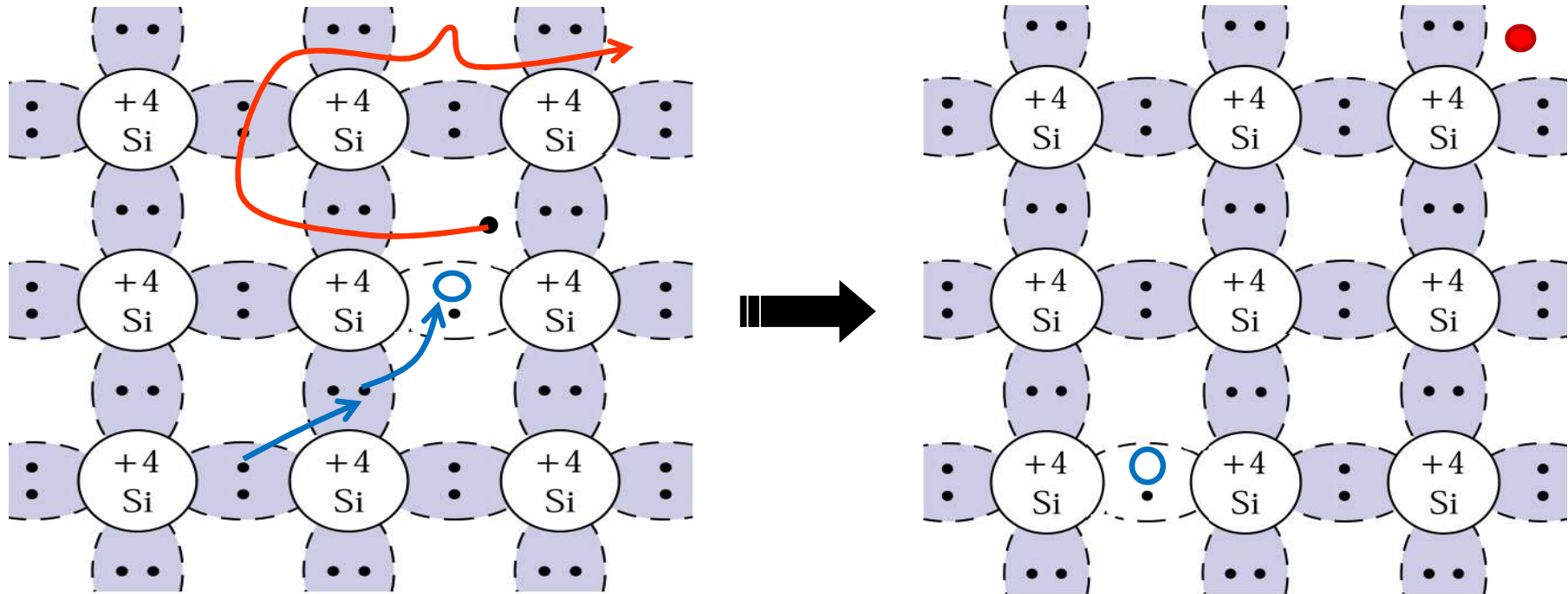


**L'électron libre ainsi que le trou se déplacent indépendamment**

La zone avec l'électron libre est chargée négativement

La zone avec le trou est chargée positivement

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



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

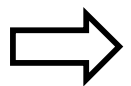
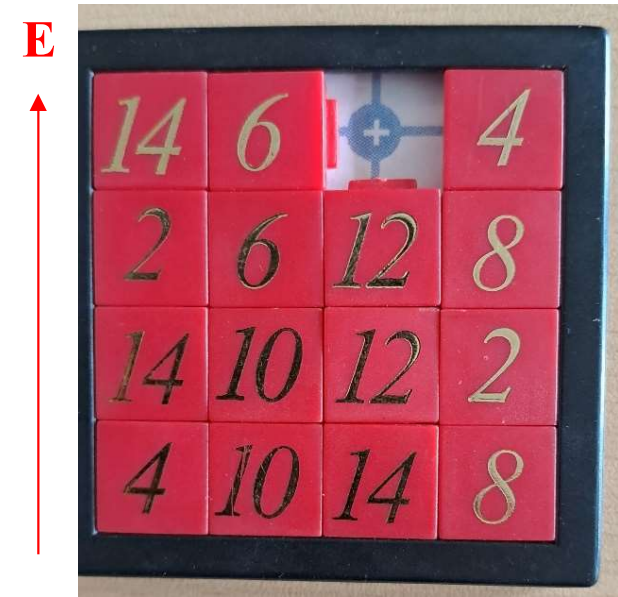
Bande de valence vide



Bande de valence pleine



Bande de valence avec un trou



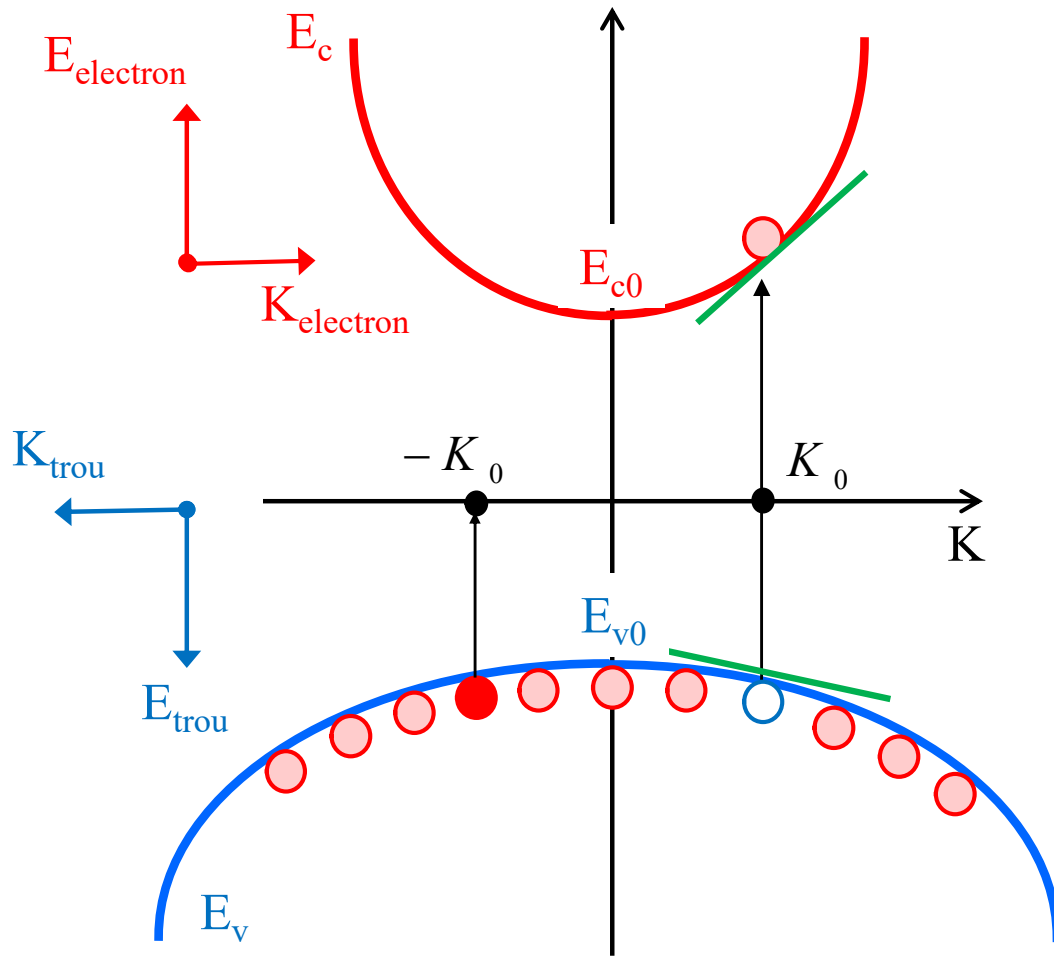
Charge positive du trou = charge du proton non-neutralisée par un électron



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

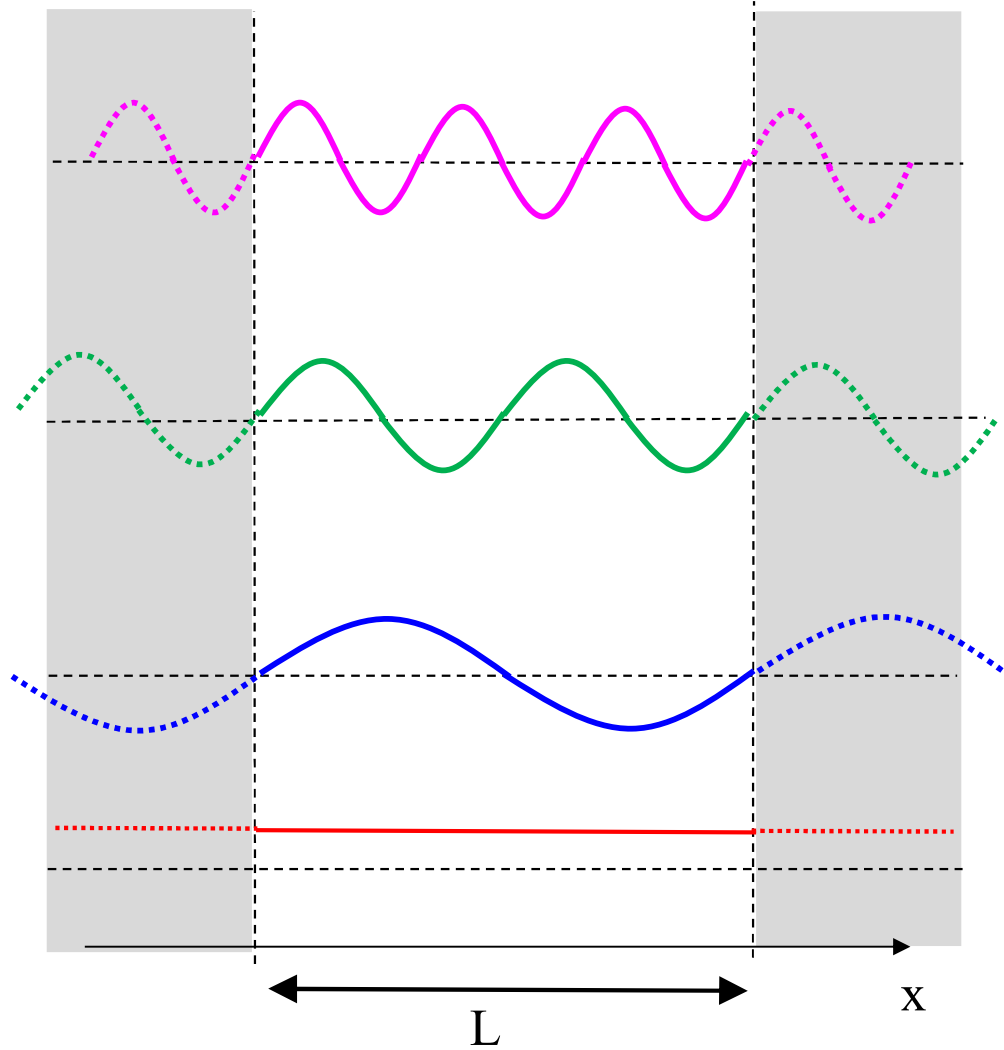
Calcul  
de la densité d'états,  
du taux d'occupation  
et des concentrations de porteurs

# 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  $F(E)$  )

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

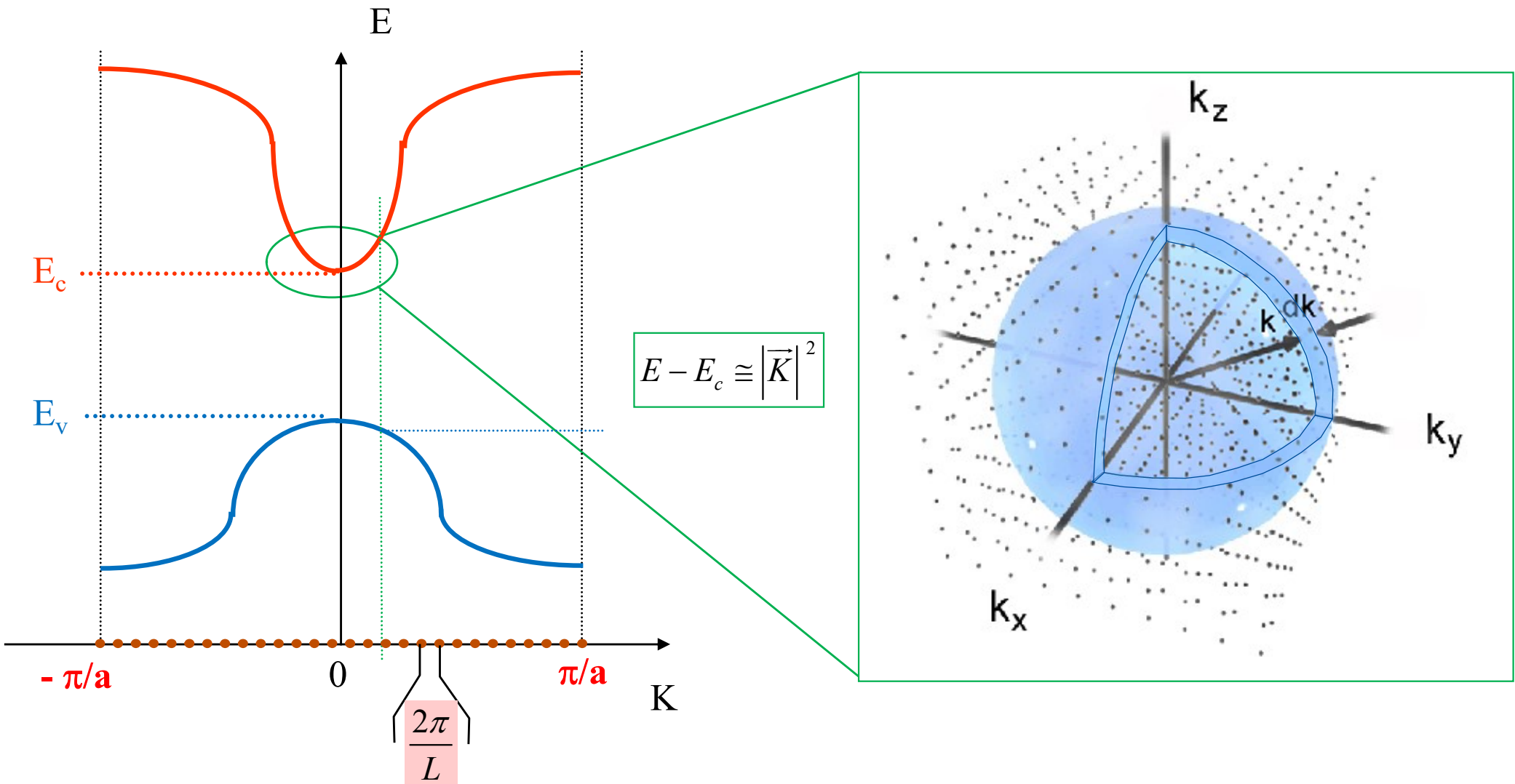


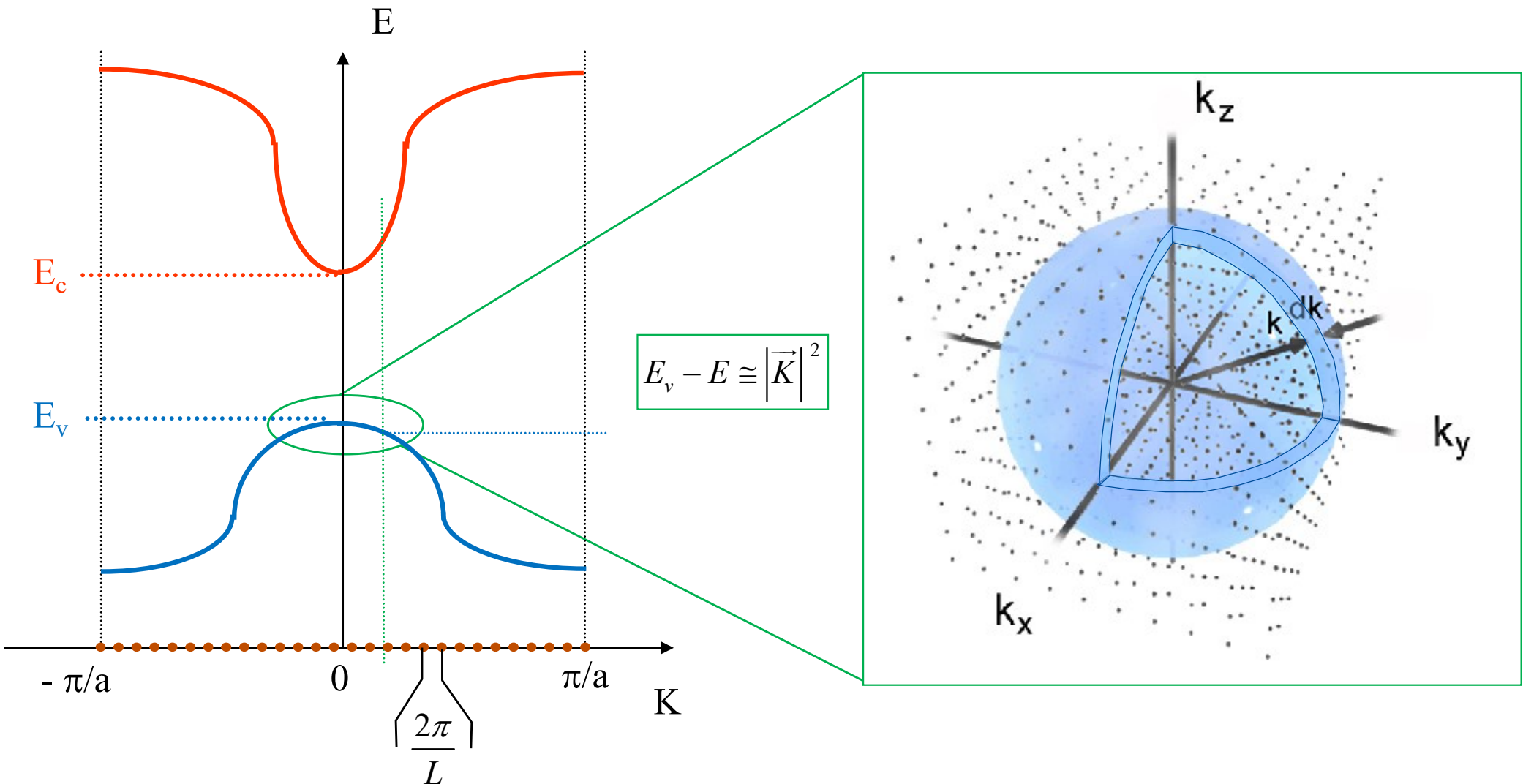
Fonctions périodiques

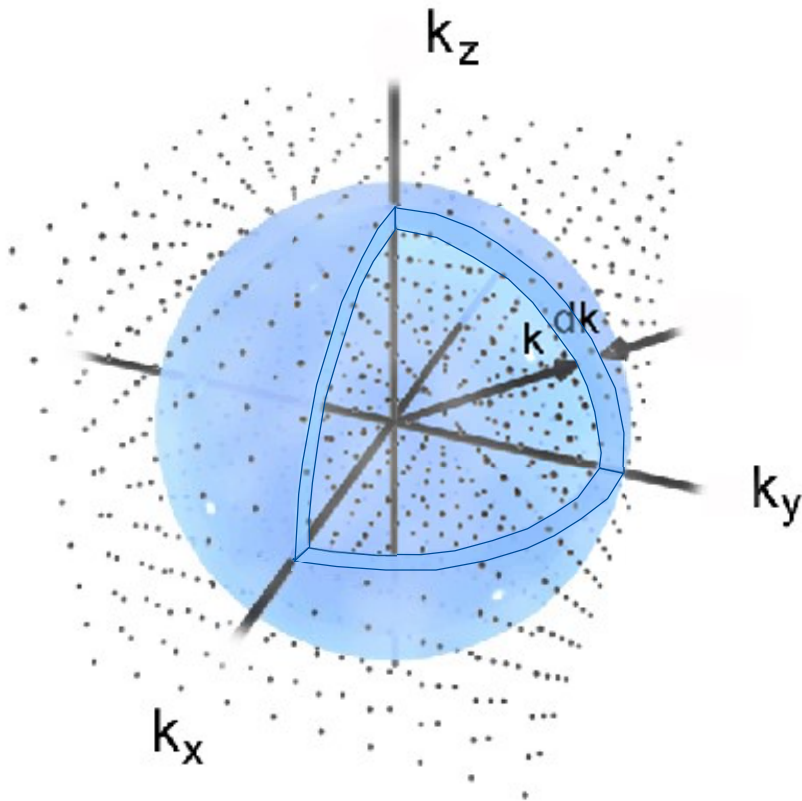
$$n \cdot \lambda_n = L$$



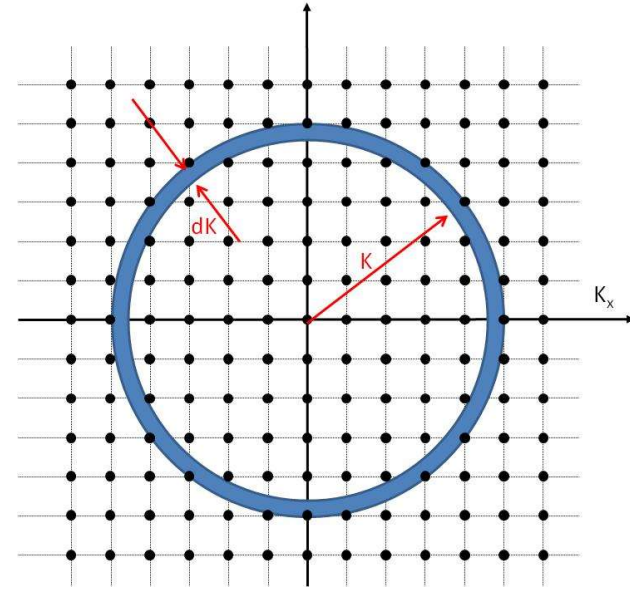
$$K_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = n \cdot \frac{2\pi}{L}$$







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



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

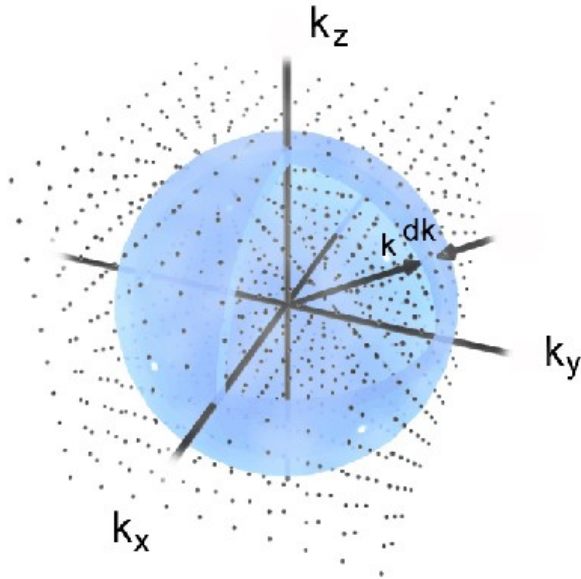
La densité d'états avec la même norme de K:

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

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

Cas anisotrope avec plusieurs vallées:

Bande de conduction:

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

Bande de valence:

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

Silicium:

6 vallées      ellipsoïdes

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

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

J. Singh “Semiconductor Devices”

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

For Si:  $m^*_{dos}$ : To be used in calculating density of states, position of Fermi level  
 $m^*_\sigma$ : 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) = Boltzmann si E élevé

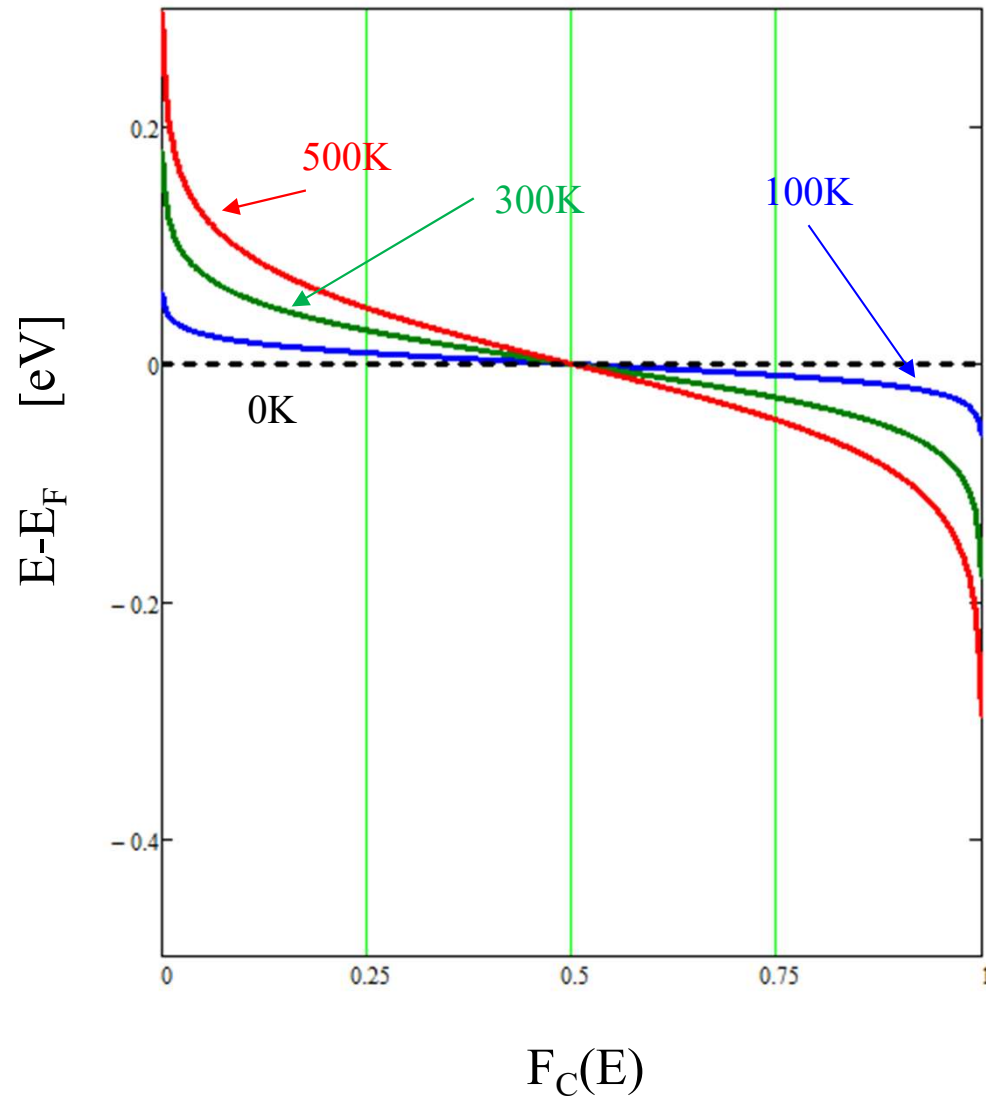
$$F_c(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

→ Fermi-Dirac avec un paramètre le niveau de Fermi

## Trous

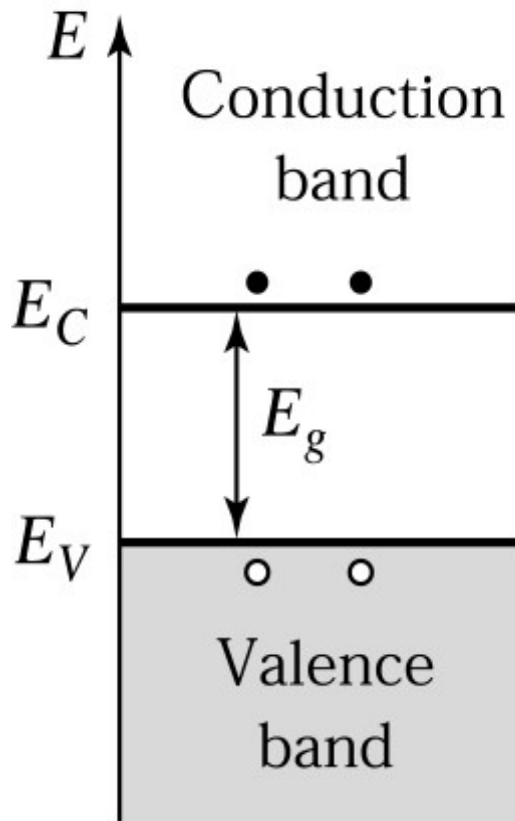
Proba d'occupation d'un trou = 1-proba d'occupation d'un électron

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



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

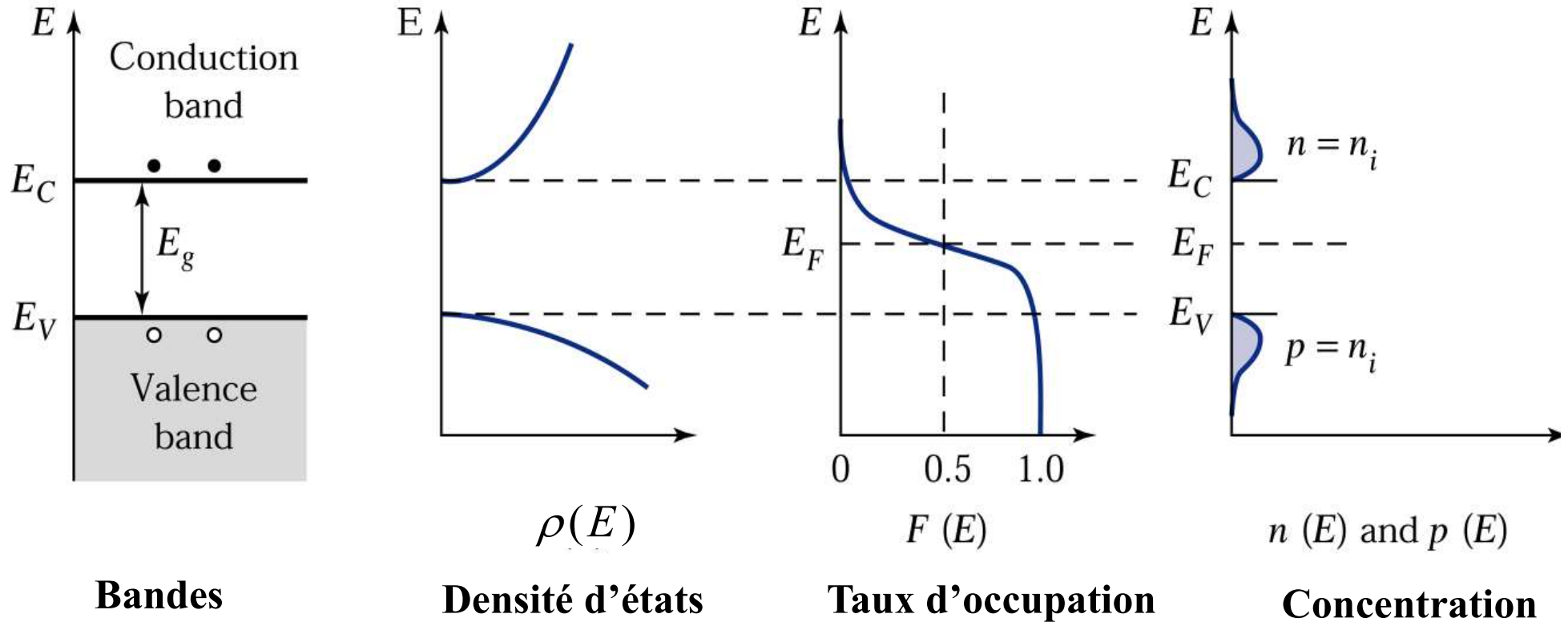
# Semiconducteur: concentrations de porteurs libres



$n =$  concentration d'électrons libres

$p =$  concentration de trous

# Calcul des concentrations de porteurs: principe



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

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

# Concentration d'électron libre et de trous

Concentration d'électrons libre dans les bandes de conduction:

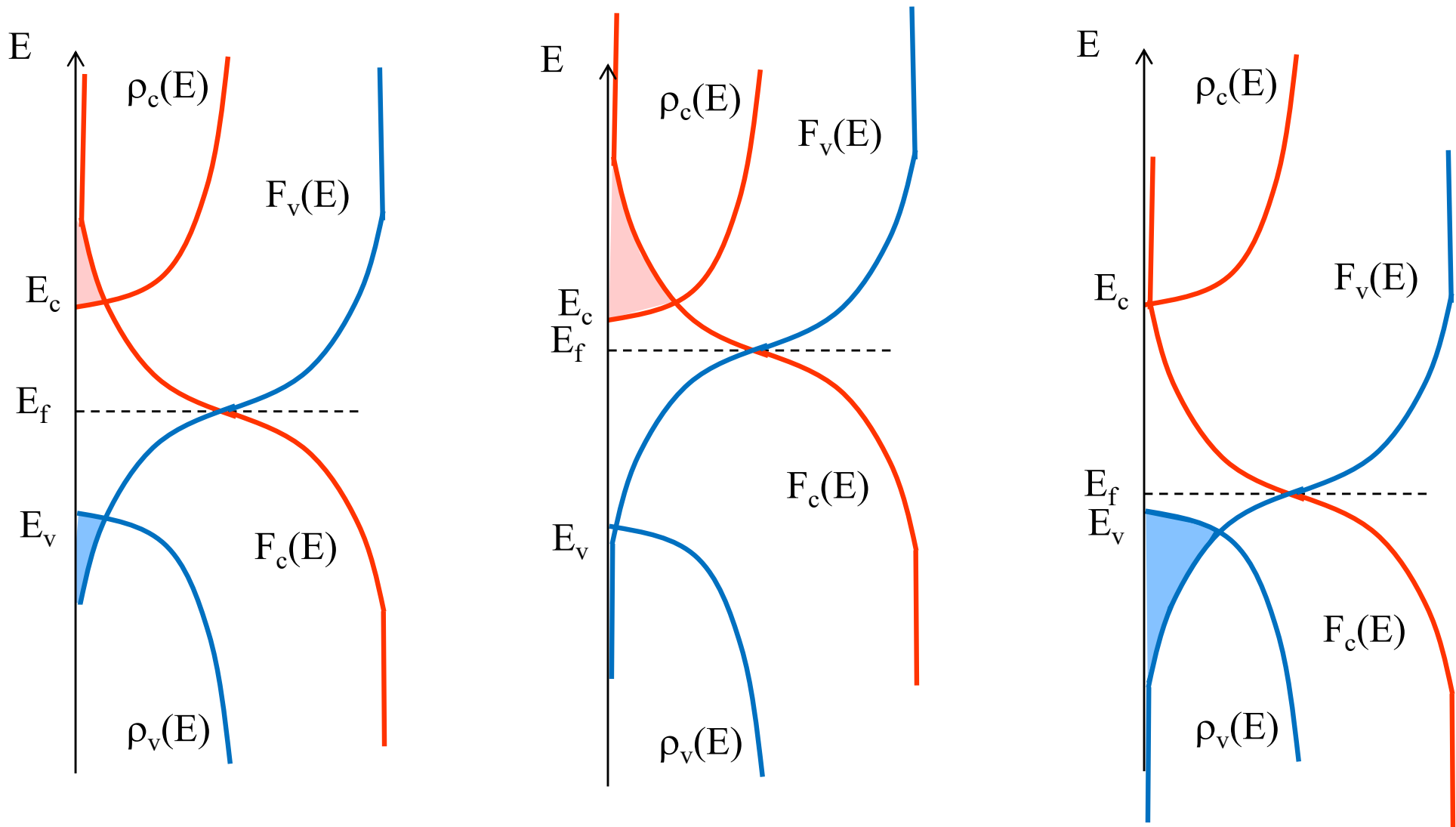
$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c,\max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) \cdot dE = \sqrt{2} \frac{(m_{dos,n}^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} \sqrt{E - E_c} \cdot \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \cdot dE$$

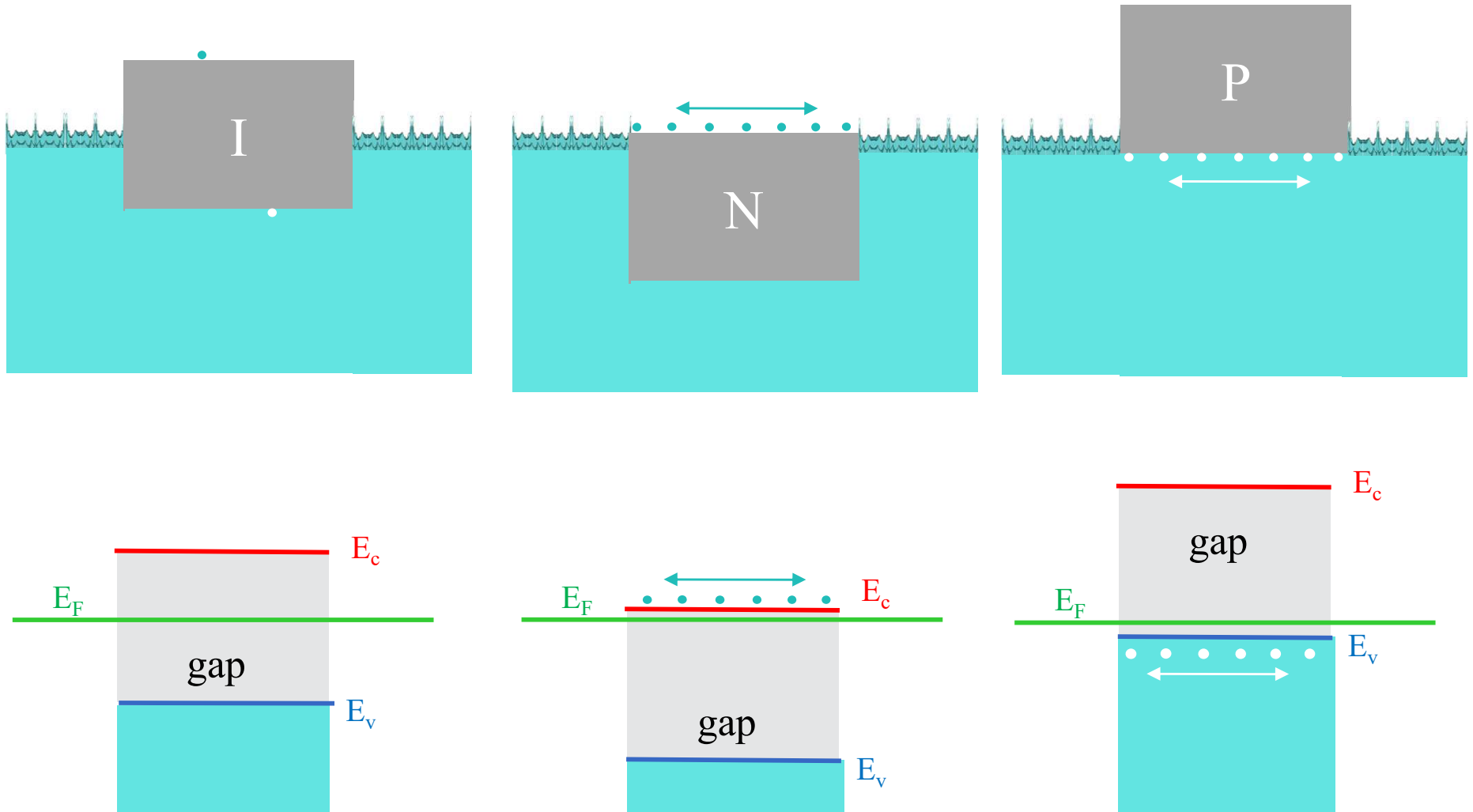
Concentration de trous dans les bandes de valence:

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

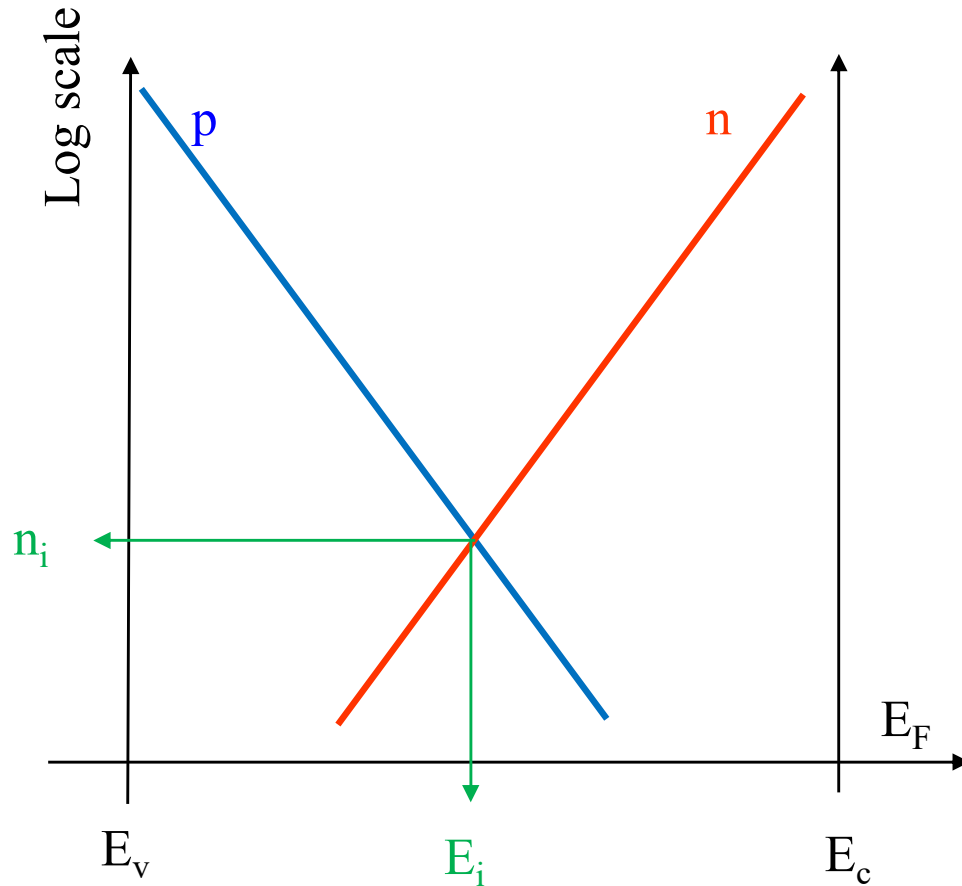
Remarques: - Ces équations sont aussi valides pour un semi-conducteur dopé

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





# Semi-conducteurs intrinsèques: neutralité



Le semi-conducteur intrinsèque est neutre:

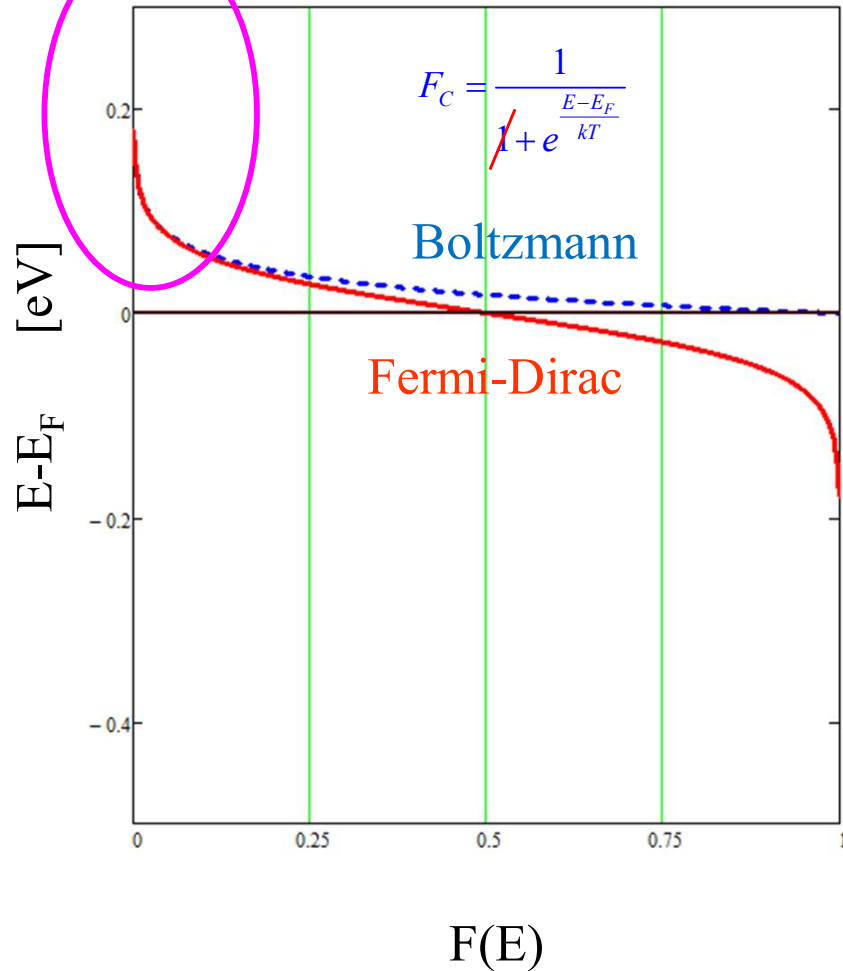
$$\rightarrow n = p = n_i$$

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

# Approximation de Boltzmann (1)

T=300K → kT=25meV



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)

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

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

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

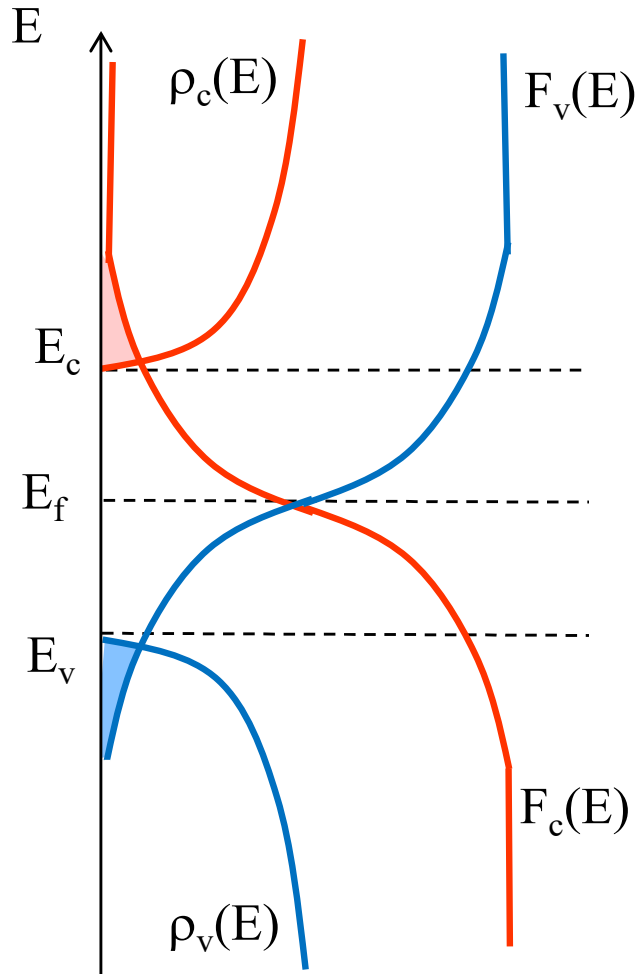
$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F) / kT}$$

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

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

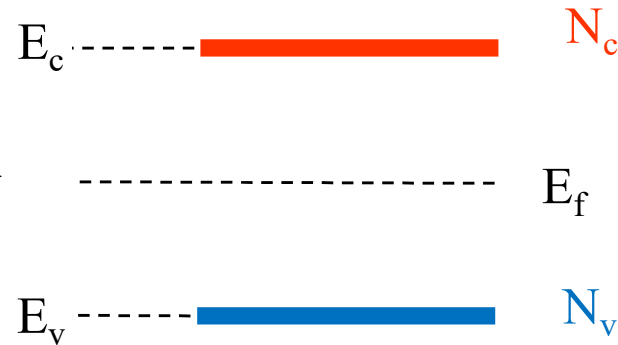
**Loi d'action de masse**

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



## « Système à deux niveaux »

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



+ Boltzmann

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

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

# 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

Multiplier

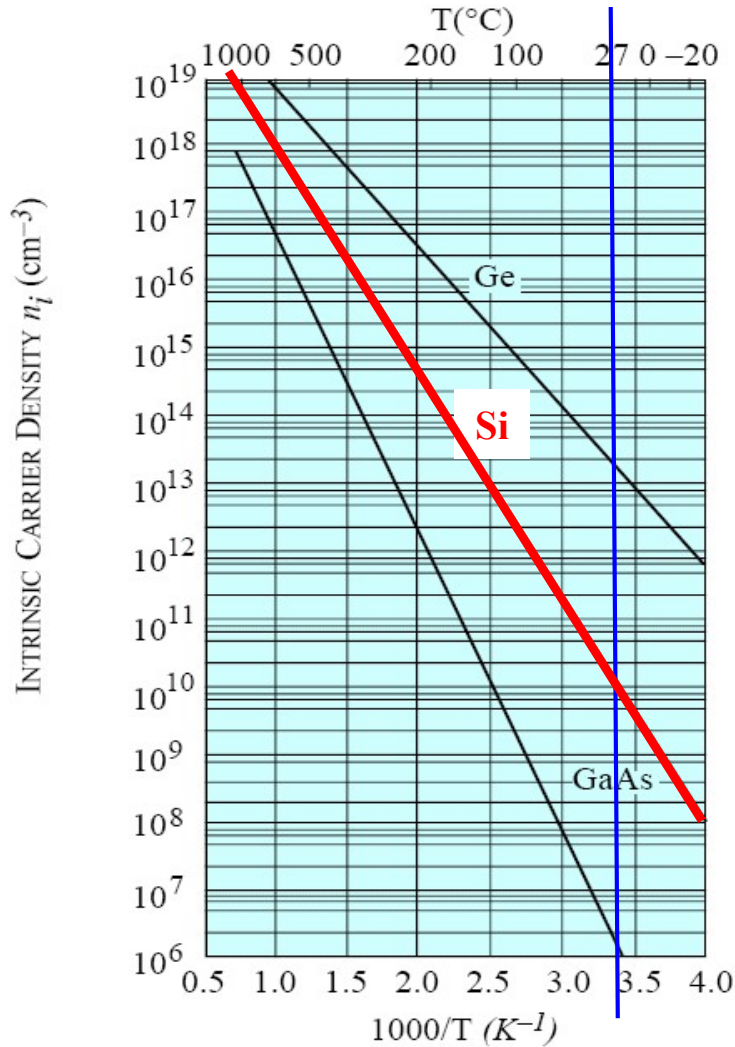
$$E_i = \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v}$$

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

Pour le silicium à température ambiante:

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

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



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

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

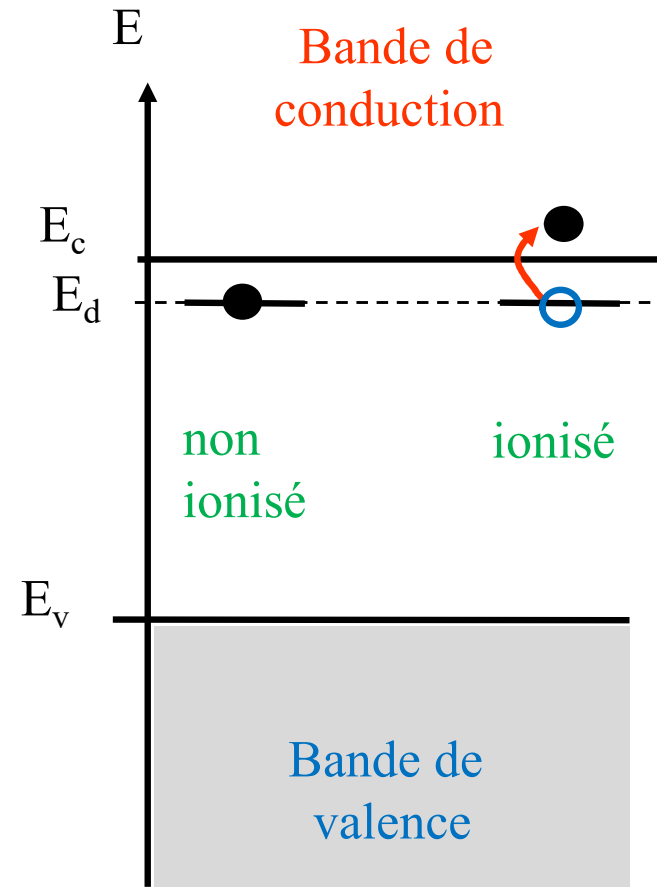
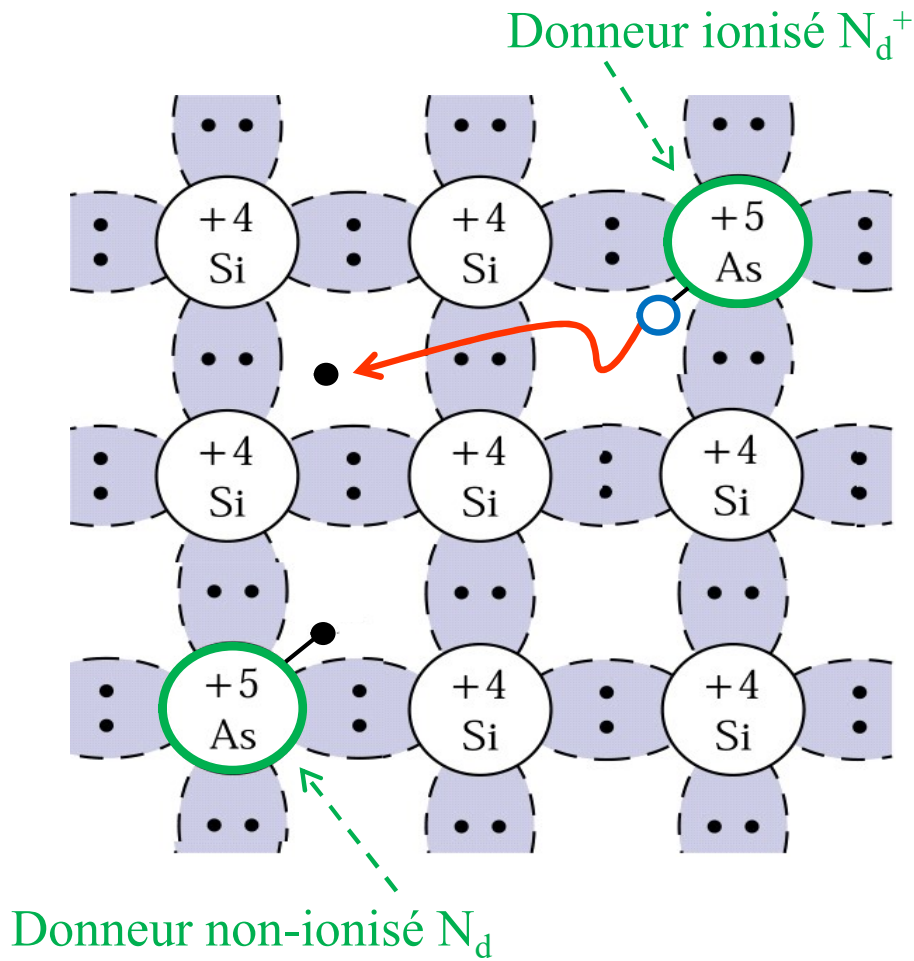
$$E_i = \frac{(E_c + E_v)}{2} - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_c}{N_v} \approx \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

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)	$2.78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.84 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	<b>1.12</b>
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

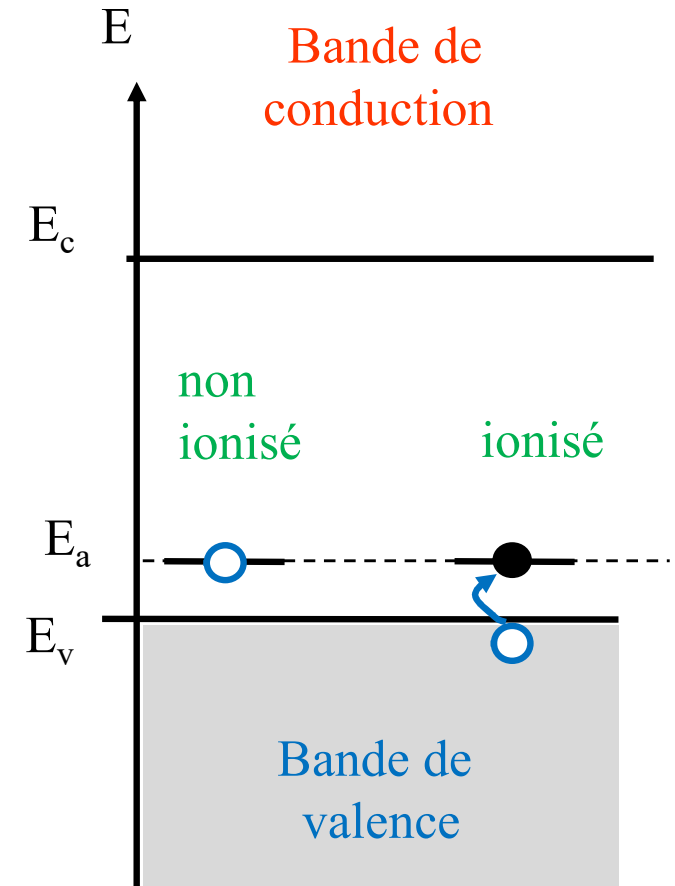
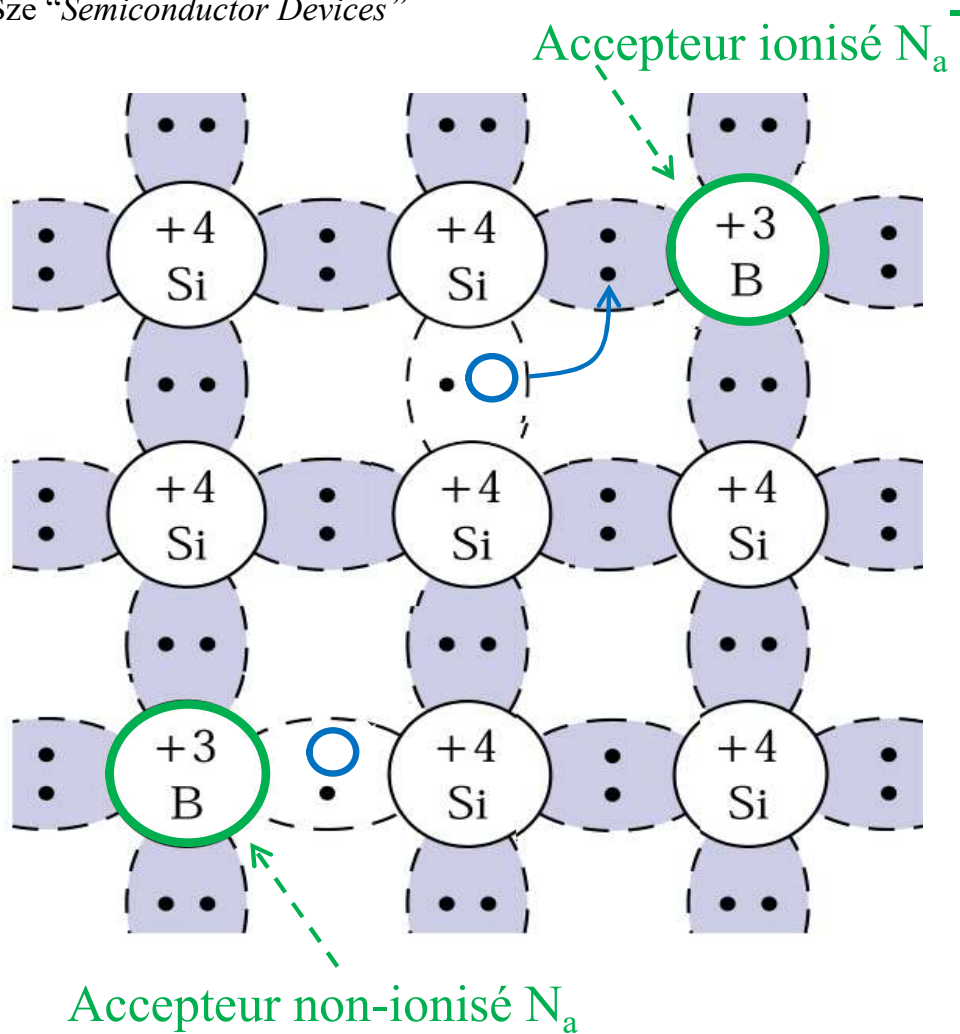
J. Singh "Semiconductor Devices"

Dopage:  
Donneurs  
Accepteurs

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



S. M. Sze "Semiconductor Devices"



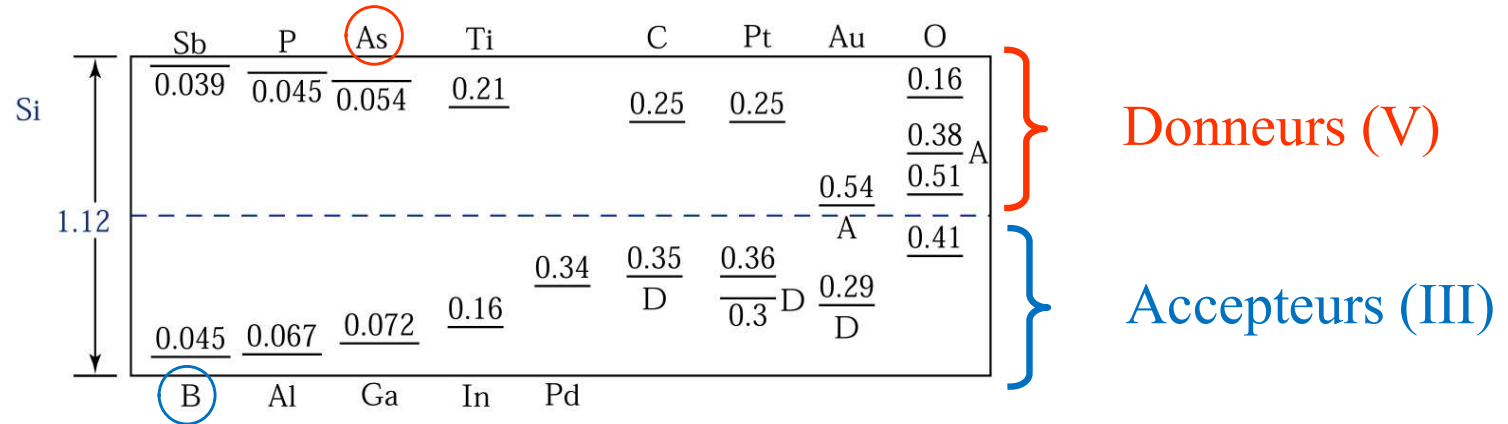
# Tableau périodique des éléments

period	group 1*												13	14	15	16	17	18																																																							
	1a	2a	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	IIIb IIIa	IVb IVa	Vb Va	VIb VIa	VIIb VIIa	VIIIb 0																																																							
1	H																		He																																																						
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																																																							
3	Na	Mg	IIIa** IIIb***	IVa IVb	Va Vb	VIa VIb	VIIa VIIb	VIIIa VIIIb	IXa IXb	Xa Xb	XIa XIb	XIIa XIIb	Al	Si	P	S	Cl	Ar																																																							
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																																							
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																																							
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																																							
7	Fr	Ra	Ac	****	****	****	****	****	****	****	****	****																																																													
			<table border="1"> <tr> <td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td> </tr> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>															58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																												
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																																												
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																												
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																																												

Encyclopaedia Britannica, Inc.

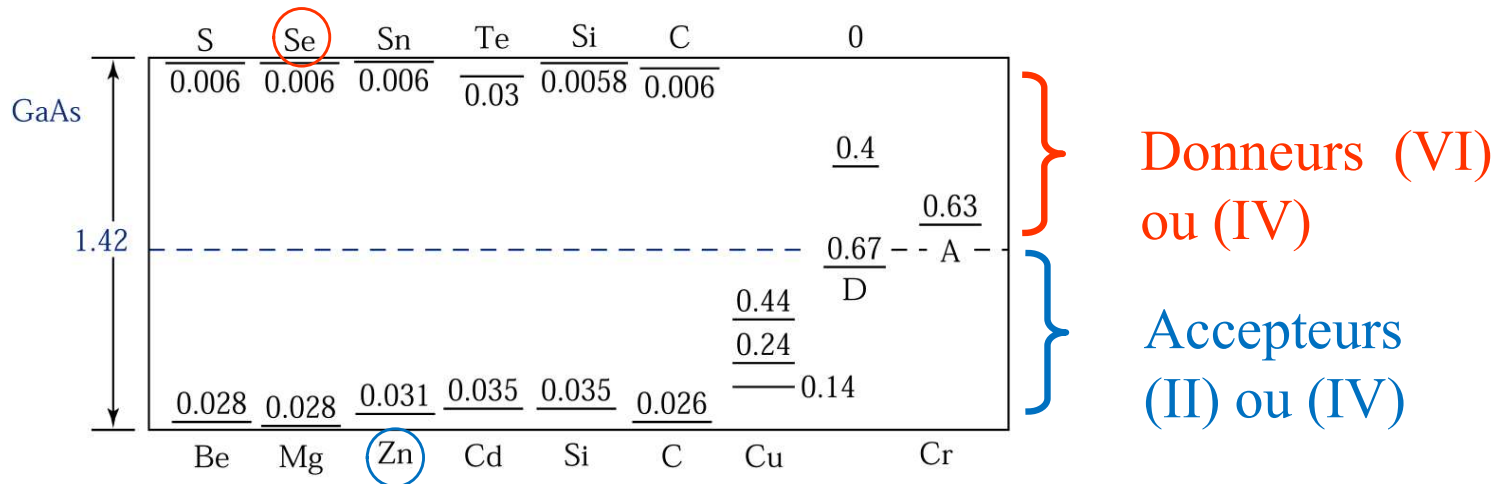
# Choix du dopant

Silicium  
IV



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

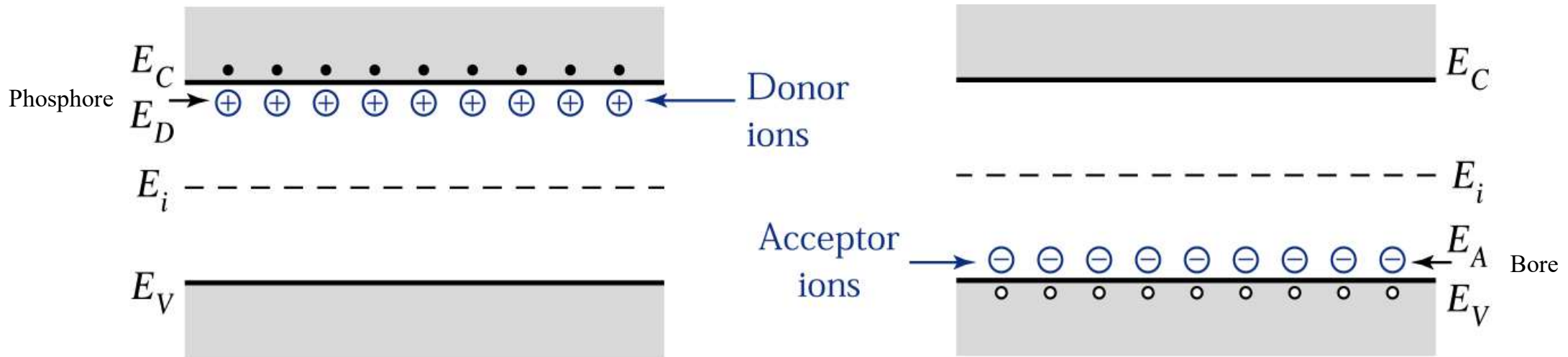
GaAs  
III-V



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)

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

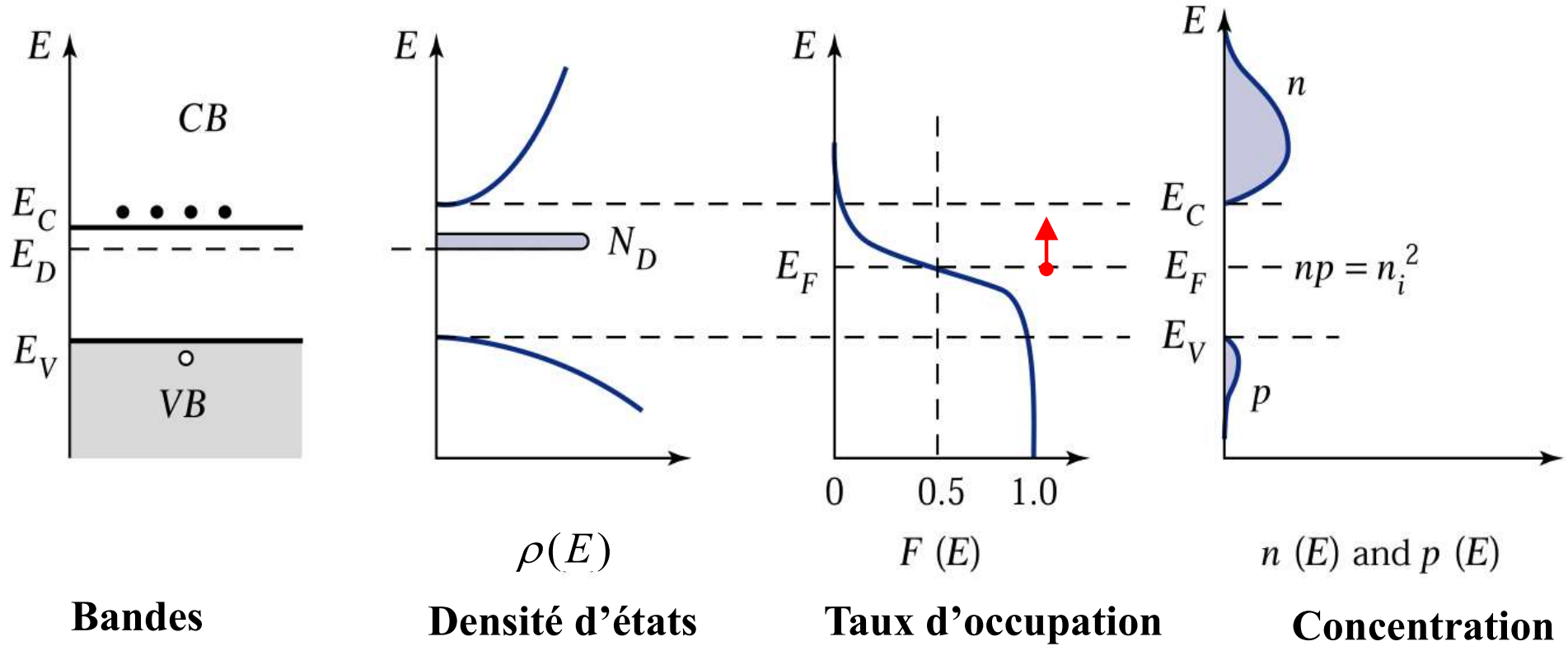
Probabilité pour un accepteur d'avoir un trou:

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

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

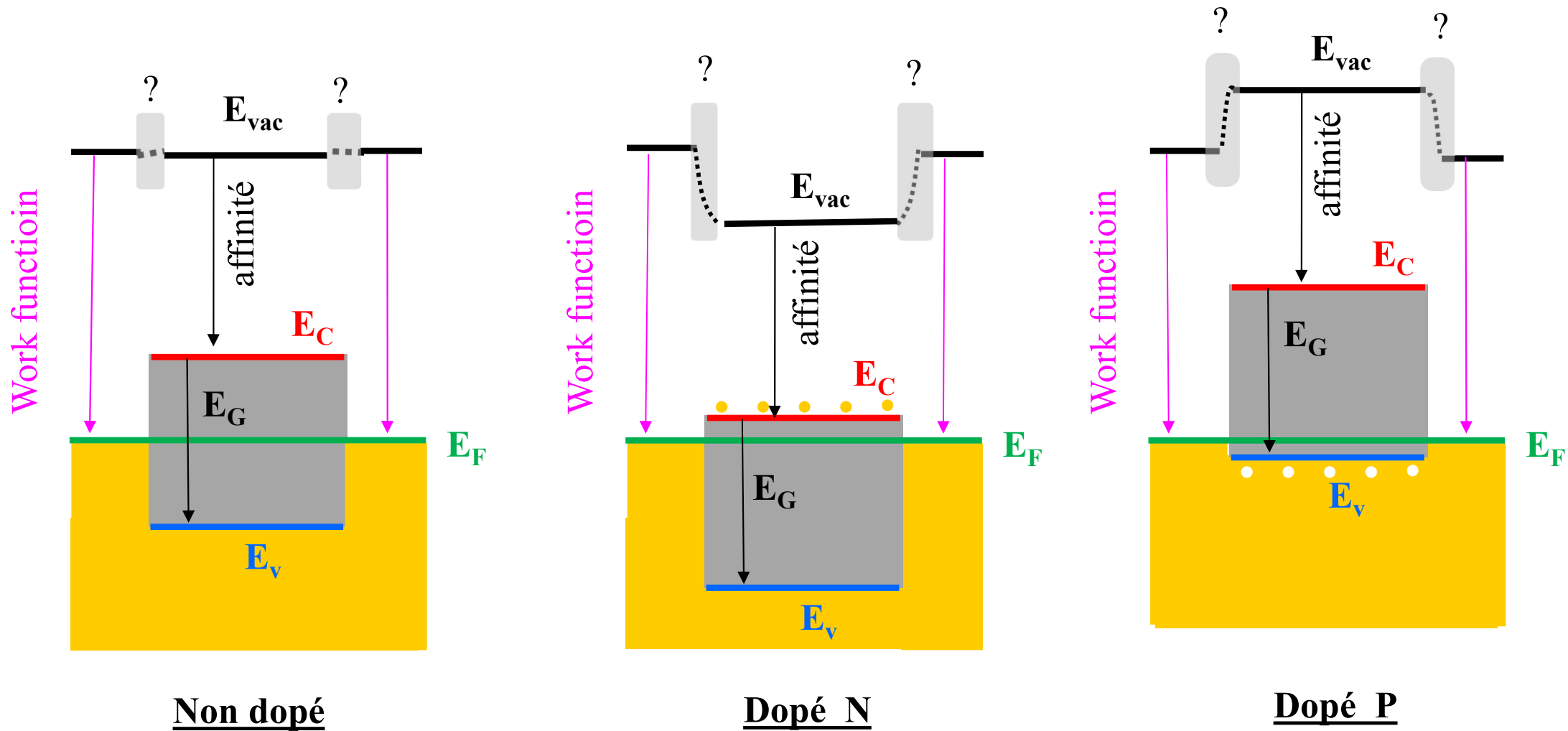
~~$$N_A^- = N_A (1 - F_A)$$~~

# 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"



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

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

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

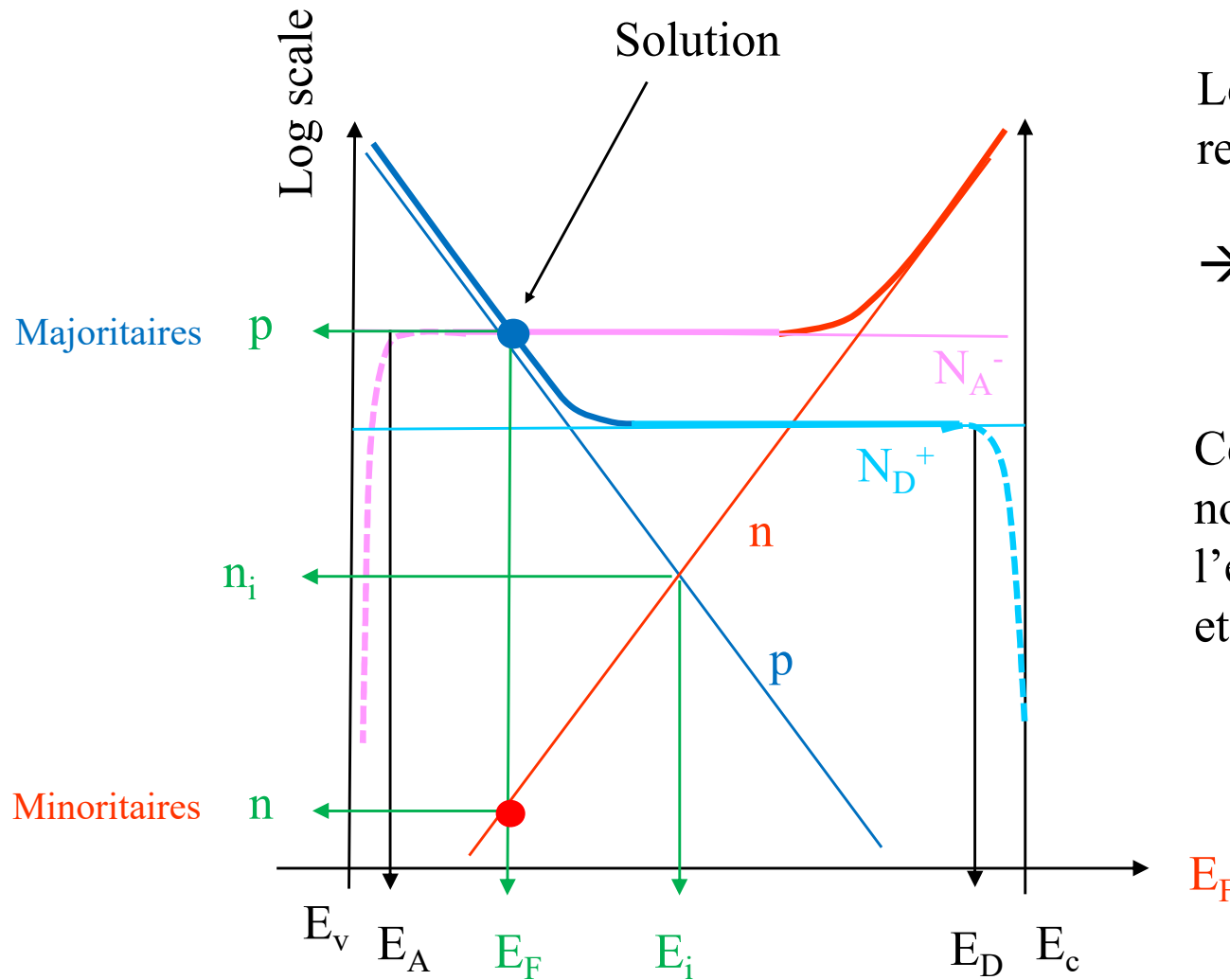
$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v) / kT}$$

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

**Loi d'action de masse**

**Seule la position de l'énergie de Fermi  $E_F$  doit être adaptée**

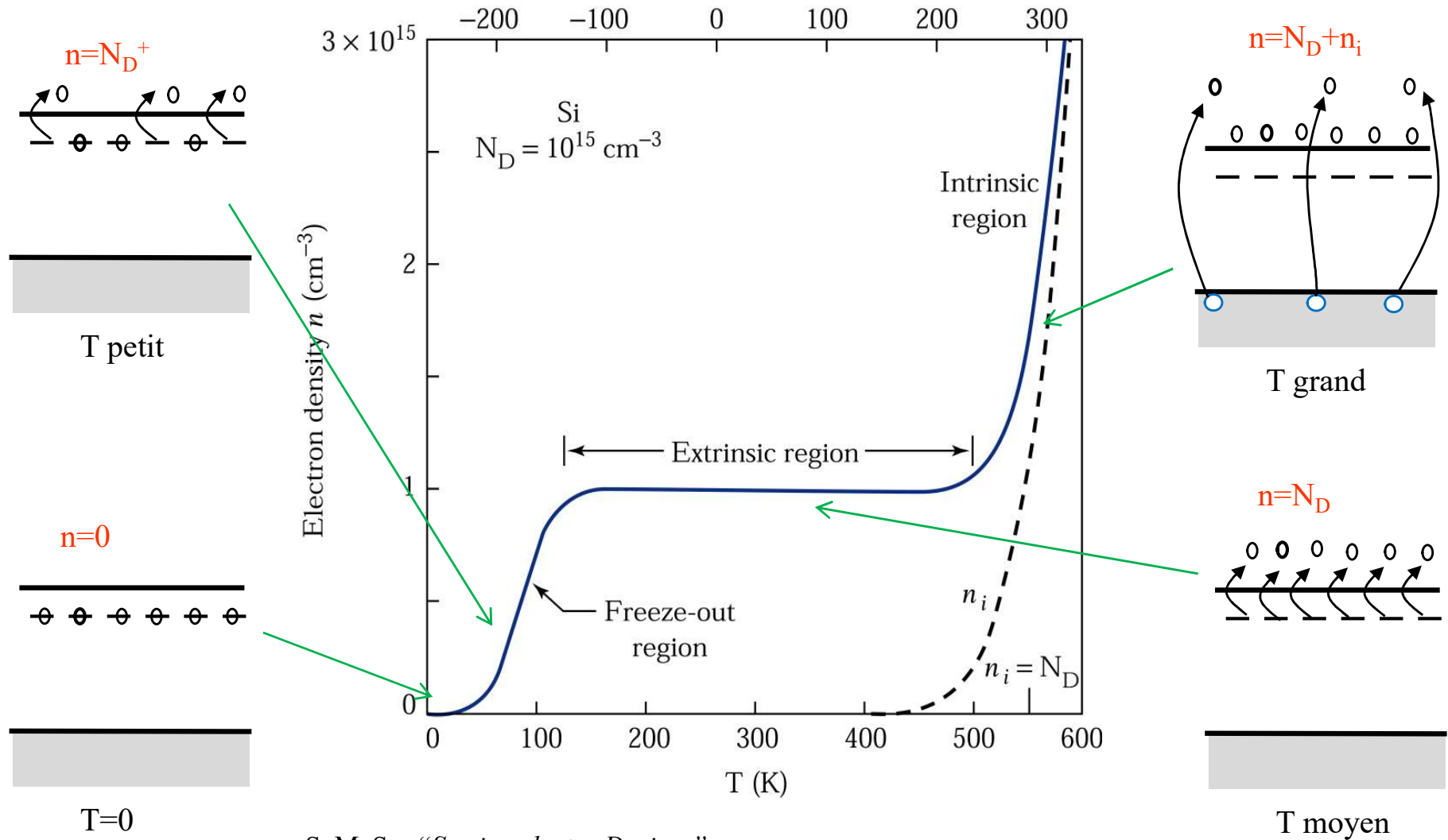
# Semi-conducteurs extrinsèques: graphique de Shockley condition de neutralité et niveau de Fermi



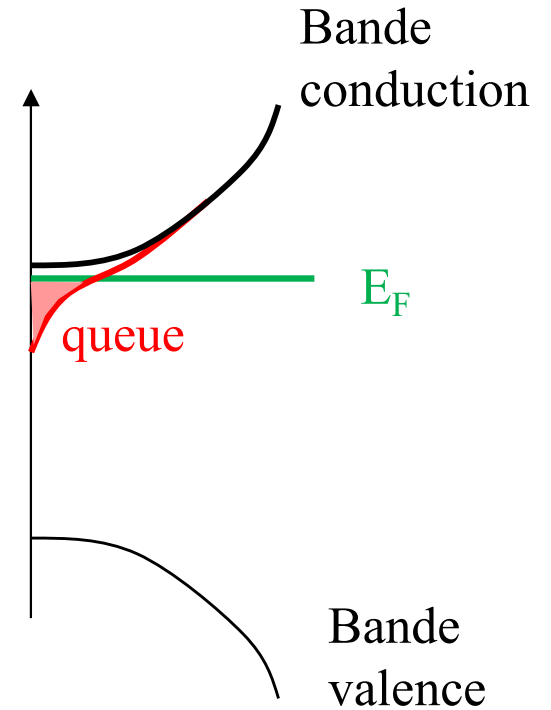
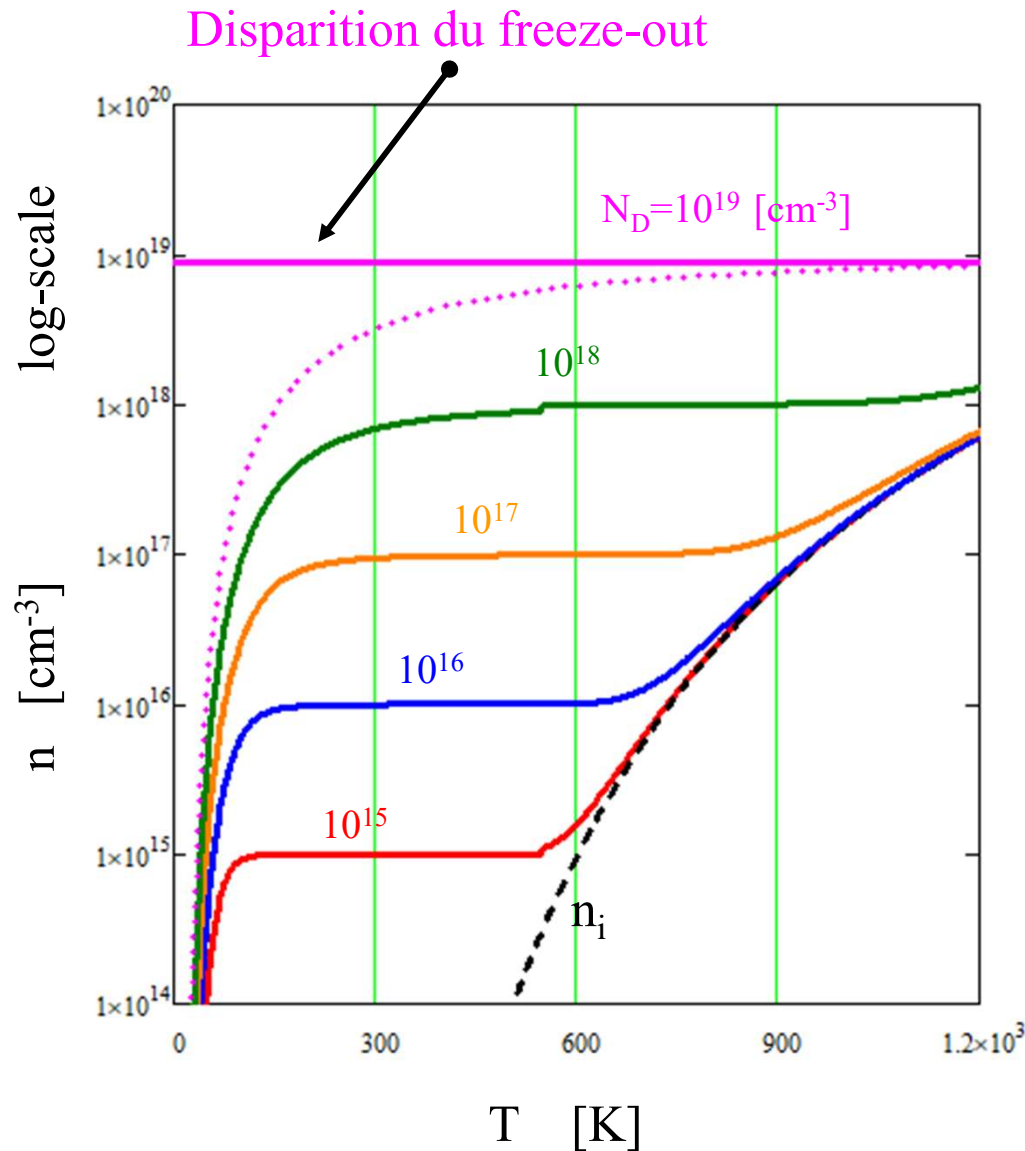
Le semi-conducteur dopé reste neutre:

$$\rightarrow n + N_A^- = p + N_D^+$$

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

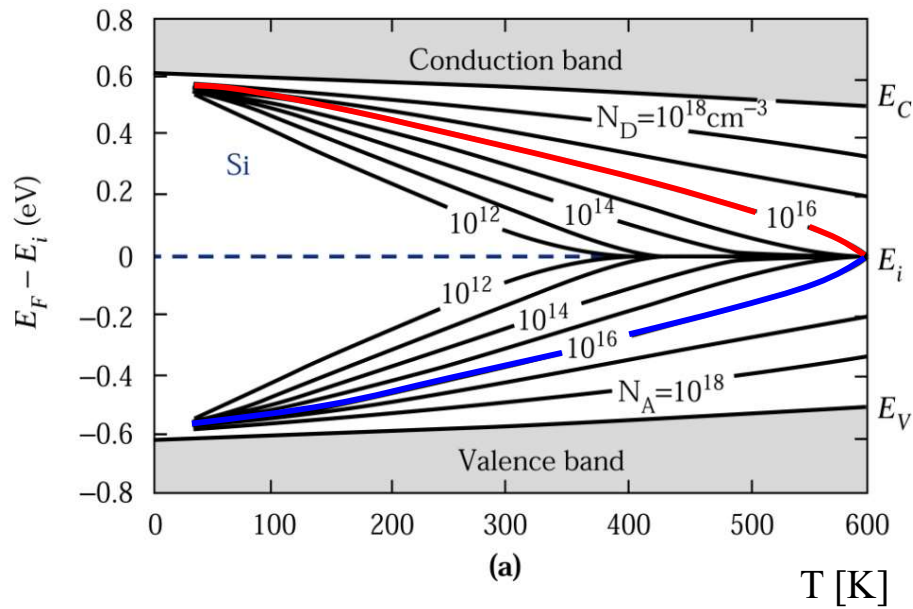


S. M. Sze "Semiconductor Devices"

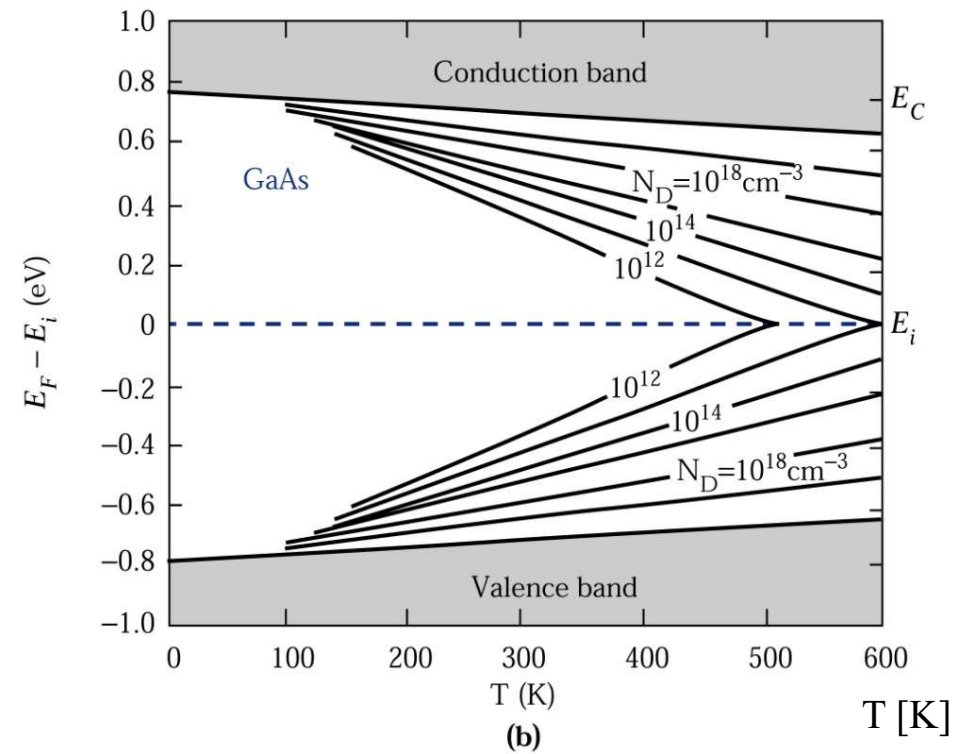


A très fort dopage ( $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ),  
la bande se déforme,  
l'énergie de Fermi y pénètre  
→ Un lac d'électron libres se forme

## Silicium

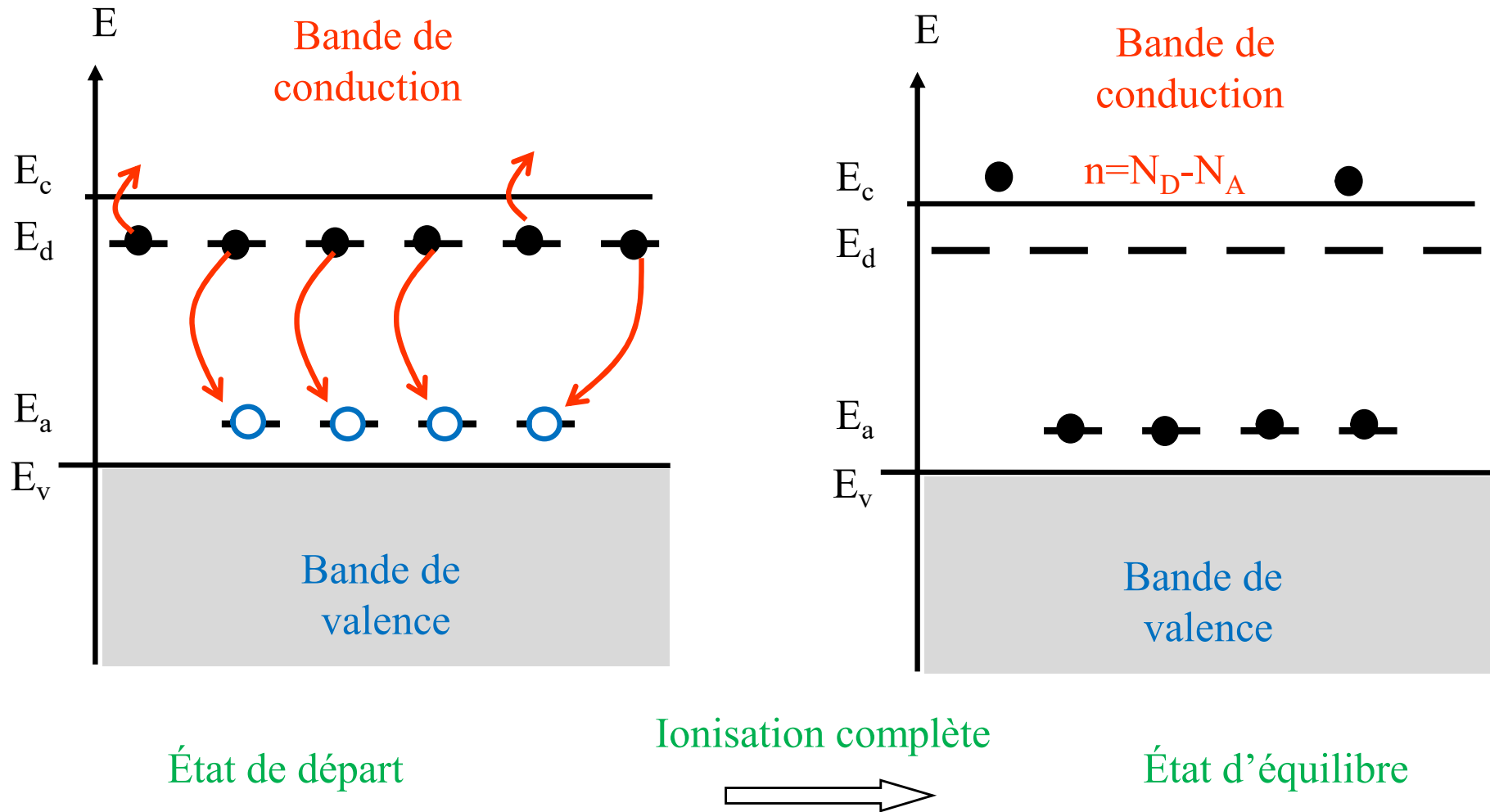


## GaAs



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

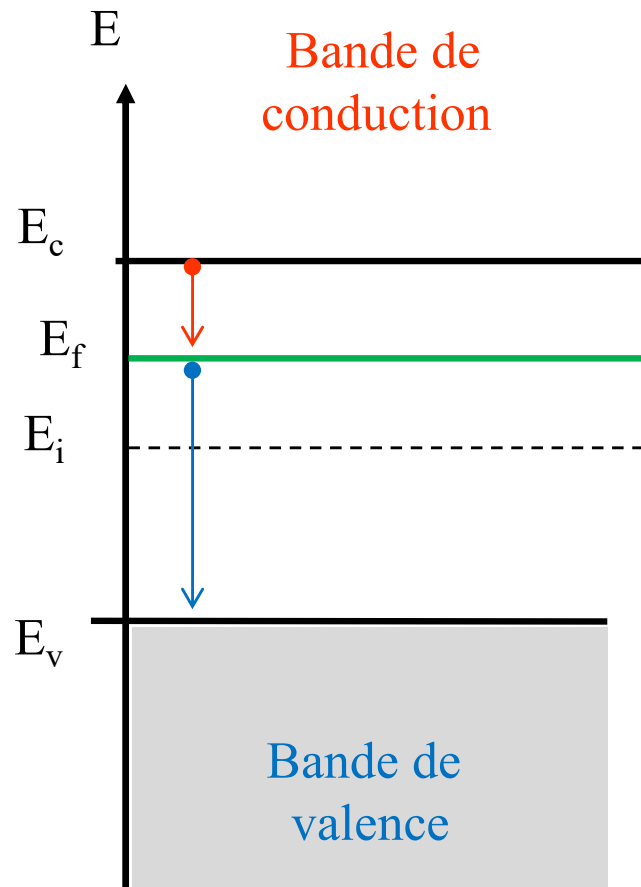
# Effet de compensation de dopage



Par référence aux densités effectives d'états

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

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



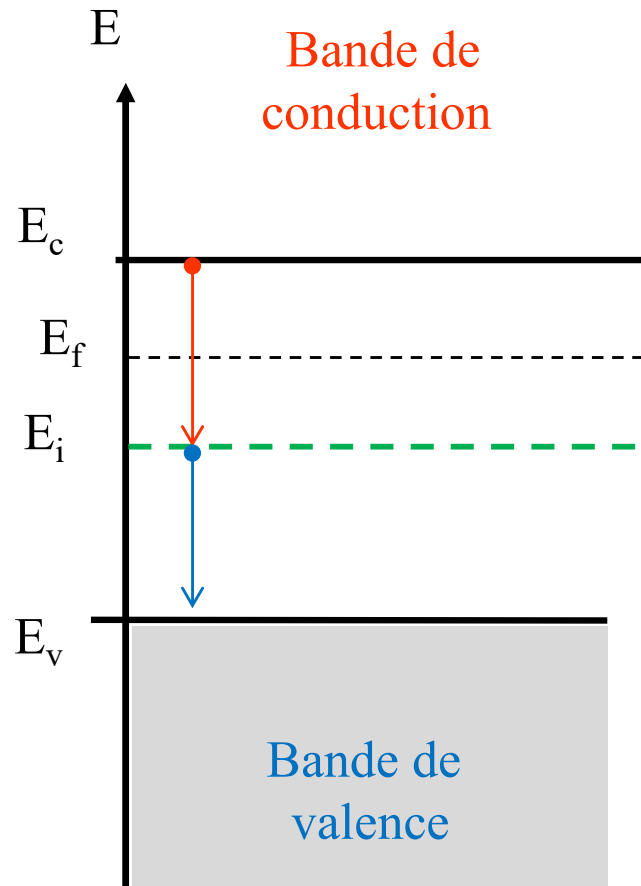
Par référence aux densités effectives d'états

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

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

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

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



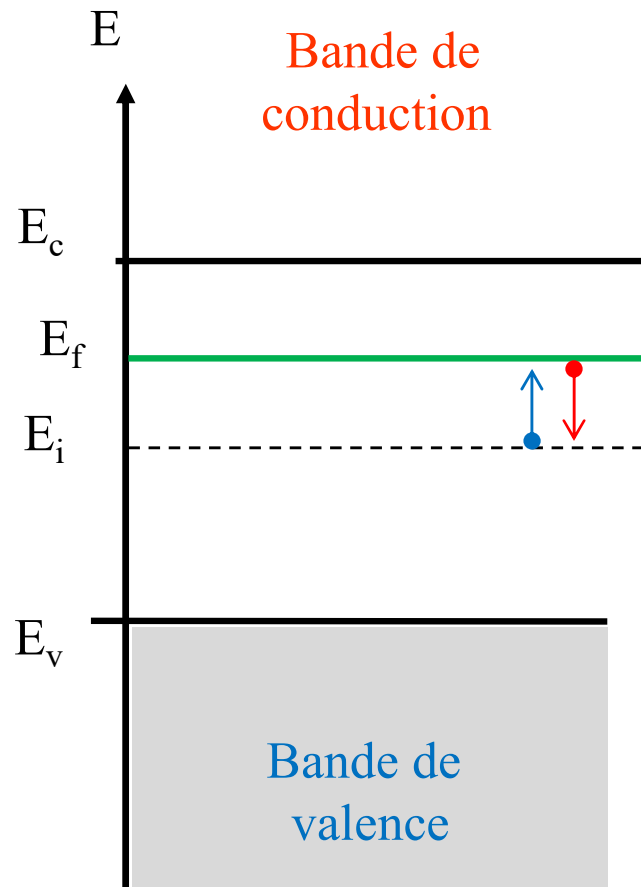
Par référence aux densités effectives d'états

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

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

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

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



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

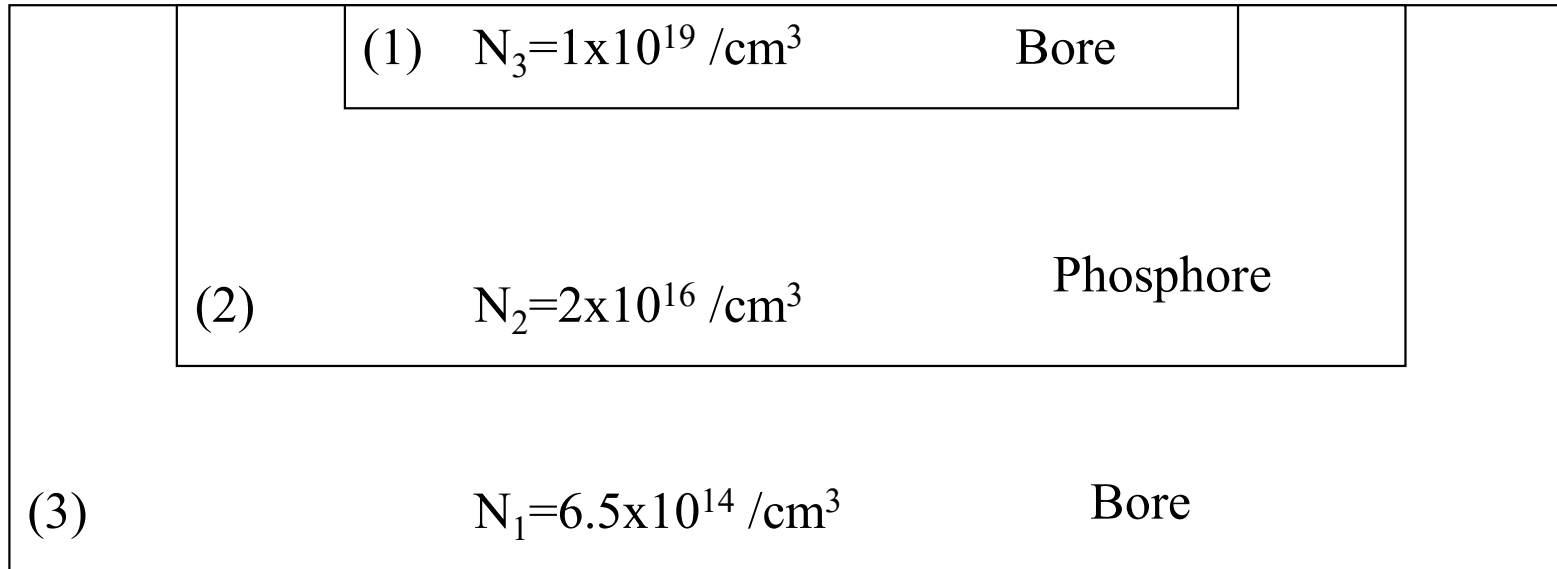
Type p:

$$N_A \gg N_D$$

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

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

$$n = n_i^2 / N_A$$



## Exercice E2.2: Niveaux de Fermi et température



- 1) *Trouvez le niveau de Fermi d'un silicium dopé avec  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  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  $E_D = E_C - 0.045 \text{ eV}$ ).*