

# COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

## II) Semi-conducteurs à l'équilibre

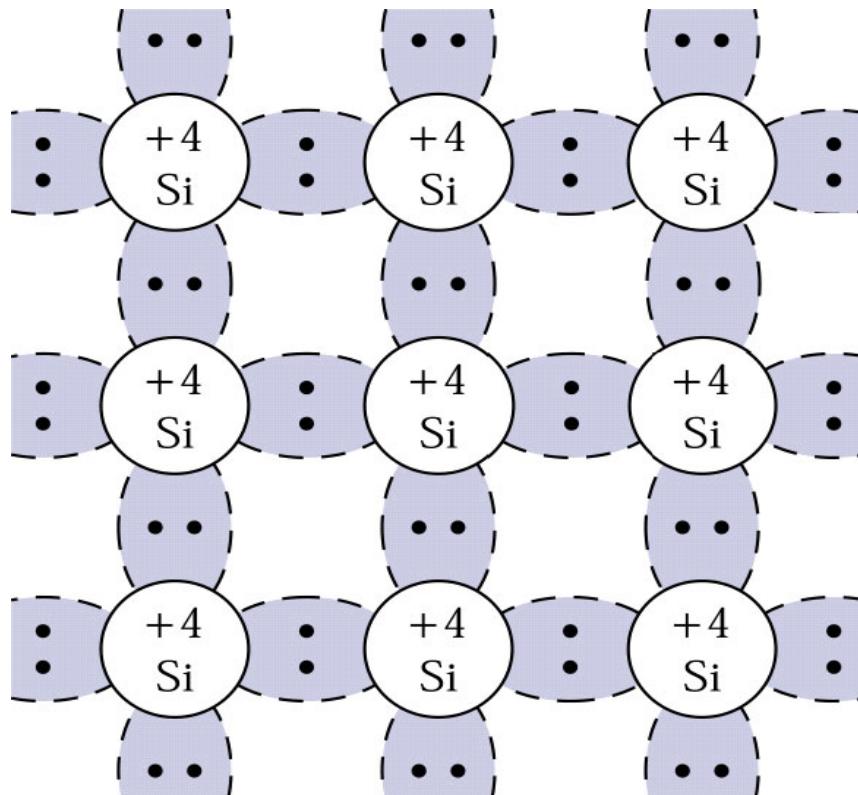
P.A. Besse

EPFL

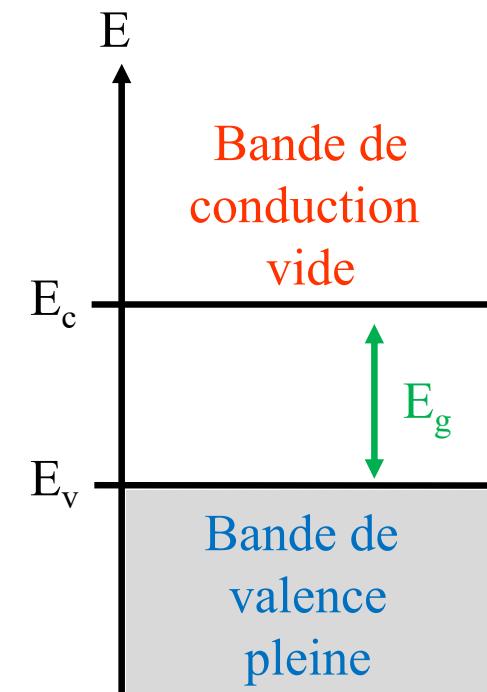
Concepts  
d'électrons libres  
et  
de trous

# 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



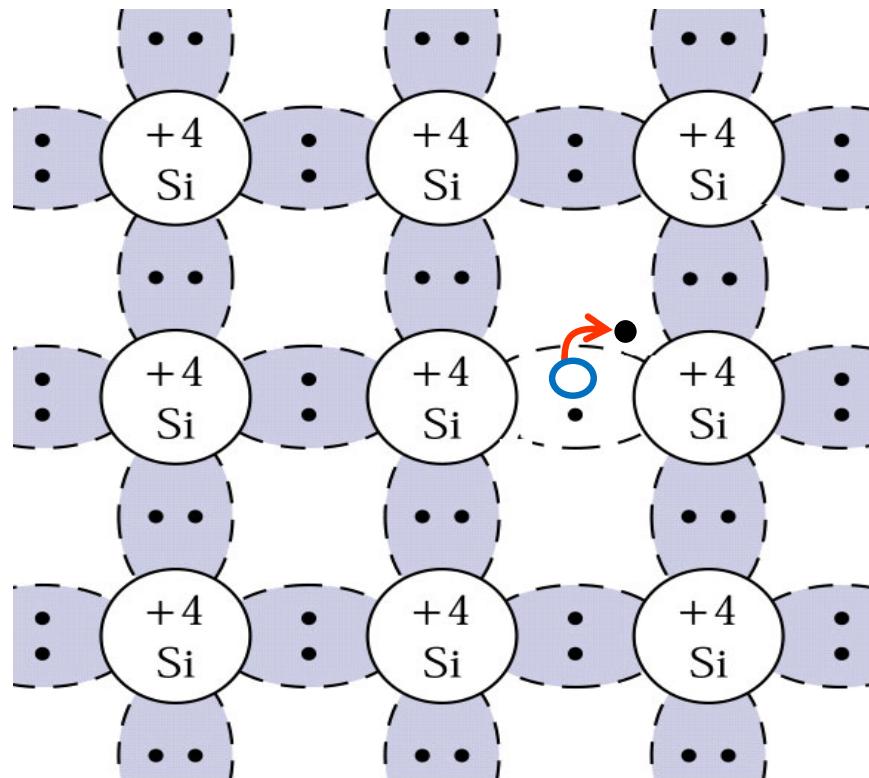
S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Pas de déplacement possible → isolant

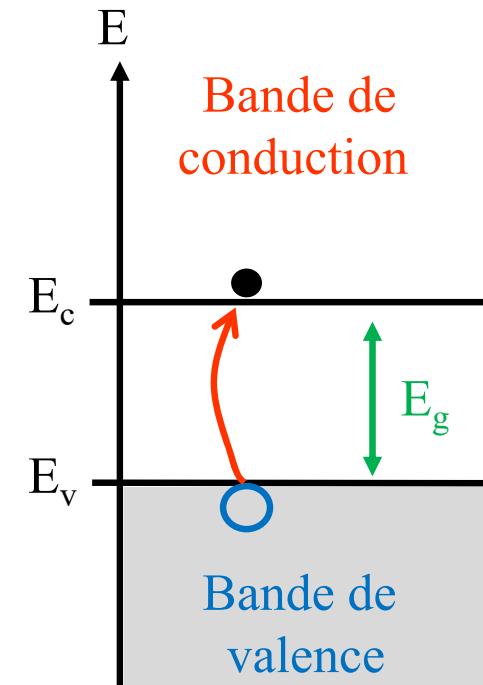
# Semi-conducteur intrinsèque: génération thermique

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



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

Génération d'une paire  
électron + trou

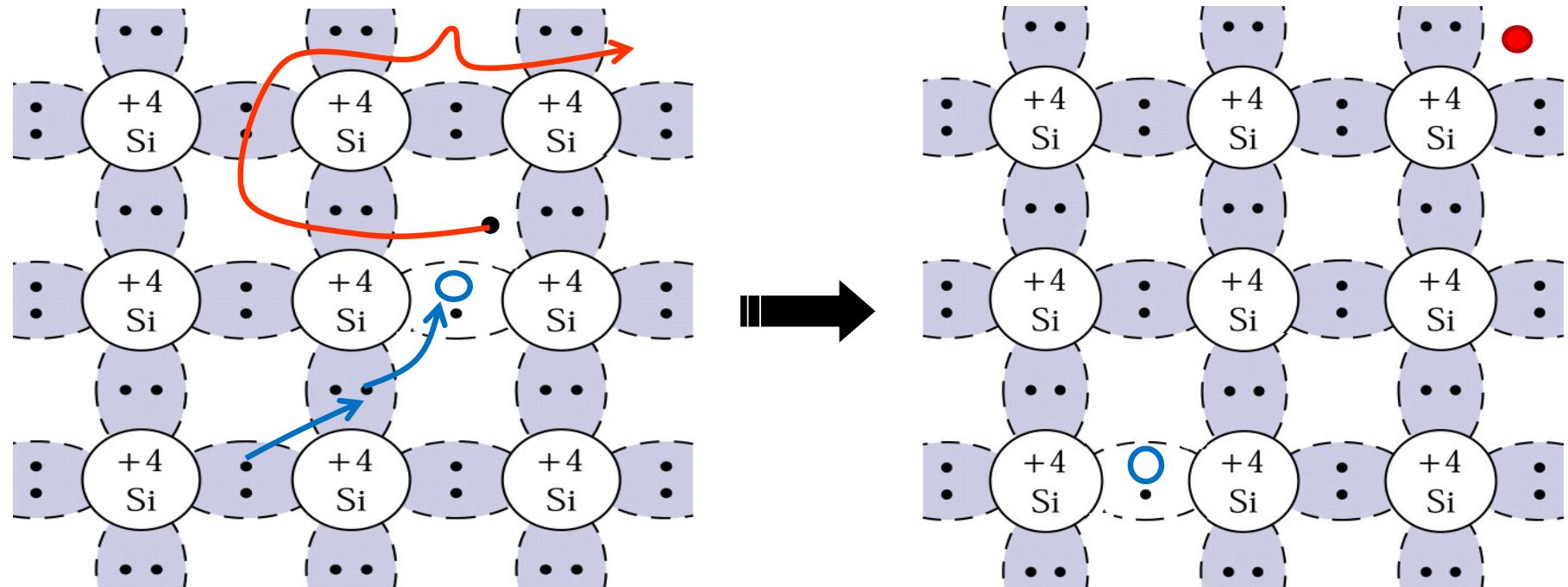


L'électron libre ainsi que le trou se déplacent indépendamment

La zone avec l'électron libre est chargée négativement

La zone avec le trou est chargée positivement

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



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

## Bandes et porteurs libres

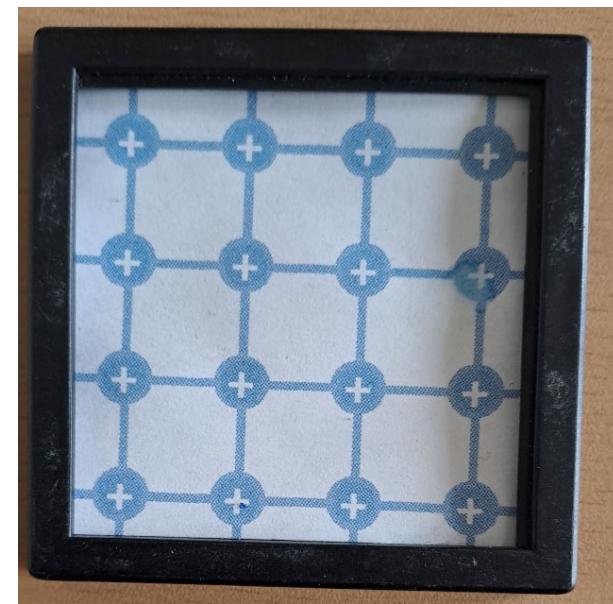
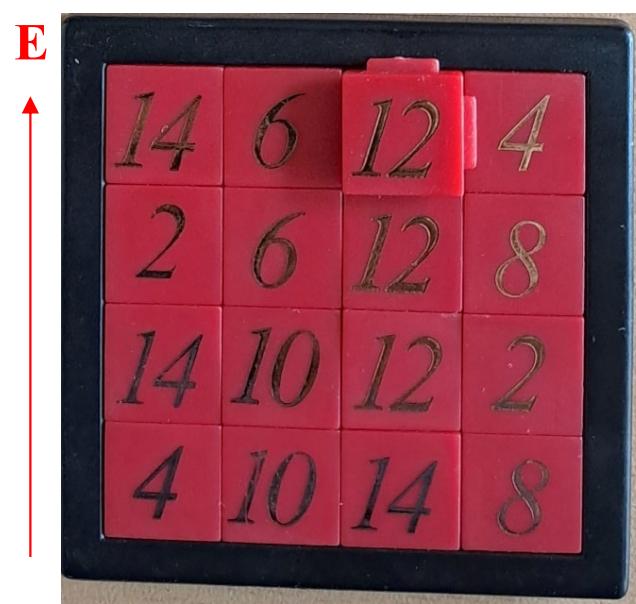
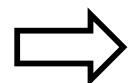
T=0K



T=300K



## Trou = Charge positive

Bande de valence  
videBande de valence  
pleineBande de valence  
avec un trou

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

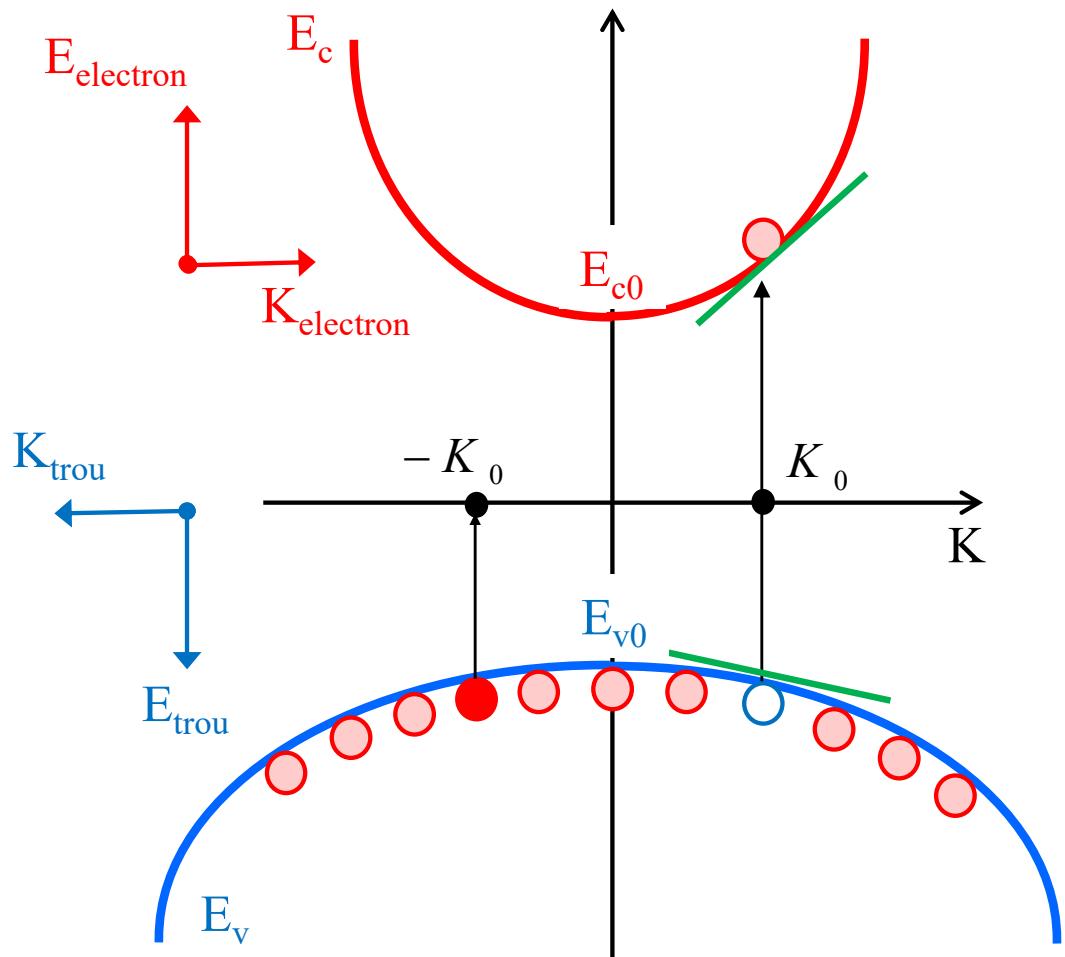
# Paires électron-trou



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

$$P_e = \hbar K_0$$

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

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

### Trous

positive

$$P_h = -\hbar K_0$$

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

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

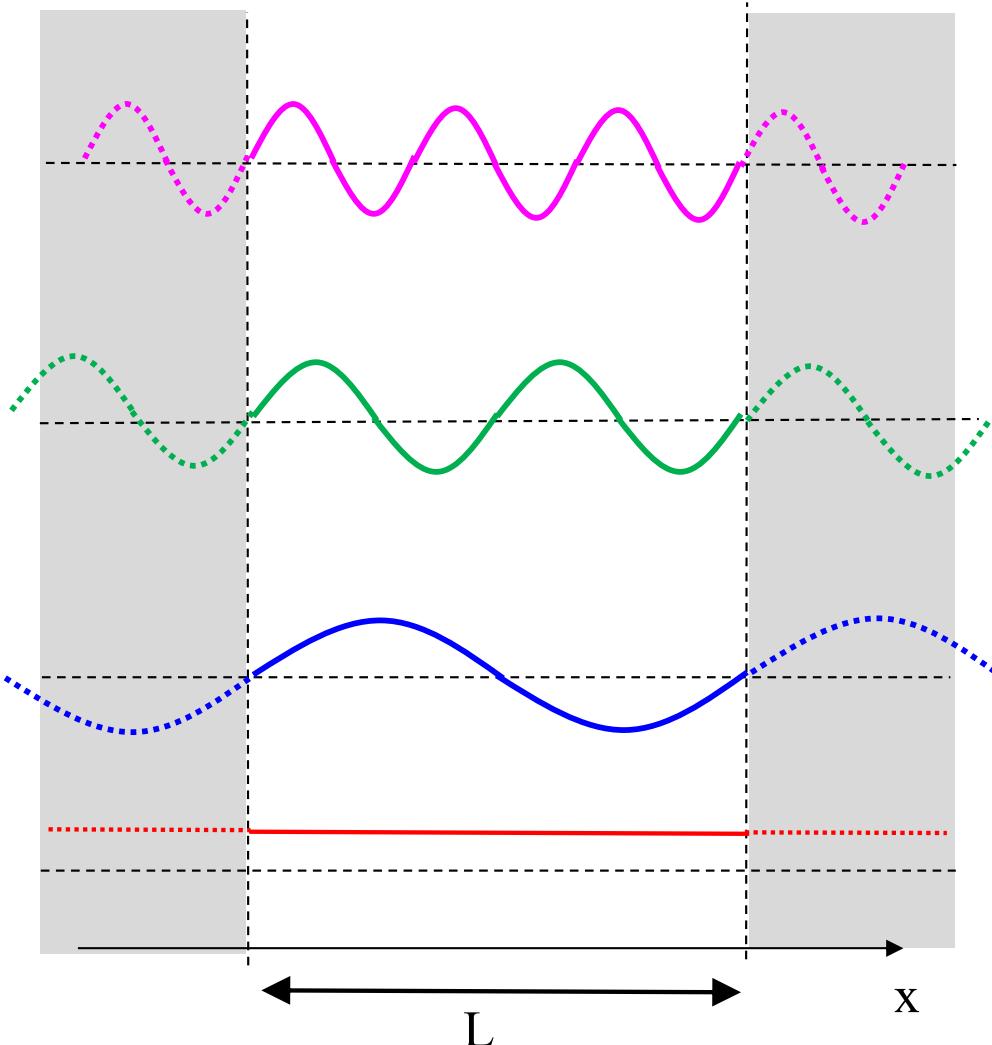
Calcul  
de la densité d'états,  
du taux d'occupation  
et des concentrations de porteurs

# 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 ) → facteur 2
- 3) Probabilité d'occupation à chaque étage (Fermi-Dirac  $F(E)$ )

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

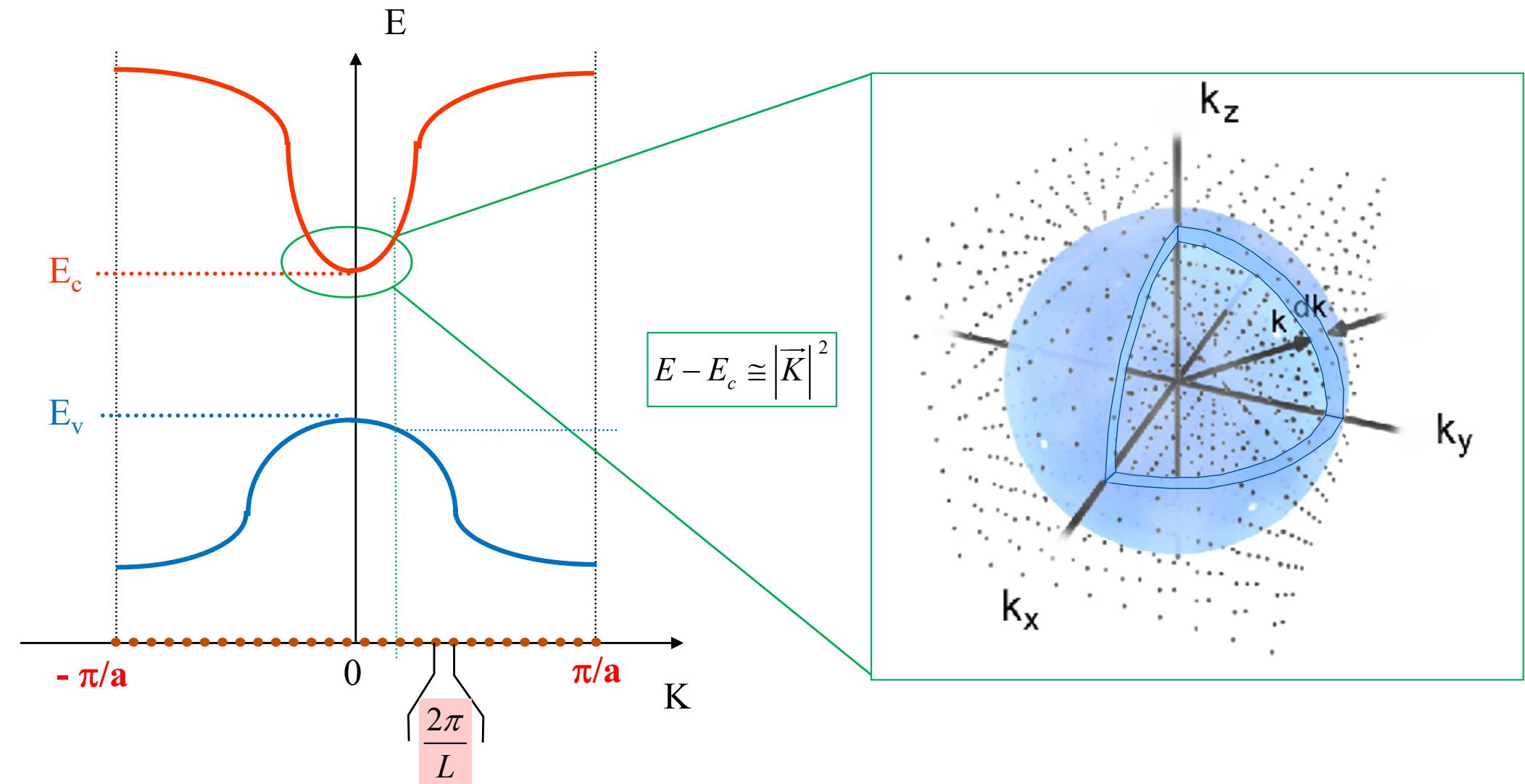


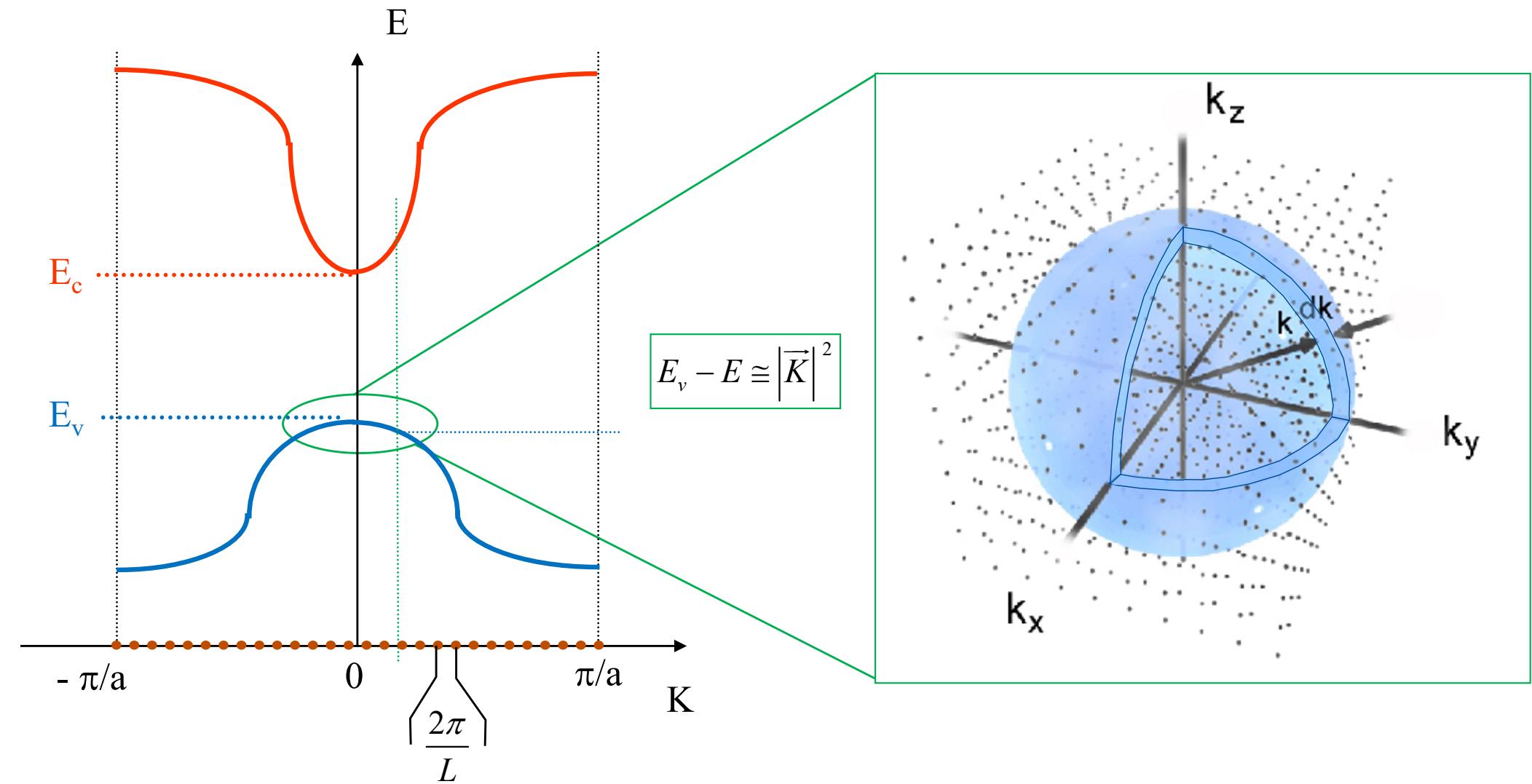
Fonctions périodiques

$$n \cdot \lambda_n = L$$

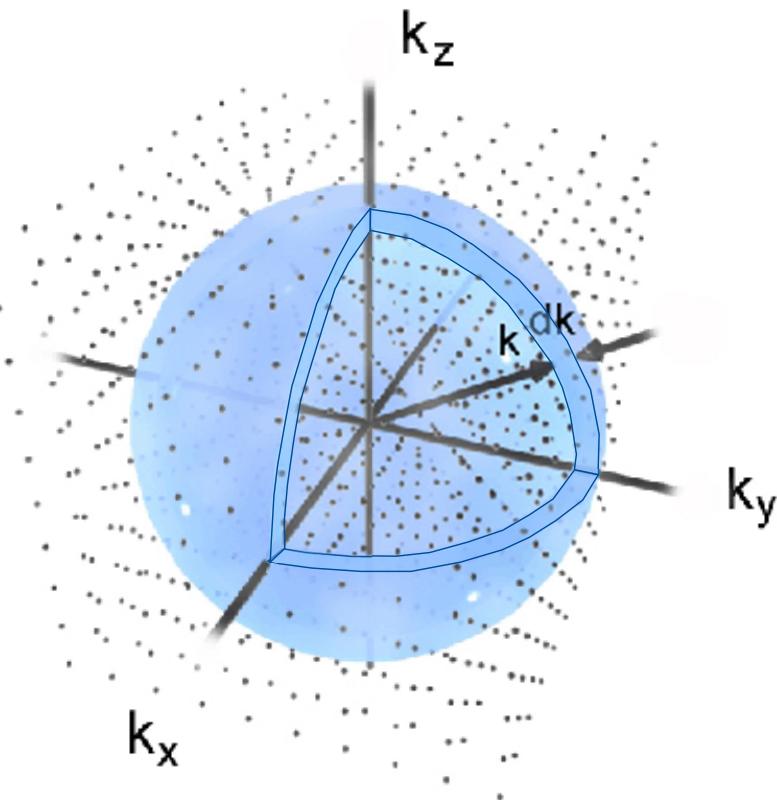


$$K_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = n \cdot \frac{2\pi}{L}$$

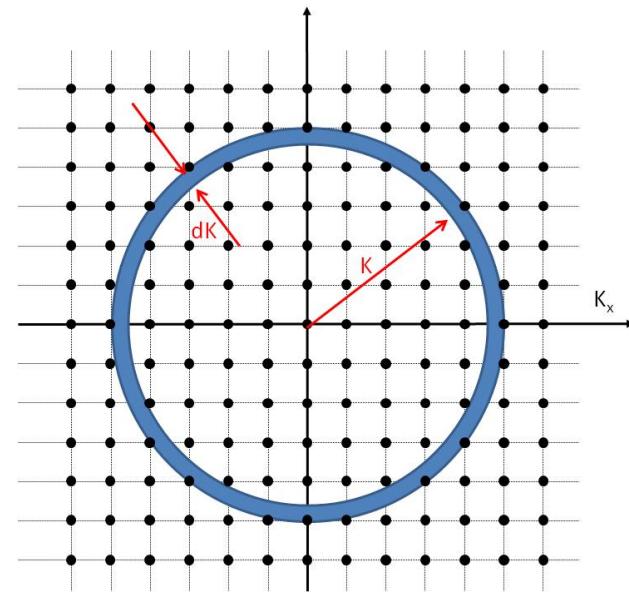




## Densité d'états de même norme de K



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



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

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

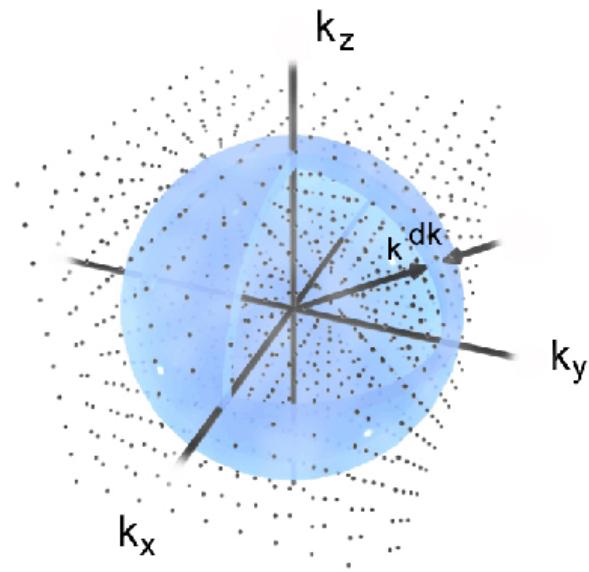
$$\rho_K \cdot dK \equiv \frac{n_K}{L^3} = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^3 \cdot 4\pi \cdot K^2 \cdot dK$$

# Densité d'états pour les électrons

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:



Densité d'état en énergie (Electrons):

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



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

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

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

# Densité d'états: bande de conduction et de valence

Cas anisotrope avec plusieurs vallées:

Bandes de conduction:

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

Bandes de valence:

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

Silicium:

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

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

# Masses effectives

## «Density of States» (dos)

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

J. Singh "Semiconductor Devices"

Masses effectives en unité:  
 $m_0 = 9.11 \cdot 10^{-30}$  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
- $F(E) = \text{Boltzmann}$  si  $E$  élevé

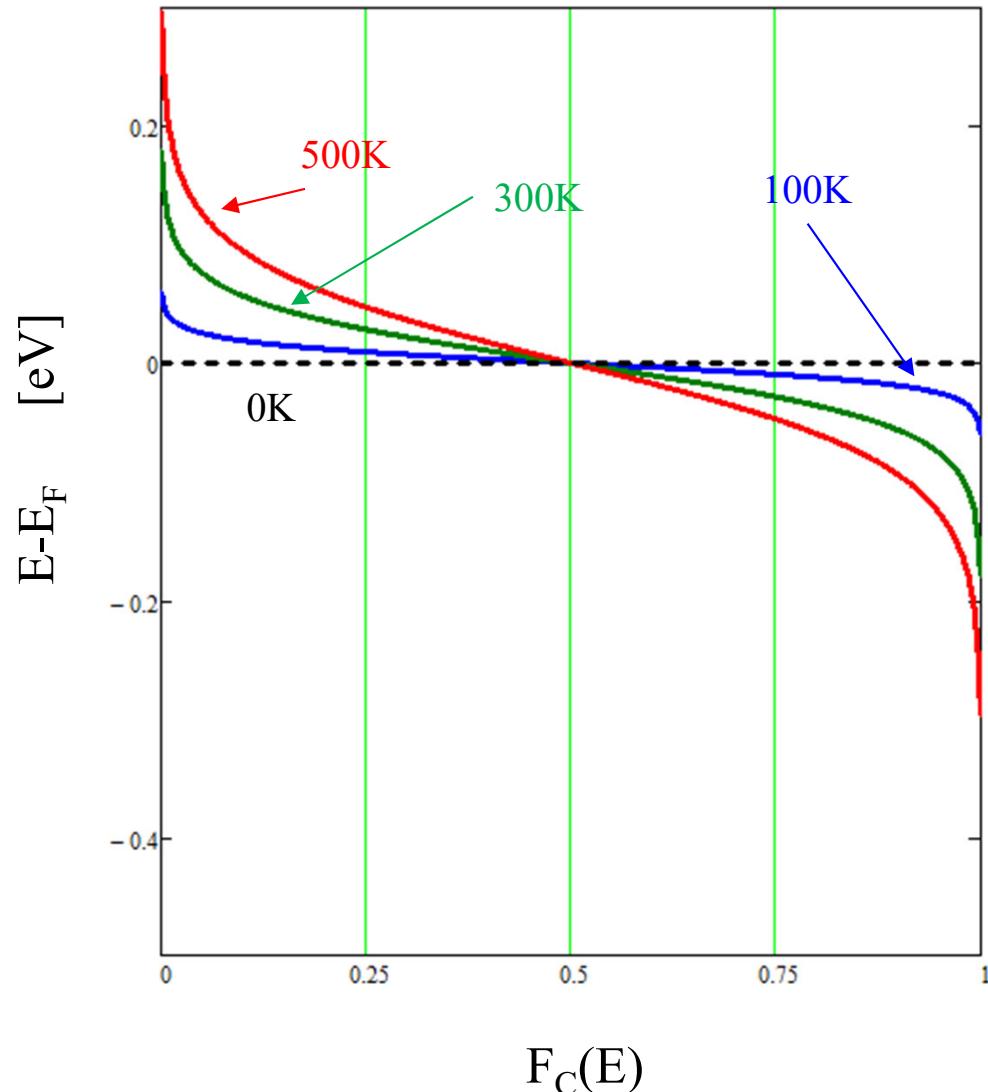
$$F_c(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}$$

→ Fermi-Dirac avec un paramètre le niveau de Fermi

### Trous

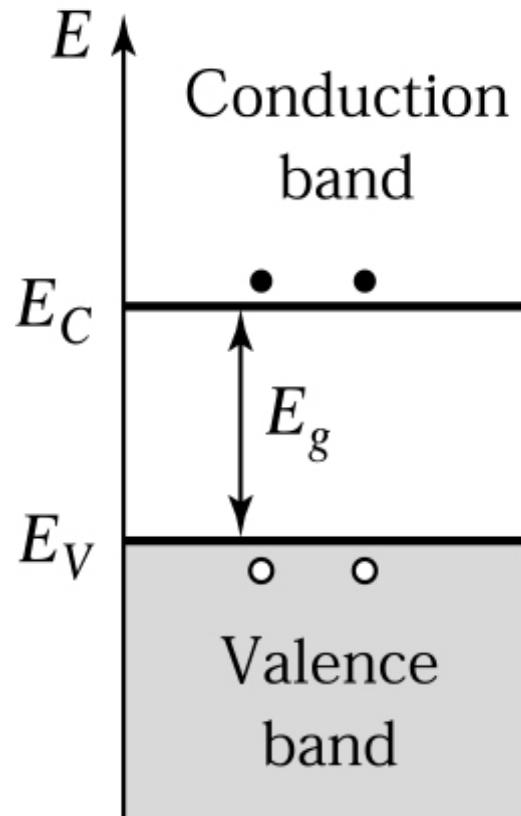
Proba d'occupation d'un trou = 1-proba d'occupation d'un électron

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



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

# Semiconducteur: concentrations de porteurs libres

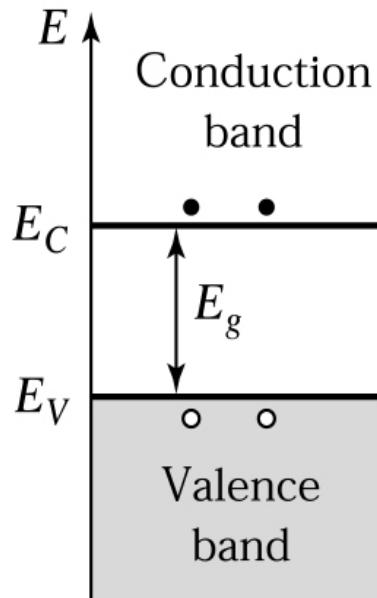
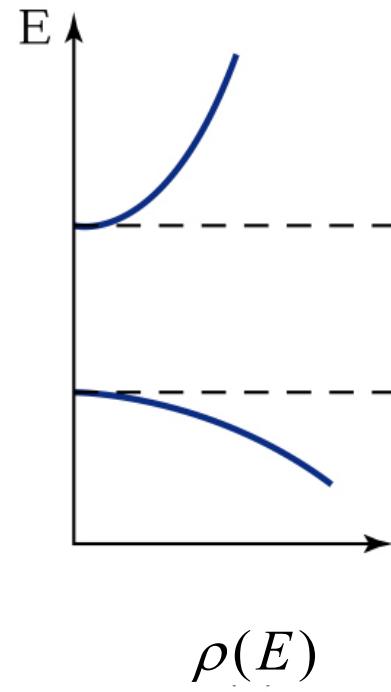
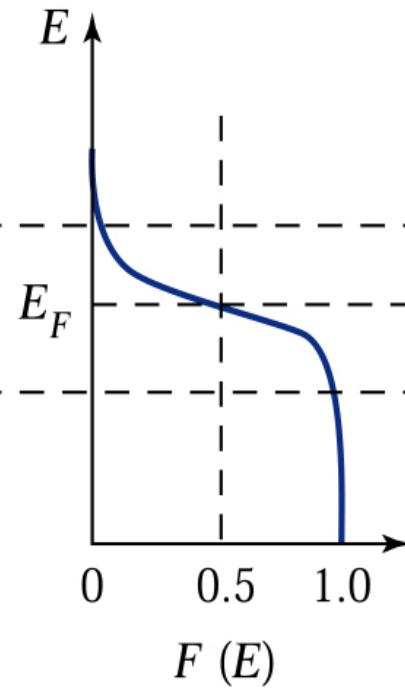
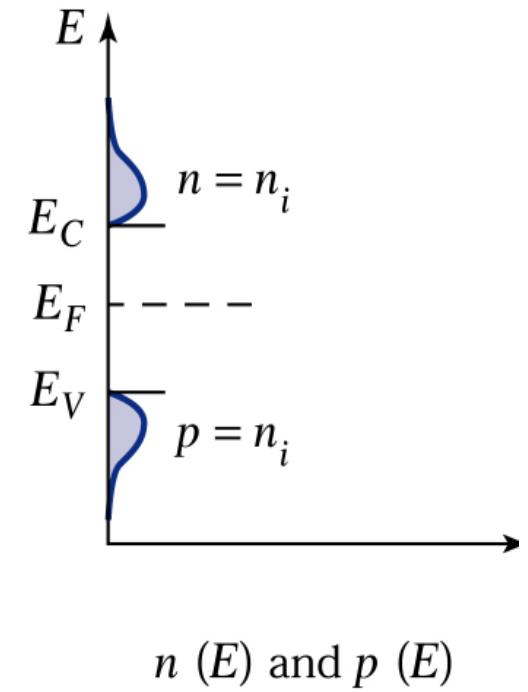


$n$  = concentration d'électrons libres

$p$  = concentration de trous

S. M. Sze “*Semiconductor Devices*”

# Calcul des concentrations de porteurs: principe

**Bandes****Densité d'états****Taux d'occupation****Concentration**

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

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

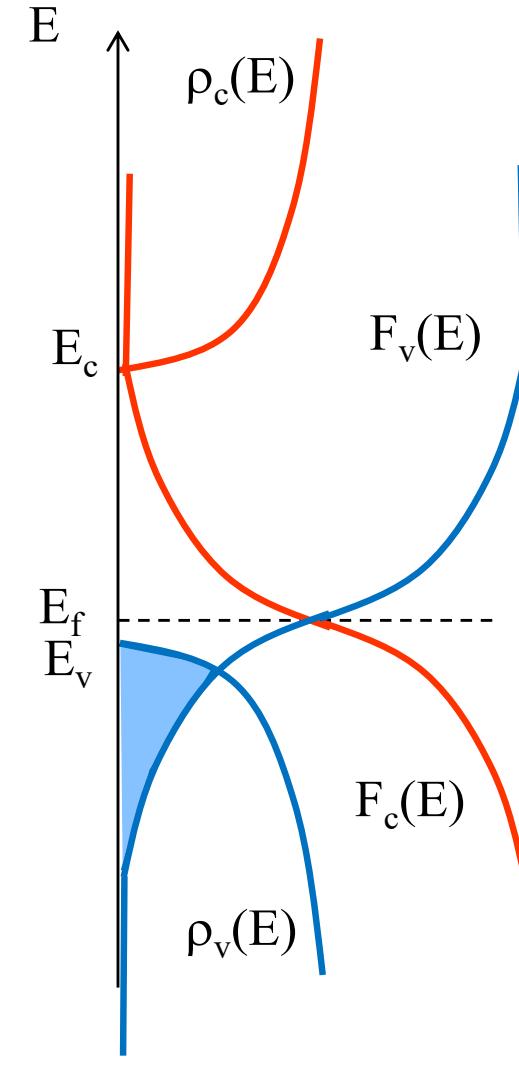
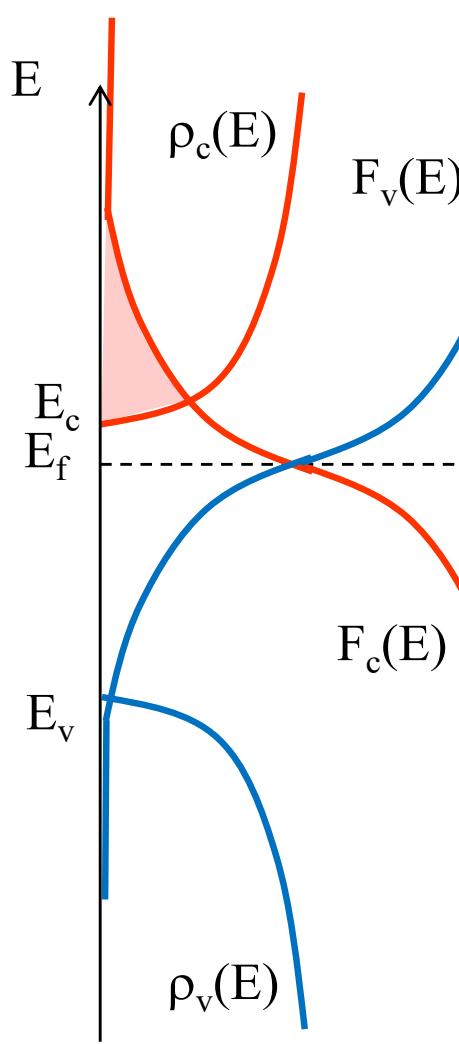
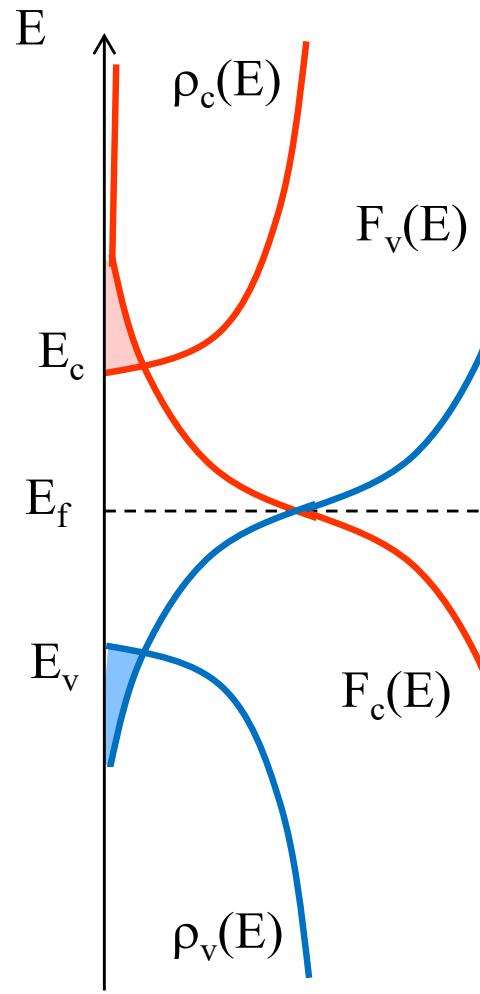
Concentration d'électrons libre dans les bandes de conduction:

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

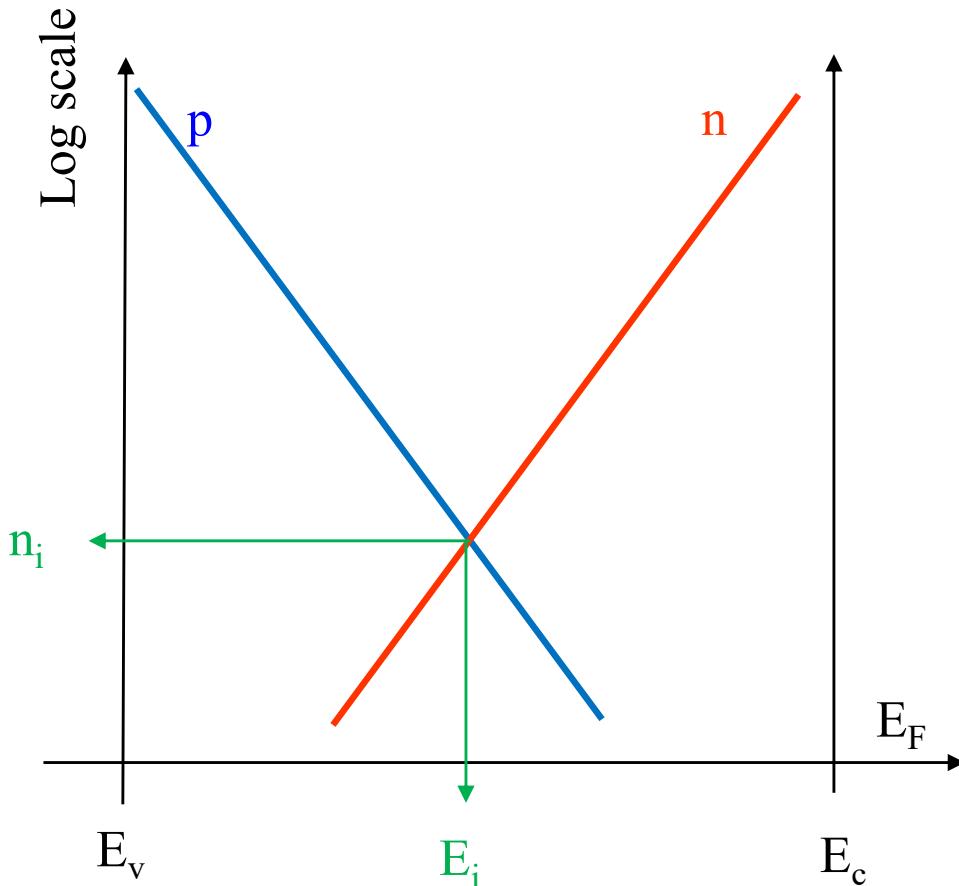
Concentration de trous dans les bandes de valence:

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

- 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

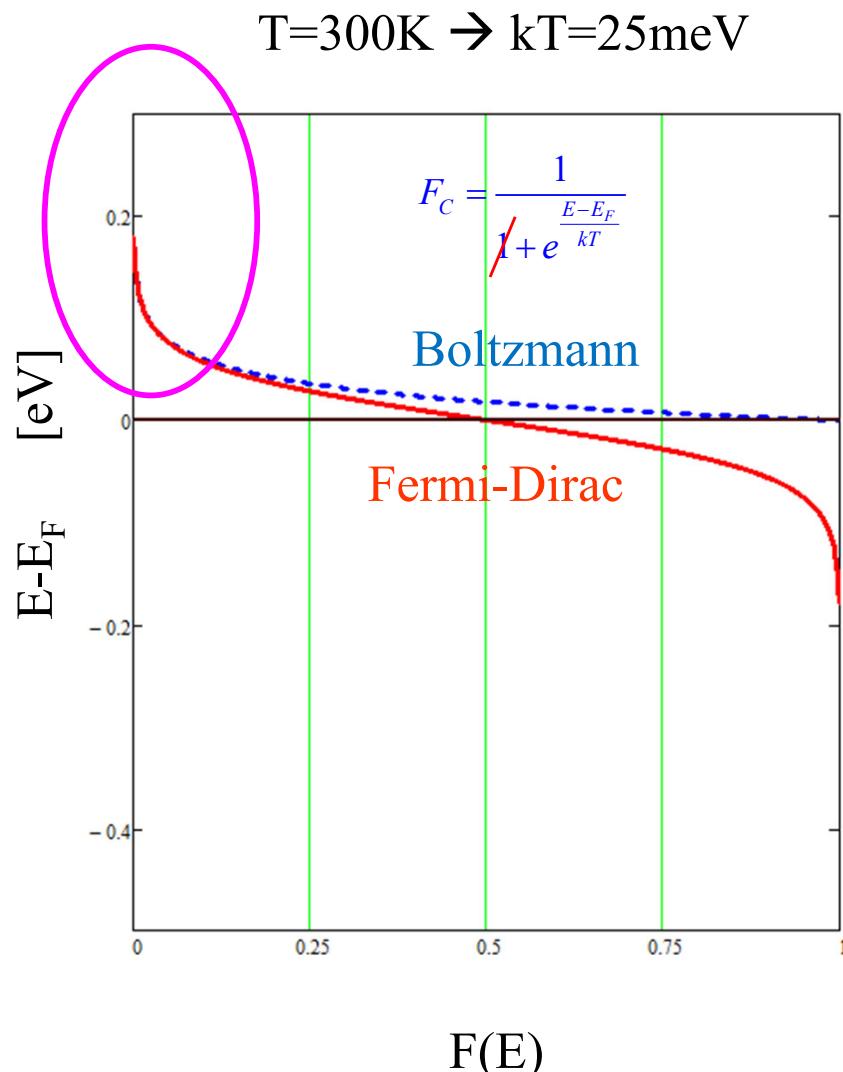


Le semi-conducteur intrinsèque est neutre:

$$\rightarrow n = p = n_i$$

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:

$$\text{Si: } E_c - E_F > 3kT$$

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

Pour la bande de valence:

$$\text{Si: } E_F - E_V > 3kT$$

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

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



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

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



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

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)

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

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

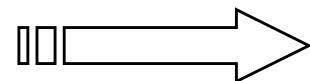
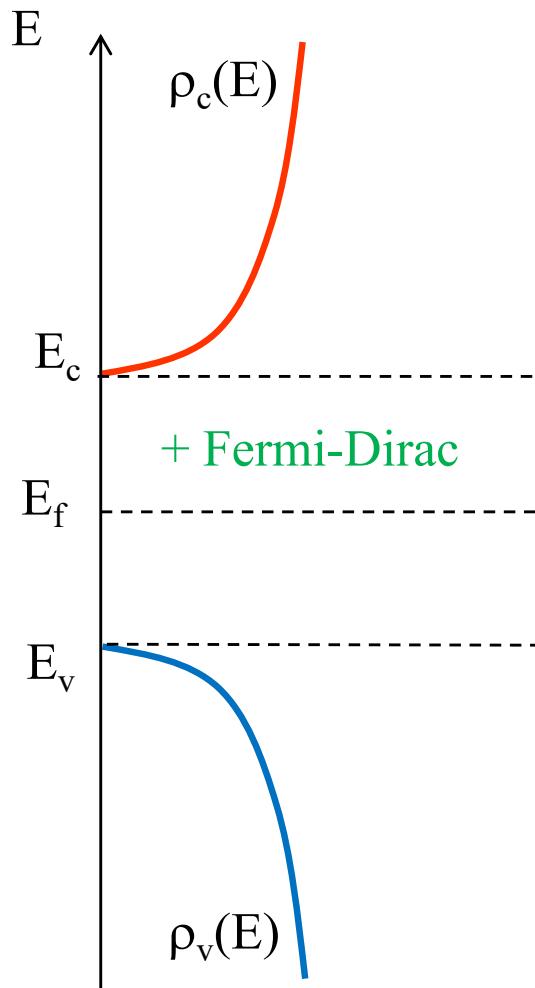
$$p = 2 \cdot \int_{E_{v,\min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) \cdot dE$$

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

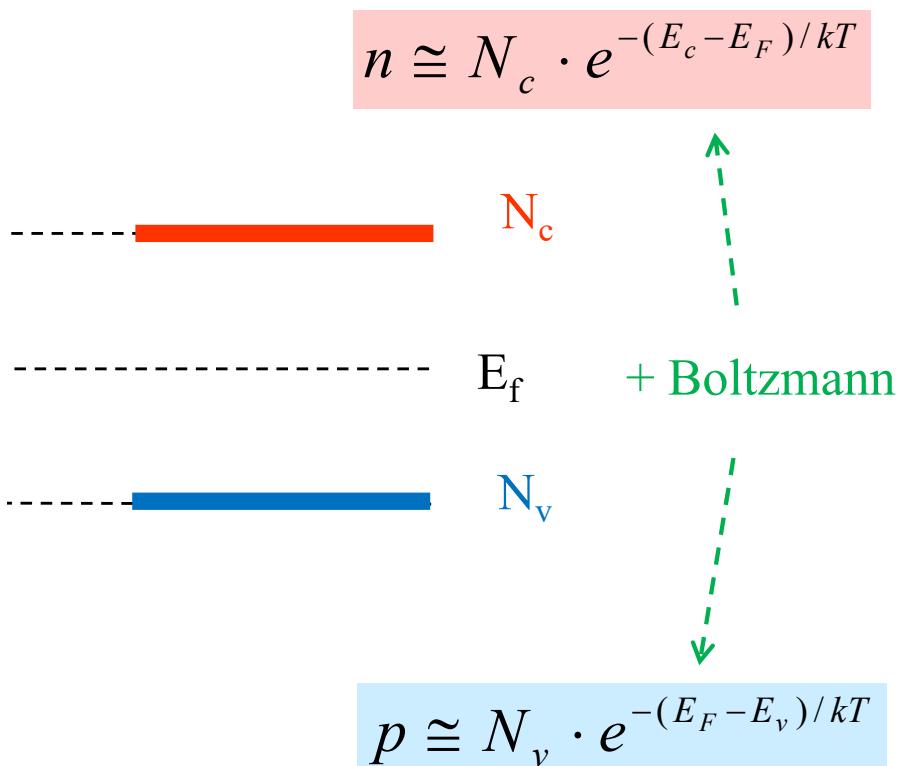
$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

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

**Loi d'action de masse**



« Système à deux niveaux »



# 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

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

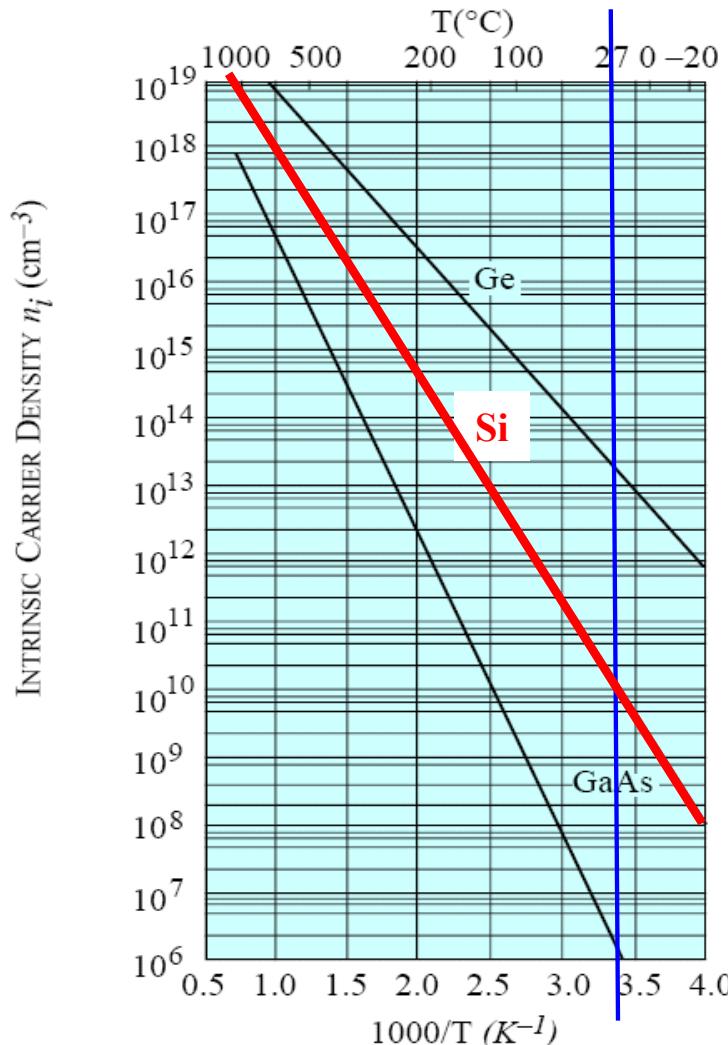
Pour le silicium à température ambiante:

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

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



# Concentration intrinsèque $n_i$



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



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

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

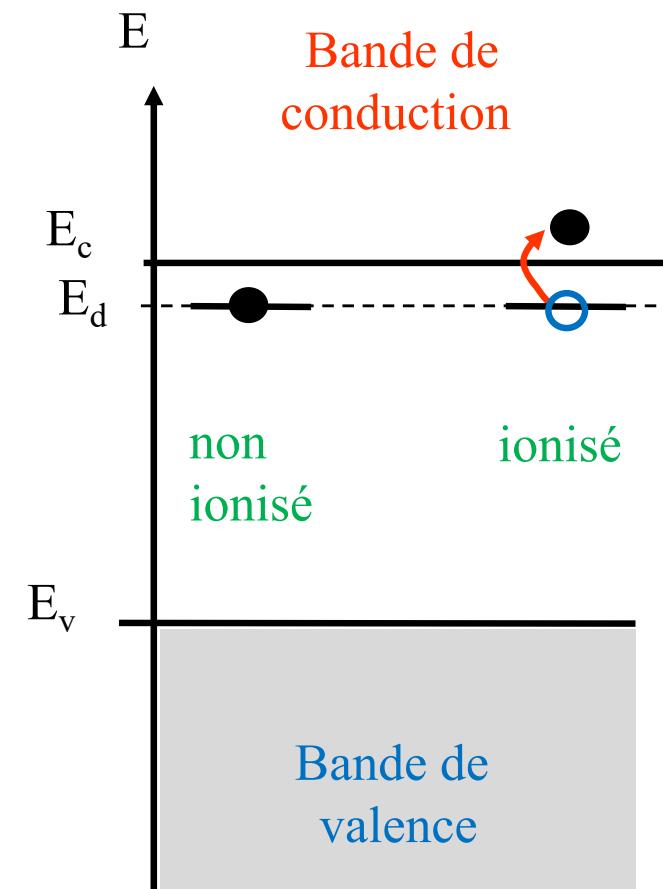
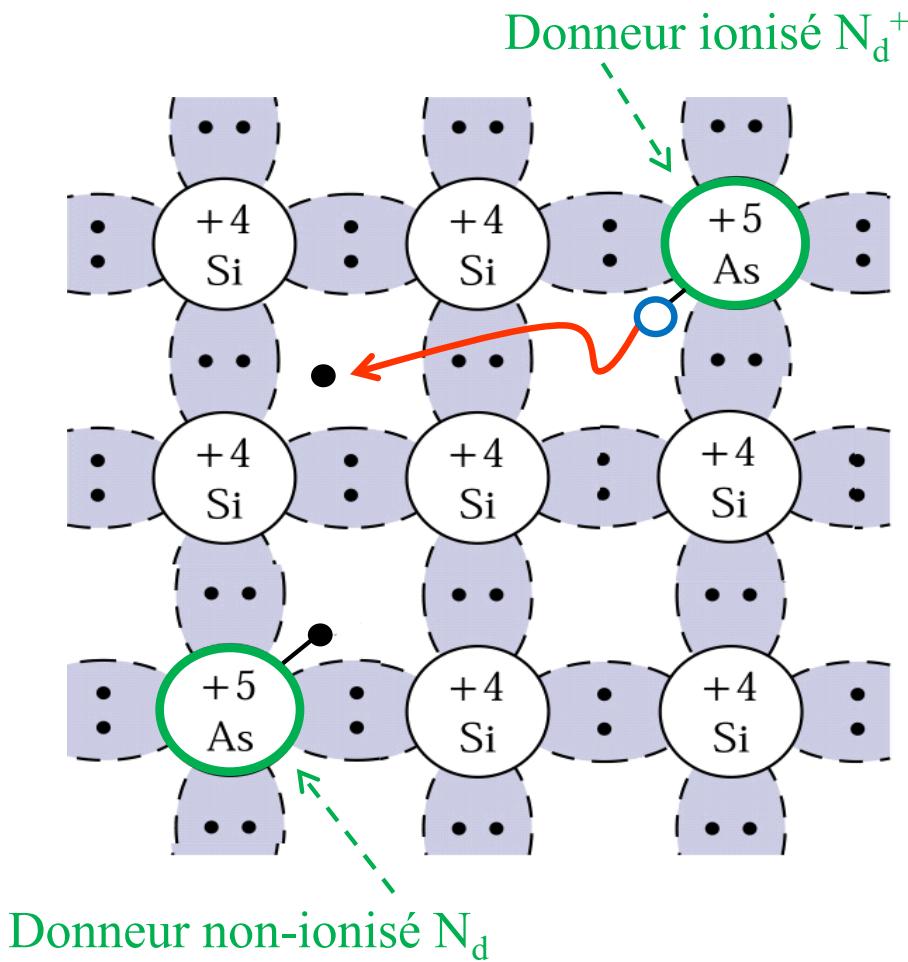
MATERIAL	CONDUCTION BAND EFFECTIVE DENSITY ( $N_c$ )	VALENCE BAND EFFECTIVE DENSITY ( $N_v$ )	INTRINSIC CARRIER CONCENTRATION ( $n_i = p_v$ )	$E_g$ [eV]
Si (300 K)	$2.78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.84 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	1.12
Ge (300 K)	$1.04 \times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

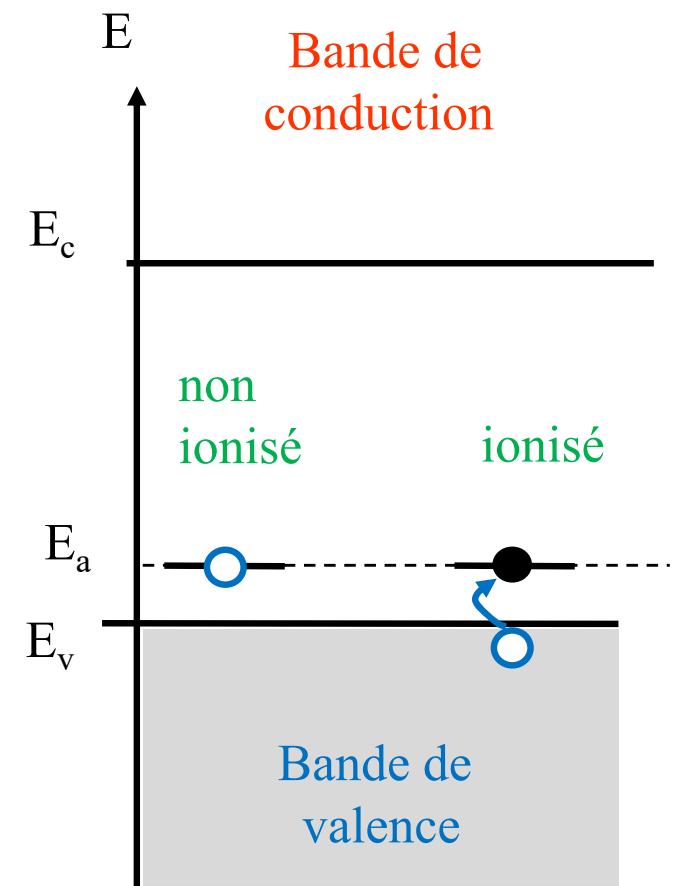
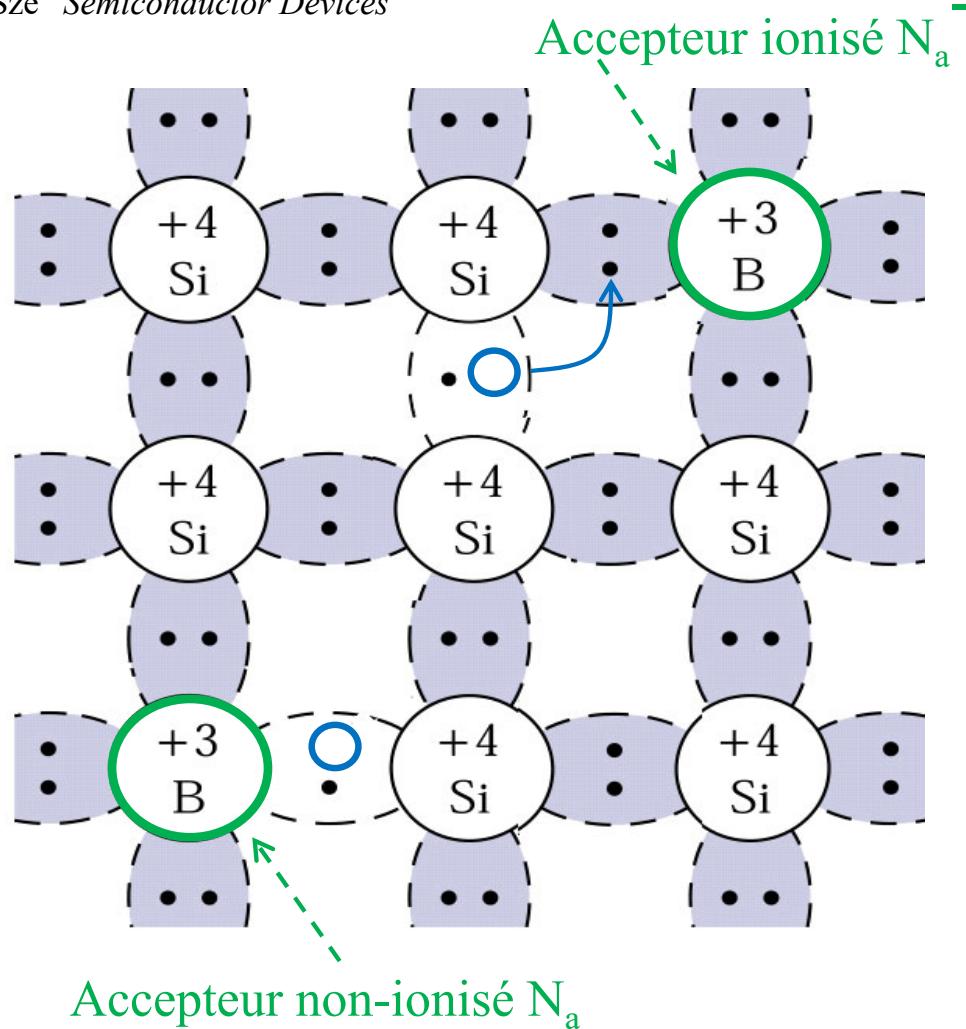
## Donneurs

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



## Accepteurs

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



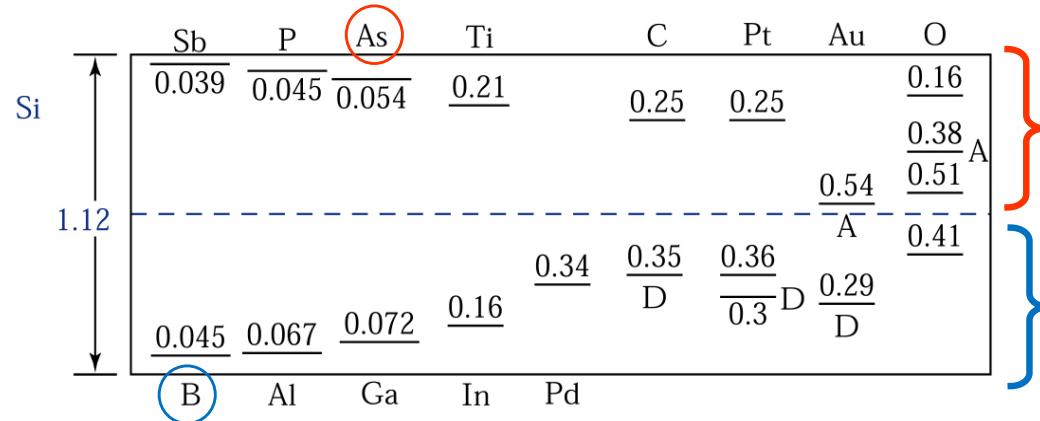
# Tableau périodique des éléments

group	1*																	18	
period	1*	Ia																VIIIb	
	1	H	2	IIa													0		
1																			
2		Li	Be														He		
3		Na	Mg	3 IIIa**	4 IVa	5 Va	6 VIa	7 VIIa	8 VIIa	9 VIIa	10 VIIa	11 Ib	12 IIb	13 IIIa	14 IVa	15 Va	16 Vb	17 VIIb	18 VIIa
4		K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6		Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7		Fr	Ra	Ac	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****						
	6	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
	7	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Encyclopaedia Britanica, Inc.

## Choix du dopant

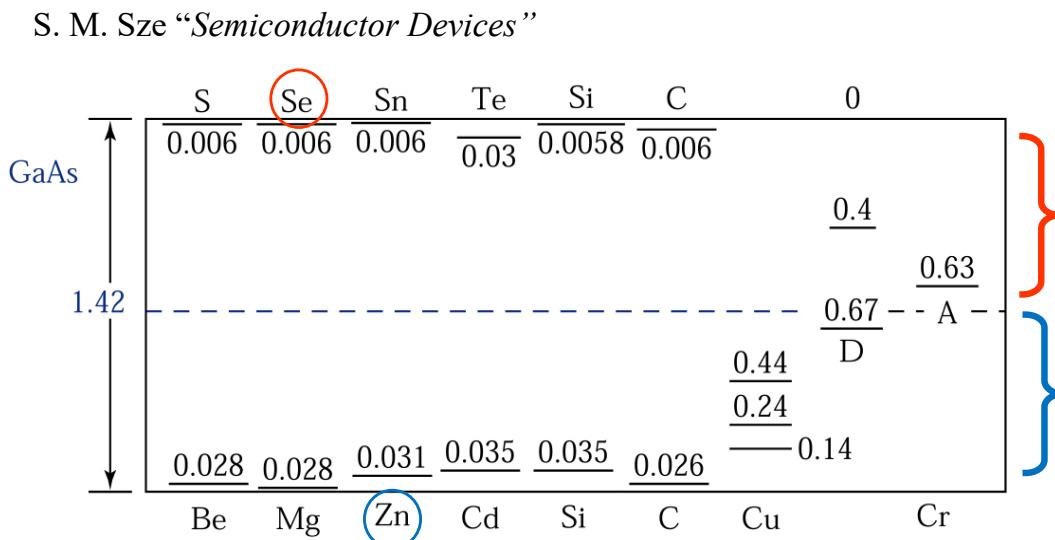
Silicium  
IV



Donneurs (V)

Accepteurs (III)

GaAs  
III-V

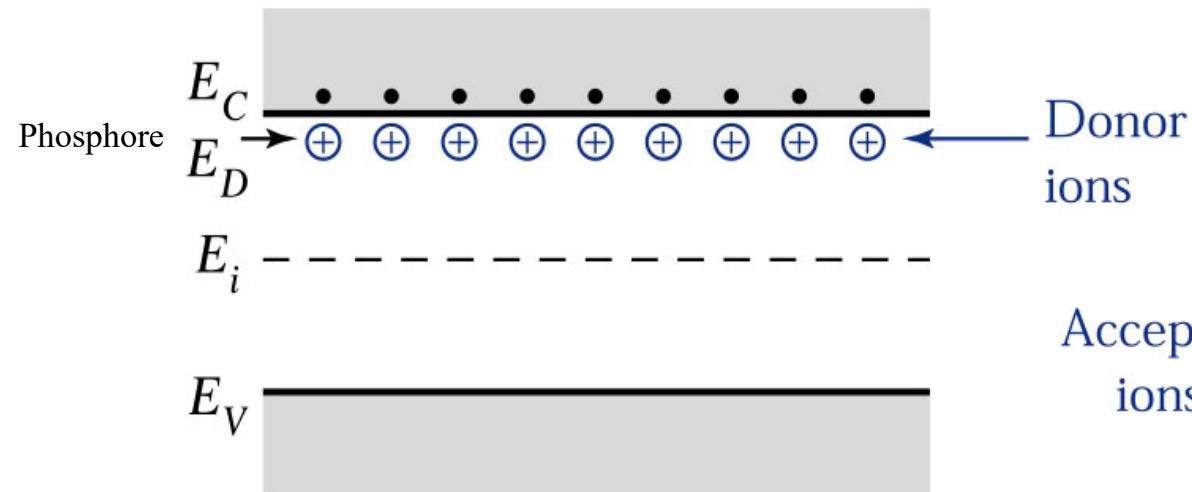


Donneurs (VI)  
ou (IV)

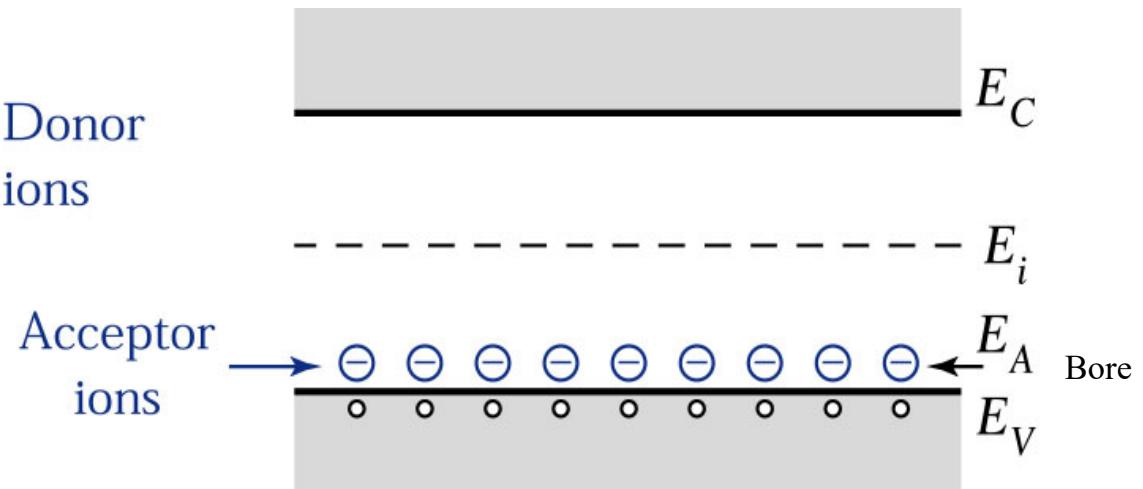
Accepteurs  
(II) ou (IV)

A température ambiante:  
Ionisation complète

Type n



Type p



S. M. Sze “*Semiconductor Devices*”



# Taux d'occupation des donneurs et accepteurs

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)

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

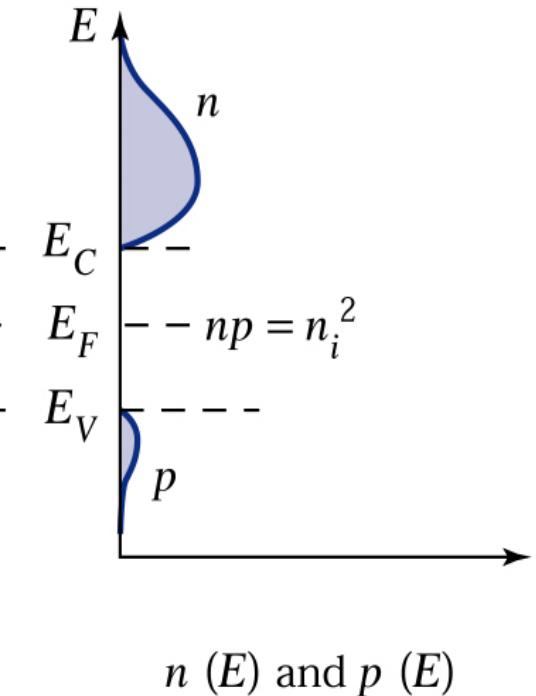
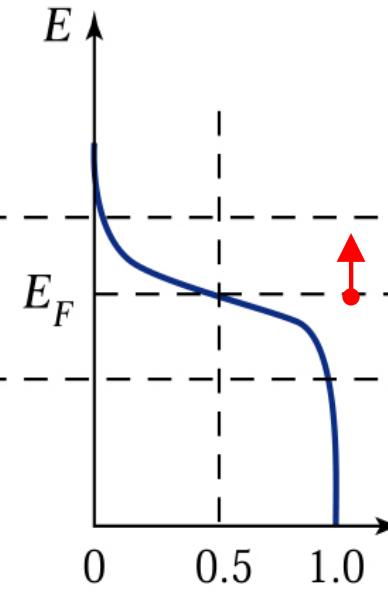
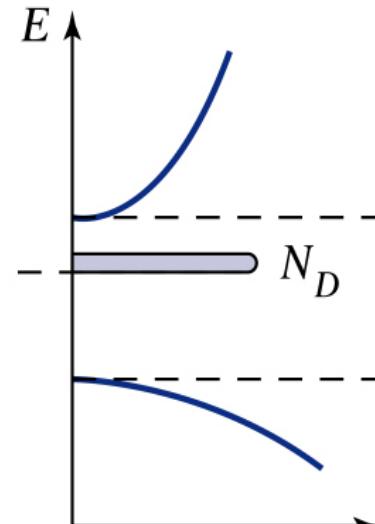
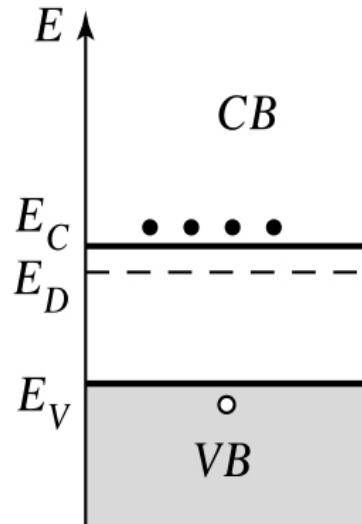
Probabilité pour un accepteur d'avoir un trou:

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

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

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

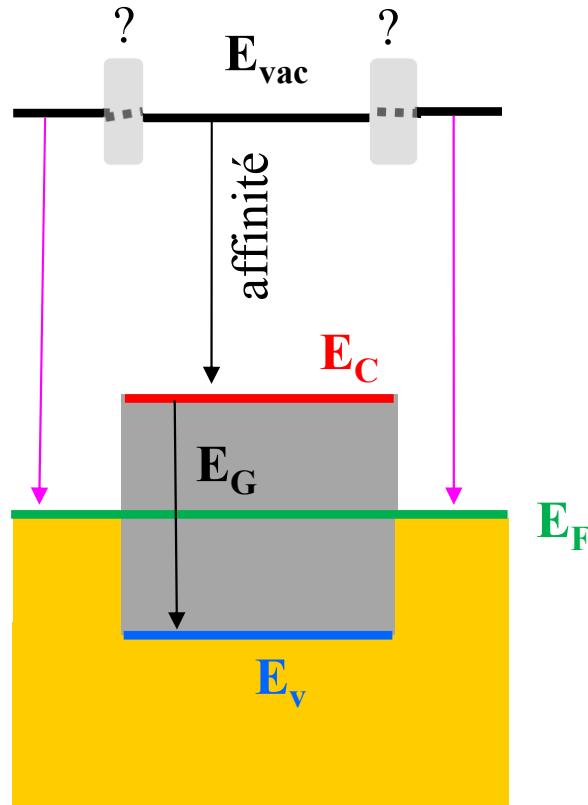
# Concentrations de porteurs: semi-conducteur extrinsèque (« dopé »)



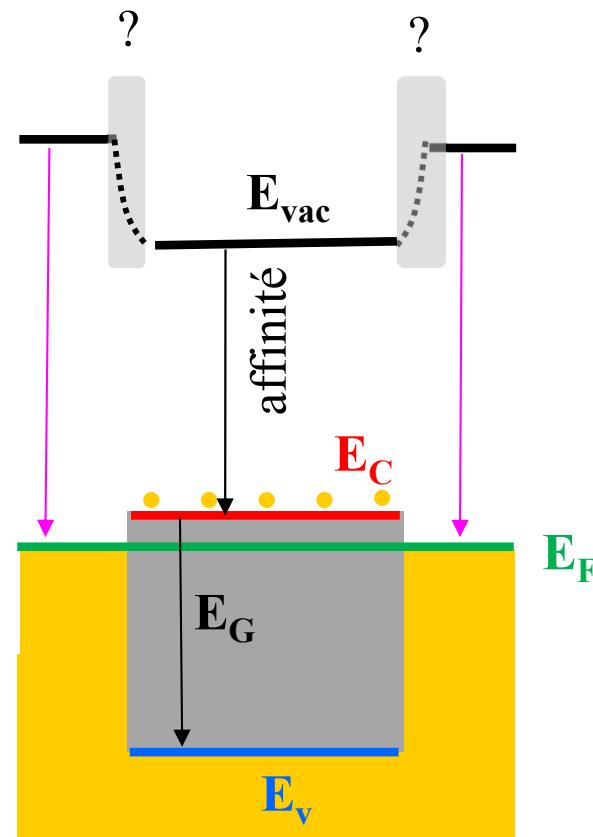
$$\text{Concentration} = 2 \cdot \int_{\text{Spin}} \rho(E) \cdot F(E) dE$$

S. M. Sze "Semiconductor Devices"

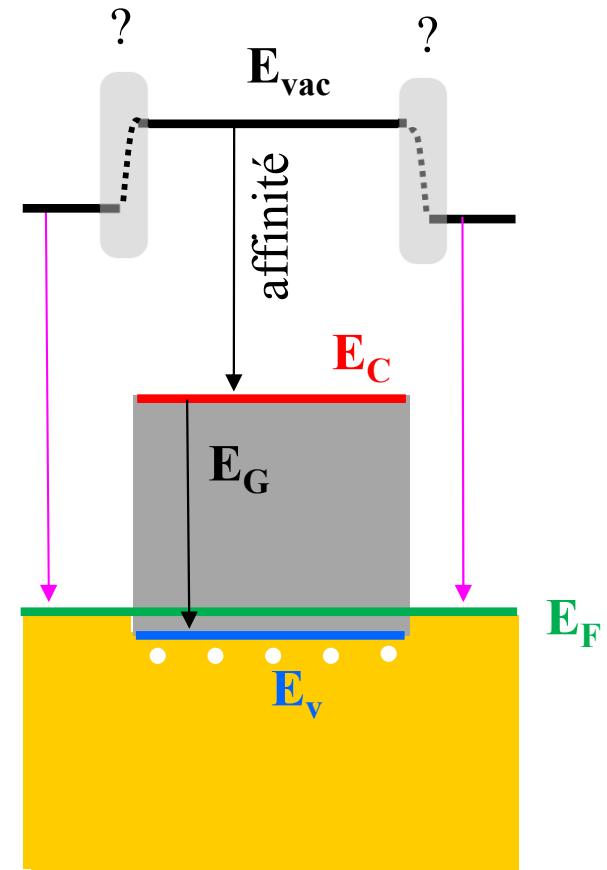
Work function

Non dopé

Work function

Dopé N

Work function

Dopé P

## 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

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

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

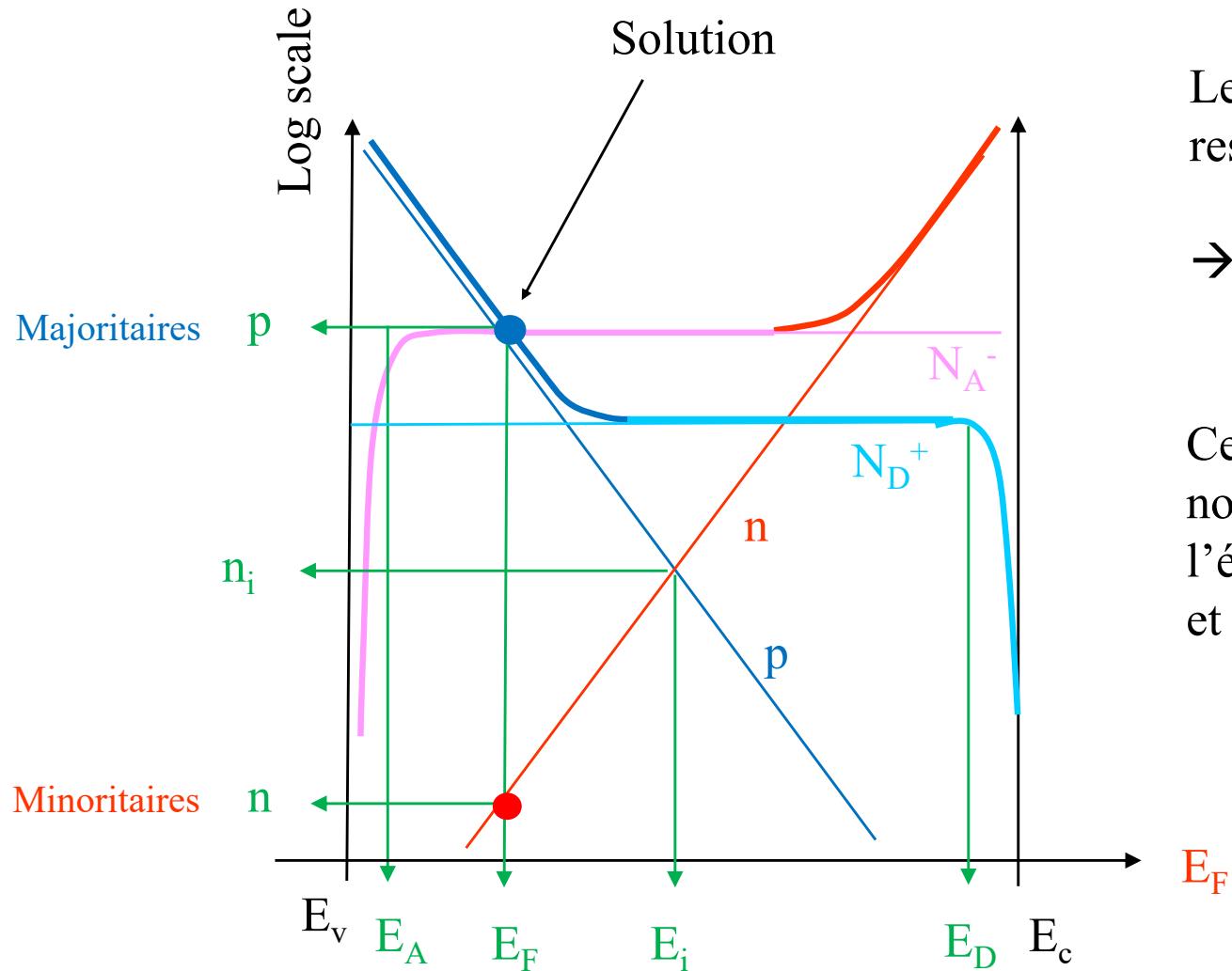
$$n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

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

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

**Loi d'action de masse**

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

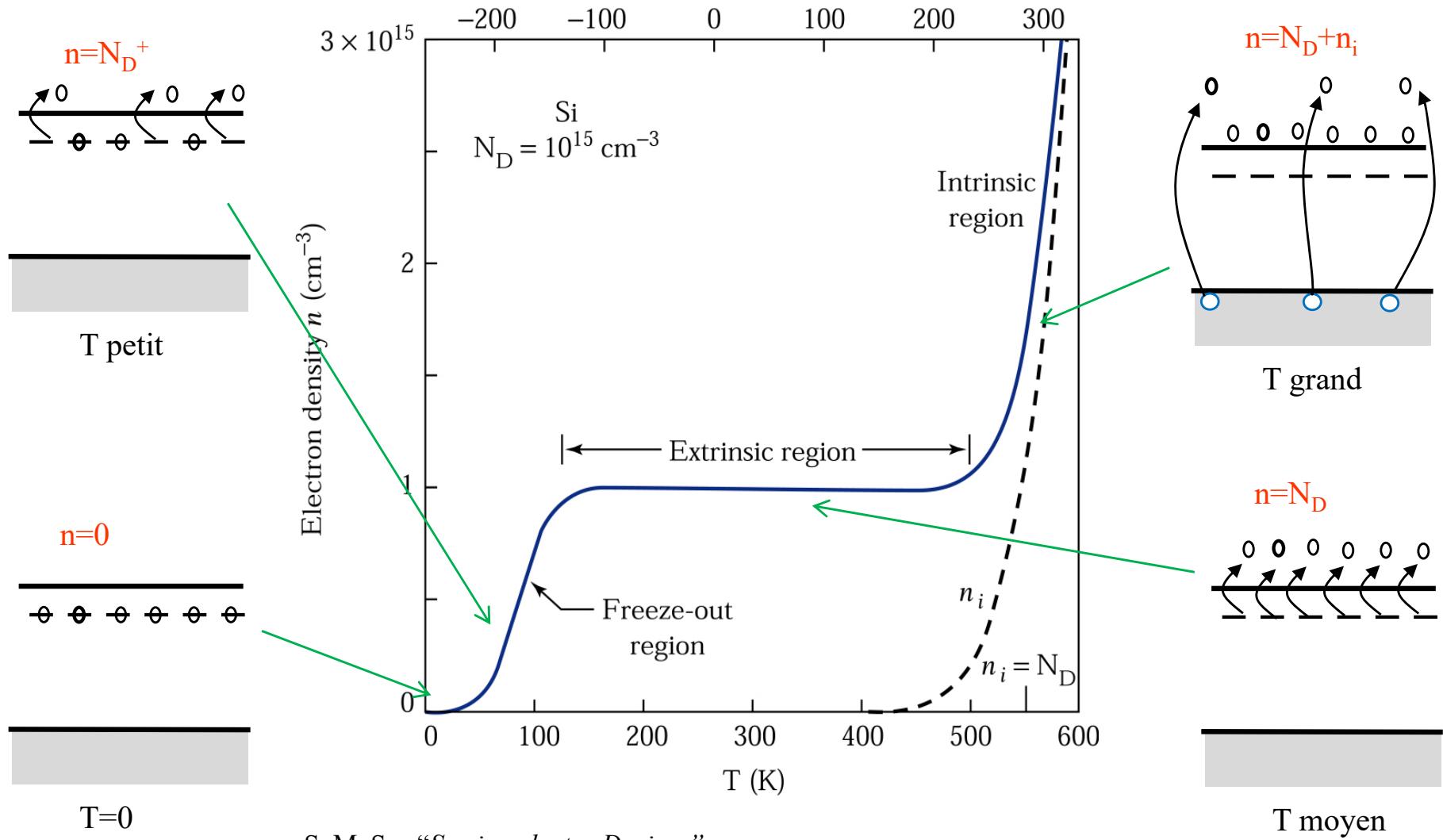


Le semi-conducteur dopé reste neutre:

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

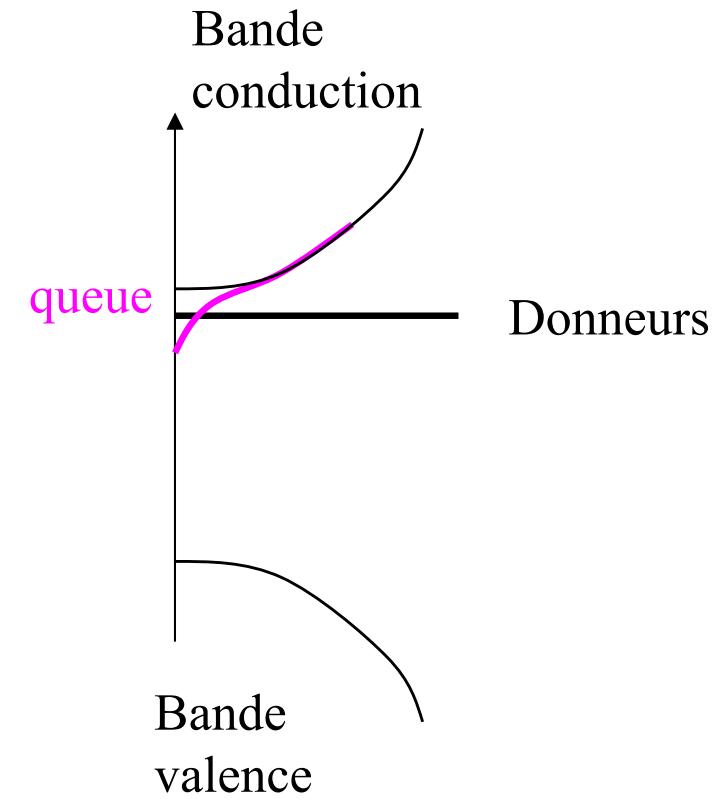
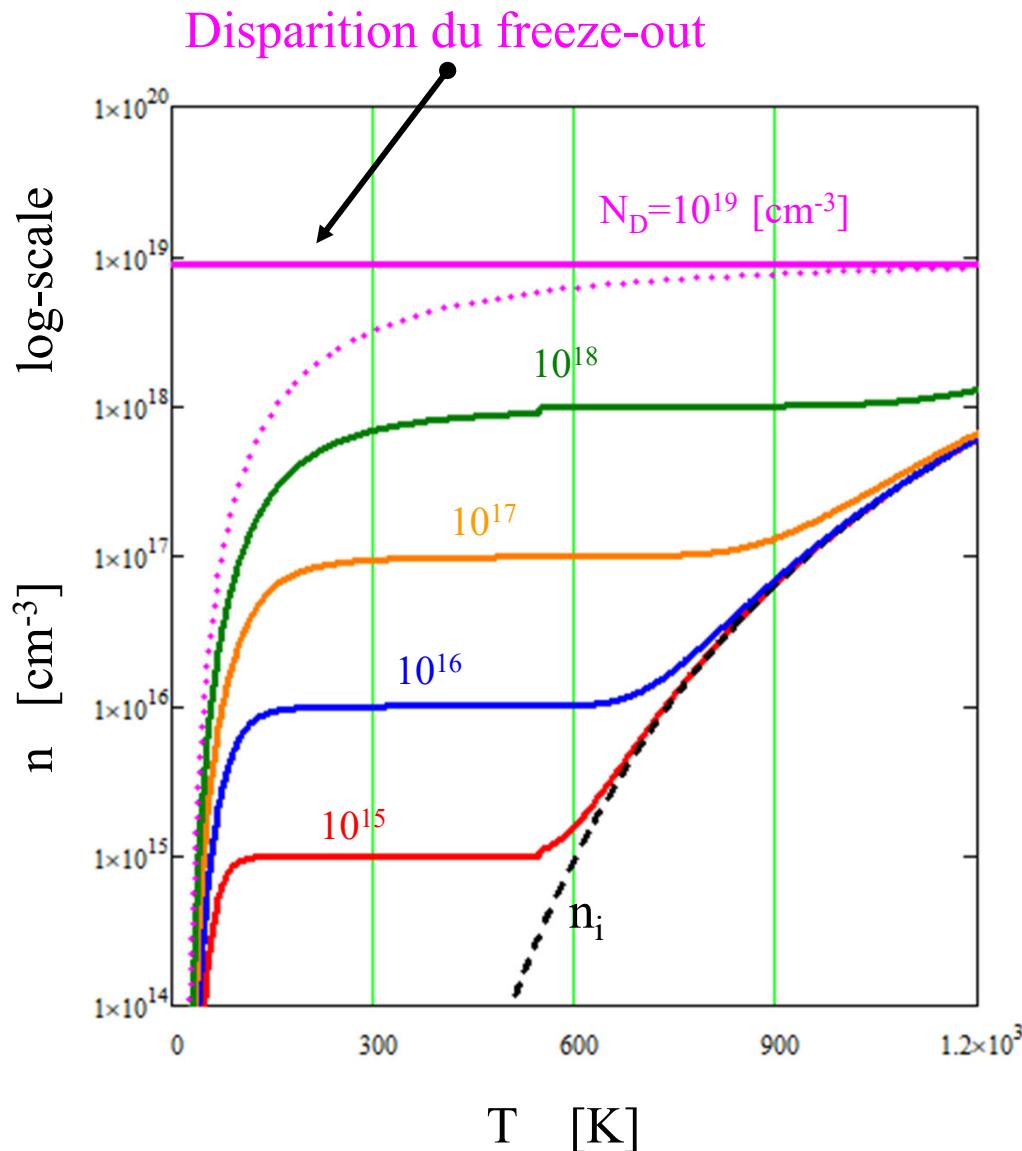
Cette condition de neutralité nous donne la valeur de:  
l'énergie de Fermi  $E_F$   
et des concentrations  $n$  et  $p$

## Concentration et température

S. M. Sze “*Semiconductor Devices*”

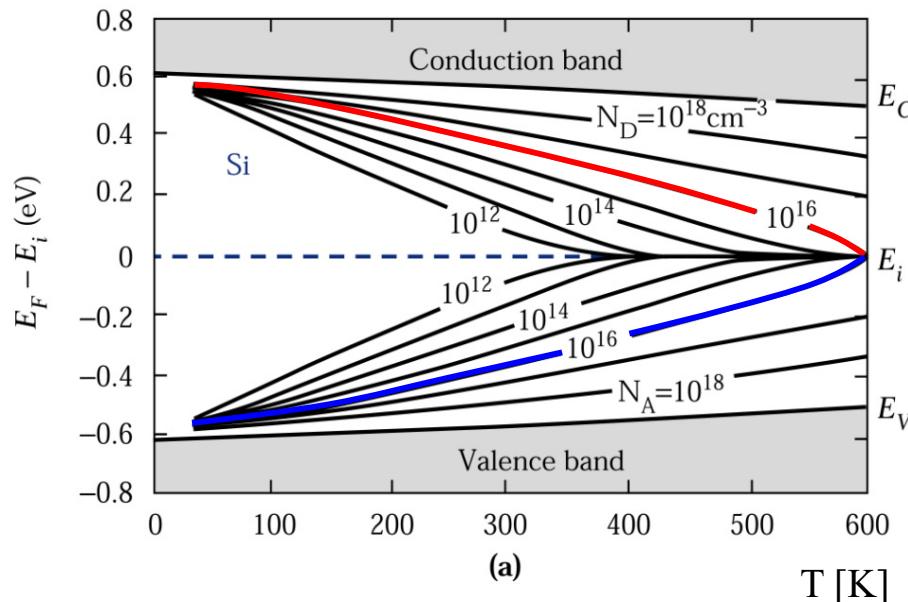


# Concentration de porteurs avec des dopages très élevés



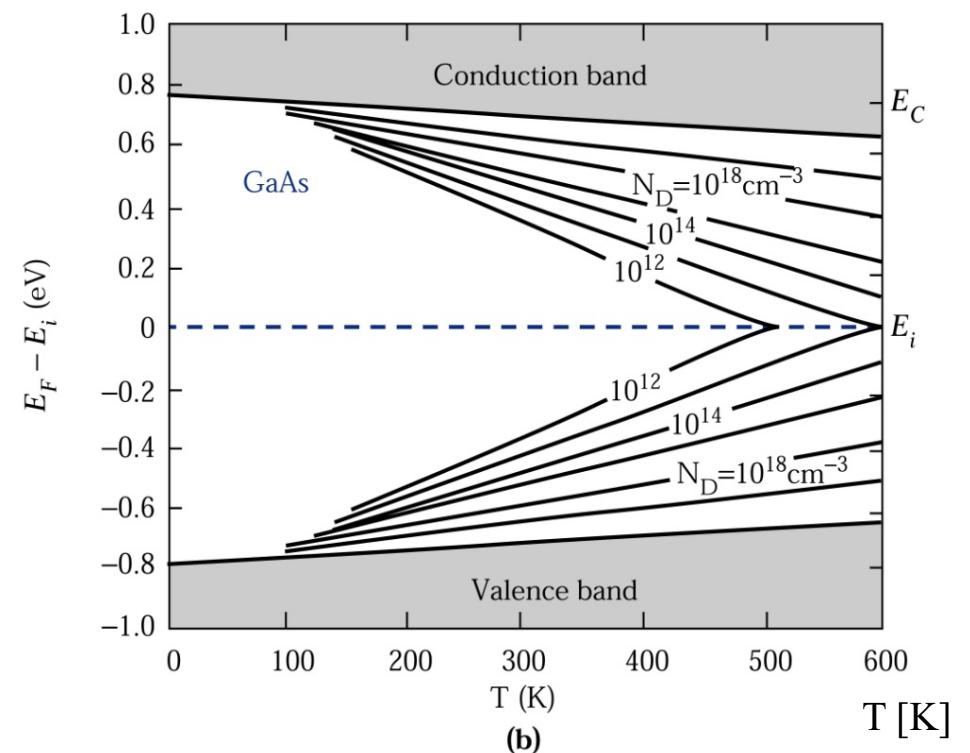
A très fort dopage ( $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), les donneurs se touchent et forment une queue de bande

## Silicium



(a)

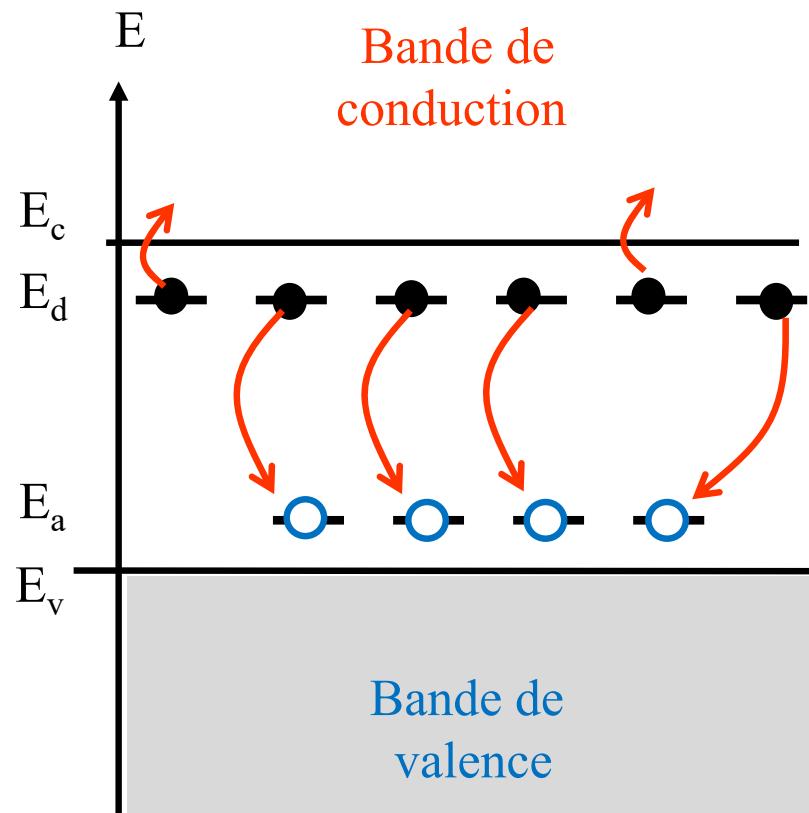
## GaAs



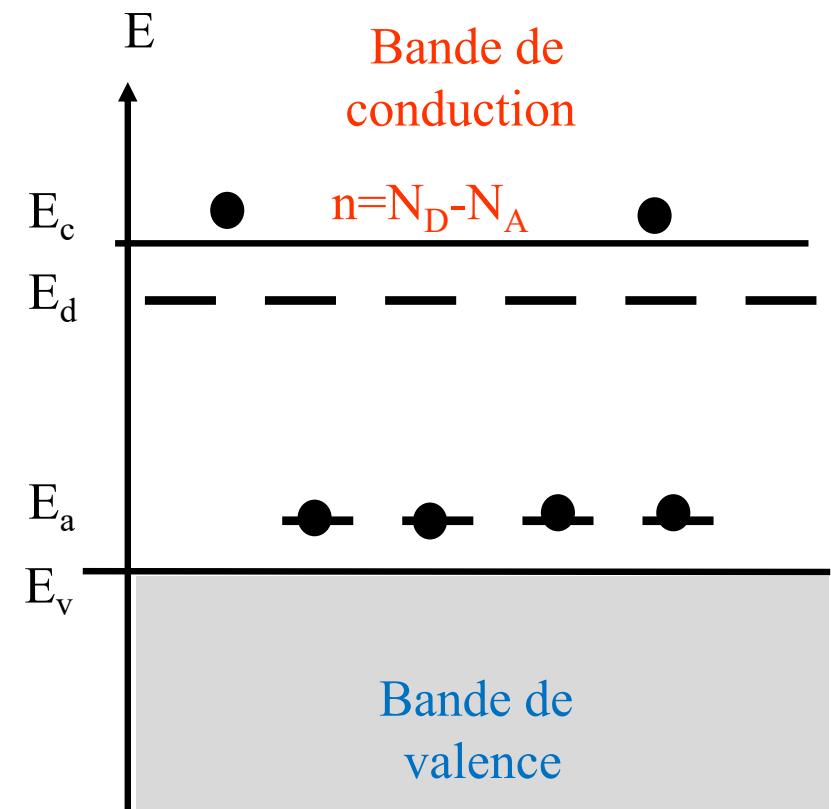
(b)

S. M. Sze “*Semiconductor Devices*”

## Effet de compensation de dopage



État de départ



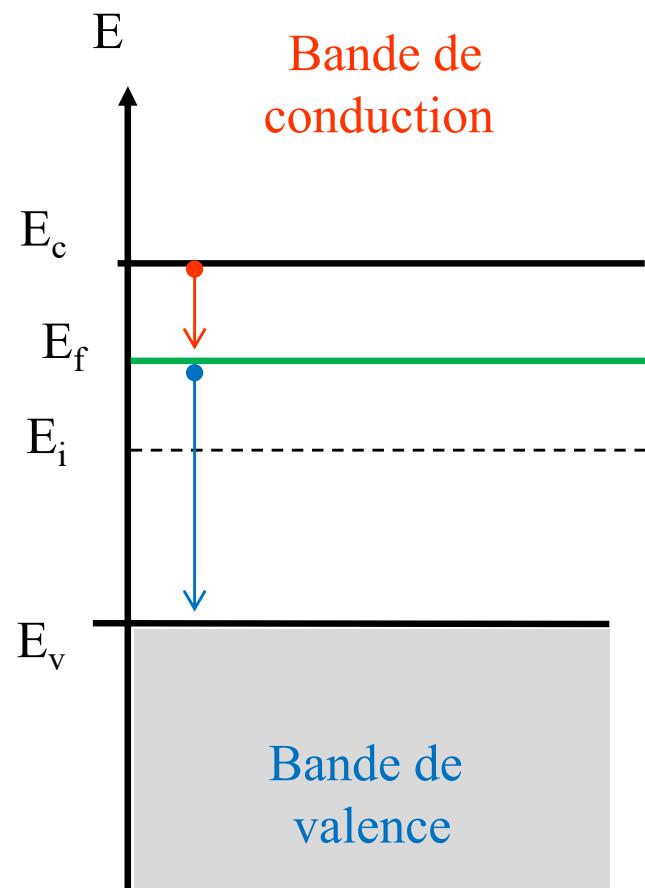
Ionisation complète

État d'équilibre

Par référence aux  
densités effectives d'états

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

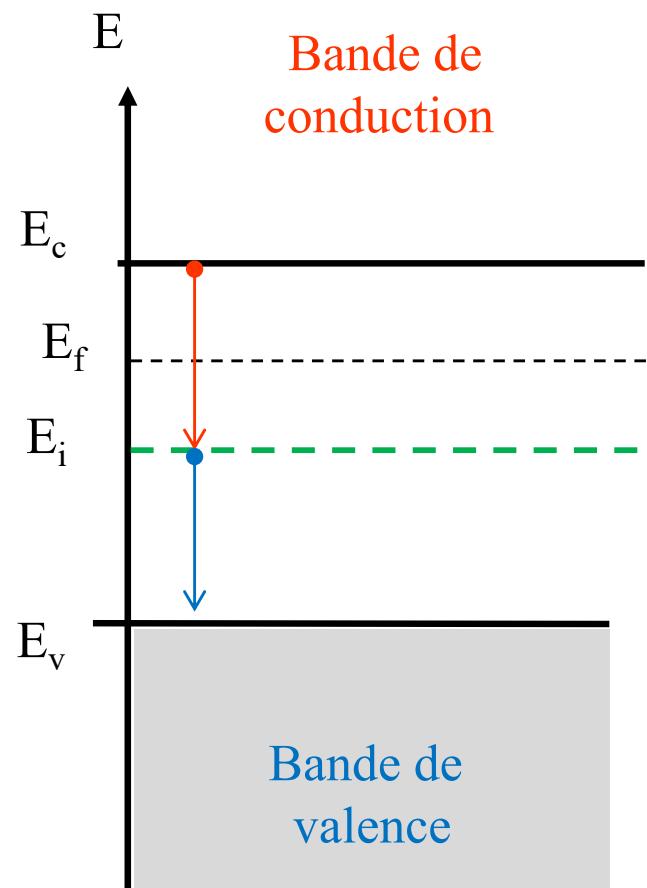
$$p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT}$$



Par référence aux  
densités effectives d'états

$$\left[ \begin{array}{l} n \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_F)/kT} \\ n_i \cong N_c \cdot e^{-(E_c - E_i)/kT} \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{l} p \cong N_v \cdot e^{-(E_F - E_v)/kT} \\ p_i = n_i \cong N_v \cdot e^{-(E_i - E_v)/kT} \end{array} \right]$$



2<sup>ème</sup> écriture pour les concentrations n et p

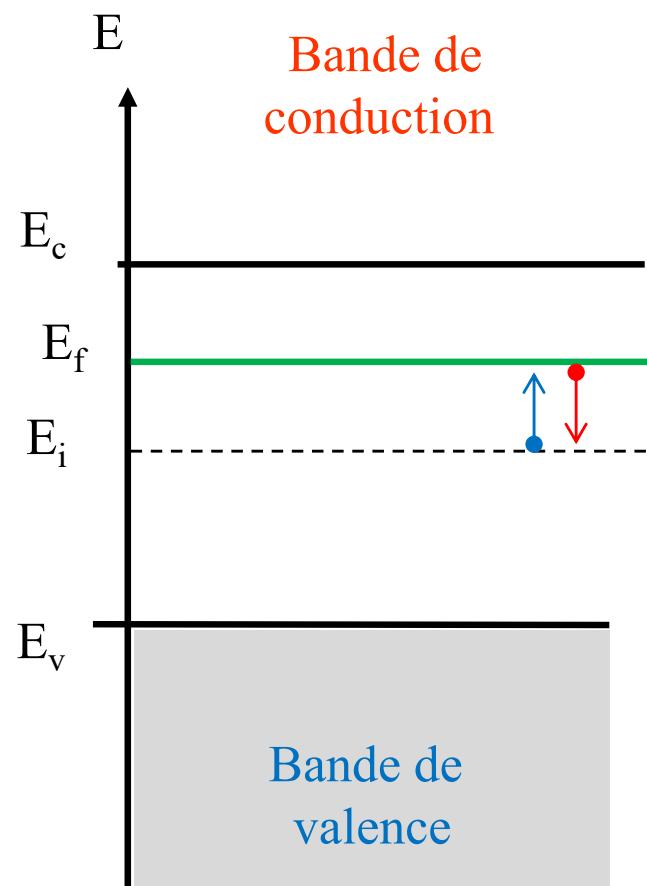
Par référence aux densités effectives d'états

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

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

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

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



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:

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

$$N_D \gg N_A$$

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

$$p = n_i^2 / N_D$$

Loi d'action de masse  
pour les minoritaires

Type p:

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

$$N_A \gg N_D$$

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

$$n = n_i^2 / N_A$$



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

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



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