

NOTIONS FONDAMENTALES SUR LA PHYSIQUE DES SEMI- CONDUCTEURS

Composants électroniques à semi-conducteurs

✓ Les composants à semi-conducteurs

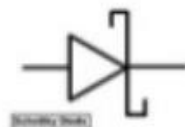
Diode
simple



Diode
Zener



Diode
Schottky



Composants électroniques à semi-conducteurs

✓ Les composants optoélectroniques

Diode
luminescente



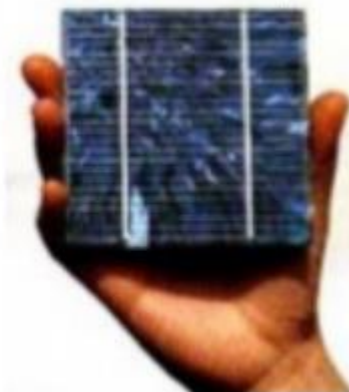
Laser



Photodiode



Diode
photovoltaïque



Composants électroniques à semi-conducteurs

- ✓ L'électronique intégrée-puissance

Transistors Bipolaires



Transistors MOSFET



Microprocesseur

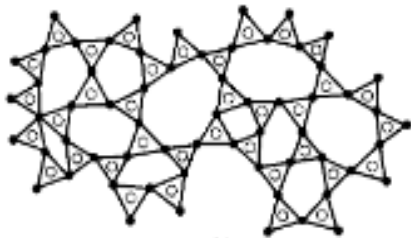


Les matériaux solides

L'état solide se présente principalement sous deux formes :

Solides Amorphe

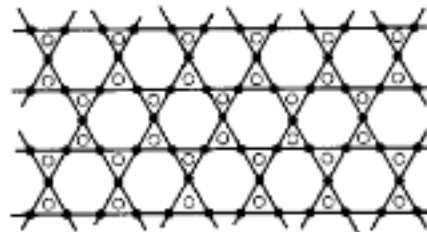
Un solide amorphe est un solide où les atomes sont dispersés sans symétrie apparente. Il n'y a pas de symétrie de translation.



Silice amorphe
(ex.: verre)

Solides cristallins

Un solide cristallin est un solide où les atomes sont régulièrement placés et selon un ordre géométrique bien défini appelé réseau cristallin.

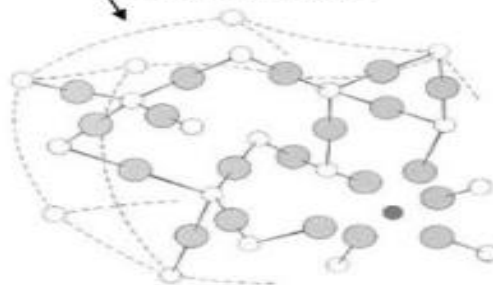
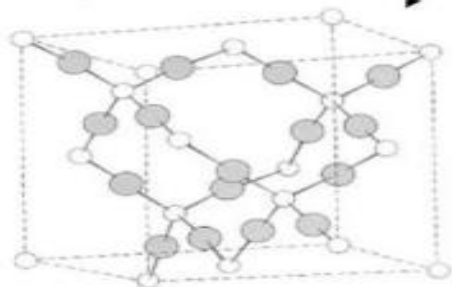


Silice
cristallisée
(ex.: quartz)

Silice SiO_2

état cristallisé

état amorphe



le quartz

le verre



Les matériaux semi-conducteurs

Par leurs propriétés électriques, les matériaux peuvent être classés en trois groupes: les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants.

Isolant

$$[10^{11} \leq \rho \leq 10^{19}] \Omega \text{ Cm}$$

Conducteur

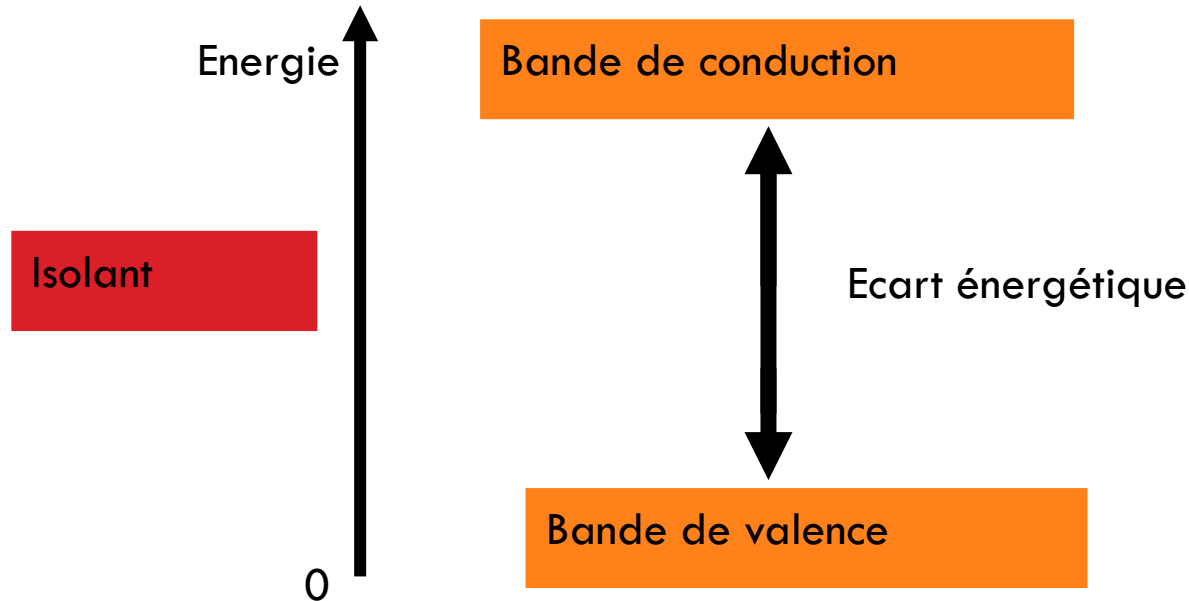
$$[1.5 \cdot 10^{-6} \leq \rho \leq 10^{-4}] \Omega \text{ Cm}$$

Semi-conducteur Quelques éléments ont une résistivité intermédiaires. Pour cette raison ils ont le nom de semi-conducteur

$$[10^{-3} \leq \rho \leq 10^6] \Omega \text{ Cm}$$

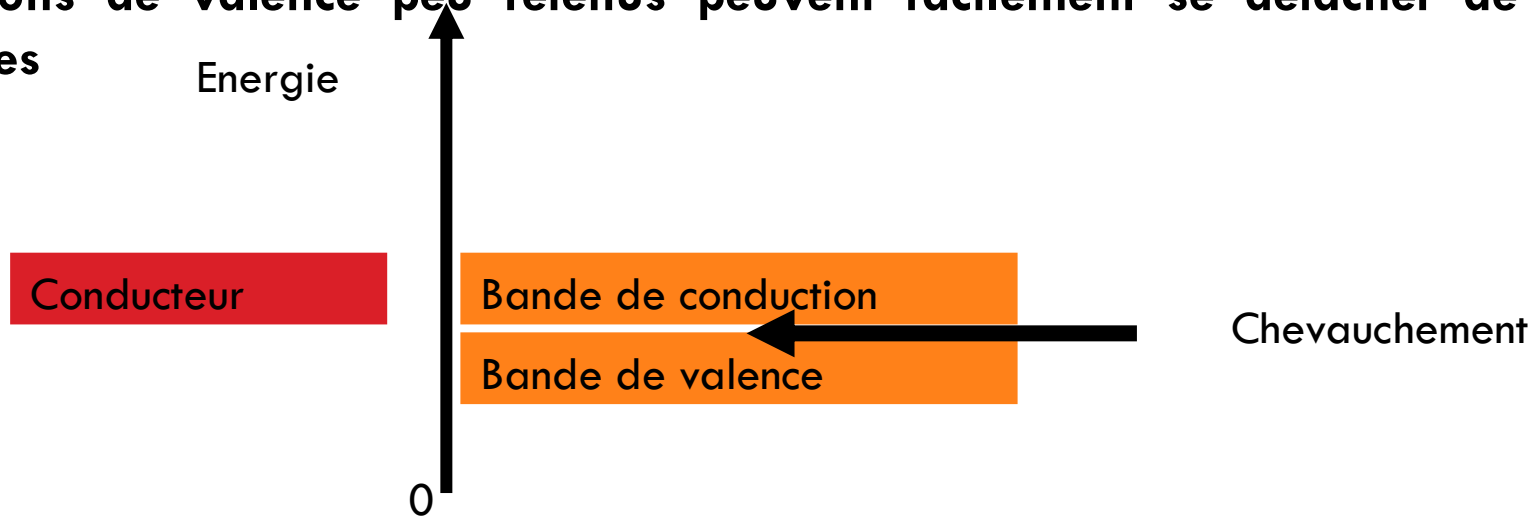
Isolants

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant.



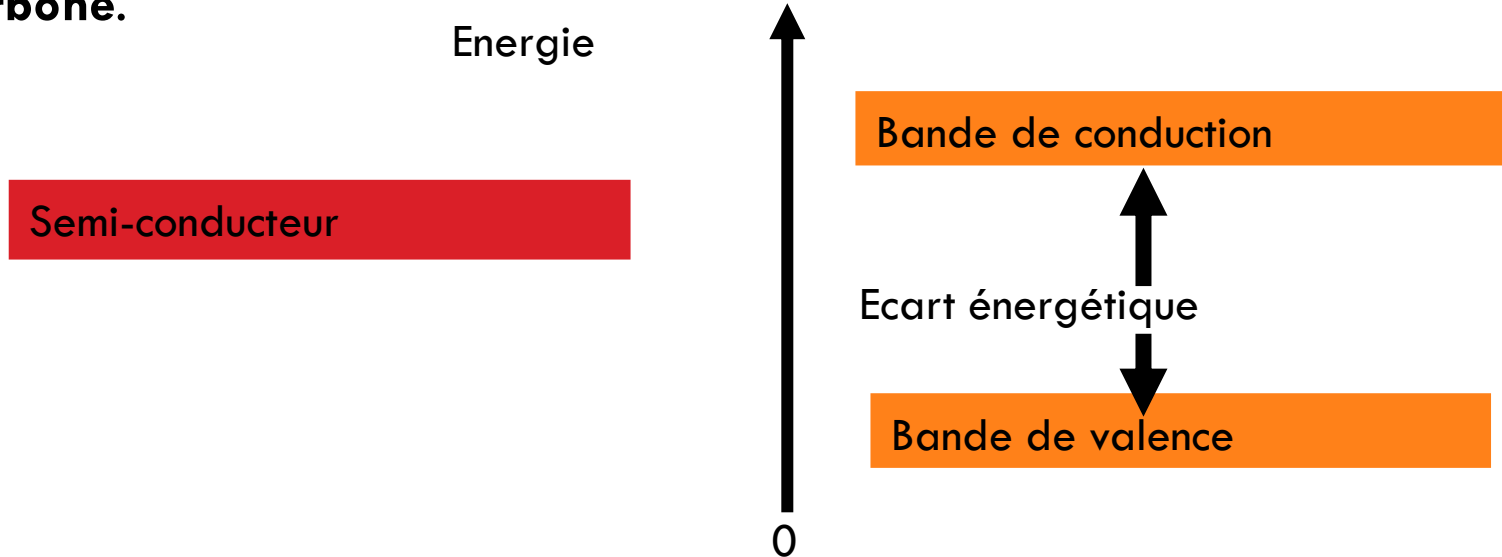
Conducteurs

Un conducteur est un matériau qui conduit aisément le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme le cuivre, l'argent, l'or et l'aluminium, ces éléments étant caractérisés par un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Ces électrons de valence peu retenus peuvent facilement se détacher de leur atomes



Semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque) n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le Silicium, le Germanium et le carbone.



Conducteurs

Isolant

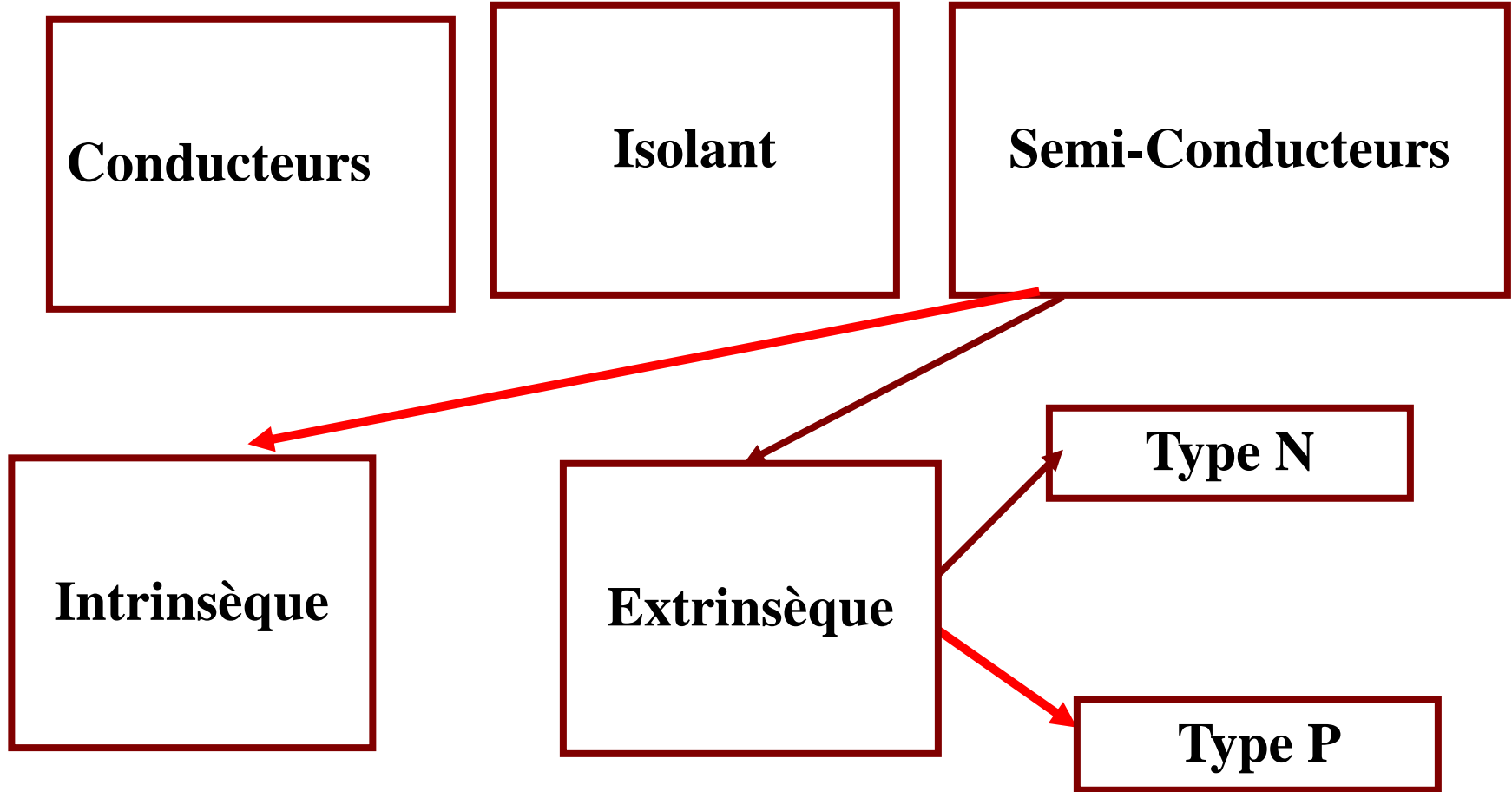
Semi-Conducteurs

Intrinsèque

Extrinsèque

Type N

Type P



On considère le cas des éléments de la colonne 4

Toutes les liaisons sont covalentes

IA	IIA
1 H Hydrogène 1,01	2 He Hélium 4,00
3 Li Lithium 6,94	4 Be Béryllium 9,01
11 Na Sodium 23,0	12 Mg Magnésium 24,3

Periodic System of Elements
Dimitri Mendeleev (1869)

III A	IV A	V A	VIA	VII A	VIII
5 B Bore 10,8	6 C Carbone 12,0	7 N Azote 14,0	8 O Oxygène 16,0	9 F Fluor 19,0	10 Ne Neon 20,2
13 Al Aluminium 27,0	14 Si Silicium 28,1	15 P Phosphore 31,0	16 S Sulfure 32,1	17 Cl Chlore 35,5	18 Ar Argon 40,0
31 Ga Gallium 69,5	32 Ge Germanium 72,6	33 As Arsenic 74,9	34 Se Sélénium 79,0	35 Br Brome 79,9	36 Kr Krypton 83,8
48 Cd Cadmium 112	49 In Indium 113	50 Sn Étain 119	51 Sb Antimoine 122	52 Te Tellure 128	53 I Iode 127
80 Hg Mercure 201	81 Tl Thallium 204	82 Pb Plomb 207	83 Bi Bismuth 209	84 Po Polonium 210	85 At Astatine 210
					86 Rn Radon 222

III A IV A V A VIA VII A VIII
 Bore Carbone Azote Oxygène Fluor
 Aluminium Silicium Phosphore Sulfure Chlore
 Gallium Germanium Arsenic Sélénium Brome
 Cadmium Indium Étain Antimoine Tellure Iode
 Mercure Thallium Plomb Bismuth Polonium Astatine Radon
 Élémental semi-conducteurs Halogènes Gaz nobles
 Métaux Non-métaux


Elément	Rayon atomique (Å)/ Constante du réseau(Å)	Bande Interdite (eV)
C	0,91/3.56	5,47
Si	1.46/5.43	1,12
Ge	1.52/5.65	0,66
α -Sn	1.72/6.49	0,08
Pb	1.81/**	Métal

Semi-conducteurs

Sont fait des éléments de la colonne

Colonne		Semiconducteur
IV		Ge, Si, C
IV-IV		SiC, SiGe
III-V	Binaire	GaAs, GaP, InP, InSb...
	Ternaire	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$
	Quaternaire	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
II-VI	Binaire	CdS; CdTe, ZnSe, ZnS
	Ternaire	$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}....$

2.33		28.086
5.43	Si	14
$3s^2 3p^2$		
1683	DIA	625



		13	14	15	16
		Al	Si	P	S
29	30	31	32	33	34
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
	48	49	50	51	52
	Cd	In	Sn	Sb	Te
IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB

Monocristal de silicium

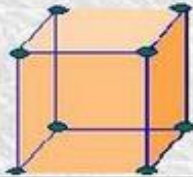
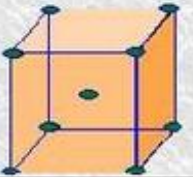
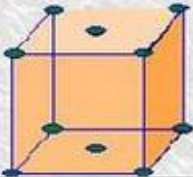
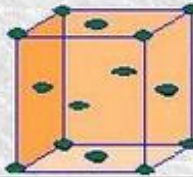


Barreau de silicium polycristallin



Structure cristalline

La plus part des semi-conducteurs cristallisent selon un système cubique:

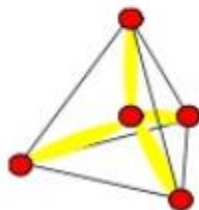
Primitives (un motif)	Multiples (plus d'un motif) avec :		
nœuds aux sommets : La maille est dite primitive et notée P. $n=1$ motif/maille	un nœud au centre : la maille est dite centrée et notée I. $n=2$ motifs/maille	des nœuds sur les bases : la maille est à bases centrées. Elle est notée C (A ou B). $n=2$ motifs/maille	toutes les faces centrées : la maille est dite à faces centrées et notée F. $n=4$ motifs/maille
			

Semiconducteurs élémentaires

Il sont fait des éléments de
la colonne IV

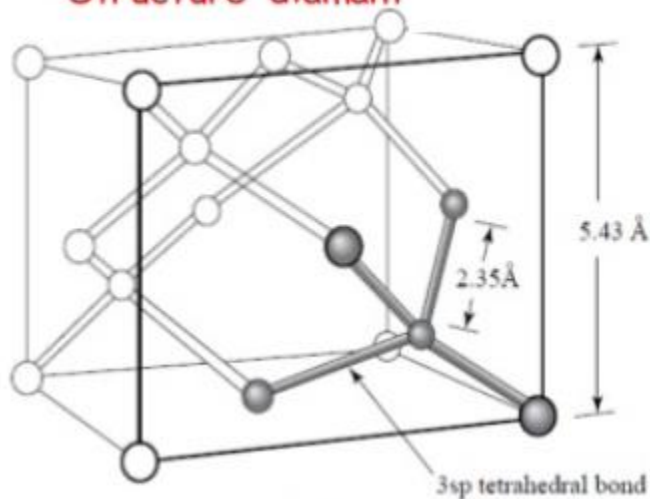
IIB IIIB IVB VB VIB

	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po



Configuration
 sp^3

Structure diamant



Exp: diamant
 $E_g = 5,4 \text{ eV}$
incolore



semi-conducteurs composés

Il sont fait des éléments des
colonnes III-V et II-VI

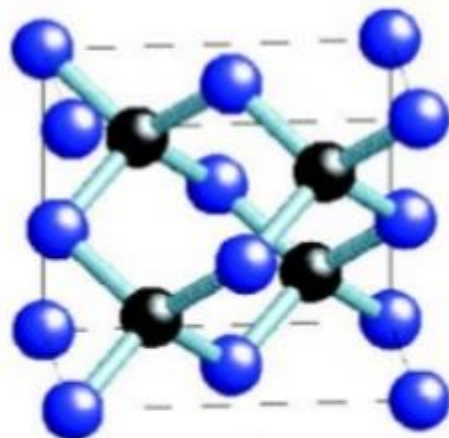
IIB IIIB IVB VB VIB

	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po

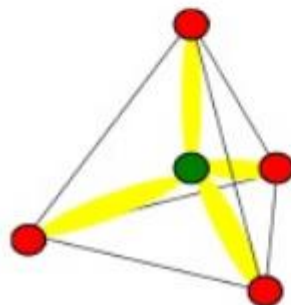
III-V: GaAs, InP, GaN, etc

II-VI: ZnSe, CdTe, HgSe, etc

Structure zinc-Blende



Structure de zinc cubique
(diamant avec 2 atomes différents)



Configuration
 sp^3

Théorie des bandes et dynamique des électrons

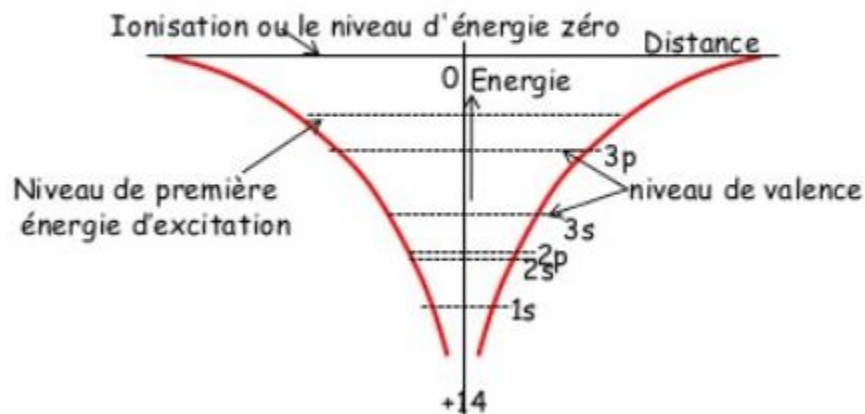
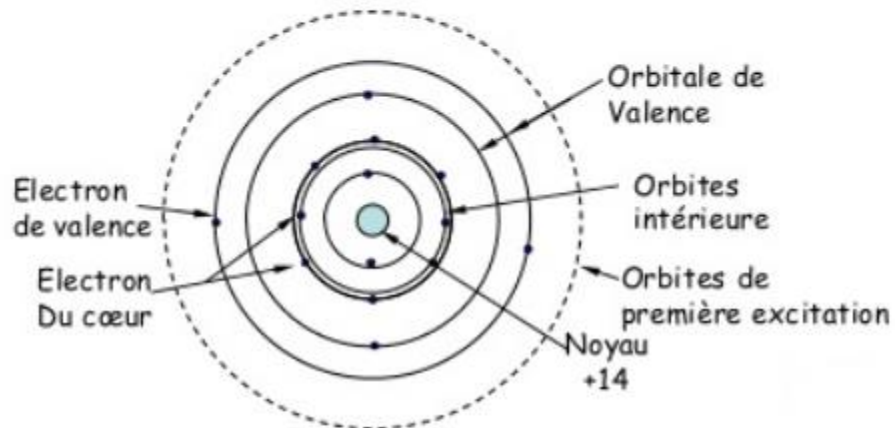
□ Structure électronique de la matière

Cas d'un atome isolé

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge négative. Les électrons d'un atome isolé prennent des valeurs d'énergies discrètes et chaque niveau d'énergies peut accueillir un nombre limité d'électrons

L'atome

2.33		28.086
	Si	
5.43		14
	$3s^2 3p^2$	
1683	DIA	625

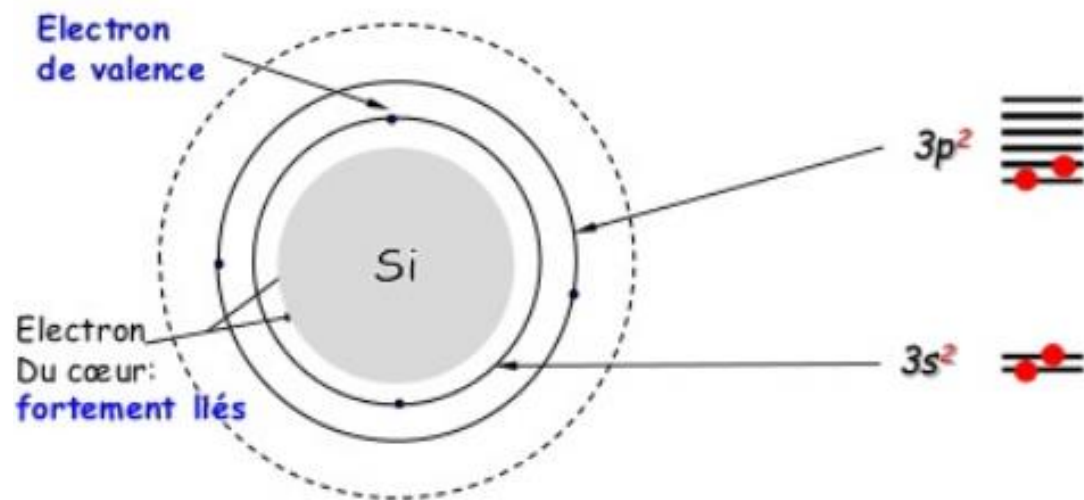


□ Mécanique quantique pour un atome isolé :

Niveaux d'énergie discrets

Modèle qualitatif pour le *Silicium*:

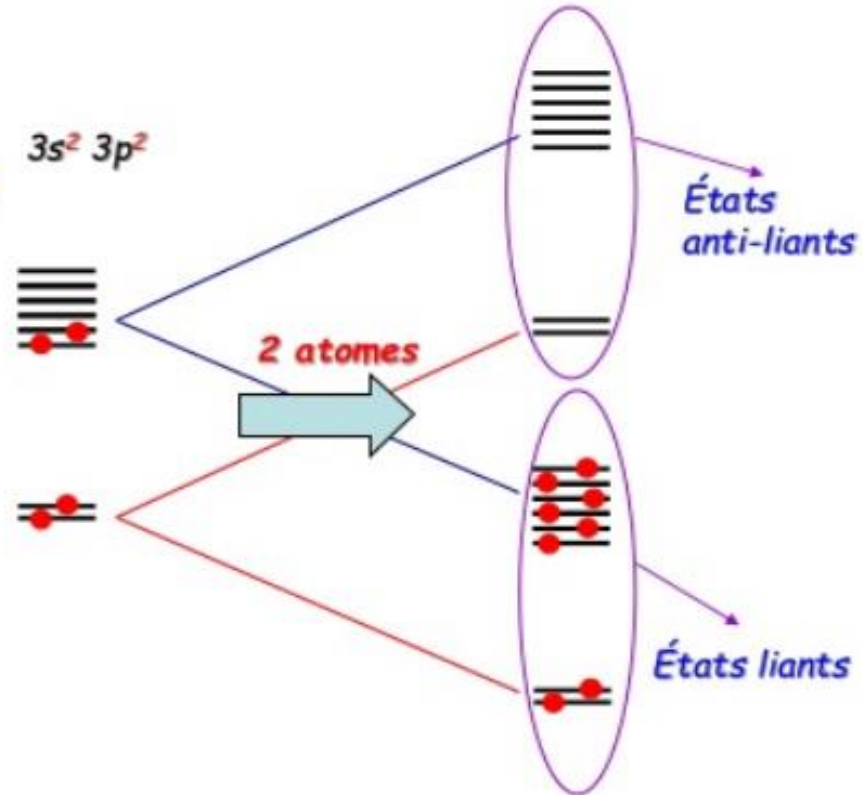
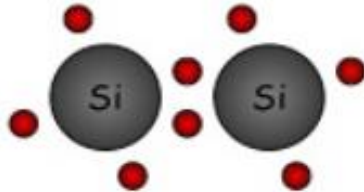
Structure électronique (14 électrons): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

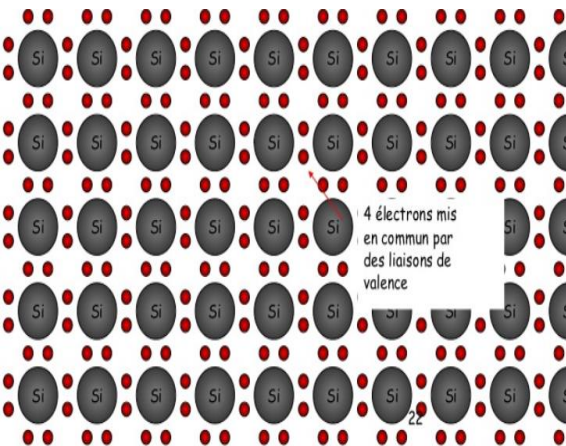


Cas d'un atome liés, bandes d'énergies

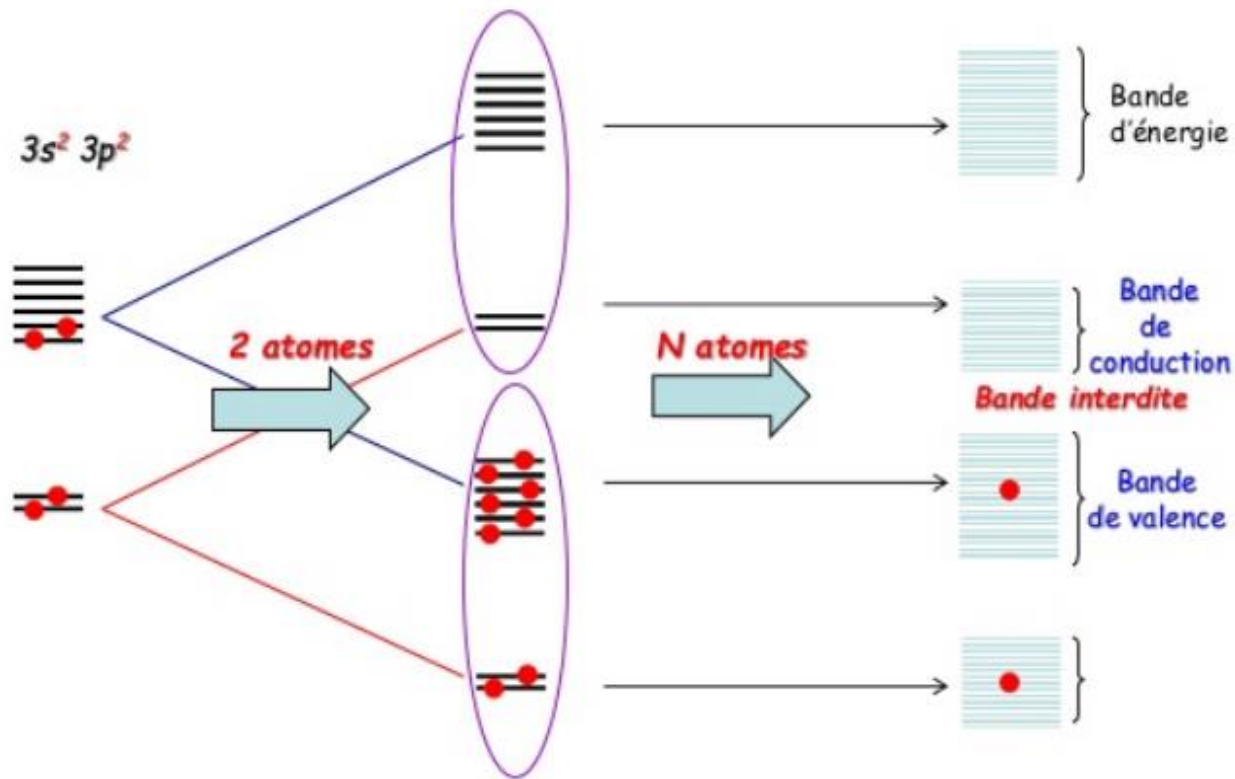
□ Si on approche 2 atomes :

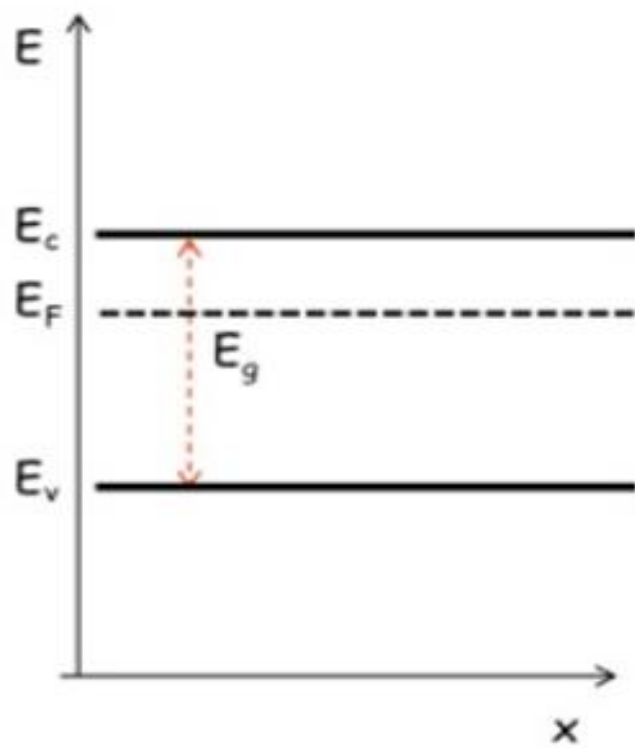
- Fonctions d'ondes des électrons perturbées
- Deux fois plus d'électrons sur le même niveaux
- Chaque niveau \rightarrow 2 niveaux





□ Si on approche N atomes?

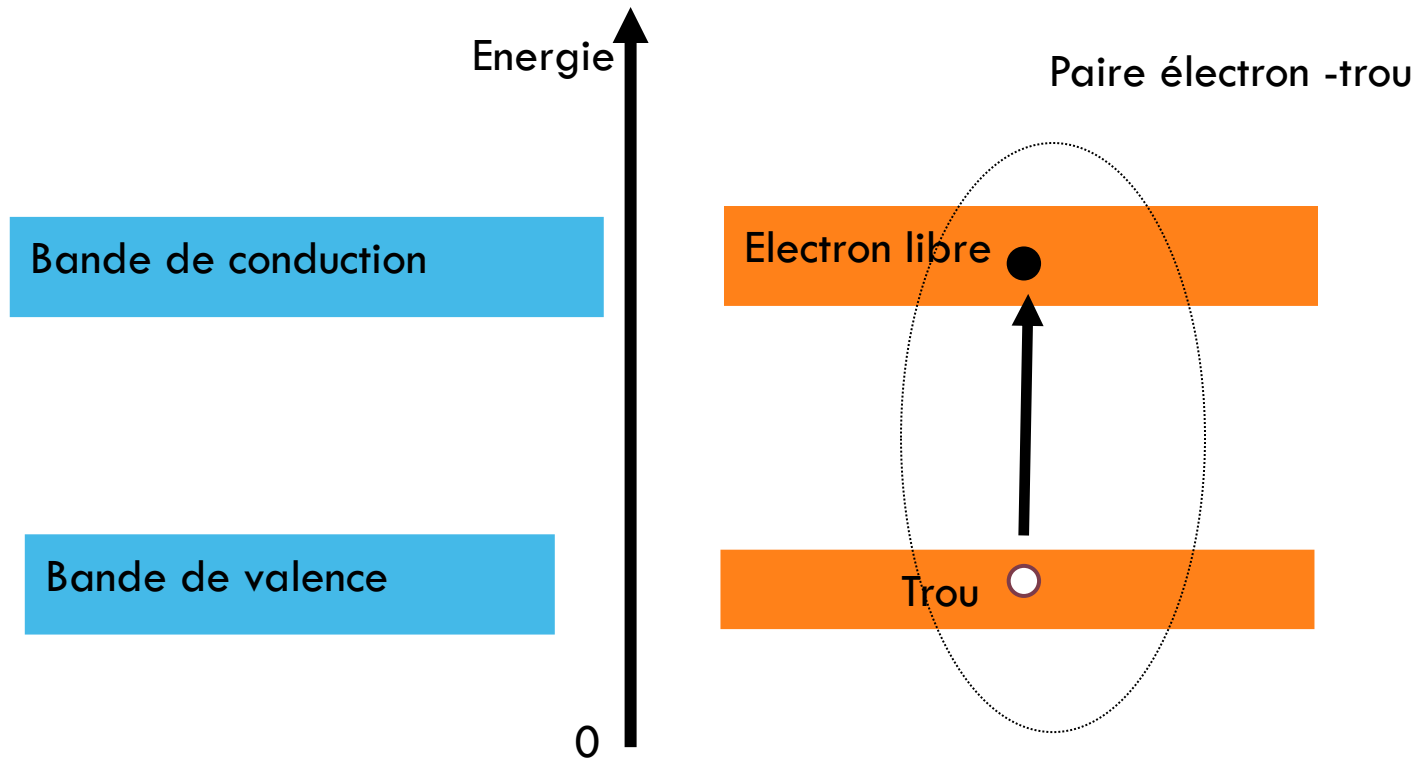




Notion d' électron et de trou

- Si on apporte au semi-conducteur une énergie $E > E_g$ l'**électron** passe de la bande de valence vers la bande de conduction se départ va donner naissance à **un trou**

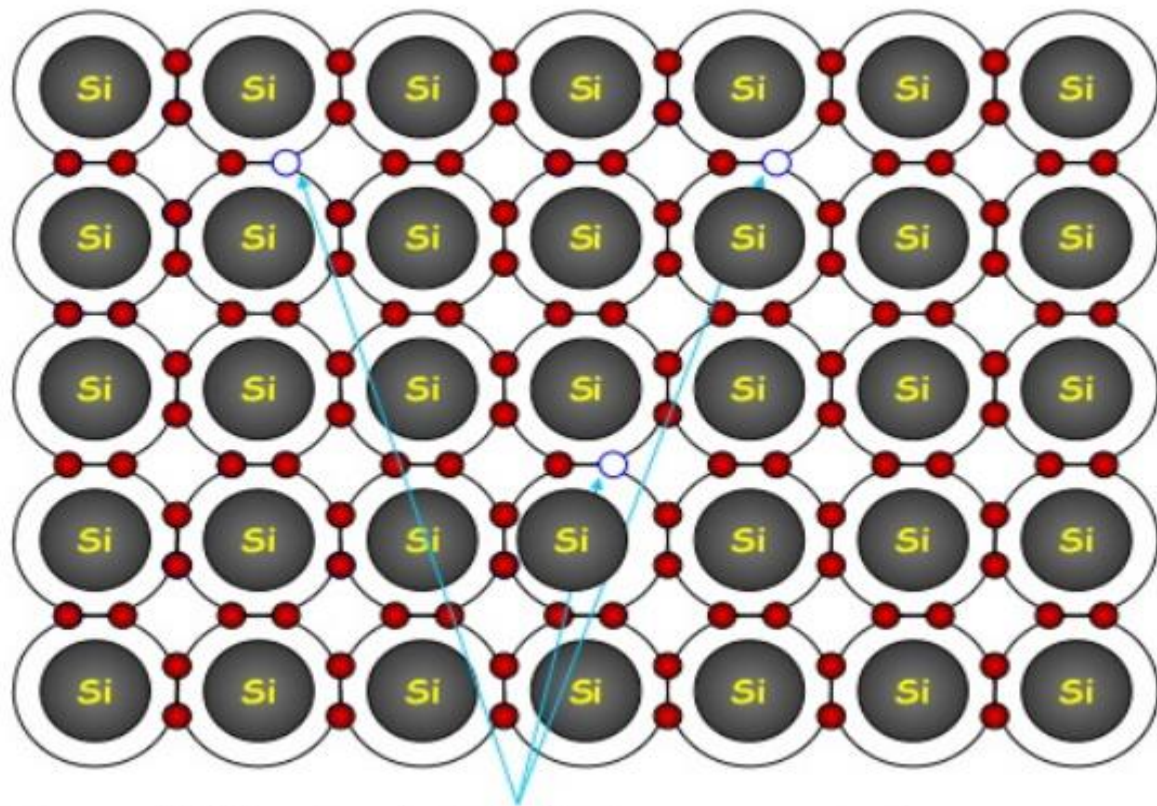
formation d'une paire électron-trou (é-t)



Création d'une paire électron-trou dans un atome excité de silicium .Un électron dans la bande de conduction est un trou dans la bande de valence.

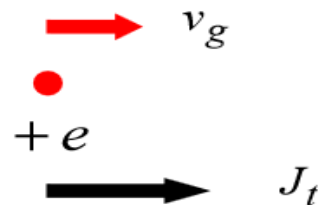
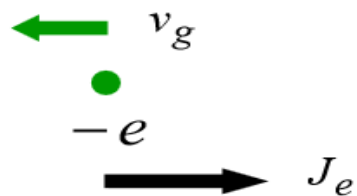
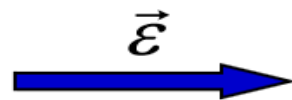
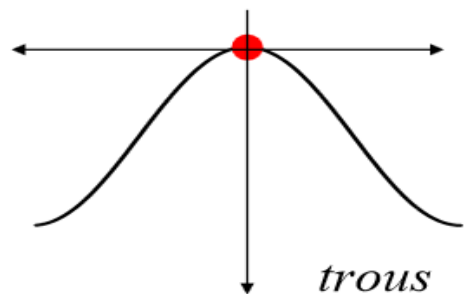
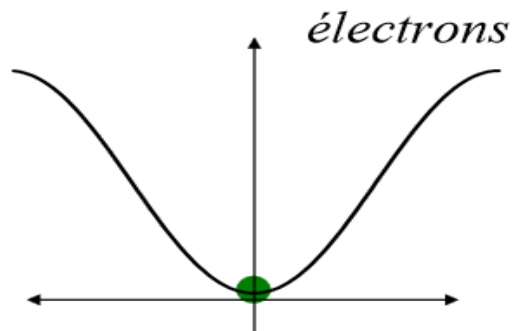
Notion de trous (+e !)

- La notion de bandes permet d'introduire le porteur de charge positif : un trou



- Aux températures différentes de 0 K, électrons « montent » dans BC, laissent des « trous » dans la BV

Électrons et trous

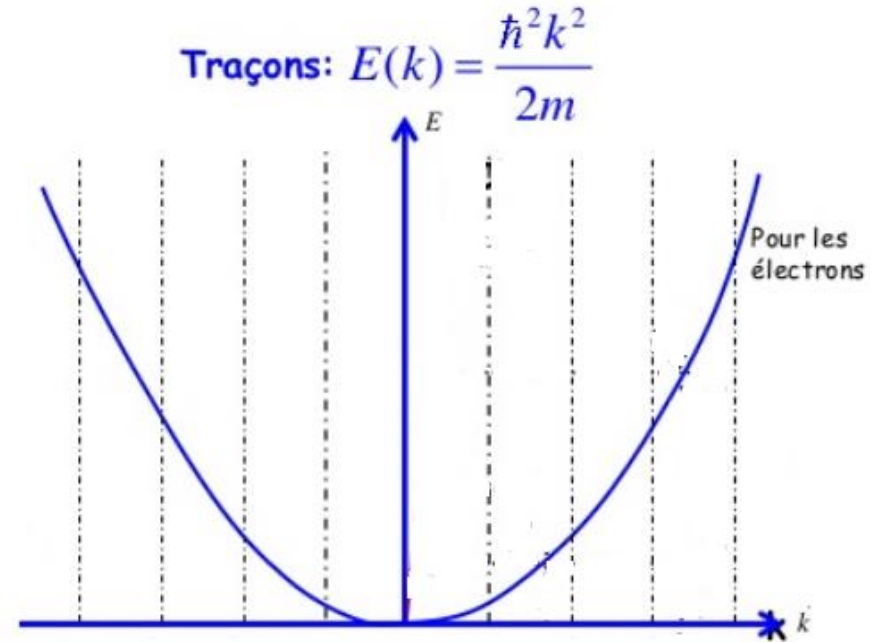


$$J_{total} = J_e + J_t$$

Notion de masse effective

Electron dans le vide

- La variation de l'énergie cinétique d'un électron dans le vide en fonction du vecteur d'onde k est parabolique



Cas d'un électron dans la B.C et d'un trou dans la B.V

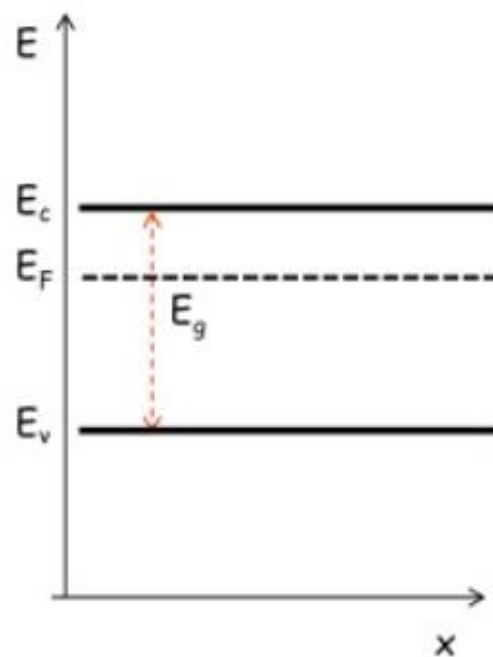
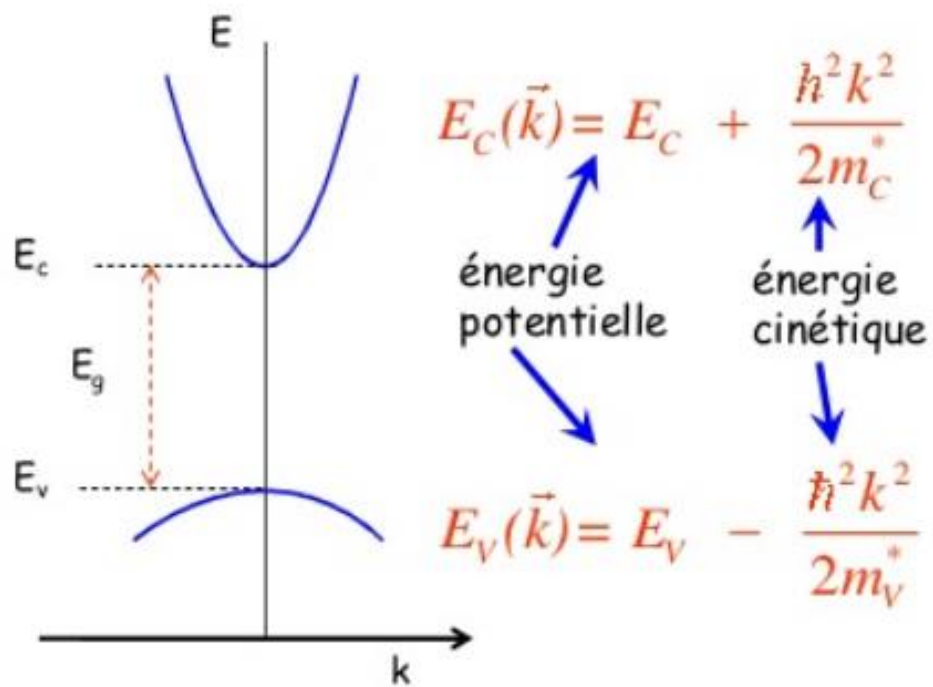
- Soit un électron dans la bande de conduction d'un semi-conducteur. Les électrons sont situés au minimum de la bande de conduction qui correspond à $k=0$
- Effectuons un développement limité au second ordre de l'énergie valable au voisinage de ce minimum:

$$E(k) = \underbrace{E(k=0)}_{=0} + \frac{\partial E}{\partial k}(k=0)k + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} k^2 = E_c + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} k^2$$

On pose

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}}$$

Donc on peut assimiler la variation de la B.C localement (proche du minimum) à une parabole. C'est l'approximation parabolique des bandes d'énergie. La relation précédente signifie que un électron dans la B.C se comporte comme un électron dans le vide(é libre) à condition de remplacer sa masse m par une masse fictive qui dépend du matériau: appelée masse effective de l'électron



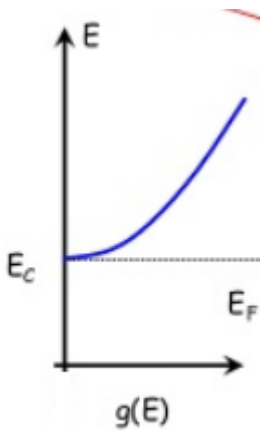
Densité d'état

- Un nombre maximal d'électron peut exister dans un semi-conducteur cette limite fait intervenir une quantité d'énergie que l'on peut stocker par unité de volume: C'est la densité d'état d'énergie en $\text{cm}^{-3}\text{J}^{-1}$

Cette densité d'état d'énergie existe pour les électrons et les trous.

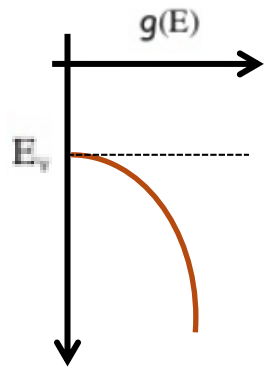
□ **Densité d'état pour les électrons dans la B.C**

$$g_C(E) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \left(\frac{2m_C^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$



□ **Densité d'état pour les trous dans la B.V**

$$g_V(E) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \left(\frac{2m_V^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2}$$



Répartition des porteurs sur les états d'énergies

Les répartitions de porteurs obéissent à des lois qui peuvent dépendre du type de particules. Trois types de lois peuvent être utilisées:

- La statistique de BOLTZMANN qui s'applique aux gaz parfaits

$$\bar{n} = n_0 \exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right)$$

- La statistique de FERMI-DIRAC pour les particules de spin demi-entier

$$\bar{n} = n_0 \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right)}$$

- La statistique de BOSE-EINSTEIN pour les particules de spin entier (photons, phonons).

$$\bar{n} = n_0 \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right) - 1}$$

Le cas qui nous intéresse correspond à celui des électrons et suit donc la statistique de FERMI-DIRAC.

Fonction de distribution de Fermi-Dirac

La probabilité de présence d'un électron sur un niveau énergétique E sera notée $f(E)$. Elle est donnée par la formule

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

Appelée fonction
de distribution de
Fermi-Dirac.

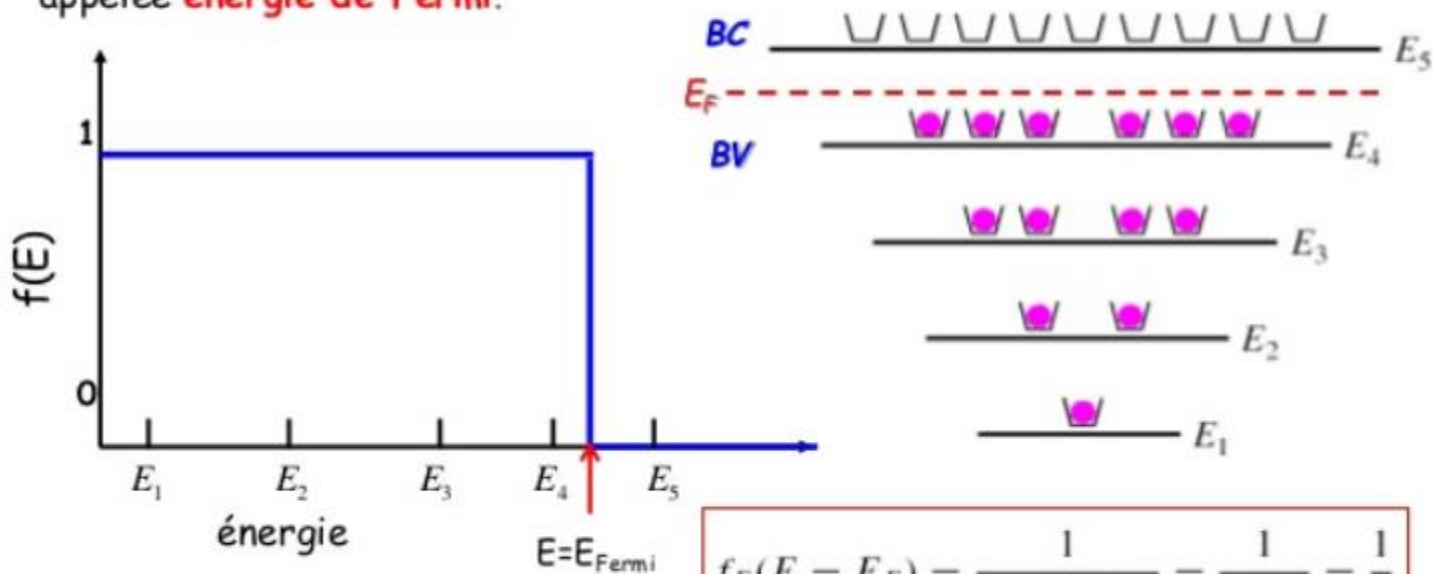
Cette expression fait apparaître un niveau énergétique E_F qui correspond à une probabilité de présence égale à $\frac{1}{2}$:

Ce niveau correspond, au zéro absolu, à la séparation entre les niveaux vides et les niveaux pleins.

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

À T= 0K: $\begin{cases} E < E_F \Rightarrow f(E) = 1 \\ E > E_F \Rightarrow f(E) = 0 \end{cases}$

À T = 0, tous les niveaux d'énergie sont remplis à l'énergie E_F , appelée **énergie de Fermi**.

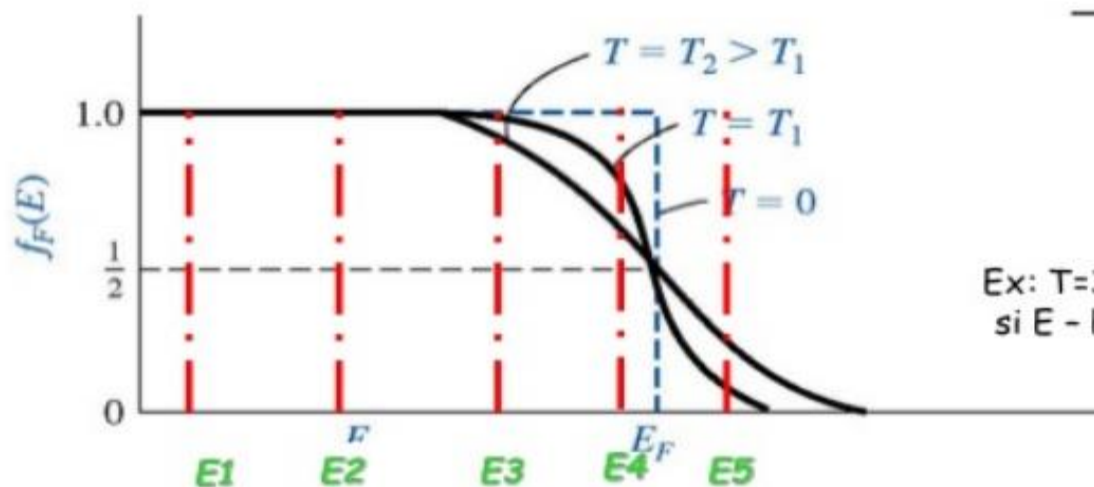
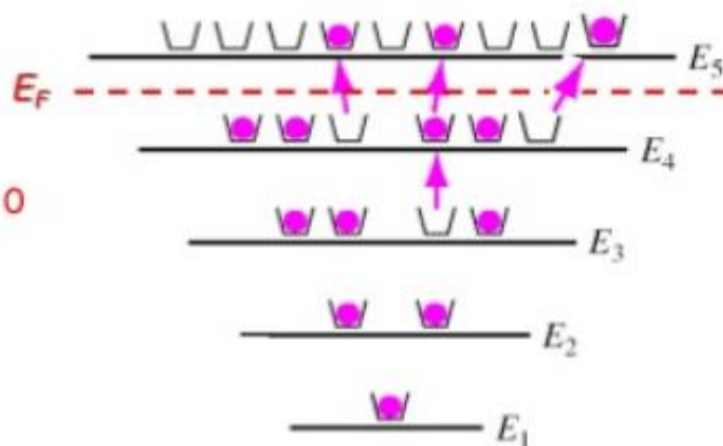


$$f_F(E = E_F) = \frac{1}{1 + \exp(0)} = \frac{1}{1 + 1} = \frac{1}{2}$$

Influence de la température

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

$T \neq 0$



Ex: $T=300\text{K}$,
si $E - E_F = 3kT$, $f(E)$?