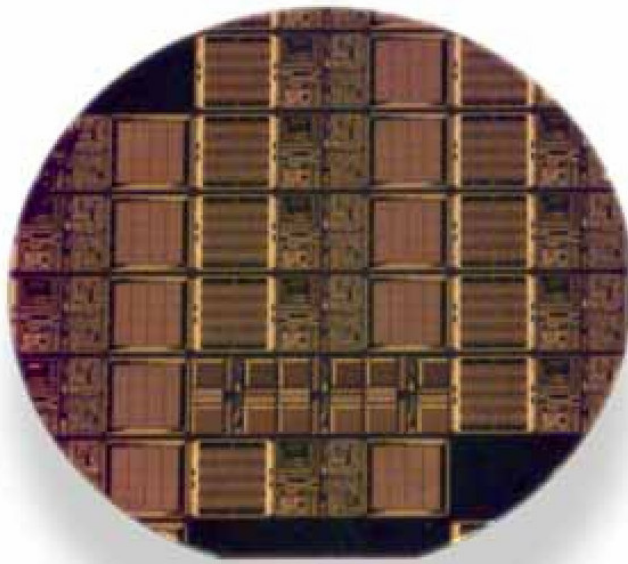
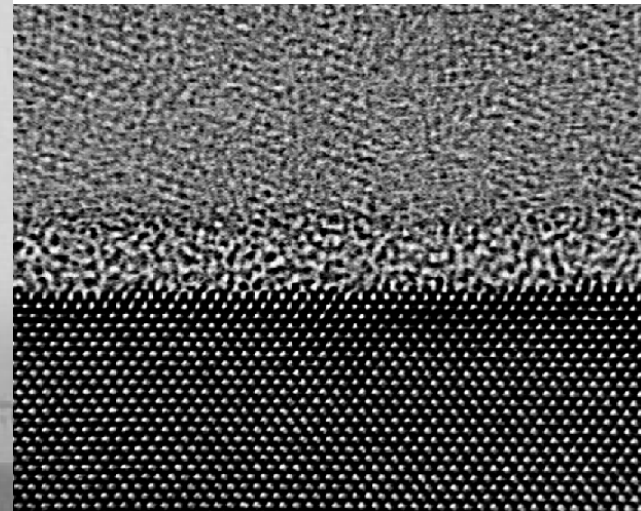


Cours de Physique des Semi-conducteurs



Alain CHOVET
&
Pascal MASSON

*(Alain.chovet@enserg.fr
pascal.masson@L2MP.fr)*

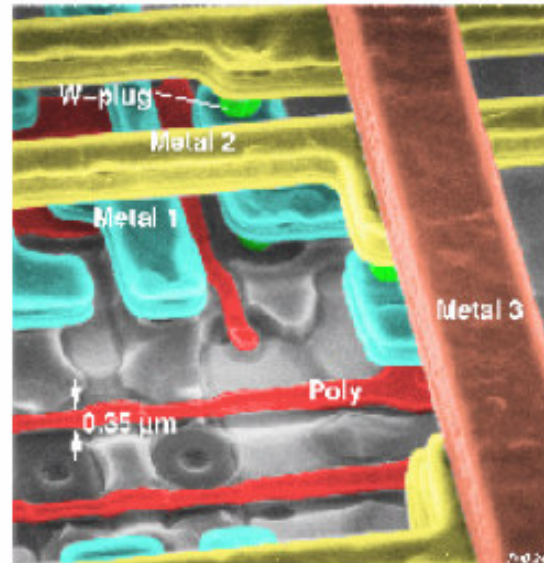
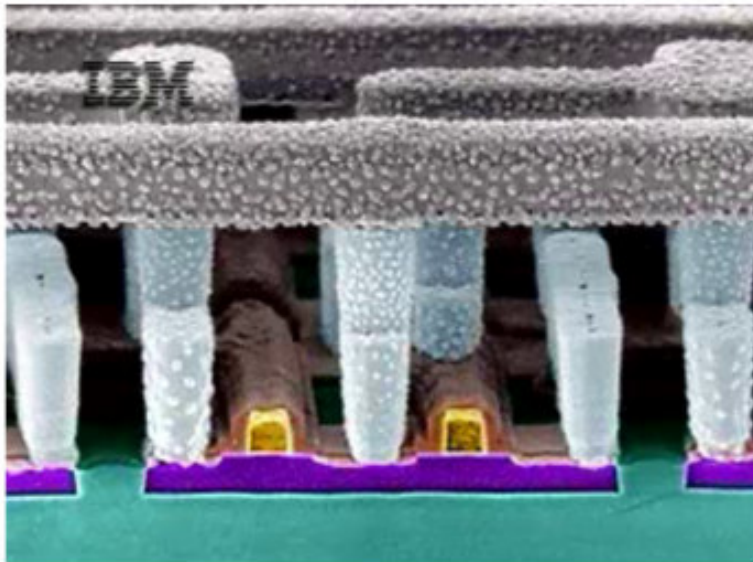


- Généralités
- Quelques propriétés
- Semi-conducteur non dopé ou dopé
- Semi-conducteur à l'équilibre
- Équation de Poisson - Conséquences
- Perturbations faibles de l'équilibre
- Perturbations fortes de l'équilibre
- Équations d'évolution
- Contact entre deux matériaux différents

➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

□ Conducteurs

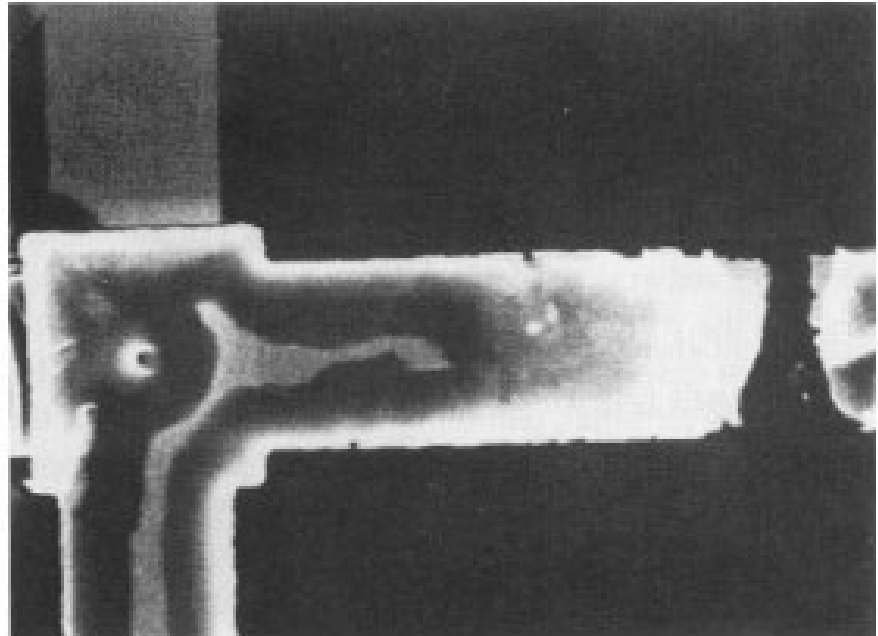
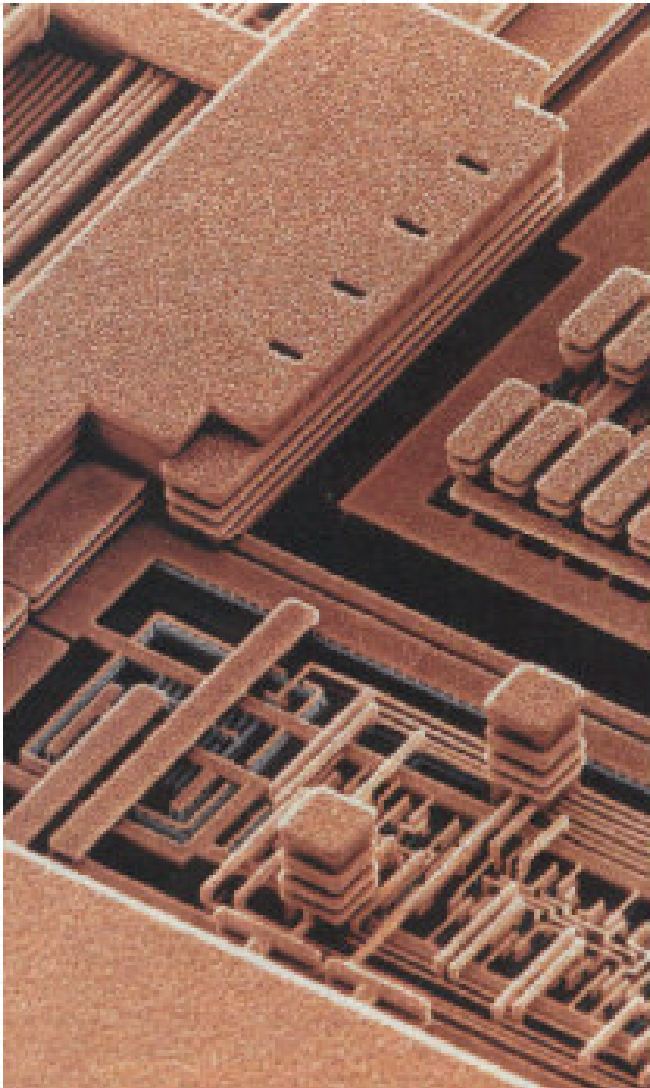
- Matériaux ayant la plus faible résistivité à température ambiante
- $\rho < 10^{-5} \Omega\text{cm}$
- Cuivre, or, argent, aluminium...



- Conduction électrique \Rightarrow électrons libres (de 10^{22} à 10^{23} cm^{-3})
- Augmentation de la température \Rightarrow augmentation légère de ρ
- Electro-migration

➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

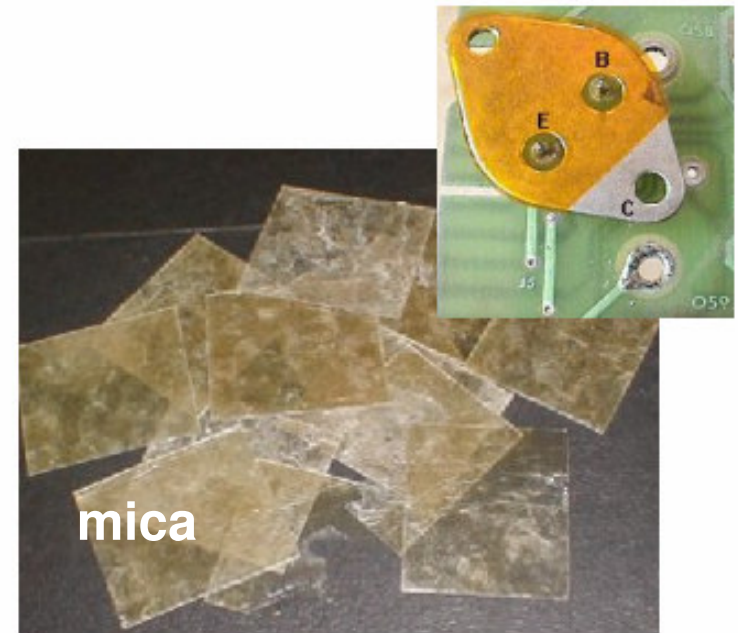
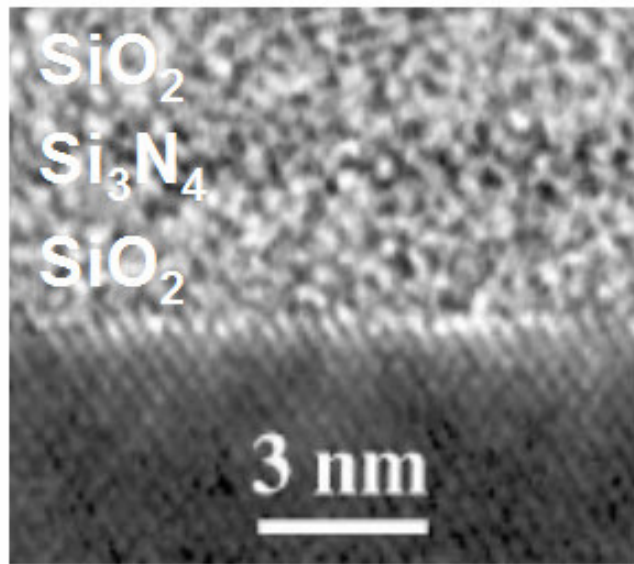
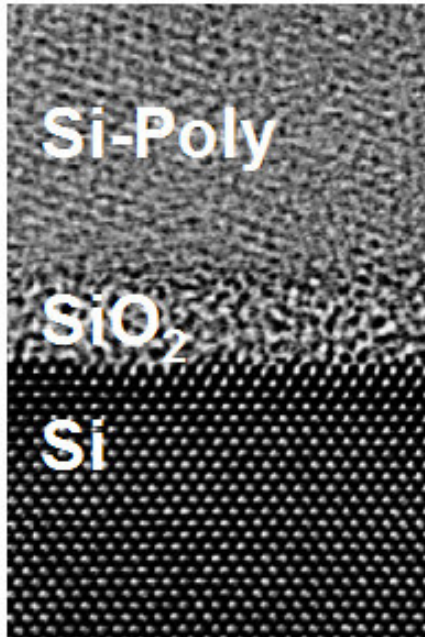
□ Conducteurs



➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

□ Isolants

- $\rho > 10^8 \Omega\text{cm}$
- Verre, mica, la silice (SiO_2), le carbone (diamant)...



- Augmentation de la température \Rightarrow baisse de ρ (libération d'électrons et de trous)
- Fuite ou claquage de l'isolant

➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

□ Semi-conducteurs

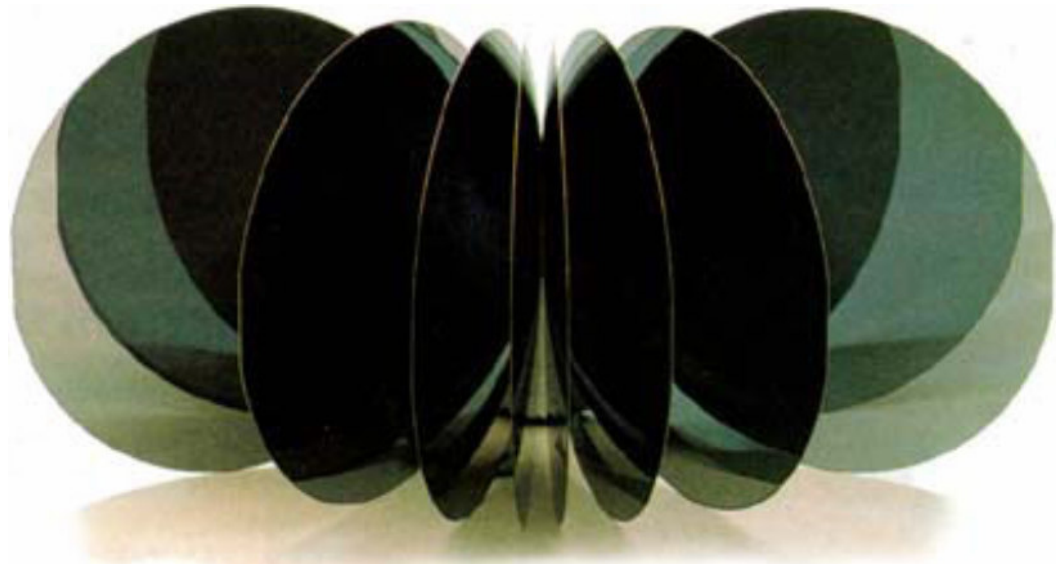
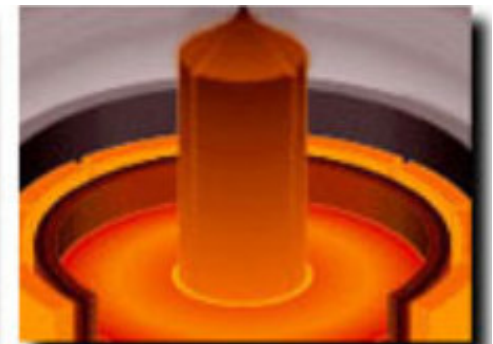
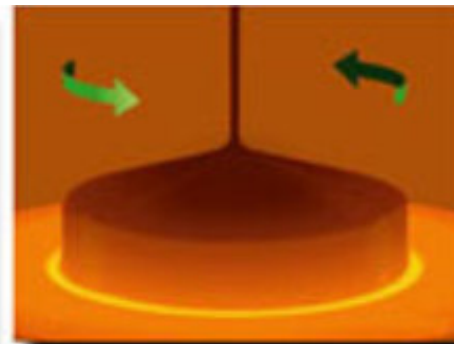
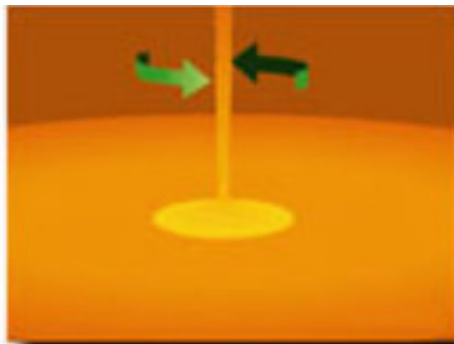
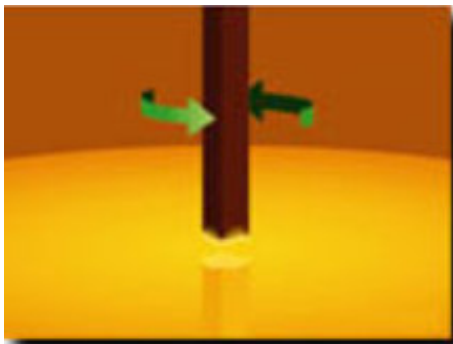
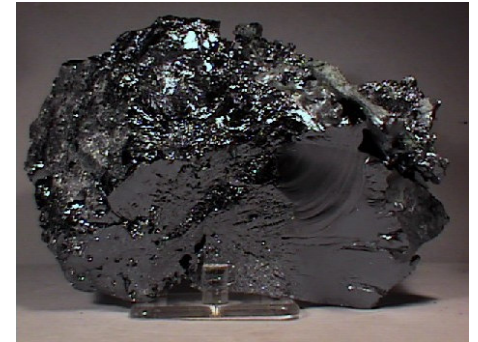
- $10^{-3} \Omega\text{cm} < \rho < 10^4 \Omega\text{cm}$
- La conduction électrique se fait par les électrons et/ou les trous
- Semi-conducteur $\left\{ \begin{array}{l} \text{pur} \Rightarrow \text{intrinsèque} \\ \text{dopé} \Rightarrow \text{extrinsèque} \end{array} \right.$
- Silicium assez pur + un atome de Bore ou de Phosphore pour 10^5 atomes de Silicium $\Rightarrow \rho$ passe de 10^3 à environ $10^{-2} \Omega\text{cm}$

Colonne		Semi-conducteur
IV		Ge, Si
III-V	binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, 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, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	ternaire	$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

❑ Semi-conducteurs

- Matériau étudié depuis les années 1830

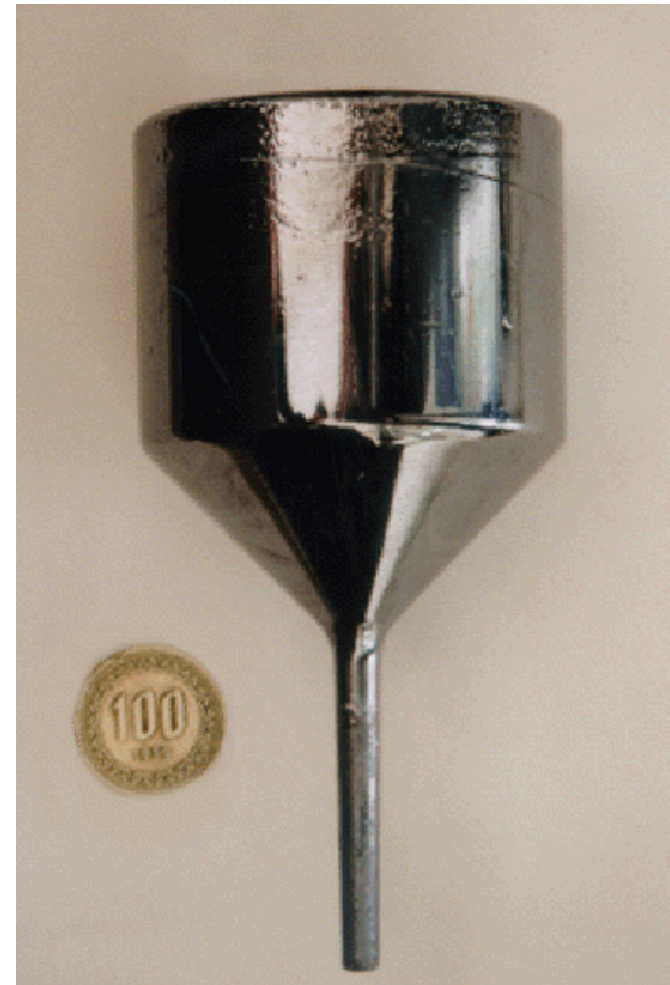


➤ Conducteurs – Isolants – Semi-conducteurs

❑ Semi- conducteurs



Silicium



GaAS

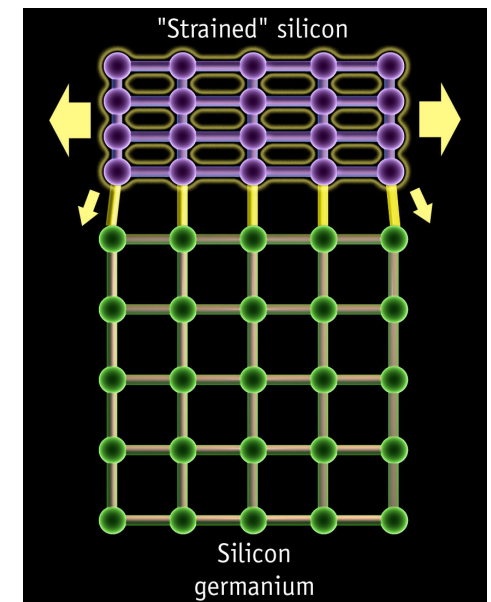
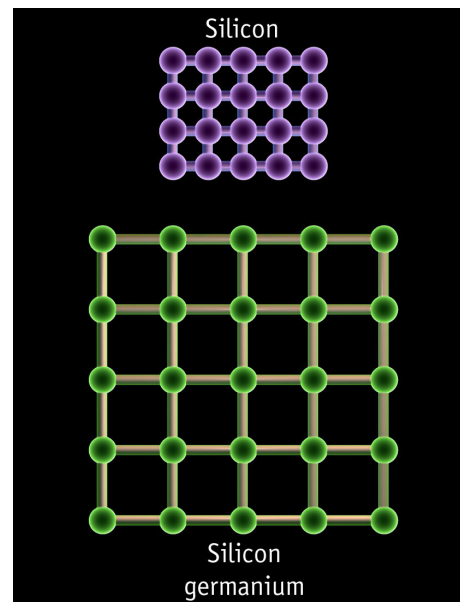
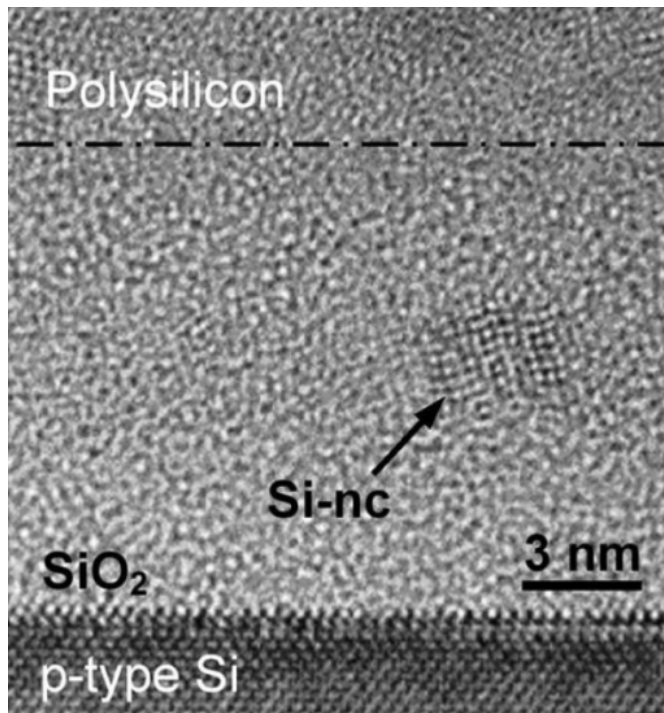
➤ Structure de l'état solide

❑ Matériaux cristallins

- Atomes rangés régulièrement aux nœuds d'un réseau périodique
- La maille (ou motif) élémentaire se répète régulièrement

❑ Matériaux amorphes

- Ordre local et non répété à "longue distance"



➤ Structure de l'état solide

❑ Familles de solides cristallins

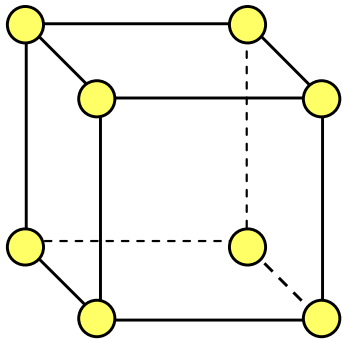
- Cristaux ioniques ($\text{Na}^+\text{Cl}^- \dots$) : ions liés par attraction coulombienne, aucun électron libre (cristaux isolants), liaison très solide.
- Cristaux covalents (colonne IV : C, Si, Ge, Sn) : quatre électrons périphériques mis en commun avec quatre voisins (liaisons de valence), liaisons moins fortes que les liaisons ioniques.
- Métaux (Li, Na, K, Cu, Ag, Au) : conducteurs électriques (un électron libre par atome), température de fusion est moins élevée que celle des cristaux covalents
- Cristaux moléculaires

❑ Système cristallin et réseau cristallin

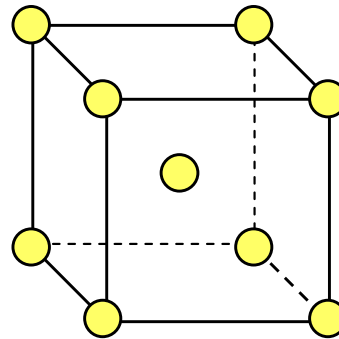
- Cristal représenté à partir d'une cellule de base
- Cellule de base répétée périodiquement
- Il existe sept systèmes cristallins dont le système cubique

➤ Cristal cubique

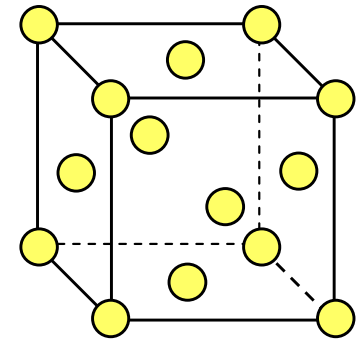
- Il existe trois réseaux différents



Cubique simple

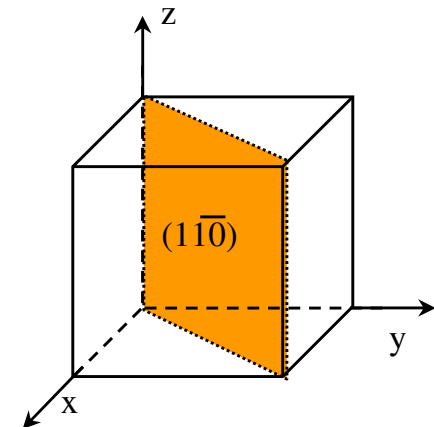
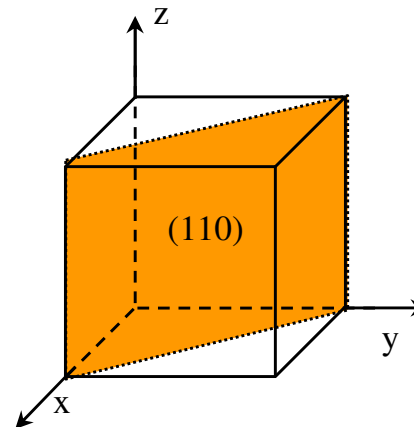
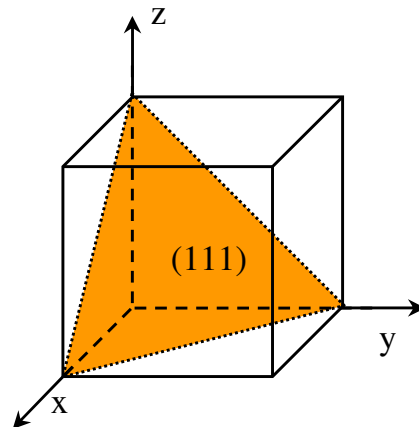
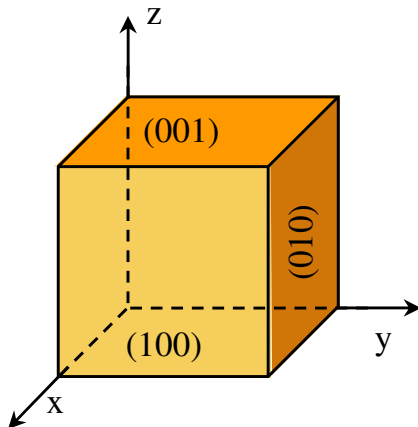


Cubique centré



Cubique face centrée

- Plans cristallographiques

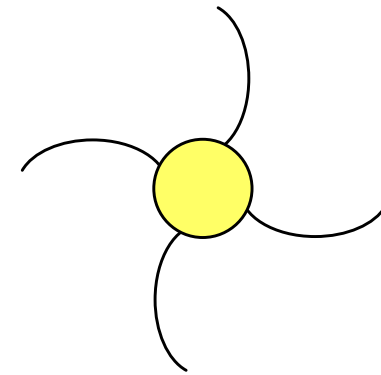
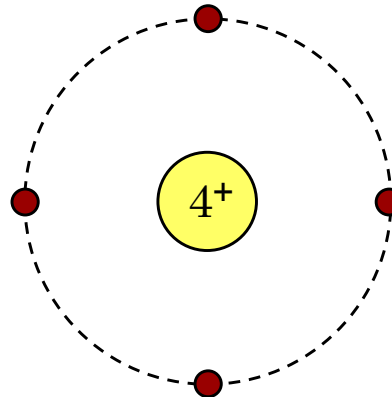
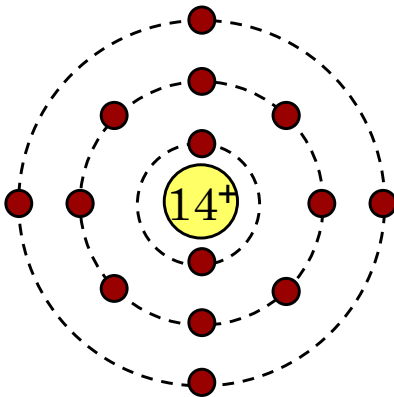


➤ Cristal cubique

❑ Semi-conducteurs de la colonne IV (Ge, Si) – Réseau diamant

- Les électrons d'un atome isolé prennent des valeurs d'énergie discrètes
- Pour chaque niveau : nombre limité d'électrons ($2n^2$)
- les niveaux les plus proches du noyau sont occupés
- Pour le silicium :

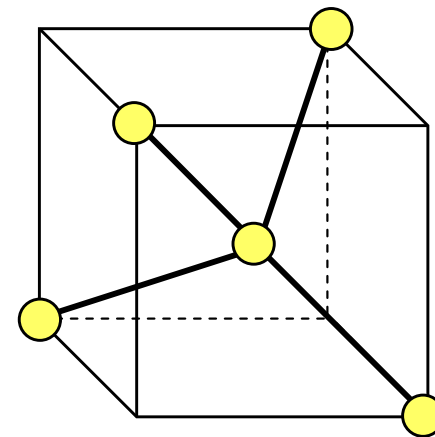
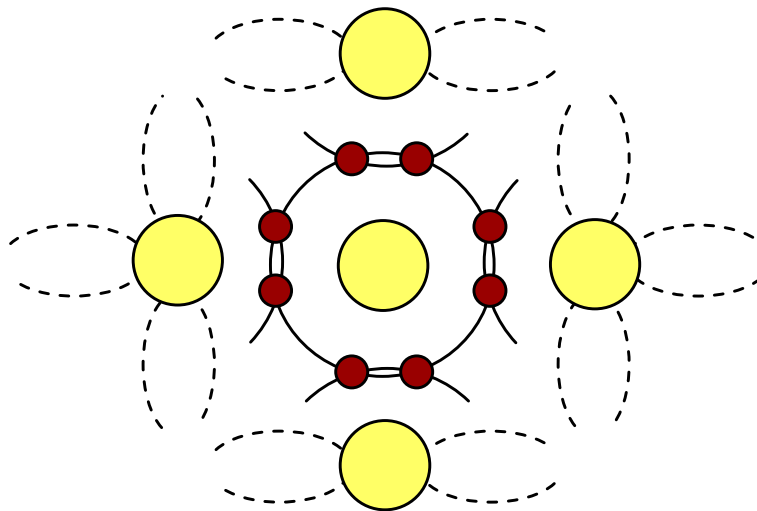
{ Numéro atomique $Z = 14$
2 électrons sur la première couche ($n = 1$)
8 sur la seconde ($n = 2$)
4 sur la dernière (nombre de places = 18) ($n = 3$)



➤ Cristal cubique

❑ Semi-conducteurs de la colonne IV (Ge, Si) – Réseau diamant

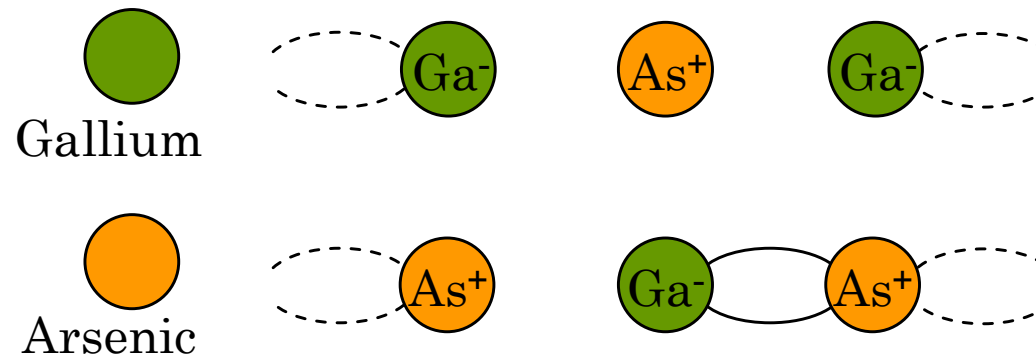
- Atome stable : 8 électrons sur la couche externe (gaz rares)
- Atome de silicium isolé non stable
- Formation du cristal : association avec quatre voisin
- A $T = 0$ K (aucune liaison brisée) : pas d'électrons libres (isolant)
- Cristal : deux réseaux cubiques faces centrées imbriqués (décalés du quart de la diagonale principale du cube)



➤ Cristal cubique

❑ Semi-conducteurs composés (III-V ou II-VI) – Réseau Zinc-blende

- Gallium ($Z = 31$)
- Arsenic ($Z = 33$)
- GaAs : Ga (resp. Ar) prend quatre atomes de As (resp. Ge) comme voisins
- Cristal constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (l'un de Ga et l'autre de As) imbriqués et décalés du quart de la diagonale principale.



- En réalité : le cristal construit à partir de Ga^- et As^+ (4 électrons périphériques)

➤ Bandes d'énergie

- Mécanique quantique pour un atome isolé :

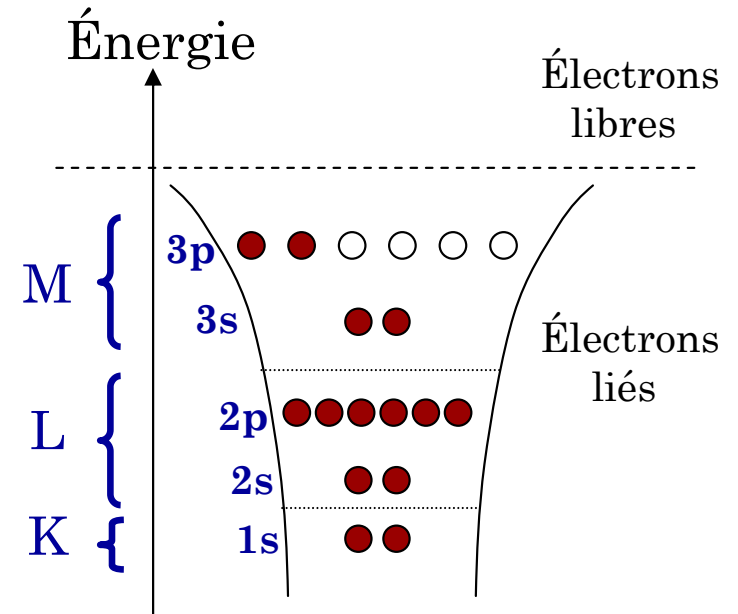
{ Niveaux d'énergie discret
Couche M : électrons de valence
Couche K : électrons fortement liées

- Si on approche 2 atomes :

{ Fonctions d'ondes des électrons perturbées
Deux fois plus d'électrons sur le même niveau ?
Chaque niveau : 2 niveaux très rapprochés

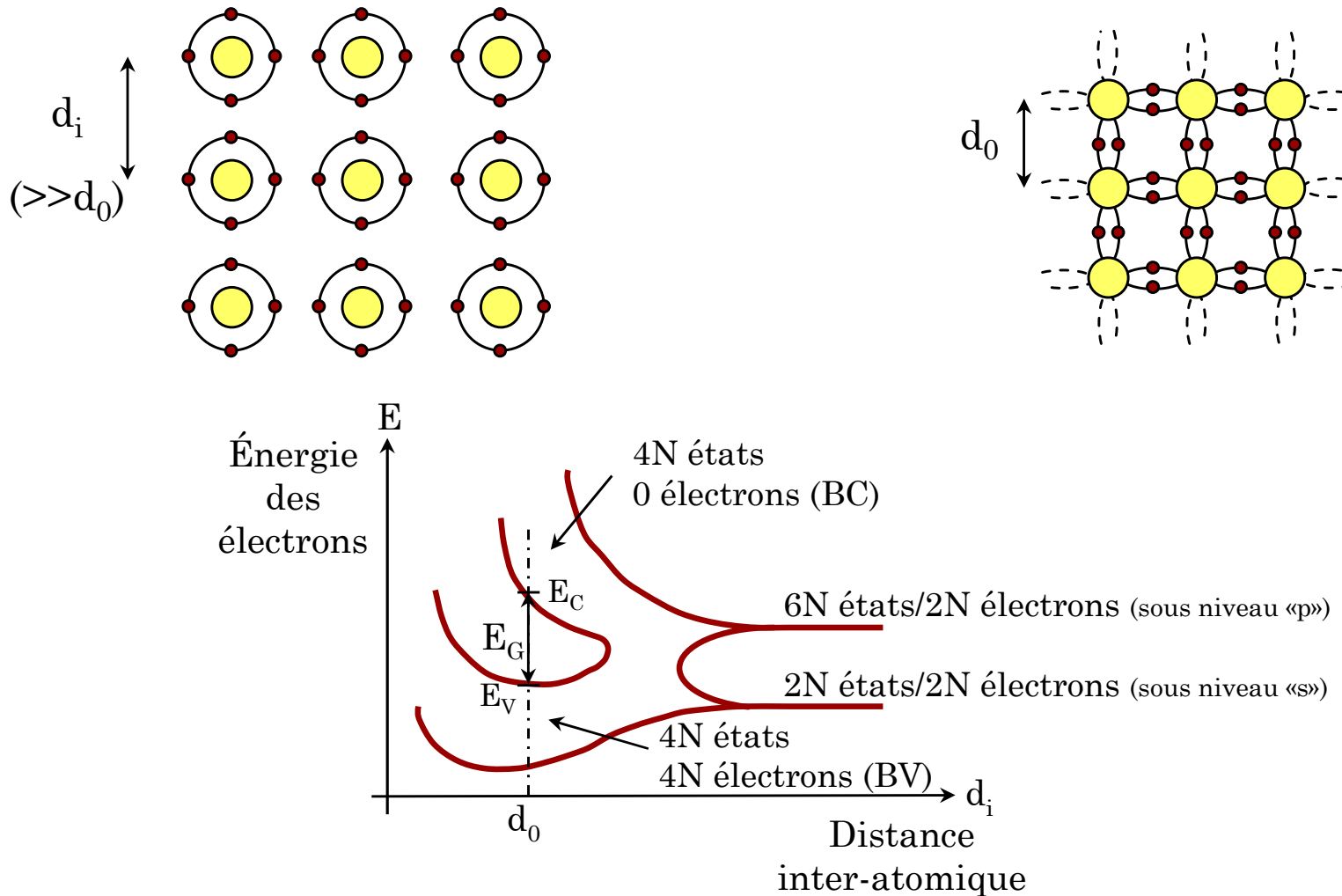
- Si on approche N atomes :

{ Apparition de bandes d'énergies (niveaux discrets très rapprochés)
Si une bande à p places et n électrons : N.p places et N.n électrons
Si la couche externe est saturée : pas de courant



➤ Bandes d'énergie

- Bandes de conduction et de valence (électrons des niveaux 3s et 3p)
- Apparition d'une bande interdite ou Gap



➤ Bandes d'énergie

- Exemple de largeur de bande interdite

atome	E_G (eV)	type de matériau	d (Å)
C (Carbone)	5.5	isolant	3.567
Si (Silicium)	1.12	semi-conducteur	5.431
Ge (Germanium)	0.7	semi-conducteur	5.646
Sn(Etain)	0	conducteur	6.489

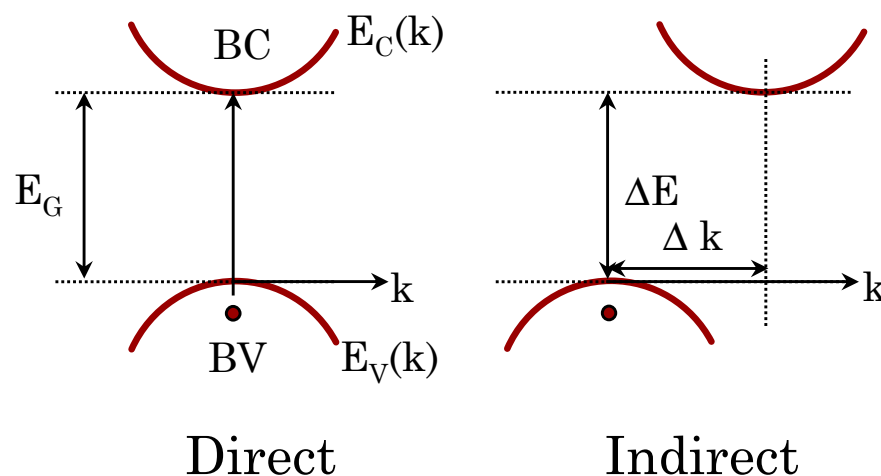
➤ Gap direct ou indirect

- $E_{C,V}(k)$: relations de dispersion
- Minimum E_C égale maximum de E_V

Gap direct

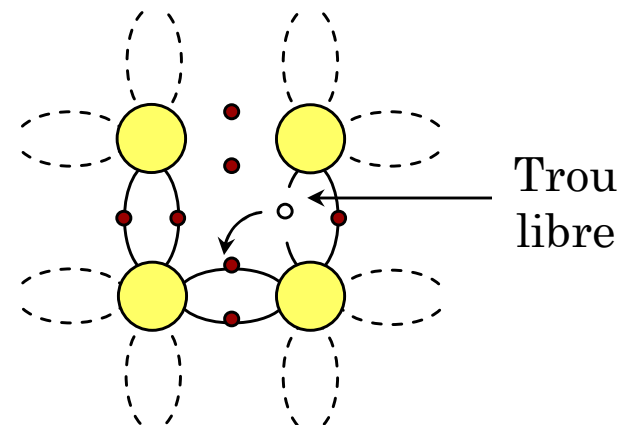
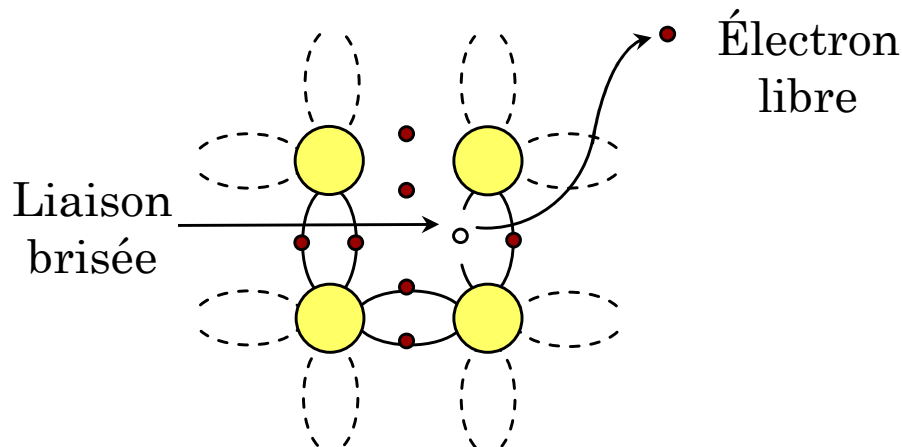
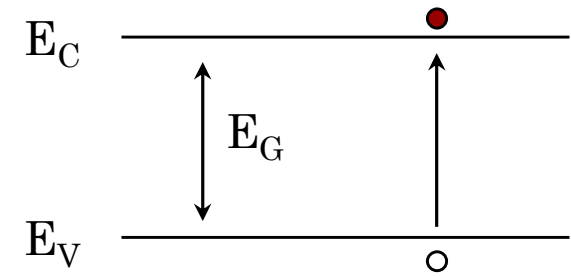
- Minimum E_C différent maximum de E_V

Gap indirect



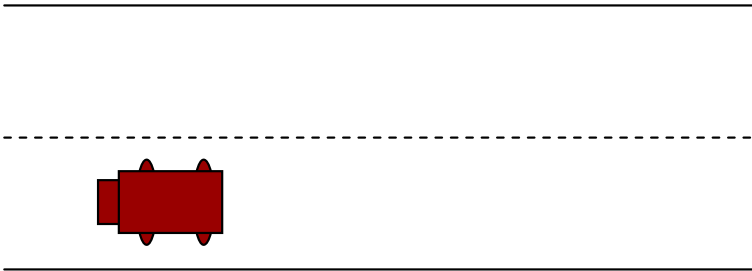
➤ Conduction par électron ou par trou

- Apport d'une énergie à une liaison de valence
- On arrache un ou plusieurs électrons
- Cet électron de la BV passe dans la BC
- L'électron se comporte comme une particule "quasi-libre" (sous l'influence du réseau)
- Il peut participer à la conduction électrique
- On lui affecte une masse effective m_n différente de m_0 ($0,91 \cdot 10^{-30}$ kg)
- En fait, il apparaît aussi un trou libre



➤ Conduction par électron ou par trou

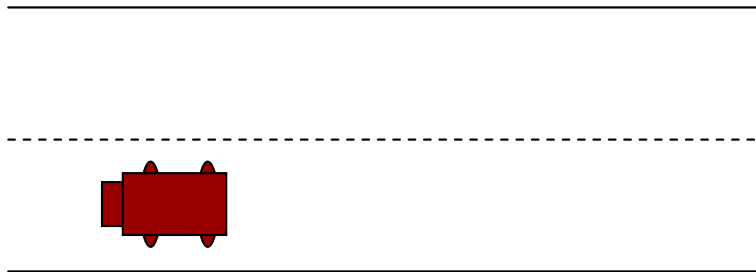
- Analogie avec le déplacement de voitures



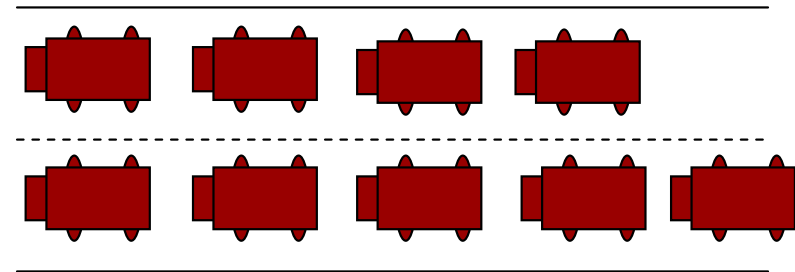
Courant d'électrons

➤ Conduction par électron ou par trou

- Analogie avec le déplacement de voitures



Courant d'électrons



Courant de trous

- Pour simplifier le système on parlera :

{ Des électrons de la bande de conduction
Des trous de la bande de valence (non de ses électrons) avec une masse m_p

- Au voisinage d'un extremum des bandes : développement de $E(k)$

$$E(k) \approx E_C + 0 + \frac{1}{2} \frac{d^2 E}{dk^2} k^2 + \dots \quad \text{ou} \quad E(p) - E_C \approx \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial p^2} p^2 = \frac{p^2}{2m_n}$$

- Masse effective dans la vallée considérée : inverse de la courbure $E(p)$

➤ Conduction par électron ou par trou

- Nombre de places disponibles dans la BC : densité d'états

$$n_C(E)dE = \text{nombre d'états (m}^{-3}\text{) dans la "tranche" d'énergie } E, E + dE$$

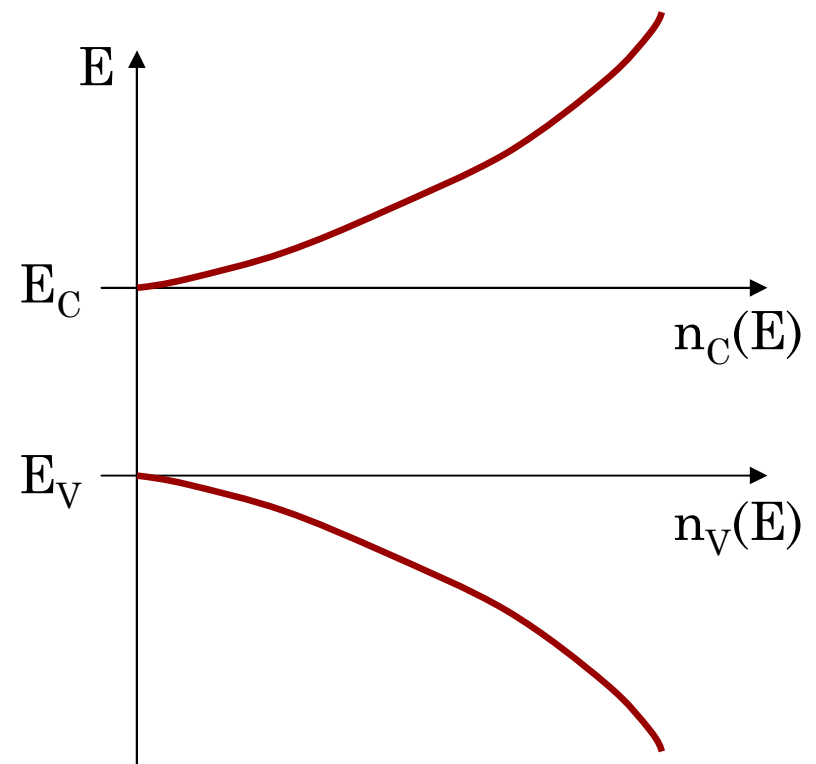
- On obtient au final :

Pour la bande de conduction

$$n_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$

Pour la bande de valence

$$n_V(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2}$$

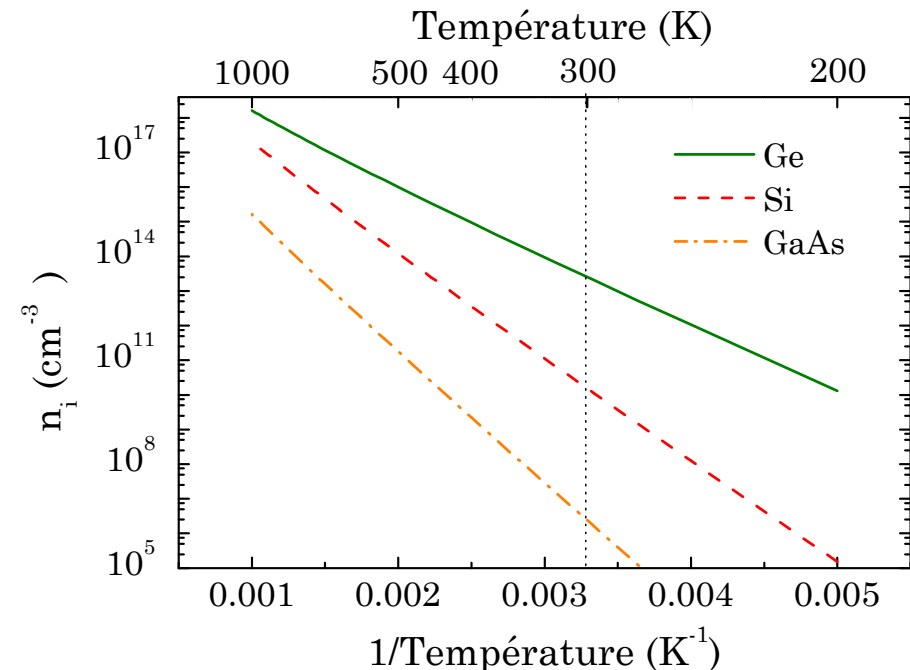
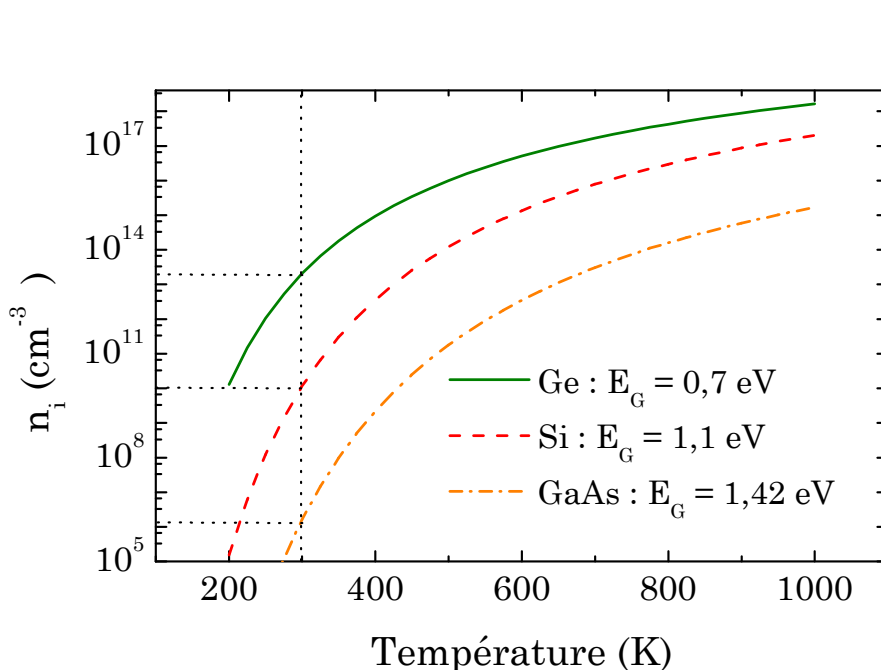


➤ Semi-conducteur intrinsèque

- Semi-conducteur non pollué (volontairement ou non) par des impuretés
- Pour $T \neq 0$, des électrons peuvent devenir libres
- La densité d'électrons (resp. trous) libres est notée "n" (resp. "p") = n_i

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

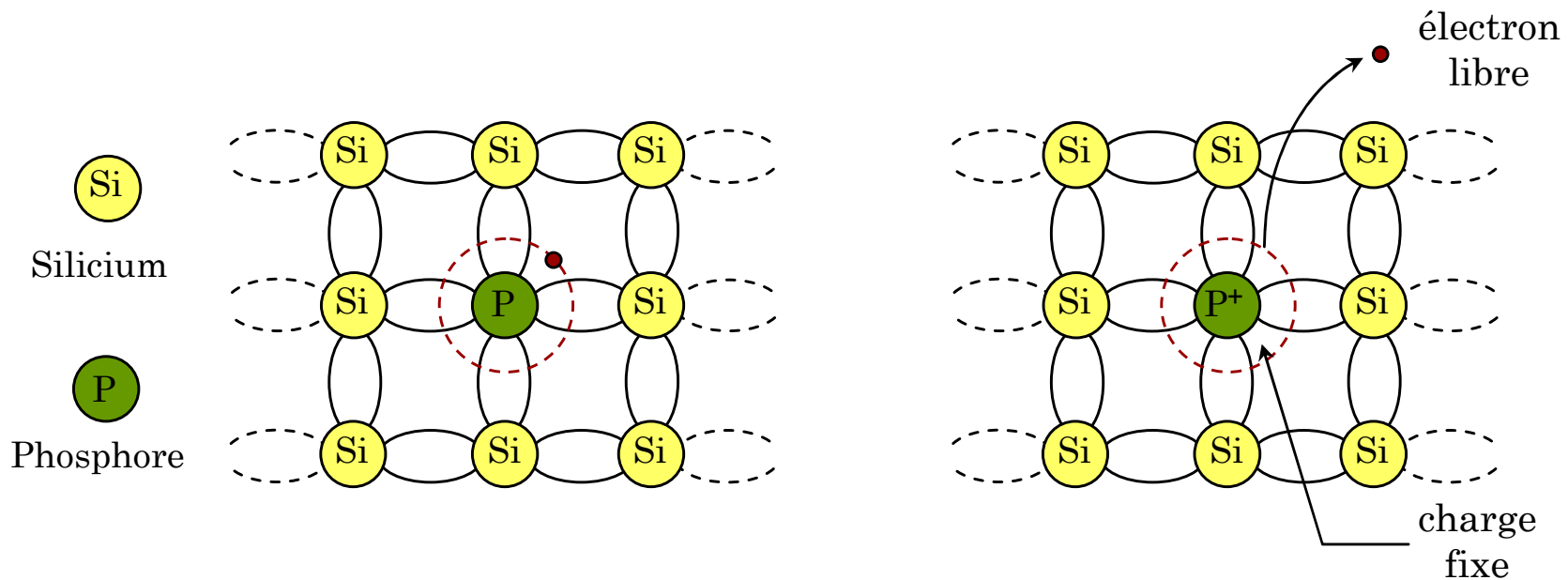
- E_G grand \Rightarrow meilleure stabilité en température (Puissance)
- $\ln(n_i)$ en fonction de $1/T$ est une droite : déduction de E_G avec la pente



➤ Semi-conducteur extrinsèque : dopage

□ Semi-conducteurs de type n

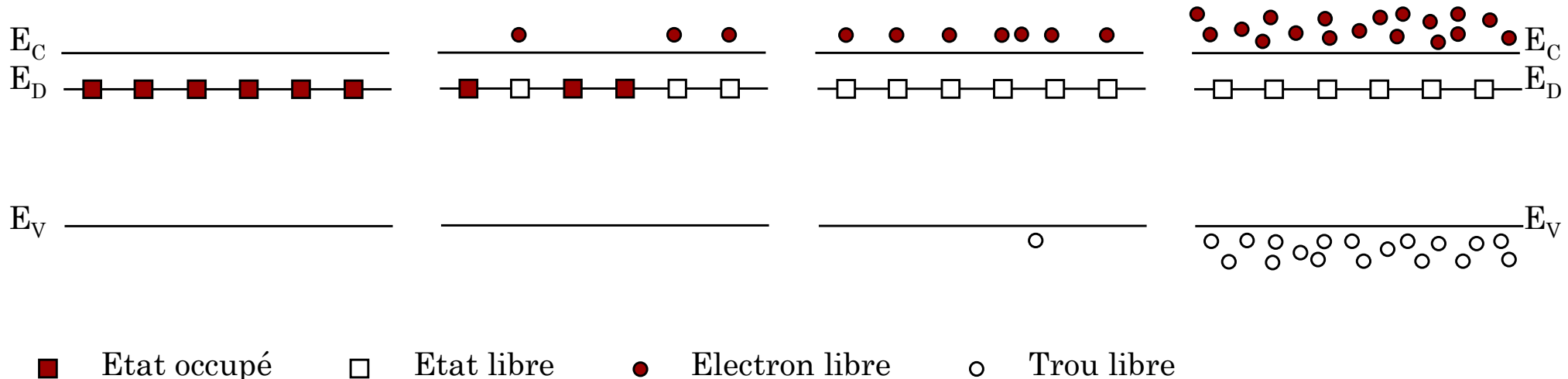
- Atomes (ou impuretés) de type donneur (d'électrons) en faible quantité
- Conduction par électrons plutôt que par trous
- Cristal de la colonne IV \Rightarrow atomes la colonne V (phosphore)
- Un faible apport d'énergie (0,04 eV), par exemple dû à une température différente de 0 K, peut "libérer" le cinquième électron de l'atome de phosphore



➤ Semi-conducteur extrinsèque : dopage

❑ Semi-conducteurs de type n

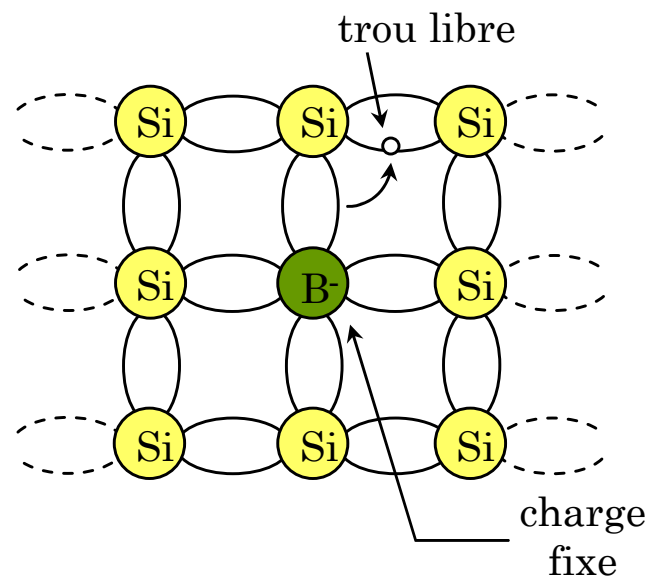
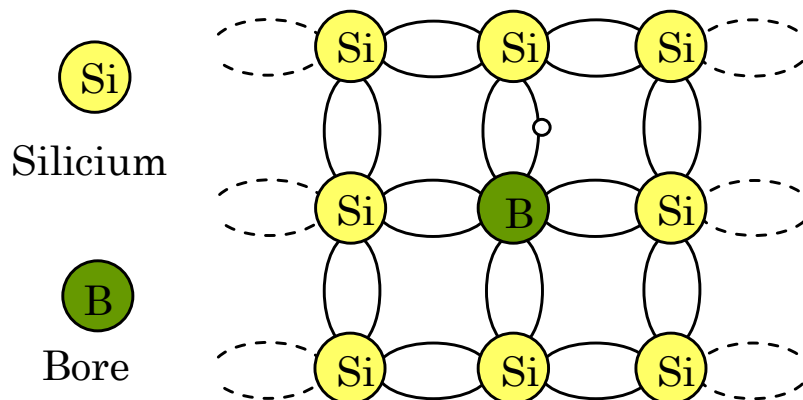
- Apparition d'un niveau d'énergie E_D dans la BI ($E_C - E_D = 0,04$ eV)
- A partir d'environ 50 K toutes les impuretés sont "dégelées"
- $n_0 = N_D \gg n_i \gg p_0$
- Comportement intrinsèque du matériau pour $T > 500$ K



➤ Semi-conducteur extrinsèque : dopage

❑ Semi-conducteurs de type p

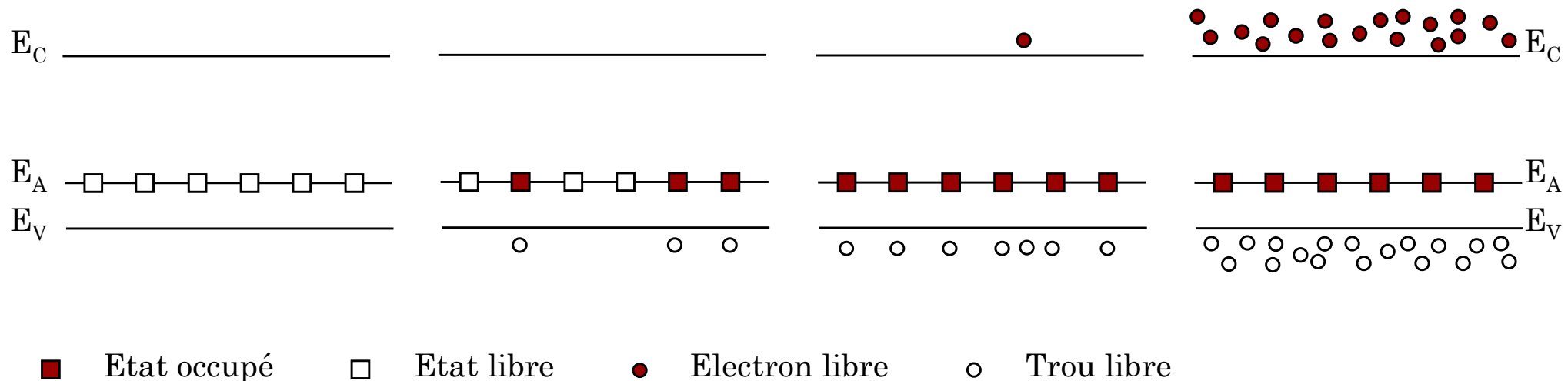
- Atomes (ou impuretés) de type accepteur (d'électrons) en faible quantité
- Conduction par trous plutôt que par électrons
- Cristal de la colonne IV \Rightarrow atomes la colonne III (bore)
- Un faible apport d'énergie permet à l'atome de bore de subtiliser un électron à un proche voisin



➤ Semi-conducteur extrinsèque : dopage

□ Semi-conducteurs de type p

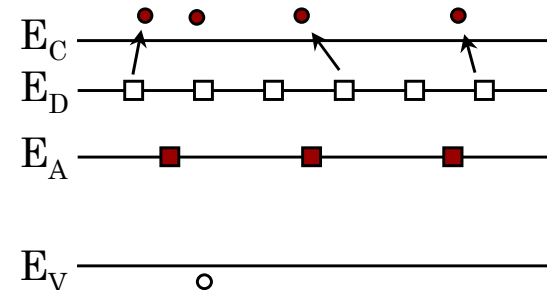
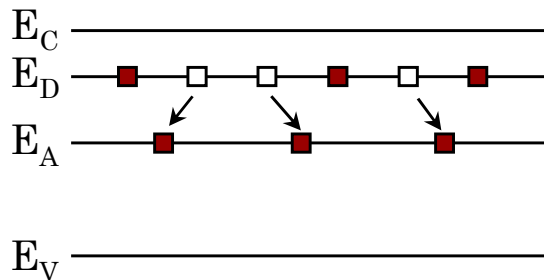
- Apparition d'un niveau d'énergie E_D dans la BI
- A partir d'environ 50 K toutes les impuretés sont "dégelées"
- $p_0 = N_A \gg n_i \gg n_0$
- Comportement intrinsèque du matériau pour $T > 500$ K



➤ Semi-conducteur extrinsèque : dopage

□ Semi-conducteurs compensés

- Les impuretés dopantes de **type différent** peuvent se compenser, partiellement ou totalement. $p_0 = N_A \gg n_i \gg n_0$
- Parfaitement compenser ($N_A = N_D$): semi-conducteur "intrinsèque par compensation"

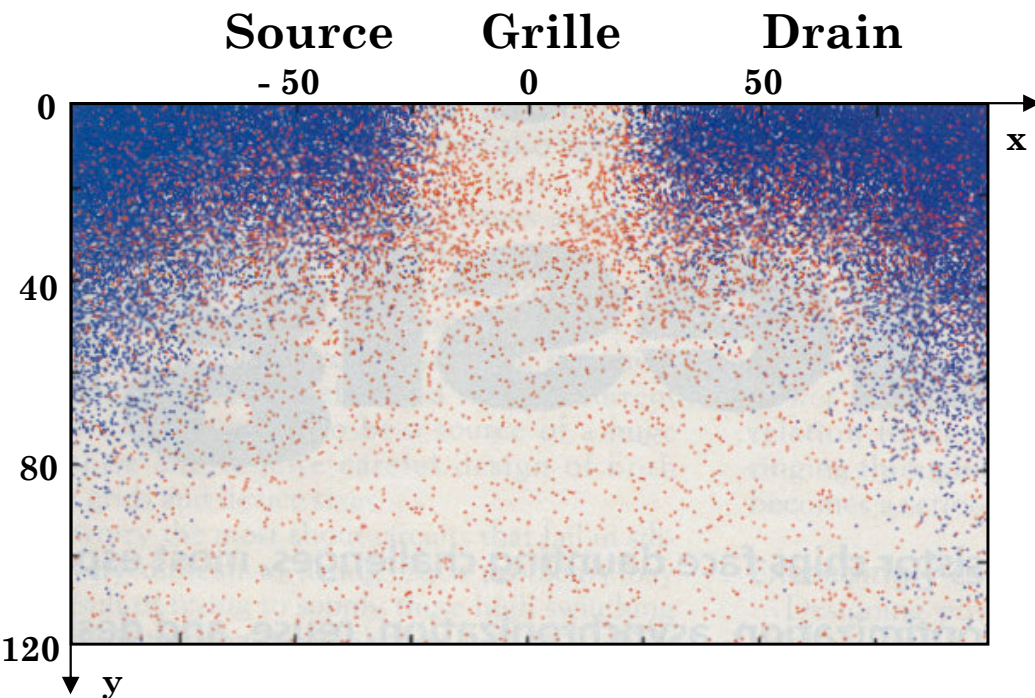
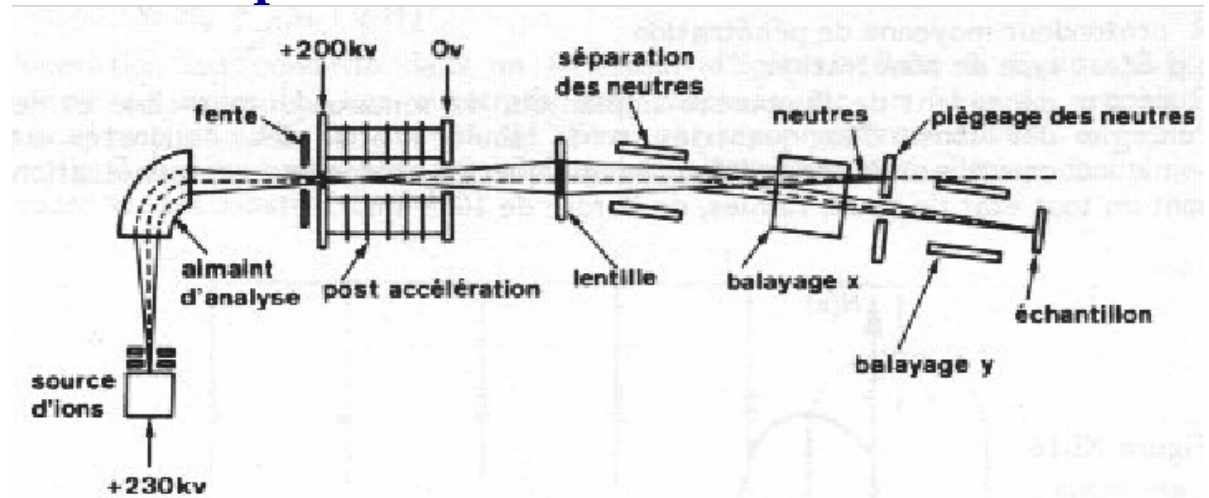


■ Etat occupé □ Etat libre ● Electron libre ○ Trou libre

- Le dopage minimum dépend du raffinage du matériau
- Concentrations résiduelles de bore d'environ 10^{13} atomes par cm^3 (silicium intrinsèque à température ambiante : $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

➤ Semi-conducteur dopé : exemples

Schéma d'un implantateur



Dopage d'un transistor MOS

$L = 50 \text{ nm}$, $W = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$
 Atomes donneurs : ●
 Atomes accepteurs : ●

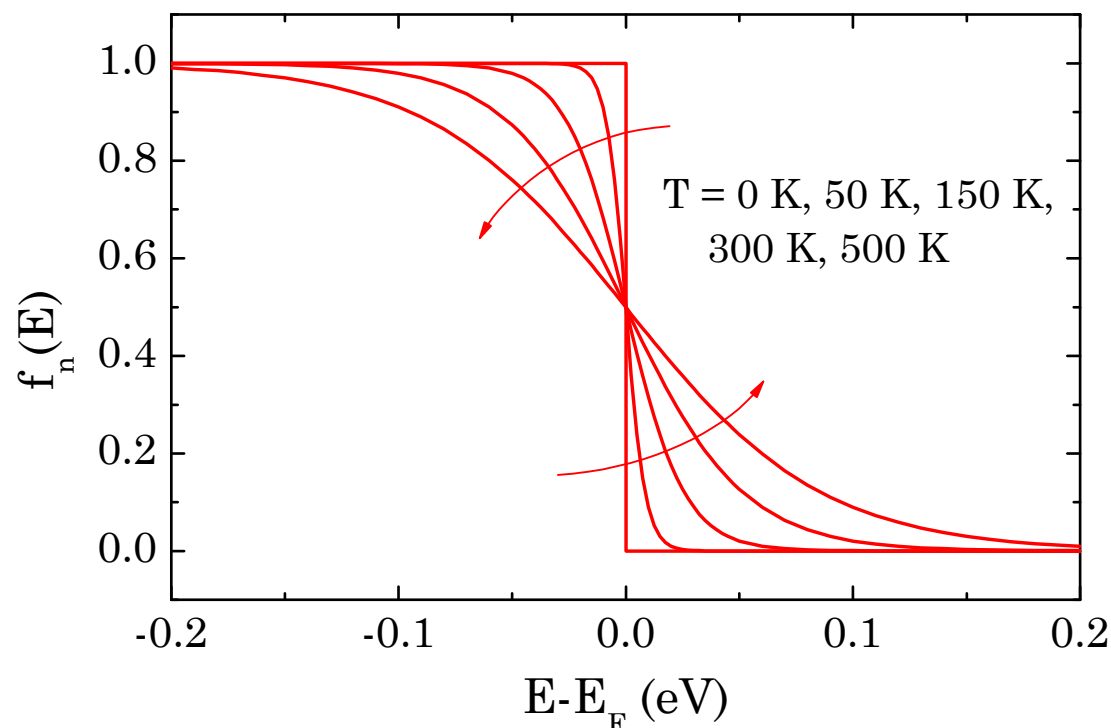
➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Distribution de Fermi-Dirac. Niveau de Fermi

- La probabilité d'occupation (à l'équilibre) d'un niveau d'énergie E par un électron est donnée par (statistique de Fermi-Dirac) :

$$f_n(E) = \frac{\text{nombre de cases occupées par les électrons (entre } E \text{ et } E + dE)}{\text{nombre de cases disponibles (entre } E \text{ et } E + dE)} = \frac{n(E)dE}{n_C(E)dE}$$

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$



➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Distribution de Fermi-Dirac. Niveau de Fermi

- La probabilité $f_p(E)$ qu'un niveau E soit occupé par un trou :

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right)}$$

- Statistique de Boltzmann :

Pour les électrons ($E - E_F$ est supérieure à quelques kT)

$$f_n(E) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

Pour les trous ($E_F - E$ est supérieur à quelques kT)

$$f_p(E) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right)} = \exp\left(-\frac{E_F - E}{kT}\right)$$

- Niveau de Fermi intrinsèque : E_{Fi} se situe près du milieu de la bande interdite $E_i = (E_C + E_V)/2$

➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

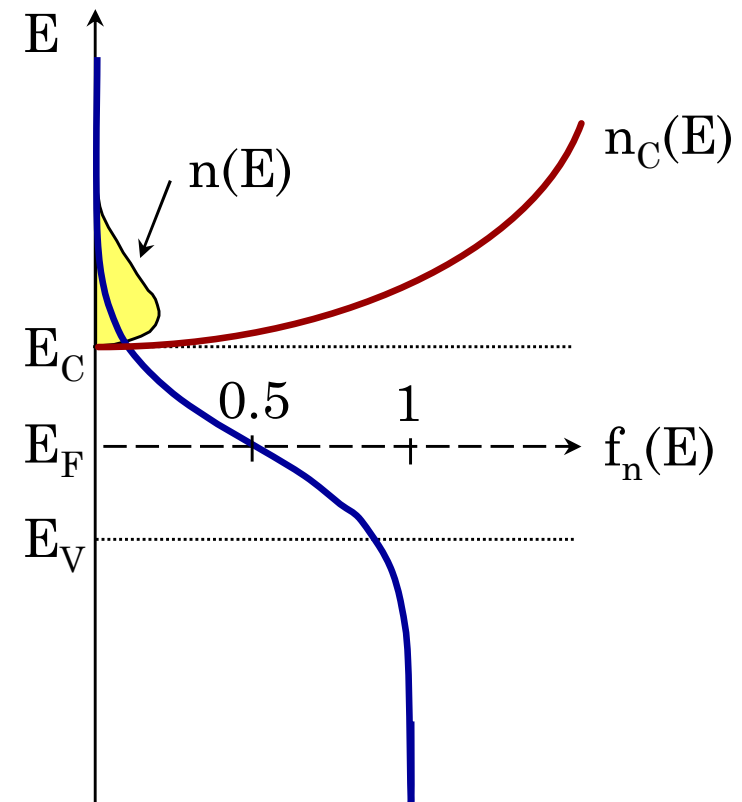
□ Concentrations à l'équilibre pour les électrons

$$n_0 = \int_{BC} n(E) dE = \int_{E_C}^{E_{\max}} n_C(E) f_n(E) dE \cong \int_{E_C}^{\infty} n_C(E) f_n(E) dE$$

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = N_C f_n(E_C)$$

- Densité équivalente d'états dans la bande de conduction ramenée en E_C

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$



➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

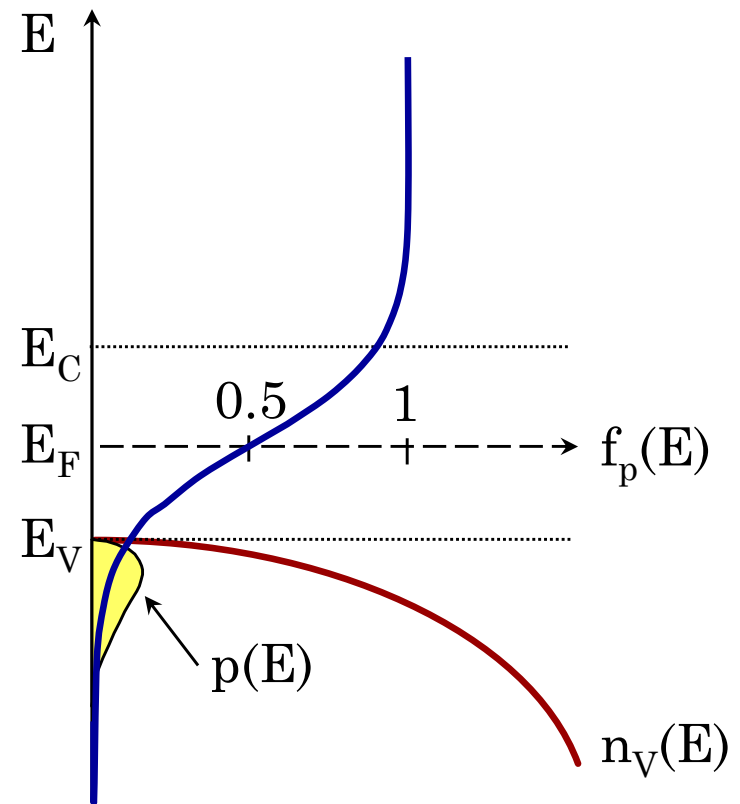
□ Concentrations à l'équilibre pour les trous

$$p_0 = \int_{BV} p(E) dE = \int_{E_{\min}}^{E_V} n_V(E) f_p(E) dE \cong \int_{-\infty}^{E_V} n_V(E) f_p(E) dE$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) = N_V f_p(E_V)$$

- Densité équivalente d'états dans la bande de valence ramenée en E_V

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$$



➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Loi d'action de masse

- Multiplication des densités d'électrons et de trous :

$$n_0 p_0 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{kT}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right)$$

- $n_0 p_0$ est indépendant de E_F et donc du dopage
- Dans un matériau intrinsèque on a :

$$n_i = p_0 = n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right)$$

- La loi d'action de masse s'écrit :

$$n_0 p_0 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) = n_i^2(T)$$

- Concentration intrinsèque de porteurs

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Densités d'électrons et de trous en fonction de n_i

- Expression du niveau de Fermi intrinsèque à partir de $n_0 = n_i$

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right) = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{2kT}\right)$$

Soit :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = E_i - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \approx E_i$$

- Densité d'électrons

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right) = n_i(T) \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)$$

- Densité de trous

$$p_0 = n_i(T) \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) = \frac{n_i(T)^2}{n_0}$$

➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Équation de la neutralité électrique

- Dans un semi-conducteur homogène :

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^- \quad \text{où } N_D^+ \text{ et } N_A^- \text{ représentent les impuretés ionisées}$$

- Densité d'atomes donneurs ionisés :

$$N_D^+ = N_D f_p(E_D) = N_D \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)}$$

- Densité d'atomes accepteur ionisés :

$$N_A^- = N_A f_n(E_A) = N_A \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}$$

➤ Concentration des porteurs libres à l'équilibre

□ Équation de la neutralité électrique : cas du silicium de type n

- A température ambiante, l'équation de la neutralité se simplifie ($N_D^+ = N_D$) :

$$n_0 = p_0 + N_D = \frac{n_i^2}{n_0} + N_D$$

- Pour ce type de semi-conducteur $n_0 \gg p_0$: $n_0 \approx N_D$
- Expression du niveau de Fermi : $E_F = E_C - kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) = E_{Fi} + kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

□ Équation de la neutralité électrique : cas du silicium de type p

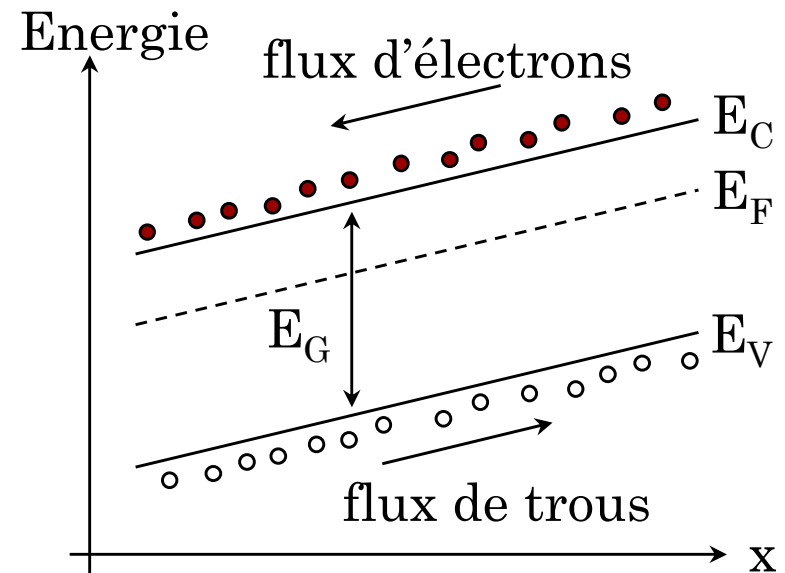
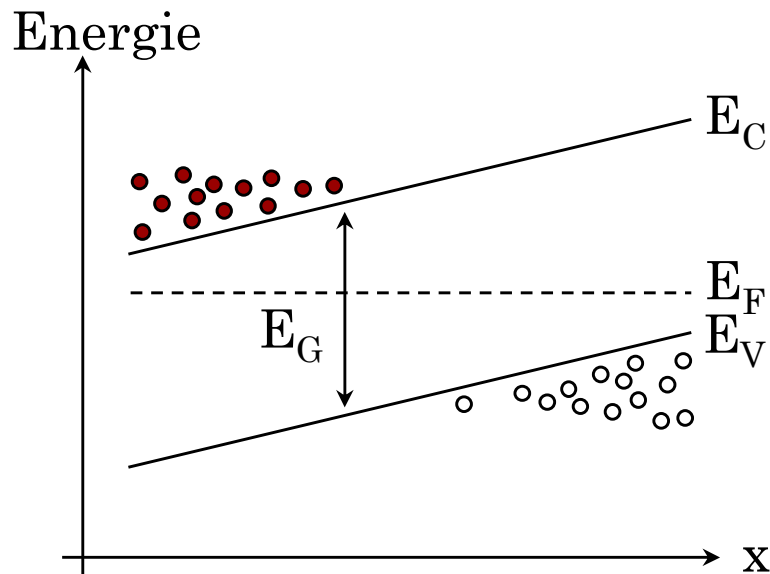
- Pour ce type de semi-conducteur $p_0 \gg n_0$: $p_0 \approx N_A$
- Expression du niveau de Fermi : $E_F = E_V + kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = E_{Fi} - kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$

➤ Le niveau de Fermi dans une structure à l'équilibre

□ Propriété fondamentale

- Quelle que soit la structure du matériau (homogène ou non), le niveau de Fermi est le même partout à l'équilibre thermodynamique.

□ Illustration

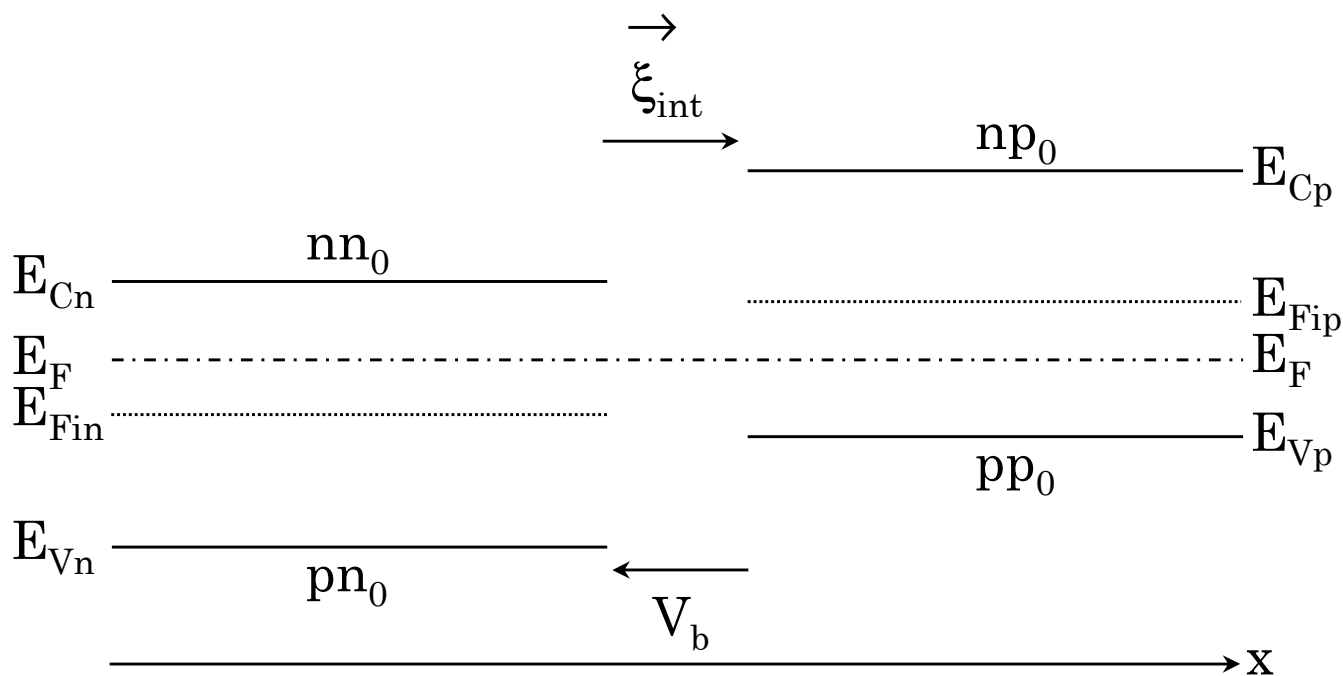


- Quelle est la particularité du dopage pour ces deux figures ?

➤ Le niveau de Fermi dans une structure à l'équilibre

□ Application : diode PN à l'équilibre

- Déterminer le potentiel interne de la diode, V_b .



$$V_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{nn_0}{np_0}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{pp_0}{pn_0}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{nn_0 pp_0}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_i^2}{pn_0 np_0}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

➤ Théorème de Gauss

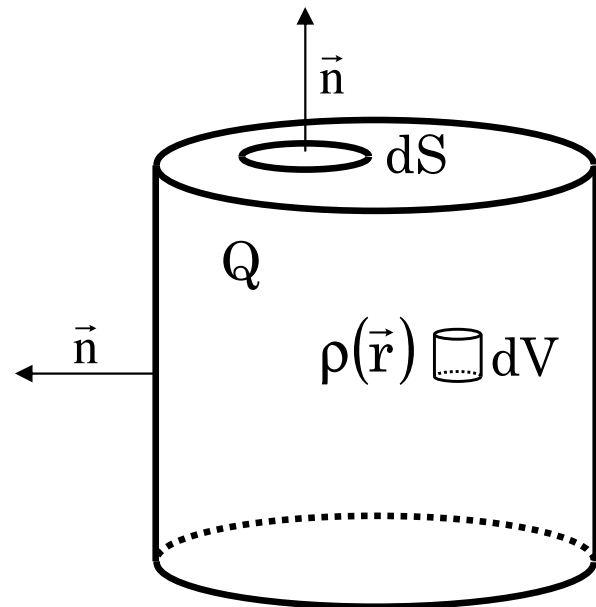
■ Rappels :

Un matériau SC homogène est neutre en tout point (neutralité électrique locale)

Lorsqu'un matériau est non homogène il y a une possibilité d'existence d'un champ électrique **interne** associé à celle d'une densité de charge dans une "zone de charge d'espace" (ZCE).

■ Soit un volume V délimité par une surface fermée S contenant une charge Q , le flux du champ électrique sortant s'écrit :

$$\iint_S \vec{\xi} \vec{n} dS = \frac{Q}{\epsilon_{SC}} = \frac{\iiint_V \rho(\vec{r}) dV}{\epsilon_{SC}} = \iiint_V \text{div}(\vec{\xi}) dV$$



➤ Équation de Poisson

- Densité de charges dans un volume dV : $\rho(\vec{r}) = q[N_D^+ + p - N_A^- - n]$

- Densité de charges et théorème de Gauss :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\xi} = \text{div}(\vec{\xi}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_{SC}} = \frac{q}{\epsilon_{SC}} [N_D^+ + p - N_A^- - n]$$

- Le champ électrique et la tension électrique V étant reliés par :

$$\vec{\xi} = -\vec{\text{grad}}(V) = -\vec{\nabla}(V)$$

- L'équation de Poisson est donnée par :

$$\Delta V = \nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{q}{\epsilon_{SC}} [N_D^+ + p - N_A^- - n]$$

- L'équation de Poisson à une seule dimension :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\partial \xi_x}{\partial x} = -\frac{q}{\epsilon_{SC}} [N_D^+(x) + p(x) - N_A^-(x) - n(x)]$$

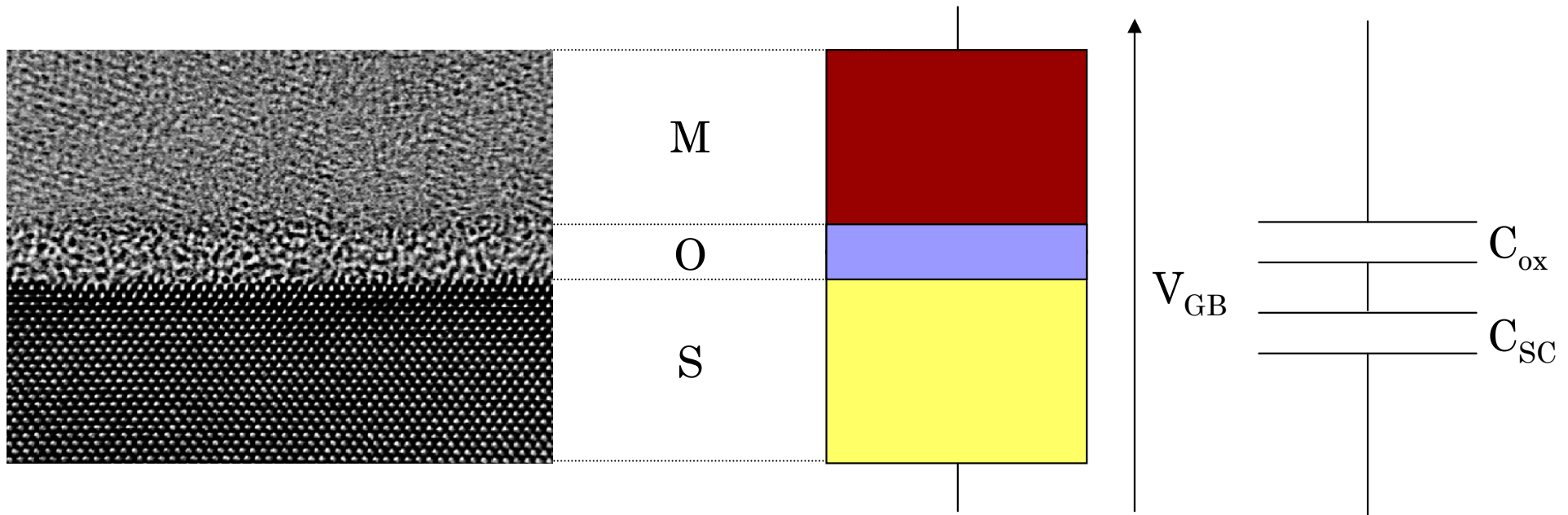
➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

□ Présentation de la structure

- MOS : Métal / Oxyde / Semi-conducteur
- Équivalent à la mise en série de deux capacités :

{
Capacité de l'oxyde
Capacité du substrat (qui dépend de la polarisation)

- Capacité MOS : base du transistor MOS (composant le plus utilisé)



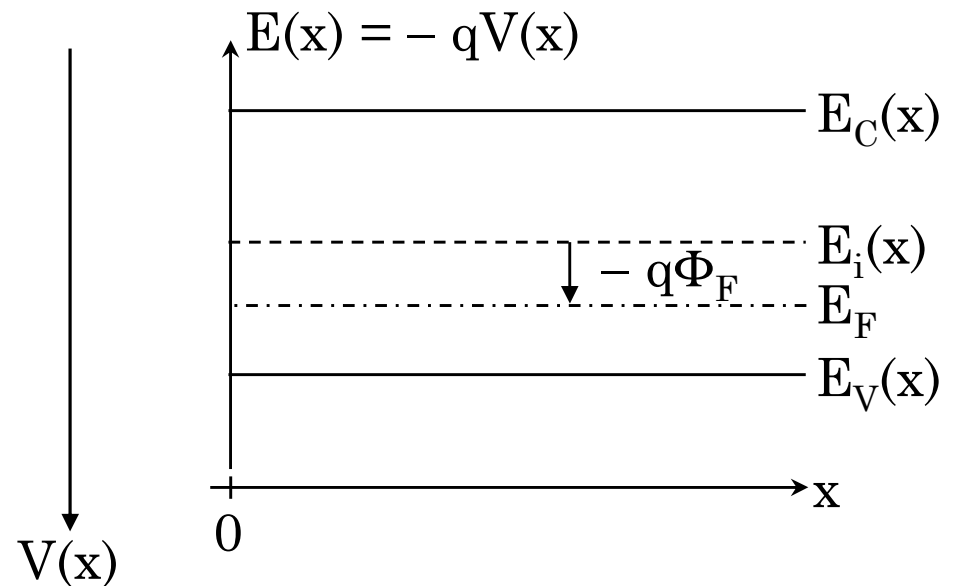
➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

❑ Caractéristiques de la structure

- Dans la suite, on ne s'intéresse qu'au substrat
- Quel est le type du substrat ?
- Donner l'expression du potentiel de volume, Φ_F .

■ On suppose que pour $V_{GB} = 0$ les bandes du substrat sont plates de l'interface vers le volume. Que ce passe t-il pour l'interface lorsque V_{GB} devient positif ?

■ Compléter le diagramme de bandes.



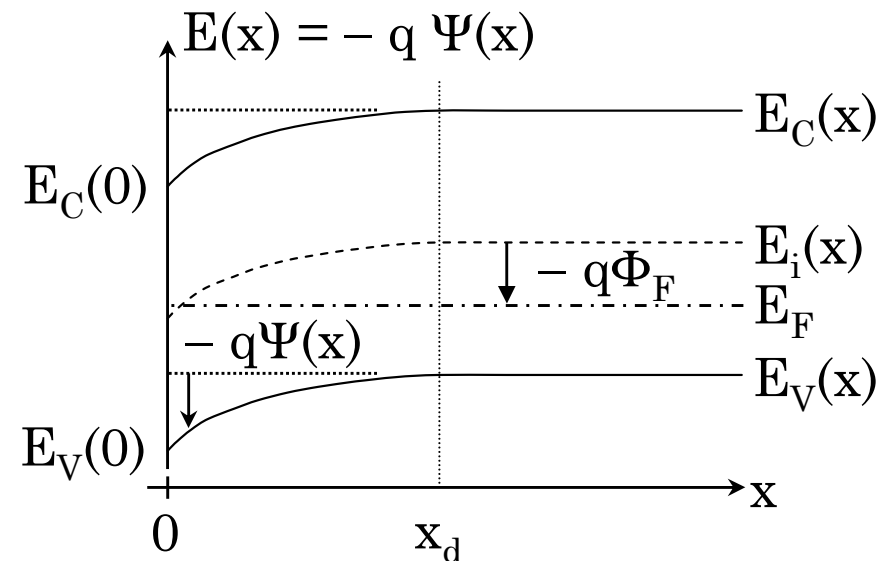
➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

❑ Courbures des bandes d'énergie

- Dans la suite, on ne s'intéresse qu'au substrat
- Quel est le type du substrat ?
- Donner l'expression du potentiel de volume, Φ_F .

▪ On suppose que pour $V_{GB} = 0$ les bandes du substrat sont plates de l'interface vers le volume. Que ce passe t-il pour l'interface lorsque V_{GB} devient positif ?

- Compléter le diagramme de bandes.



➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

□ Champ électrique

- Donner l'expression de la densité volumique de charges dans la ZCE.

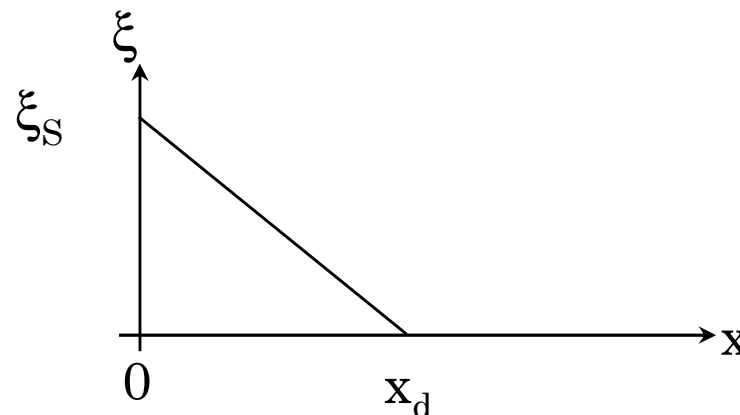
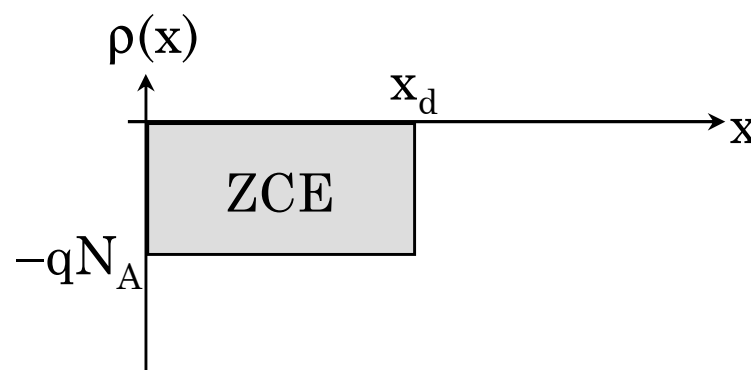
$$\rho(x) = -qN_A$$

- A partir de l'équation de Poisson, déterminer l'évolution du champ électrique et compléter le graphique ci-dessous.

$$\xi(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_{SC}}(x - x_d)$$

- Donner l'expression du champ électrique maximum.

$$\xi_S = \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{SC}}$$



➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

□ Potentiel et potentiel de surface

- Déterminer l'expression du potentiel.

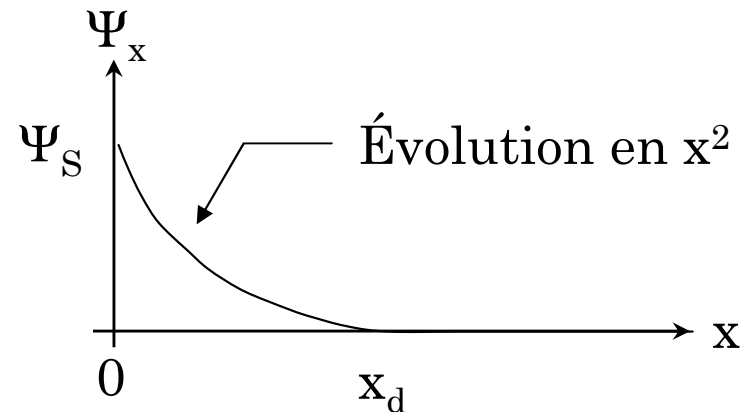
$$\Psi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_{SC}} (x - x_d)^2$$

- Donner l'expression de Ψ_S (potentiel de surface) en fonction de x_d puis de ξ_S .

$$\Psi_S = \frac{qN_A}{2\epsilon_{SC}} x_d^2 = \frac{1}{2} \xi_S x_d$$

- En déduire l'expression de x_d en fonction de Ψ_S .

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{SC}}{qN_A} \Psi_S}$$



➤ Application (et conséquences) : la capacité MOS

□ Pour aller plus loin

- Donner l'expression de la charge dans la ZCE par unité de surface.

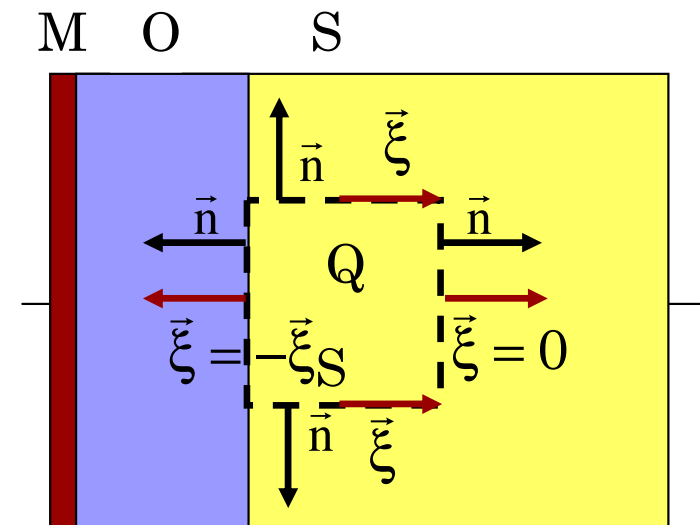
$$Q_{SC} = -qN_A x_d$$

- A partir du théorème de Gauss, déterminer l'expression de ξ_S .

$$-\xi_S n \cos(0)S + \xi n \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right)S' + 0n \cos(0)S + \xi n \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)S' = \frac{Q}{\epsilon_{SC}}$$

$$\xi_S = -\frac{Q}{S\epsilon_{SC}} = -\frac{SQ_{SC}}{S\epsilon_{SC}} = \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{SC}}$$

- Est ce que la région de la ZCE proche de x_d est réellement une ZCE ?



➤ Introduction

- Hors champ électrique, les porteurs libres ont un mouvement ressemblant à des sauts de puce (caractérisé par des changements de direction que l'on appelle "mouvement Brownien") : leur déplacement moyen est nul
- Les atomes, les impuretés et les défauts du réseau sont autant d'obstacles pour les porteurs, qui effectuent des "collisions" avec eux.
- Le temps moyen entre collisions, t_c (ou "temps de relaxation" sur le réseau), est de l'ordre de 10^{-13} s (0,1 ps).
- t_c n'a absolument rien à voir avec le temps "de vie" des porteurs (temps entre création et recombinaison de porteurs) qui est en général beaucoup plus long.
- La vitesse thermique des porteurs, v_{th} , s'exprime en fonction de l'énergie cinétique et de leur masse effective, m^* , qui reste de l'ordre de celle de l'électron dans le vide ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$$

- 300 K la vitesse thermique est de l'ordre de 10^5 ms⁻¹.
- La distance que parcourt un porteur entre deux chocs s'appelle le "libre parcours moyen", λ , et vaut simplement : $\lambda = v_{th} t_c$
qui à 300 K est d'environ 10 nm.

➤ Mobilité des porteurs

- Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un semi-conducteur, chaque porteur subit une force électrostatique (+ pour le trous et – pour les électrons) donnée par :

$$\vec{F} = \pm q \vec{\xi}$$


- Dans le cas d'un électron (force = masse × accélération) :

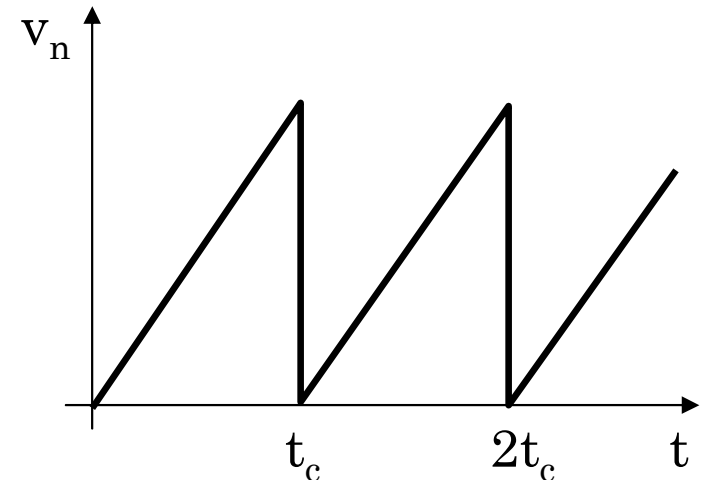
$$\vec{F} = m_n \vec{\gamma} = -q \vec{\xi} \quad \text{soit} \quad \vec{\gamma} = -\frac{q \vec{\xi}}{m_n} = \frac{d\vec{v}_n}{dt}$$

- La vitesse d'un électron est donc donnée par :

$$\vec{v}_n = -\frac{q \vec{\xi}}{m_n} t$$

- La vitesse d'un électron entre deux chocs (t_c) est :

$$\langle \vec{v}_n \rangle = -\frac{q t_c}{2 m_n} \vec{\xi} = -\mu_n \vec{\xi}$$



La mobilité μ des porteurs est définie comme le coefficient de proportionnalité entre la vitesse et le champ électrique

➤ Mobilité des porteurs

❑ Exemples de mobilités

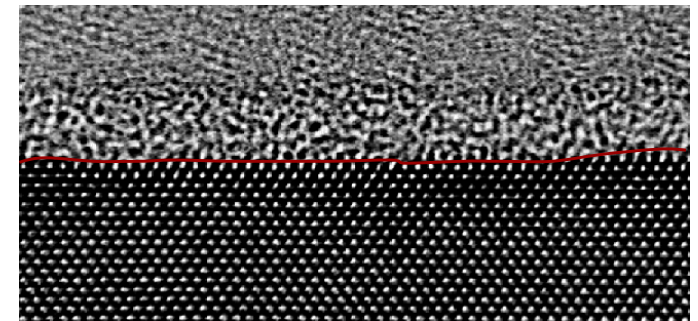
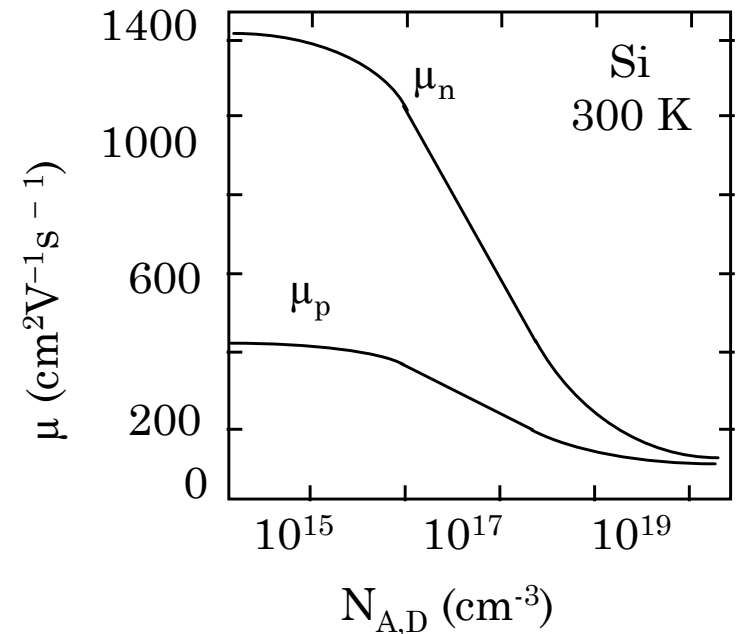
SC	E_G	μ_n	μ_p	ϵ_r
Si	1.12	1400	500	11.9
Ge	0.7	3900	1900	16
GaAs	1.42	8500	400	13
InP	1.35	5000	150	12.4
AlAs	2.16	1200	400	10.1
GaP	2.26	300	100	11

SC	E_G	μ_n	μ_p	ϵ_r
InAs	0.36	33000	460	14.6
InSb	0.18	78000	750	17.7
GaSb	0.72	5000	850	15.7
CdS	2.42	340	50	5.4
CdTe	1.56	1050	100	10.2
SiO ₂	9	isolant		3.9

➤ Mobilité des porteurs

❑ Plusieurs mécanismes influencent la mobilité :

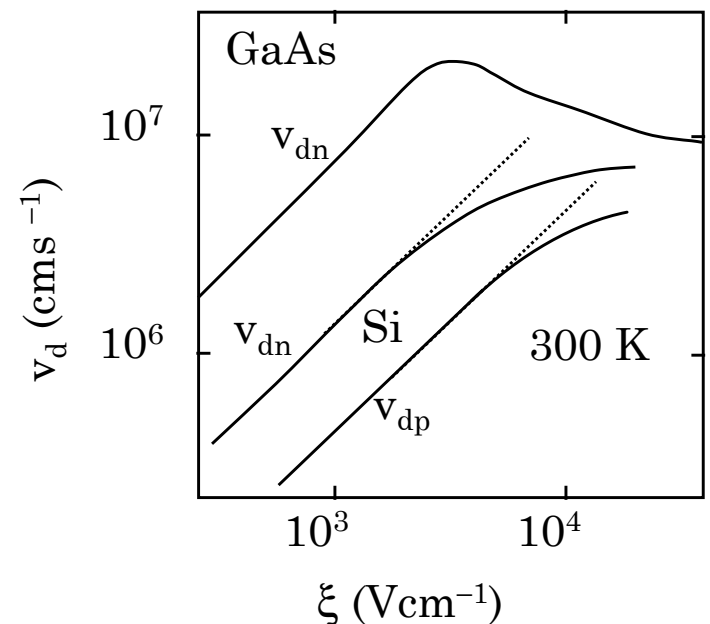
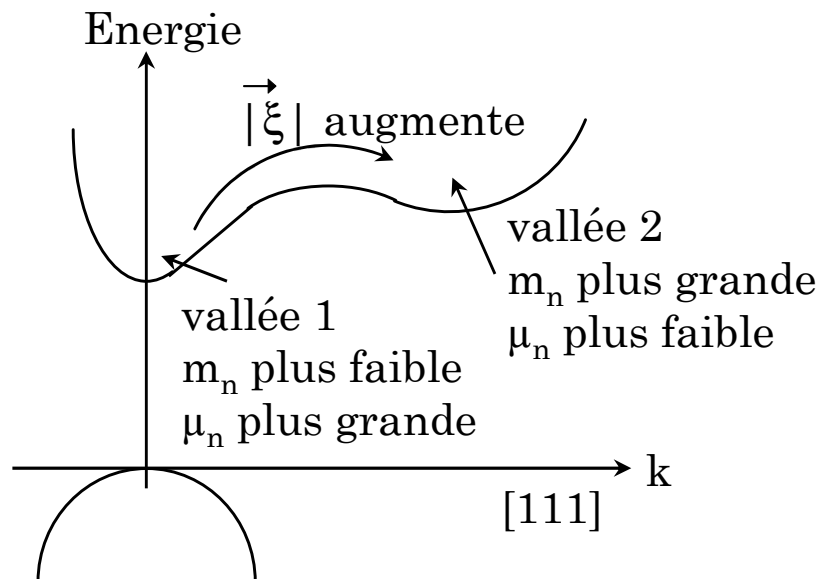
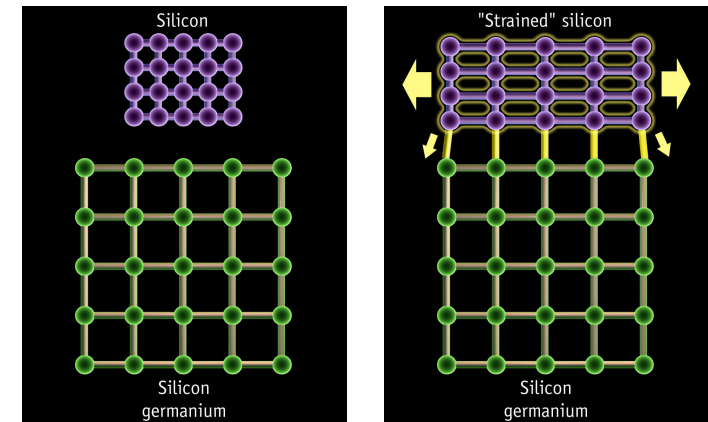
- **Les collisions coulombiennes** : les impuretés ionisées et d'une manière générale tous les centres chargés qui gênent le parcours des porteurs.
- **Les collisions avec le réseau** : les atomes du réseau cristallin qui vibrent autour de leur position moyenne (phonons) sont des obstacles pour les porteurs.
- **Les collisions sur la rugosité de surface** : les dimensions d'un composant à semi-conducteur n'étant pas infinies, les porteurs "heurtent" parfois la surface et sont d'autant plus gênés dans leur mouvement que cette surface est de mauvaise qualité.



➤ Mobilité des porteurs

❑ Plusieurs mécanismes influencent la mobilité :

- **Semi-conducteur contraint** : utilisation de silicium sur SiGe par exemple pour les transistors MOS.
- **Application d'un fort champ électrique** : existence d'une vitesse de saturation des porteurs se traduisant par une chute de la mobilité.



➤ Conduction et conductivité

□ Densité de courant

→ \vec{j} (Am^{-2}) est définie comme le flux de charges qui passe par unité de surface.

- Elle est donc égale à la vitesse des charges multipliées par la concentration de charges (Cm^{-3}). Pour les électrons cela donne :

$$\vec{j}_n = -qn\vec{v}_{dn}$$

- L'expression de la densité de courant des électrons et des trous en fonction du champ électrique est :

$$\begin{cases} \vec{j}_n = qn\mu_n\vec{\xi} = \sigma_n\vec{\xi} \\ \vec{j}_p = qp\mu_p\vec{\xi} = \sigma_p\vec{\xi} \end{cases}$$

- La conductivité (σ_n pour les électrons et σ_p pour les trous) est définie comme le coefficient de proportionnalité entre la densité de courant et le champ électrique.
- Dans le cas d'une conduction par les électrons et les trous :

$$\vec{j}_{\text{tot}} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (\sigma_n + \sigma_p)\vec{\xi} = \sigma_{\text{tot}}\vec{\xi}$$

➤ Conduction et conductivité

❑ Exemple : résistance d'un barreau de silicium

- La densité de courant est donné par (attention aux axes de I et de V) :

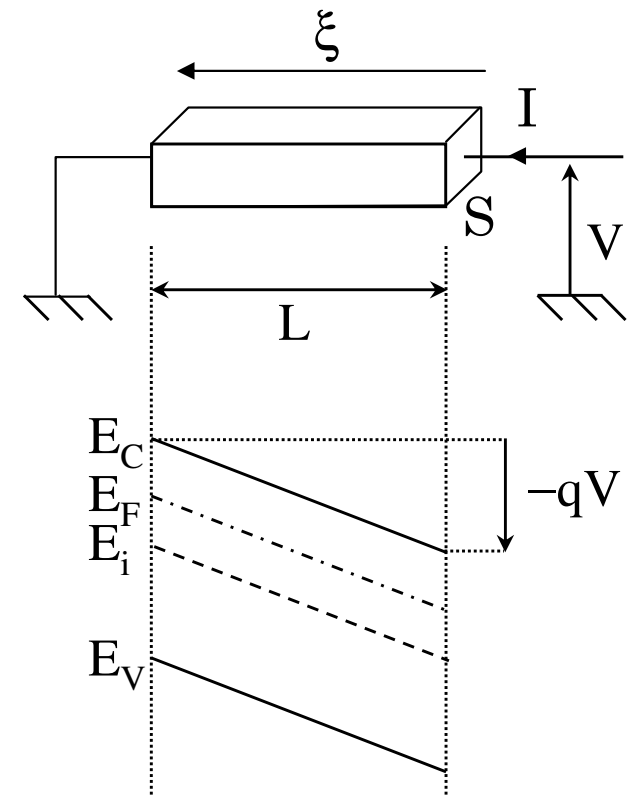
$$j_{\text{tot}} = \sigma_{\text{tot}} \xi = \sigma_{\text{tot}} \frac{V}{L}$$

- Le courant qui traverse le barreau est :

$$I = S \sigma_{\text{tot}} \frac{V}{L} = \frac{1}{R} V$$

- La loi d'Ohm permet d'identifier la résistance du barreau :

$$R = \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{L}{S} = \frac{1}{(qn|\mu_n| + qp\mu_p)} \frac{L}{S}$$



➤ Diffusion des porteurs

□ Introduction

- L'apparition d'un gradient de porteurs dans un matériau (dans le cas d'un semi-conducteur non homogène ou lors d'une excitation locale...) engendre un flux de ces porteurs dans le sens inverse du gradient.
- Soit un barreau de silicium de type p dont on considère un élément de volume.
- La force totale qui s'exerce sur cet élément s'écrit (Force = surface \times pression) :

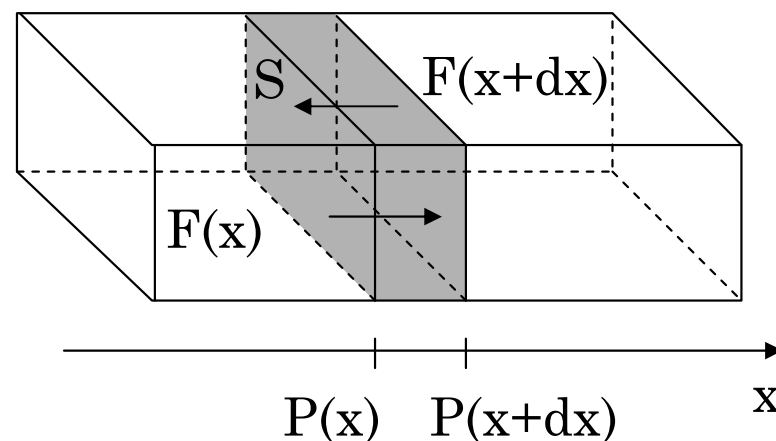
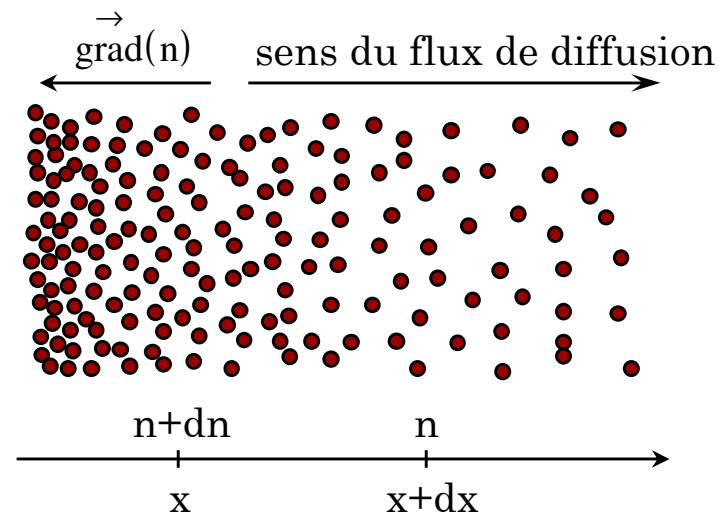
$$F = [P(x) - P(x + dx)]S = -S \frac{\partial P}{\partial x} dx$$

- La pression des trous est donnée par :

$$P(x) = kT p(x)$$

- La force qui s'exerce devient :

$$F = -SkT \frac{\partial p(x)}{\partial x} dx$$



➤ Diffusion des porteurs

□ Courant de diffusion

- Expression de la force en fonction de l'accélération :

$$F = p(x) S dx \quad m_p \gamma = -S k T \frac{\partial p(x)}{\partial x} dx$$

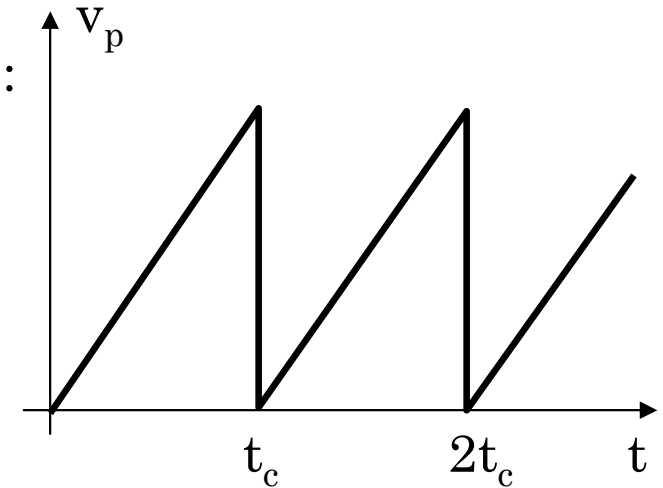
- Soit : $\gamma = -\frac{kT}{m_p} \frac{1}{p(x)} \frac{\partial p(x)}{\partial x} = \frac{dv_p}{dt}$

- La vitesse d'un trou entre deux chocs (t_c) est :

$$\langle v_p \rangle = -\frac{kT}{m_p} \frac{1}{p(x)} \frac{\partial p(x)}{\partial x} \frac{t_c}{2} = -\frac{kT}{q} \mu_p \frac{1}{p(x)} \frac{\partial p(x)}{\partial x} = -D_p \frac{1}{p(x)} \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

- D_p correspond au coefficient de diffusion des trous.
- La densité de courant de diffusion s'écrit alors :

$$\begin{cases} \vec{j}_n = -qn(x)\vec{v}_n = qD_n \overrightarrow{\text{grad}(n)} \\ \vec{j}_p = qp(x)\vec{v}_p = -qD_p \overrightarrow{\text{grad}(p)} \end{cases}$$

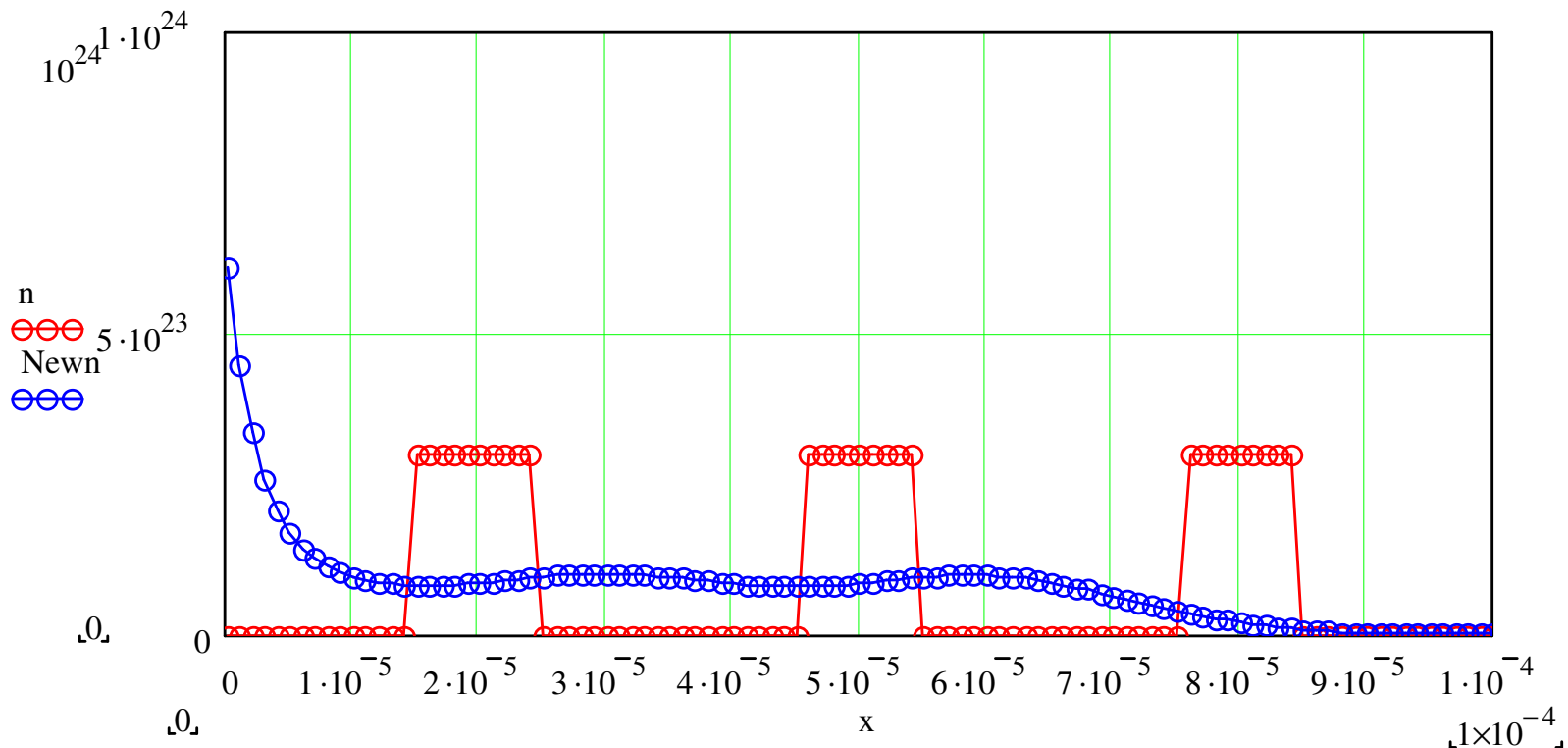


➤ Densité de courant des porteurs

□ Addition des courants de conduction et de diffusion

$$\begin{cases} \vec{j}_n = qn\mu_n\vec{\xi} + qD_n\overrightarrow{\text{grad}(n)} \\ \vec{j}_p = qp\mu_p\vec{\xi} - qD_p\overrightarrow{\text{grad}(p)} \end{cases}$$

□ Exemples



➤ Densité de courant des porteurs

□ Niveau de Fermi plat = pas de courant

- Soit un barreau de silicium de type n faisant apparaître une variation spatiale de E_F et E_i .
- Développer l'expression de $\text{grad}(n)$ en fonction de n_i .

$$\overrightarrow{\text{grad}}(n) = \overrightarrow{\text{grad}}\left(n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)\right) = \frac{n}{kT} \left(\overrightarrow{\text{grad}}(E_F) - \overrightarrow{\text{grad}}(E_i)\right)$$

- Donner l'expression de $\text{grad}(E_i)$ en fonction du champ électrique.

$$\overrightarrow{\text{grad}}(E_i) = \overrightarrow{\text{grad}}(E_C) = \overrightarrow{\text{grad}}(E_V) = \overrightarrow{\text{grad}}(-qV) = -q\overrightarrow{\text{grad}}(V) = q\vec{\xi}$$

- Donner la nouvelle expression de la densité de courant des électrons.

$$\vec{j}_n = n\mu_n \overrightarrow{\text{grad}}(E_F)$$

➤ Création de porteurs

□ La création d'un porteur libre correspond à une transition BV - BC

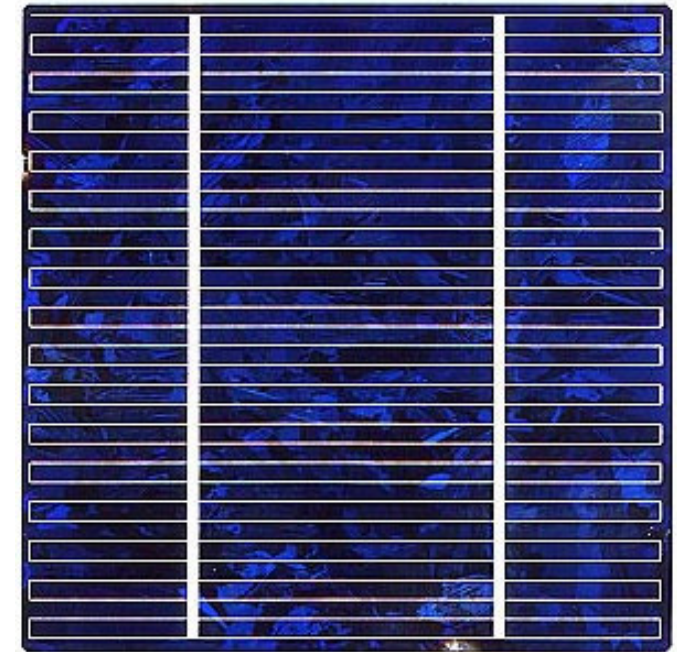
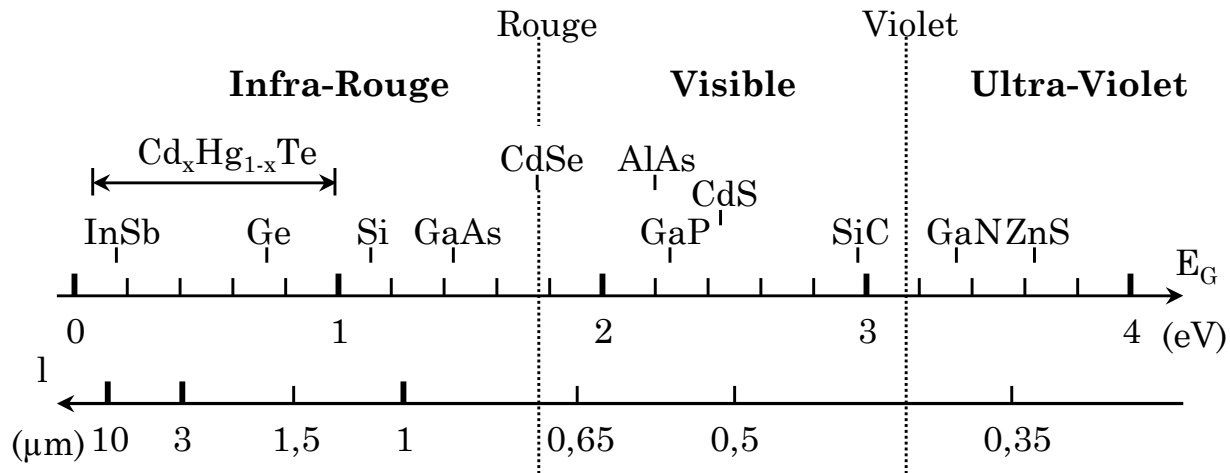
- Transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction qui correspond à la création d'une paire électron-trou.
- Transition d'un électron d'un niveau E_D (situé dans la bande interdite) vers la bande de conduction. Il reste une charge fixe positive (atome ionisé) et un électron dans BC.
- Transition d'un électron de la bande de valence vers un niveau E_A du gap. Il reste une charge négative fixe et un trou (dans BV).

□ L'énergie est fournie par :

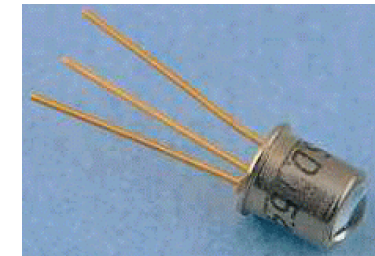
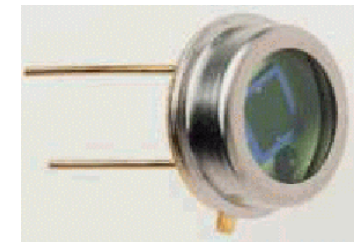
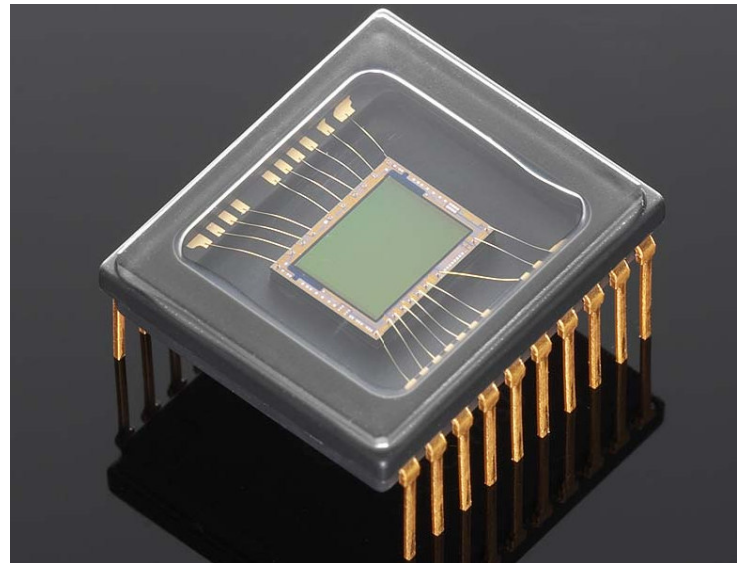
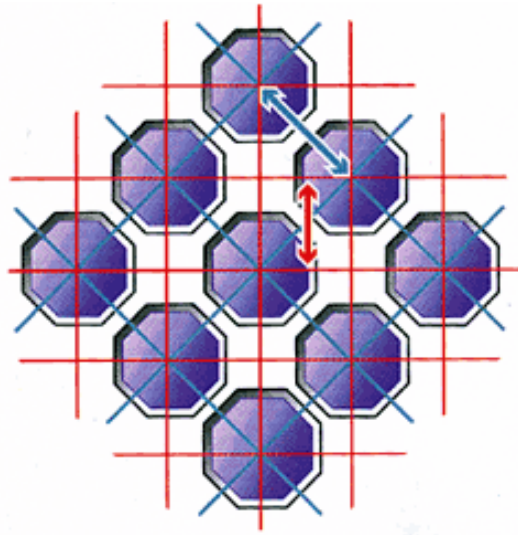
- Des photons (lumière)
- Des particules énergétiques (rayonnements ou porteurs).
- De la chaleur

□ Taux de génération (ou de création) de porteurs G_n ($m^{-3}s^{-1}$) pour les électrons et G_p pour les trous.

➤ Création de porteurs



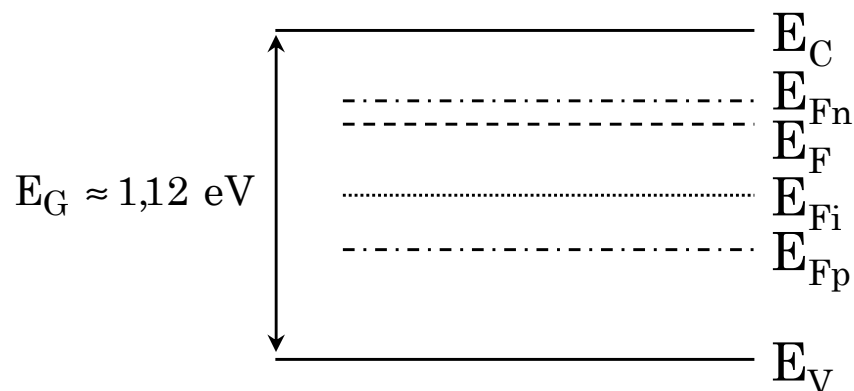
Efficiency 14.6%---Pmax 1.46W



➤ Les quasi-niveaux de Fermi

■ Soit un barreau de silicium dopé n, que l'on éclaire. On a ainsi une augmentation des densités d'électrons et de trous. Que doit faire le niveau de Fermi ?

■ Il y a ainsi apparition d'un niveau de Fermi pour les électrons (E_{Fn}) et d'un autre pour les trous (E_{Fp}), c'est ce que nous appellerons les quasi-niveaux de Fermi.



■ Les probabilités d'occupation d'un état par un électron ou un trou sont données par :

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{Fn}}{kT}\right)}$$

$$f_p(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{Fp} - E}{kT}\right)}$$

■ Les densités d'électrons et de trous sont alors données par:

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_{Fi}}{kT}\right)$$

➤ Les quasi-niveaux de Fermi

- Que devient le produit np par rapport à n_i ?

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right)$$

- La loi d'action de masse n'est pas respectée à l'état hors équilibre.

□ Exemple d'application

- Soit un barreau de Silicium ($n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à 300 K) dopé avec des impuretés donatrices afin d'obtenir $n_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ($p_0 = n_i^2/n_0 = 2,25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$). On crée des porteurs par paires avec une concentration $\delta n = \delta p = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

- Donner la position du niveau de Fermi

$$E_F - E_{Fi} = kT \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) = 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times \ln\left(\frac{10^{14}}{1,5 \times 10^{10}}\right) = 4,6 \times 10^{-20} \text{ J} = 0,228 \text{ eV}$$

➤ Les quasi-niveaux de Fermi

- Donner les densités des électrons et des trous hors équilibre.

$$n = n_0 + \delta n = 1,2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} (\approx n_0)$$

$$p = p_0 + \delta p \approx \delta p = 0,2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

- Donner la position des quasi niveaux de Fermi.

$$E_{Fn} - E_{Fi} = kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) = 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times \ln\left(\frac{1,2 \times 10^{14}}{1,5 \times 10^{10}}\right) = 0,233 \text{ eV}$$

$$E_{Fp} - E_{Fi} = -kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) = -1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times \ln\left(\frac{0,2 \times 10^{14}}{1,5 \times 10^{10}}\right) = -0,186 \text{ eV}$$

- On peut aussi ré-écrire les densités de courant :

$$\begin{cases} \vec{j}_n = n\mu_n \overrightarrow{\text{grad}}(E_{Fn}) \\ \vec{j}_p = p\mu_p \overrightarrow{\text{grad}}(E_{Fp}) \end{cases}$$

➤ Recombinaison et durée de vie des porteurs libres

□ Introduction

- La génération est équilibrée par un processus de disparition appelé "recombinaison"
- La recombinaison peut être qualifiée :

Par rapport au mécanisme de disparition :

Directe (bande à bande) : l'électron passe directement de la BC à la BV

Indirecte : l'électron passe de la BC à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme "centre de recombinaison" et situé dans la bande interdite, puis il sera ré-émis vers la BV. Cette étape peut aussi être décrit, de façon équivalente, comme la capture par le centre recombinant d'un trou de la BV

Par rapport aux échanges d'énergie :

Radiative : l'énergie (de recombinaison) est cédée sous forme lumineuse (photon)

Non radiative : l'énergie est cédée sous forme de phonons (vibrations du réseau) ou à un autre électron libre ("recombinaison Auger").

➤ Recombinaison et durée de vie des porteurs libres

□ Durée de vie des porteurs

- Processus de recombinaison caractérisé par un "taux de recombinaison" :

$$\begin{cases} R_n \text{ (m}^{-3}\text{s}^{-1}\text{) pour les électrons} \\ R_p \text{ pour les trous} \end{cases}$$

- Expression du taux recombinaison pour les électrons et les trous :

$$R_n = -\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} \qquad R_p = -\frac{dp(t)}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

- τ_n (resp. τ_p) est appelé "**durée de vie des électrons (resp. des trous)**".

□ Expression de la durée de vie

- Recombinaison directe : disparition simultanée de paires électron-trou.
- Recombinaison indirecte : dans ce cas une impureté (ou un défaut du réseau), situé à une énergie E_R dans la bande interdite agit comme "centre de recombinaison", c'est-à-dire comme "marche intermédiaire" ("relais") pour le passage d'un électron de BC vers BV.

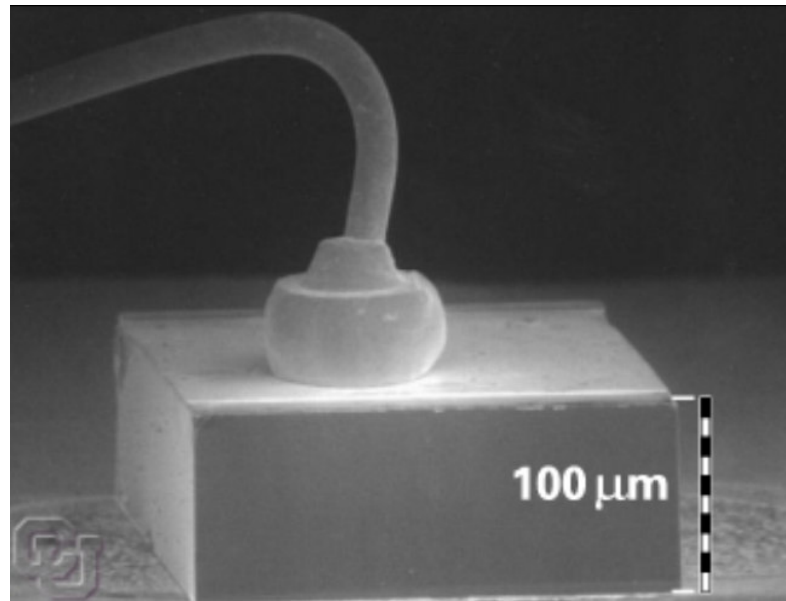
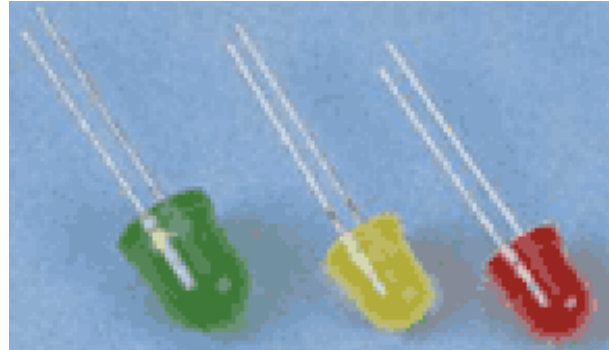
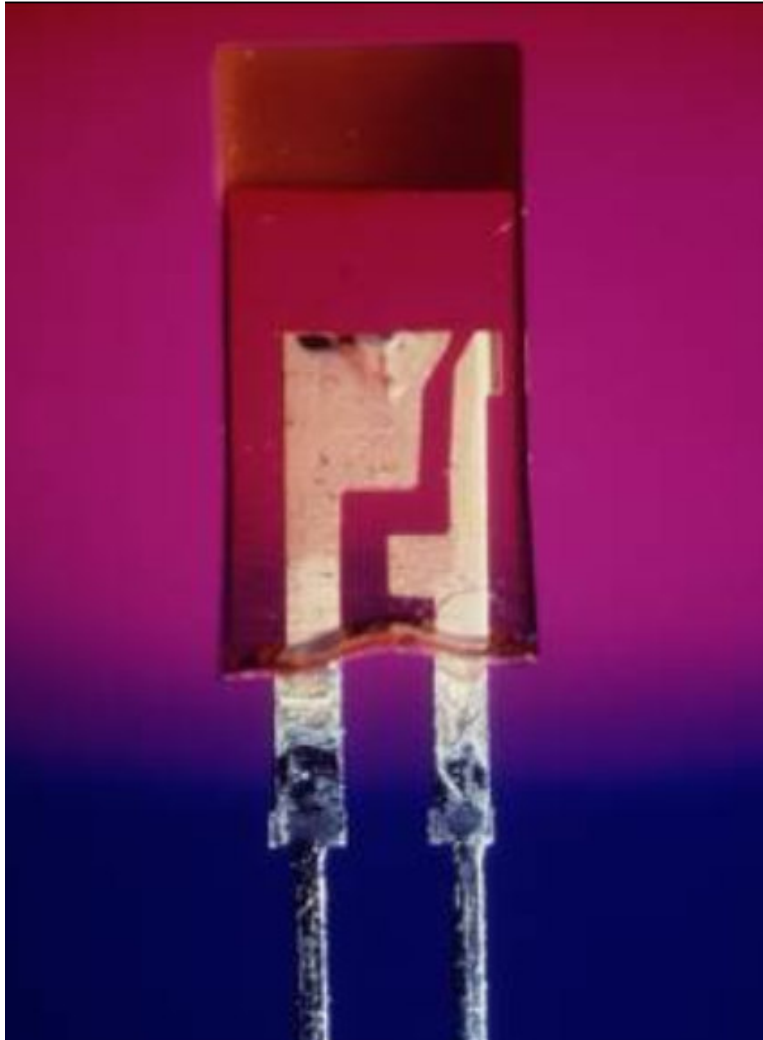
➤ Recombinaison et durée de vie des porteurs libres

❑ Quelques exemples

- **Silicium** : recombinaison indirecte et non radiative. Pour un cristal est pur, τ est de l'ordre de 1 ms ou 1 ns si présence d'atomes comme l'or ou le cuivre.
- **GaAs** : recombinaison directe et radiative, une longueur d'onde de 0.9 μm .
- **GaP** : recombinaison indirecte et non radiative sauf si présence d'impuretés (gamme du visible : LED rouge ou verte).
- **GaAs_{1-x}P_x** : recombinaison directe et radiative tant que $x < 0.45$ (émission dans le rouge mais peut être décalée avec des impuretés : LED et diode laser).

Arséniure de Gallium	910 nm (Infrarouge)
Arséniure au Phosphore de Gallium	650 nm (rouge)
Phosphore de Gallium	560 nm (vert)
Carbure de Silicium	490 nm (bleu)
Nitride de Gallium	400 nm (violet)

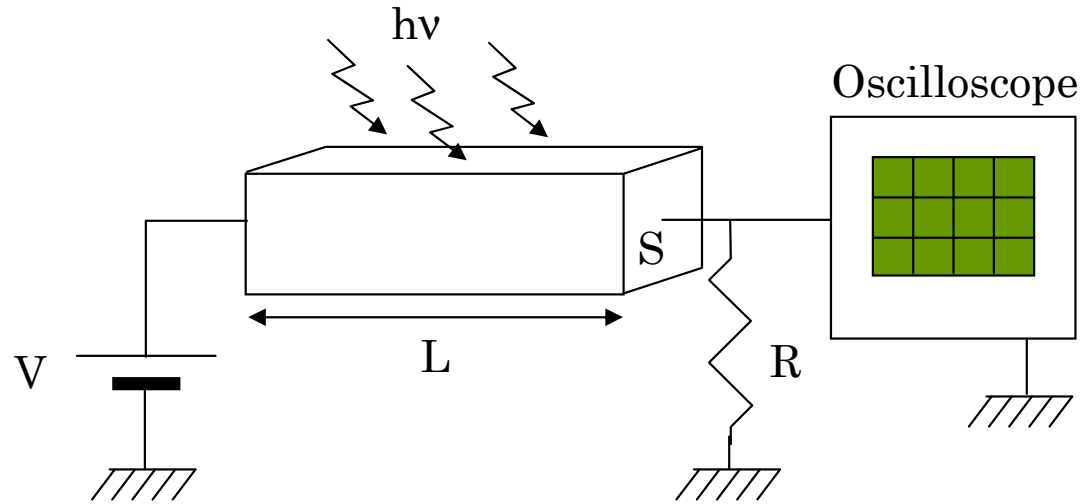
➤ Recombinaison et durée de vie des porteurs libres



➤ Photoconductivité

❑ Description du montage

- Barreau de silicium connecté à un générateur de tension et à une résistance.
- Oscilloscope aux bornes de la résistance.



❑ Flux permanent (régime permanent) de photons

- La création de porteurs entraîne une variation de la conductivité :

$$\Delta\sigma = q(\mu_n \Delta n_0 + \mu_p \Delta p_0)$$

- Surplus de porteurs : $\frac{dn(t)}{dt} = G_n - R_n = 0$

- La génération et la recombinaison se font par paire :

$$R_n = G_n = R_p = G_p = \frac{\Delta n_0}{\tau_n} = \frac{\Delta p_0}{\tau_p}$$

➤ Photoconductivité

❑ Flux permanent (régime permanent) de photons

- Surplus de porteurs : $\Delta n_0 = \tau G$
- Nouvelle expression de la conductivité : $\delta\sigma = qG\tau(\mu_n + \mu_p)$

❑ On coupe le flux de photons (régime transitoire)

- A $t = 0$ on $G = 0$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{d(n_0 + \Delta n)}{dt} = \frac{d\Delta n}{dt} = G_n - R_n = -R_n = -\frac{\Delta n}{\tau}$$

- Déterminer l'expression de $\Delta n(t)$

$$\frac{1}{\Delta n} d\Delta n = -\frac{1}{\tau} dt \quad \Longrightarrow \quad \ln(\Delta n) + K = -\frac{t}{\tau}$$

$$\Delta n = \exp(-K) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}$$

➤ Photoconductivité

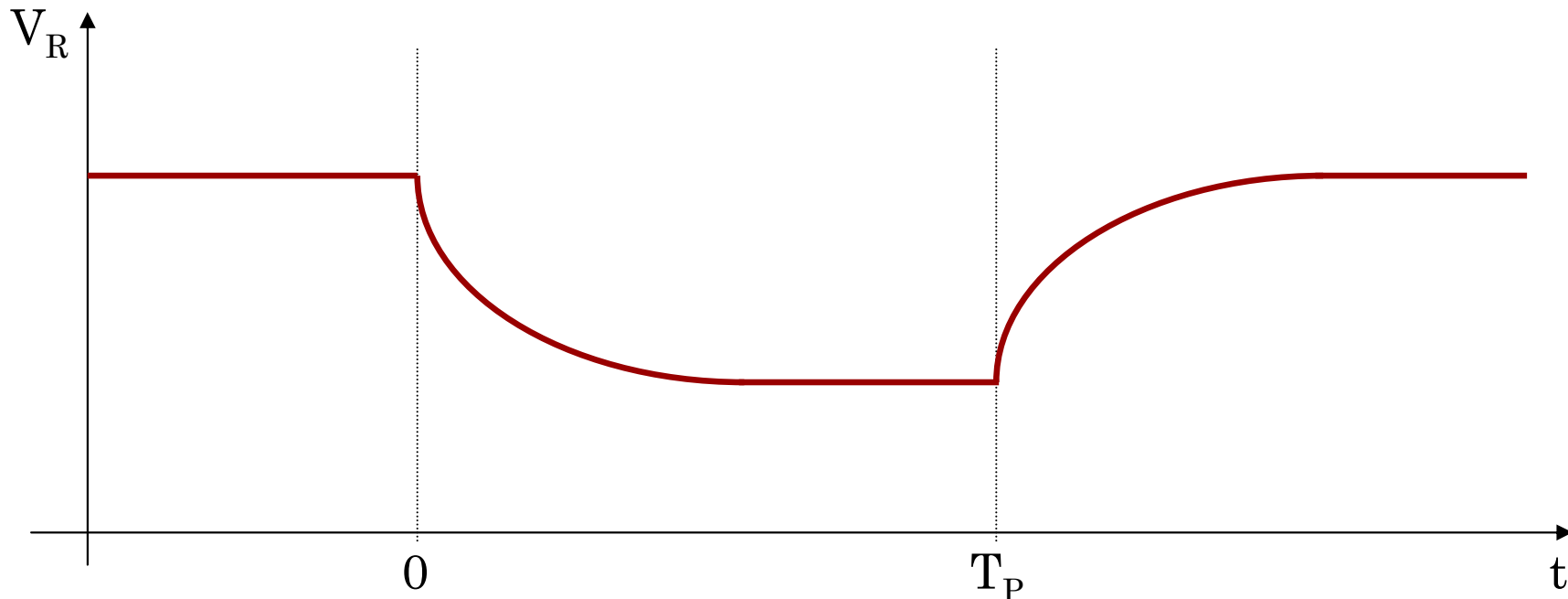
❑ On coupe le flux de photons (régime transitoire)

- Déterminer l'expression de la résistivité :

$$\Delta\sigma(t) = q\Delta n_0 (\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

❑ Évolution de V_R en fonction du temps

- Cette évolution (dite "décroissance exponentielle de photoconductivité") peut permettre de déterminer expérimentalement la durée de vie τ des porteurs.



➤ La luminescence

- La luminescence est une émission de lumière par un processus qui résulte du retour à l'équilibre d'un matériau au préalable excité.

□ Photoluminescence

- Une excitation par photons \Rightarrow émission de photons à une autre fréquence pendant un temps plus ou moins long après l'arrêt de l'excitation.
- Temps est court : matériau fluorescent, temps long : phosphorescent (quelques millisecondes, secondes ou minutes)
- Certaines impuretés introduites dans un matériau piègent des électrons qui seront rendus avec une certaine constante de temps

□ Cathodoluminescence

- Les électrons émis par une cathode et accélérés par un champ électrique (tube à vide d'une télévision ou d'un oscilloscope) viennent frapper un matériau et exciter ses électrons. En retournant à leur état d'équilibre, les électrons émettent des photons.

□ Electroluminescence

- Création d'électrons et de trous en excès par injection de porteurs (application d'une tension) \Rightarrow émission de photons lors de la recombinaison

- Pour analyser complètement tous les phénomènes cités (transport, création, recombinaison,..) il faut disposer d'un ensemble d'équations décrivant l'évolution des concentrations de porteurs et de la charge électrique.

➤ Équation de continuité

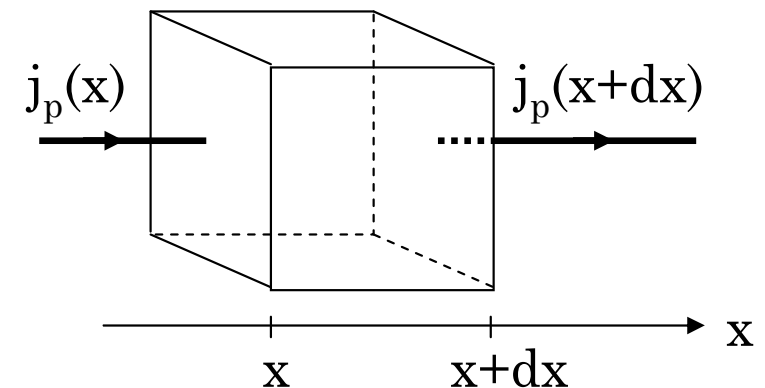
- L'équation de continuité est une équation locale valable en chaque point du semi-conducteur et à chaque instant :

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{d\Delta n(t)}{dt} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_n) \\ \frac{dp(t)}{dt} = \frac{d\Delta p(t)}{dt} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_p) \end{cases}$$

□ Origine de cette expression

$$\Delta t \left\{ \begin{array}{l} \text{Génération : 10 trous} \\ \text{Recombinaison : 2 trous} \\ \text{Flux de trous : 6 (x) et 1 (x+dx)} \end{array} \right.$$

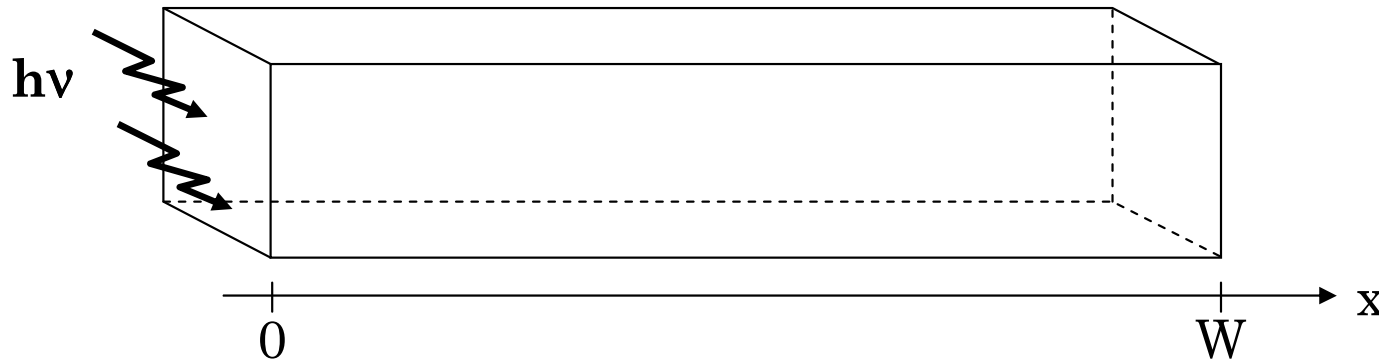
$$\overrightarrow{\text{Flux}}_p = \frac{1}{q} \vec{j}_p \quad 10 - 2 + (6 - 1) = 13 \text{ trous}$$



➤ Exemples d'application

❑ Durée de vie et longueur de diffusion

- Soit un semi-conducteur de type p soumis à une illumination
- La création de porteurs se fait en surface (rayonnement très absorbé)
- Aucun champ électrique n'est appliqué au matériau



- Simplifier l'équation de continuité des électrons

$$\frac{dn}{dt} = \frac{d\Delta n}{dt} = G - R + \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_n) = 0 - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q} \operatorname{div}(\vec{j}_n)$$

- Simplifier l'équation du courant

$$\vec{j}_n = qn\mu_n\vec{\xi} + qD_n \overrightarrow{\operatorname{grad}(n)} = qD_n \overrightarrow{\operatorname{grad}(n)}$$

➤ Exemples d'application

❑ Durée de vie et longueur de diffusion

- Ré-écrire l'équation de continuité (à une dimension)

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

- On se place en régime stationnaire, ré-écrire l'équation précédente

$$0 = -\frac{\Delta n}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$$

- La solution de cette équation est :

$$\Delta n = A_1 \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{\tau_n D_n}}\right) + A_2 \exp\left(\frac{x}{\sqrt{\tau_n D_n}}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Longueur de diffusion des électrons : } L_n = \sqrt{\tau_n D_n} \\ \text{C'est une fonction du cristal et de sa pureté} \end{array} \right.$$

➤ Exemples d'application

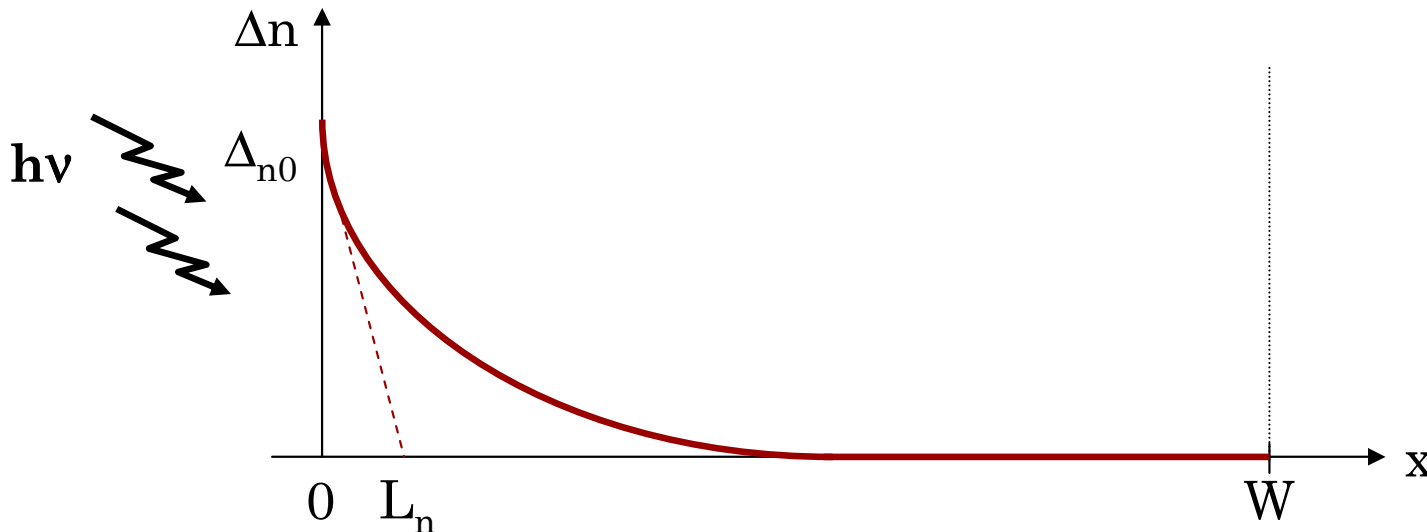
❑ Durée de vie et longueur de diffusion

- On suppose $W \gg L_n$, simplifier l'expression de Δn

$$\Delta n(x \rightarrow \infty) = 0 \quad \text{implique} \quad \Delta n = A_1 \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{\tau_n D_n}}\right)$$

- En $x = 0$ on a $\Delta n = \Delta n_0$ et finalement

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$



➤ Exemples d'application

❑ Durée de vie et longueur de diffusion

- On suppose W quelconque et qu'en ce point le surplus de porteurs est recombiné.

- Conditions aux limites :
$$\begin{cases} \Delta n(x=0) = \Delta n_0 \\ \Delta n(x=W) = 0 \end{cases}$$

■ Détermination des constantes :

$$\begin{cases} \Delta n_0 = A_1 + A_2 \\ 0 = A_1 \exp\left(-\frac{W}{L_n}\right) + A_2 \exp\left(\frac{W}{L_n}\right) \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} A_1 = -\frac{\Delta n_0}{\operatorname{sh}\left(\frac{W}{L_n}\right)} \exp\left(-\frac{W}{L_n}\right) \\ A_2 = \frac{\Delta n_0}{\operatorname{sh}\left(\frac{W}{L_n}\right)} \exp\left(\frac{W}{L_n}\right) \end{cases}$$

- Expression de la densité d'électrons :
$$\Delta n(x) = \frac{\Delta n_0}{\operatorname{sh}\left(\frac{W}{L_n}\right)} \operatorname{sh}\left(\frac{W-x}{L_n}\right)$$

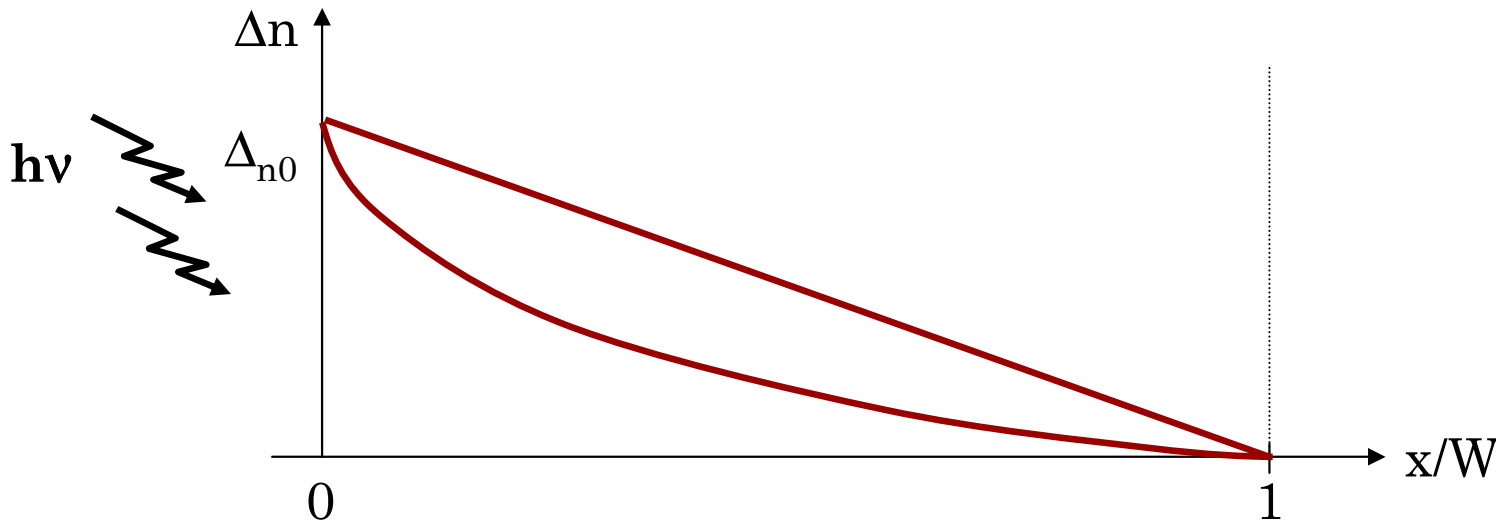
➤ Exemples d'application

□ Durée de vie et longueur de diffusion

- Simplifier $\Delta n(x)$ si $W \ll L_n$ (on rappelle que $\text{sh}(a) = [\exp(a) - \exp(-a)]/2$).

$$\Delta n(x) \cong \Delta n_0 \frac{W - x}{W}$$

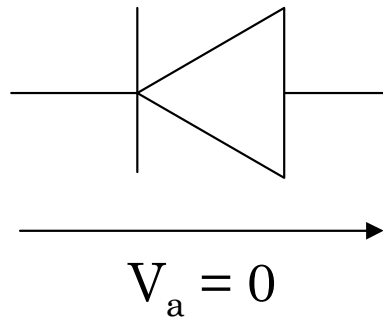
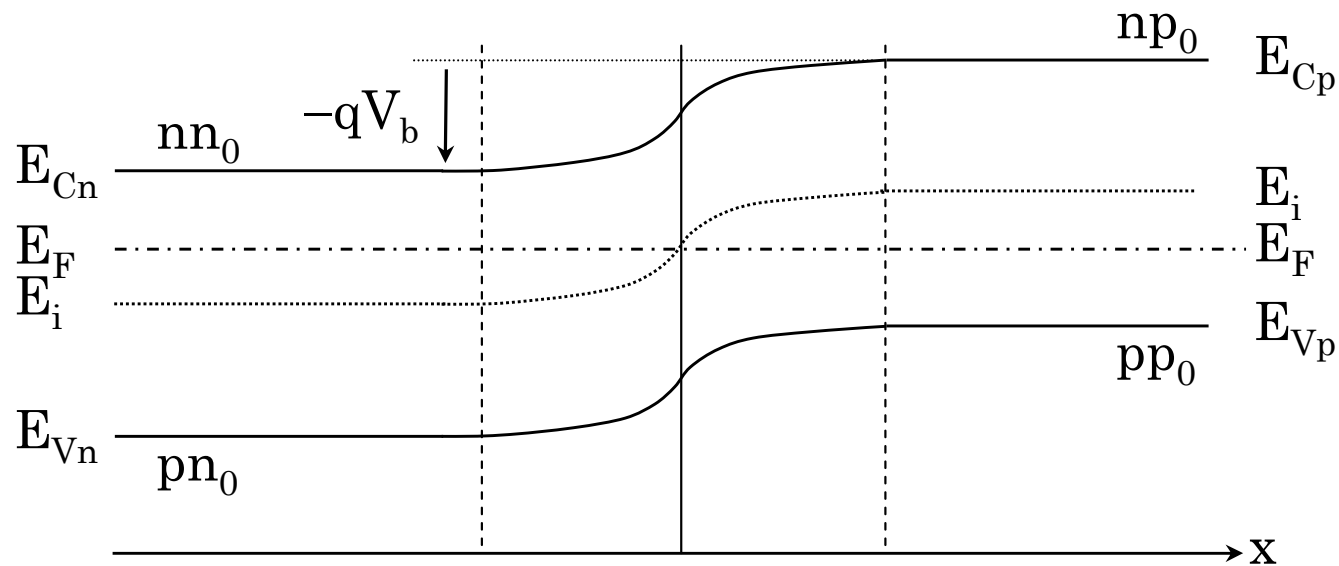
- Dans ce cas, les porteurs ne sont pas recombinaés durant la traversée du barreau de silicium.



➤ Exemples d'application

□ Courant d'une diode PN

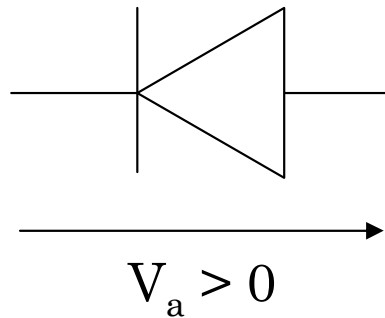
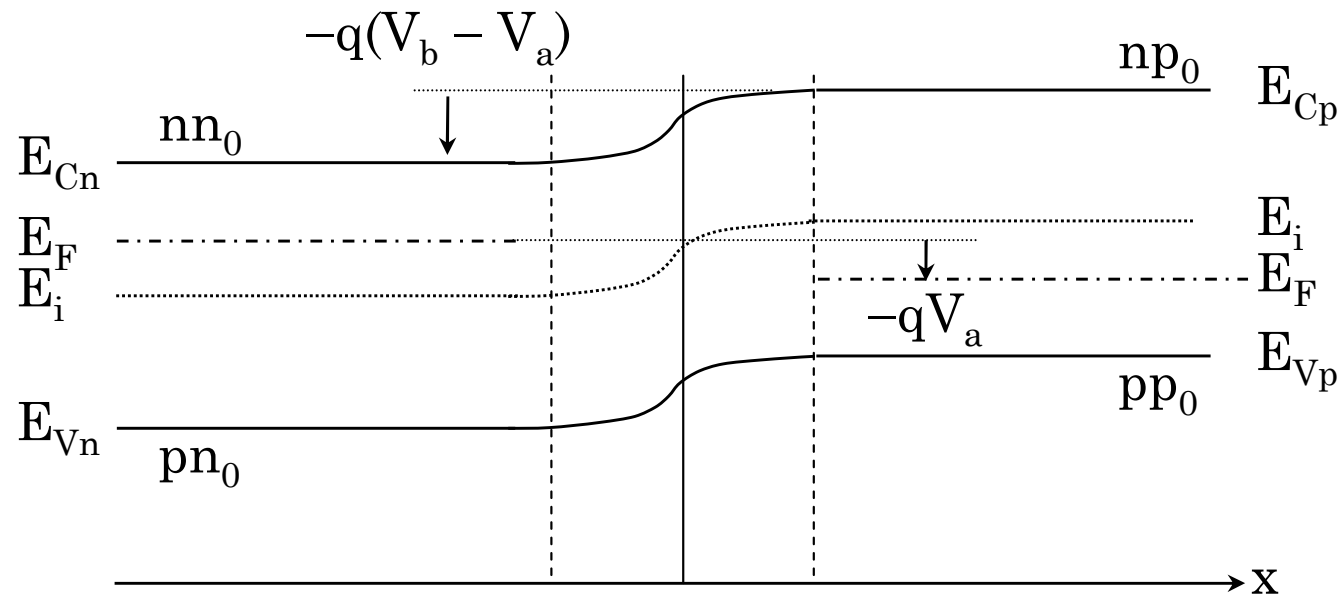
- Soit une diode PN polarisée en directe



➤ Exemples d'application

□ Courant d'une diode PN

- Soit une diode PN polarisée en directe



➤ Exemples d'application

❑ Courant d'une diode PN

- Soit une diode PN polarisée en direct
- On ne s'occupe ici que de la zone n qui admet en $x = 0$ un surplus de porteurs minoritaires en provenance de la zone p. On considère qu'en $x = W_n$ tous les porteurs en excès sont extraits du semi-conducteur.
- On se place dans l'hypothèse de faible injection : chutes de potentiels négligeables dans les zones quasi-neutres.
- Simplifier l'expression de la densité de courant des trous :

$$j_p = qp\mu_p\xi - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} = -qD_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

- Donner l'expression de la densité de courant si $W_n \gg L_p$

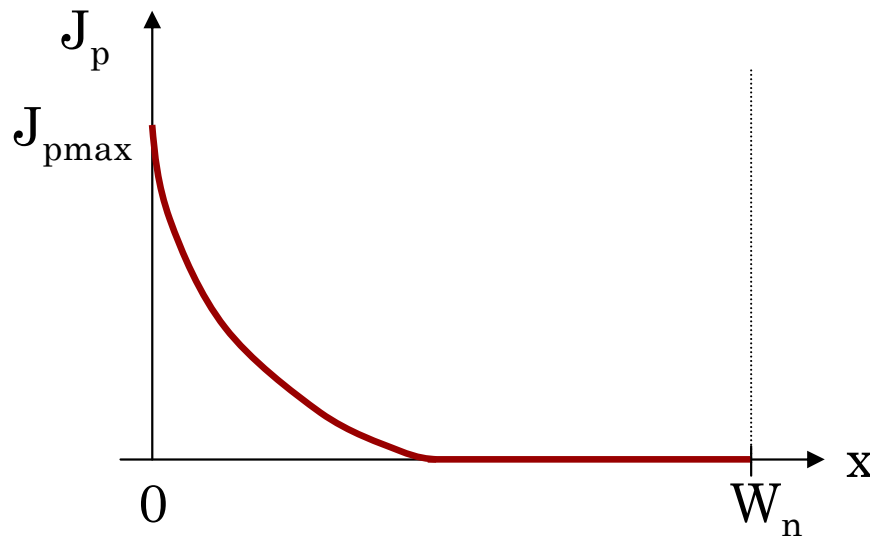
$$j_p = \frac{qD_p}{L_p} \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

- Expression du courant maximum : $j_{p \max} = \frac{qD_p}{L_p} \Delta p_0$

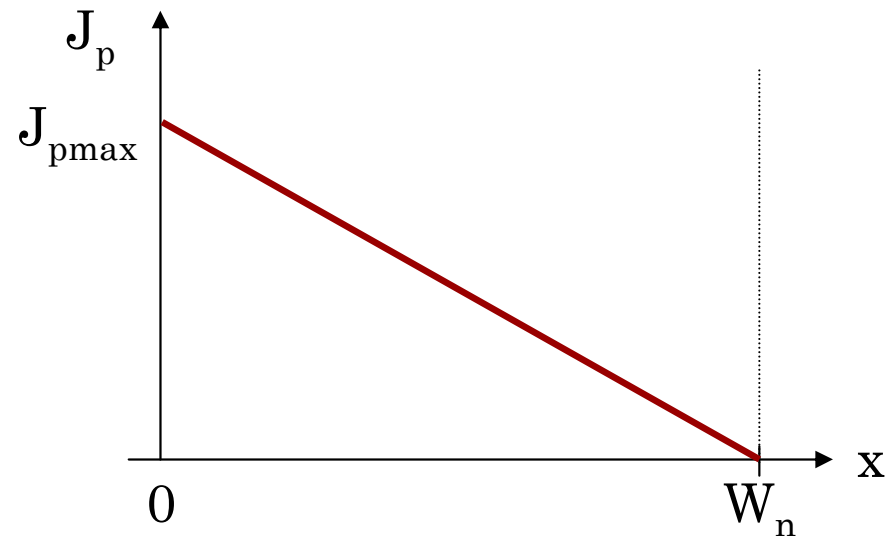
➤ Exemples d'application

□ Courant d'une diode PN

- Que devient $j_{p\max}$ si $W_n \ll L_p$?
$$j_{p\max} = \frac{qD_p}{W_n} \Delta p_0$$
- Dans ce cas la diode est dite courte et $j_p(x)$ ne dépend pas de x .
- Existe t-il un courant d'électrons en réponse au déplacement des trous pour une diode longue et une diode courte ?



diode longue



diode courte

➤ Introduction

- Il existe diverses catégories de contact entre deux matériaux :
 - ✓ Homo-jonction : c'est le contact entre deux parties différentes d'un *même* semi-conducteur par exemple les diodes à semi-conducteur qui sont constituées de deux parties dopées différemment (jonctions pn).
 - ✓ Hétéro-jonction : c'est l'association entre deux semi-conducteurs de nature différente.
 - ✓ Jonction Métal - SC : par exemple les diodes Schottky ou les contacts ohmiques.
 - ✓ Structure MIS (Métal Isolant Semi-conducteur). Lorsque l'isolant est de type oxyde la structure est dite MOS (capacité et transistor).

➤ Travail de sortie – Affinité électronique – Barrière de potentiel

- Pour un métal : EFM représente l'énergie maximale que peut avoir un électron à l'équilibre.
- Extraction d'un électron : atteindre le niveau énergie E_0 (niveau "du vide").
- Énergie minimale pour arracher un électron du métal (sans vitesse en sortie):

$$\Phi_M = E_0 - E_{FM}$$

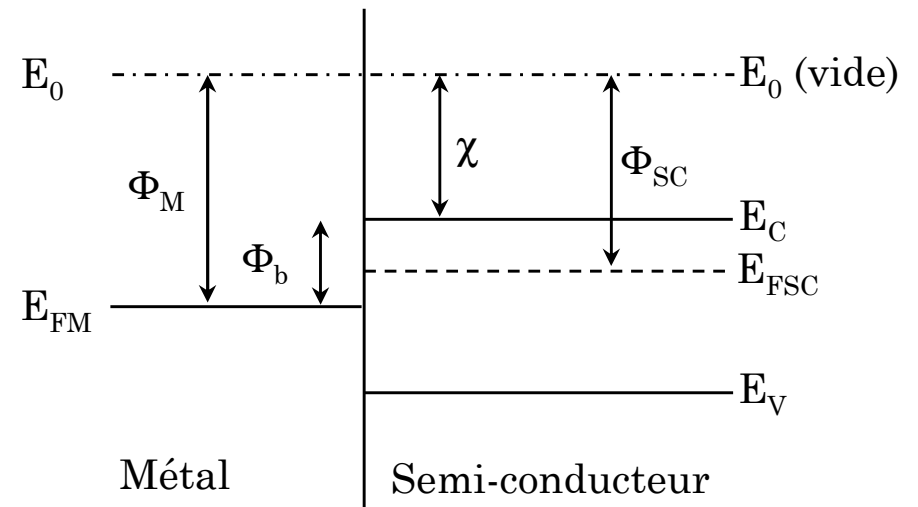
- Pour un semi-conducteur, travail de sortie :

$$\Phi_{SC} = E_0 - E_{FSC}$$

- Affinité électronique (énergie à apporter à un électron "libre") : χ

- On introduit aussi la barrière de potentiel (ou barrière de Schottky) :

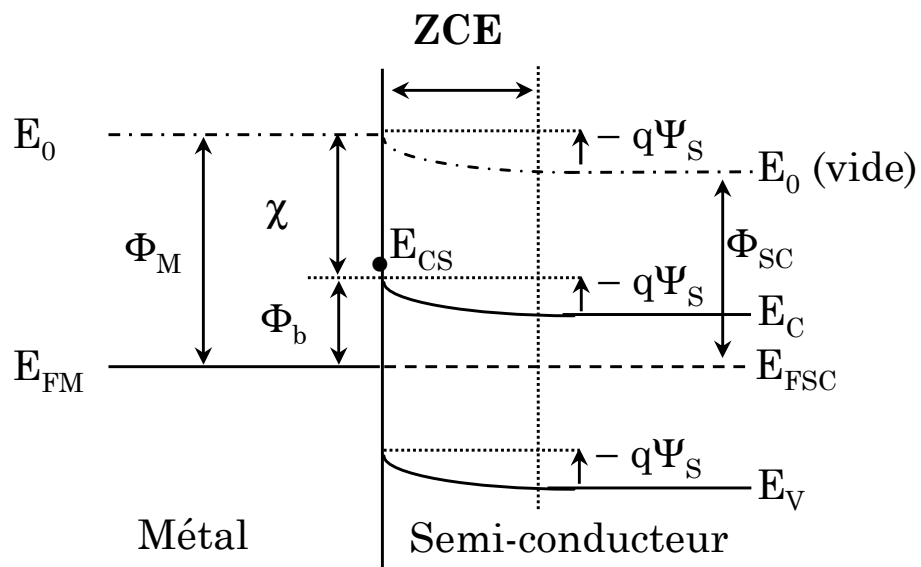
$$\Phi_b = E_C - E_{FM} = \Phi_M - \chi$$



➤ Travail de sortie – Affinité électronique – Barrière de potentiel

- A l'équilibre thermodynamique il n'y a pas de courant et le niveau de Fermi est : **PLAT**.
- Courbure des bandes du semi-conducteur : **ZCE**.
- Le potentiel de surface est donné par :

$$-q\Psi_S = E_{CS} - E_C = \Phi_b - (E_C - E_{FSC}) = \Phi_M - \Phi_{SC}$$

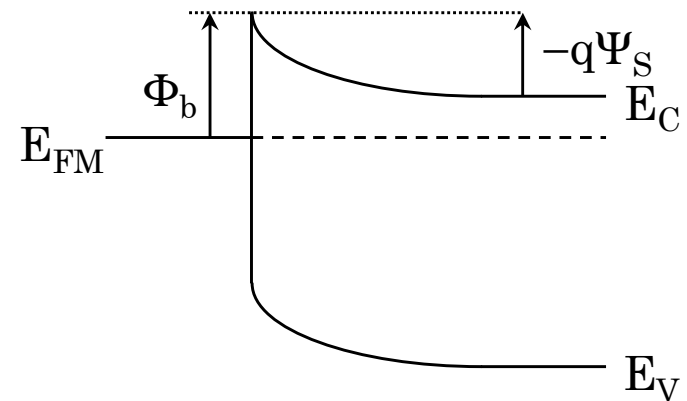
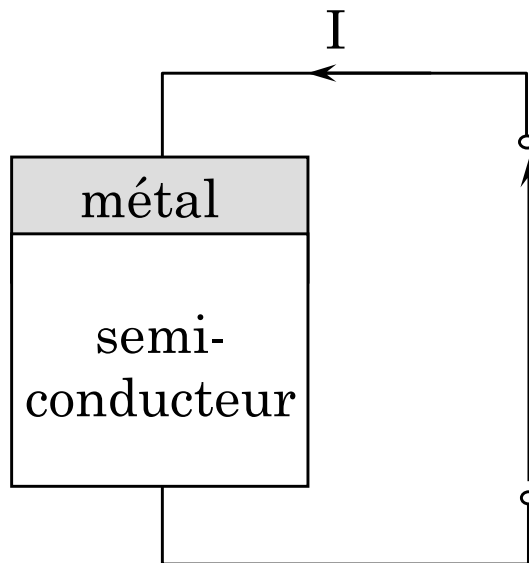


➤ Application : la diode Schottky

□ La diode idéale

- Application d'une tension : apparition d'un courant I
- Si $V_{\text{ext}} = 0$: le flux d'électrons qui peuvent franchir la barrière $M \rightarrow SC$ (Φ_b) est équilibré par le flux d'électrons pouvant franchir la barrière $SC \rightarrow M$ ($-q\Psi_s$)
- Région la plus résistive : ZCE (la tension V_{ext} se retrouve essentiellement sur cette ZCE).
- Courant de la diode (majoritaires) :

$$I = I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{ext}}}{kT}\right) - 1 \right]$$



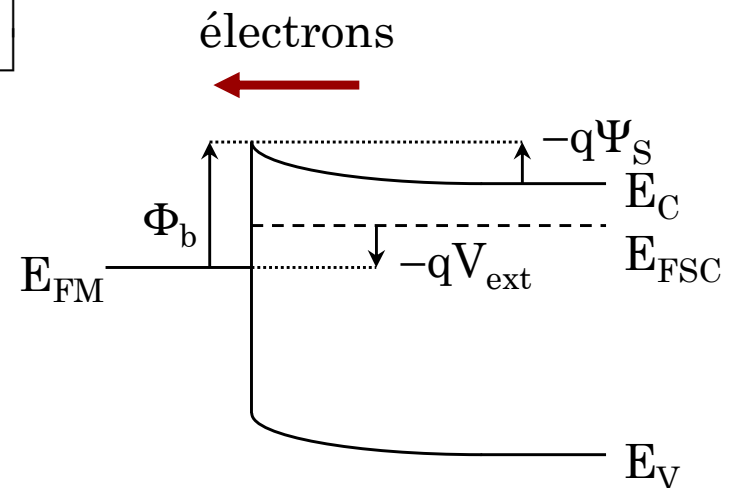
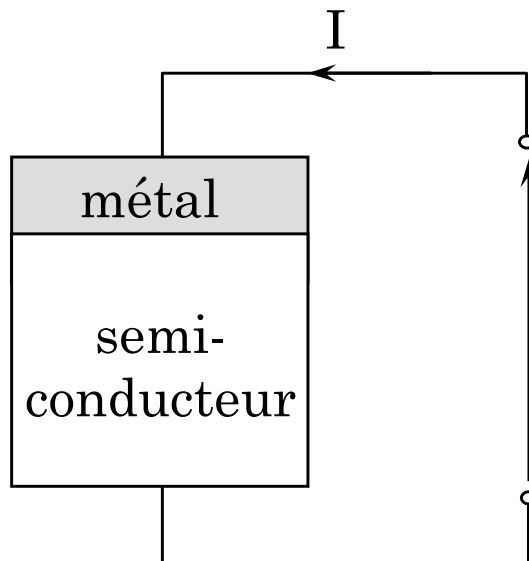
$$V_{\text{ext}} = 0$$

➤ Application : la diode Schottky

□ La diode idéale

- Application d'une tension : apparition d'un courant I
- Si $V_{\text{ext}} = 0$: le flux d'électrons qui peuvent franchir la barrière $M \rightarrow SC$ (Φ_b) est équilibré par le flux d'électrons pouvant franchir la barrière $SC \rightarrow M$ ($-q\Psi_s$)
- Région la plus résistive : ZCE (la tension V_{ext} se retrouve essentiellement sur cette ZCE).
- Courant de la diode (majoritaires) :

$$I = I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{ext}}}{kT}\right) - 1 \right]$$



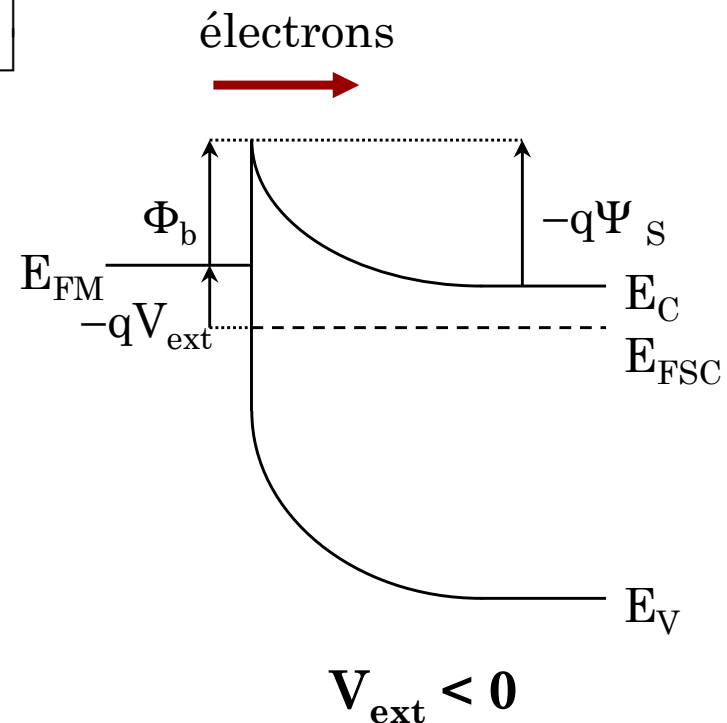
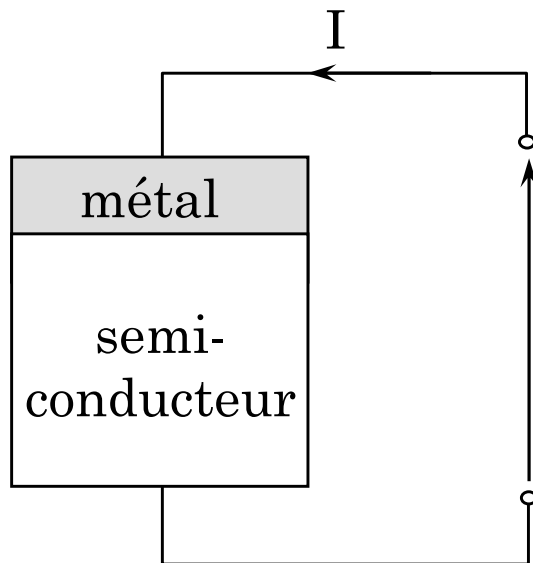
$$V_{\text{ext}} > 0$$

➤ Application : la diode Schottky

□ La diode idéale

- Application d'une tension : apparition d'un courant I
- Si $V_{\text{ext}} = 0$: le flux d'électrons qui peuvent franchir la barrière $M \rightarrow SC$ (Φ_b) est équilibré par le flux d'électrons pouvant franchir la barrière $SC \rightarrow M$ ($-q\Psi_s$)
- Région la plus résistive : ZCE (la tension V_{ext} se retrouve essentiellement sur cette ZCE).
- Courant de la diode (majoritaires) :

$$I = I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{ext}}}{kT}\right) - 1 \right]$$

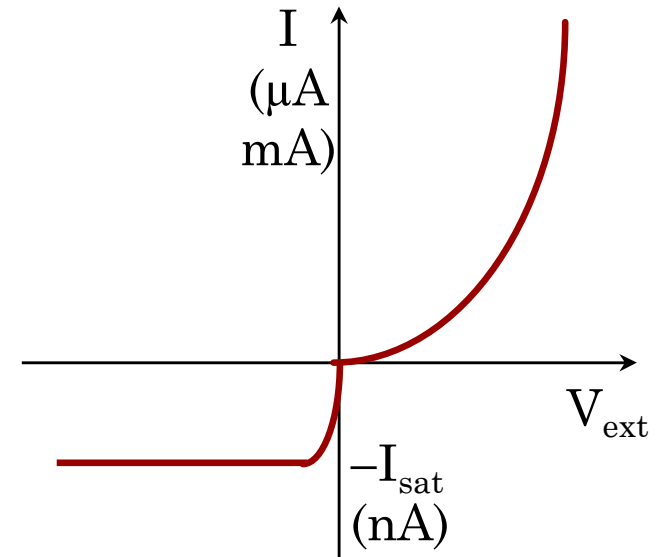
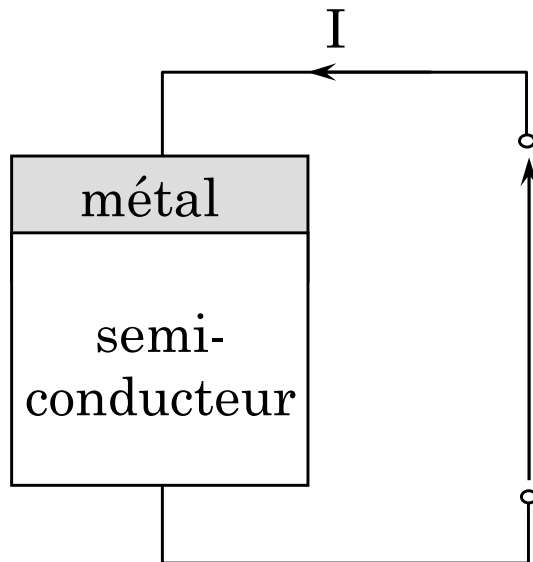


➤ Application : la diode Schottky

□ La diode idéale

- Application d'une tension : apparition d'un courant I
- Si $V_{\text{ext}} = 0$: le flux d'électrons qui peuvent franchir la barrière $M \rightarrow SC$ (Φ_b) est équilibré par le flux d'électrons pouvant franchir la barrière $SC \rightarrow M$ ($-q\Psi_s$)
- Région la plus résistive : ZCE (la tension V_{ext} se retrouve essentiellement sur cette ZCE).
- Courant de la diode (majoritaires) :

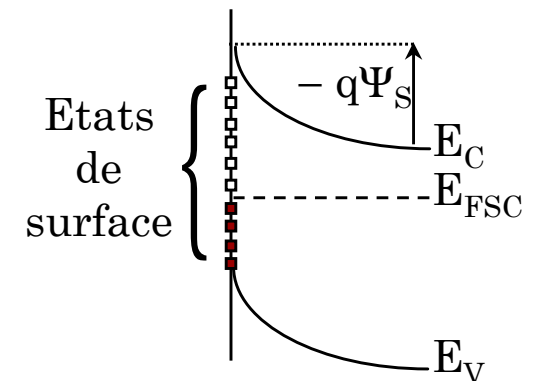
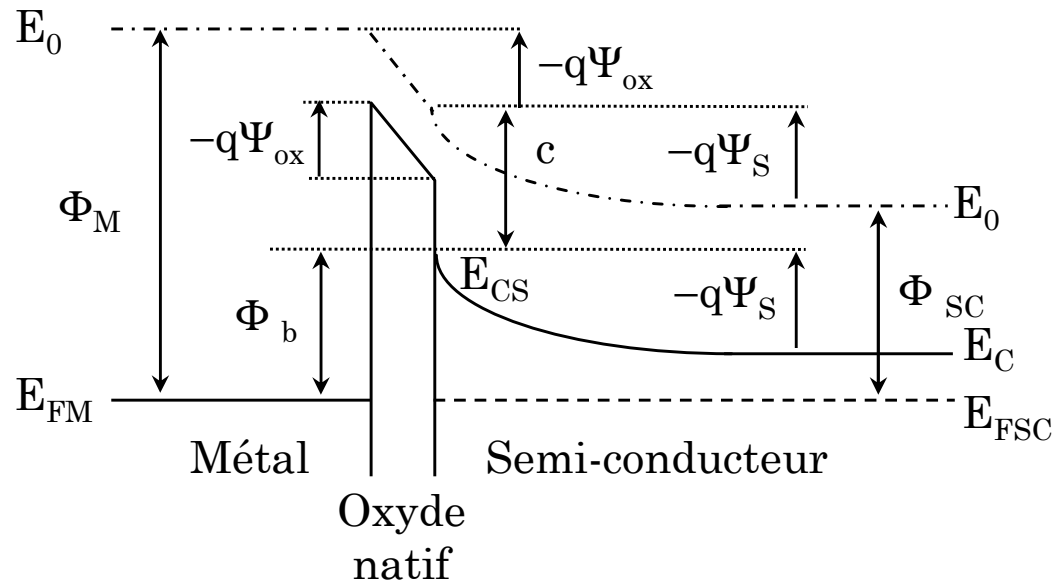
$$I = I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{ext}}}{kT}\right) - 1 \right]$$



➤ Application : la diode Schottky

❑ La diode réelle

- Présence d'un oxyde natif (modification de la hauteur de barrière). Traversée de l'oxyde par effet tunnel.
- Présence d'états à l'interface qui agissent comme des "pièges" en capturant des électrons ou des trous du semi-conducteur.
- Si densité des états de surface est élevée : le métal va échanger des électrons essentiellement avec les états d'interface ("barrière de Bardeen" où les états d'interface "écrantent" le semi-conducteur par rapport au métal).

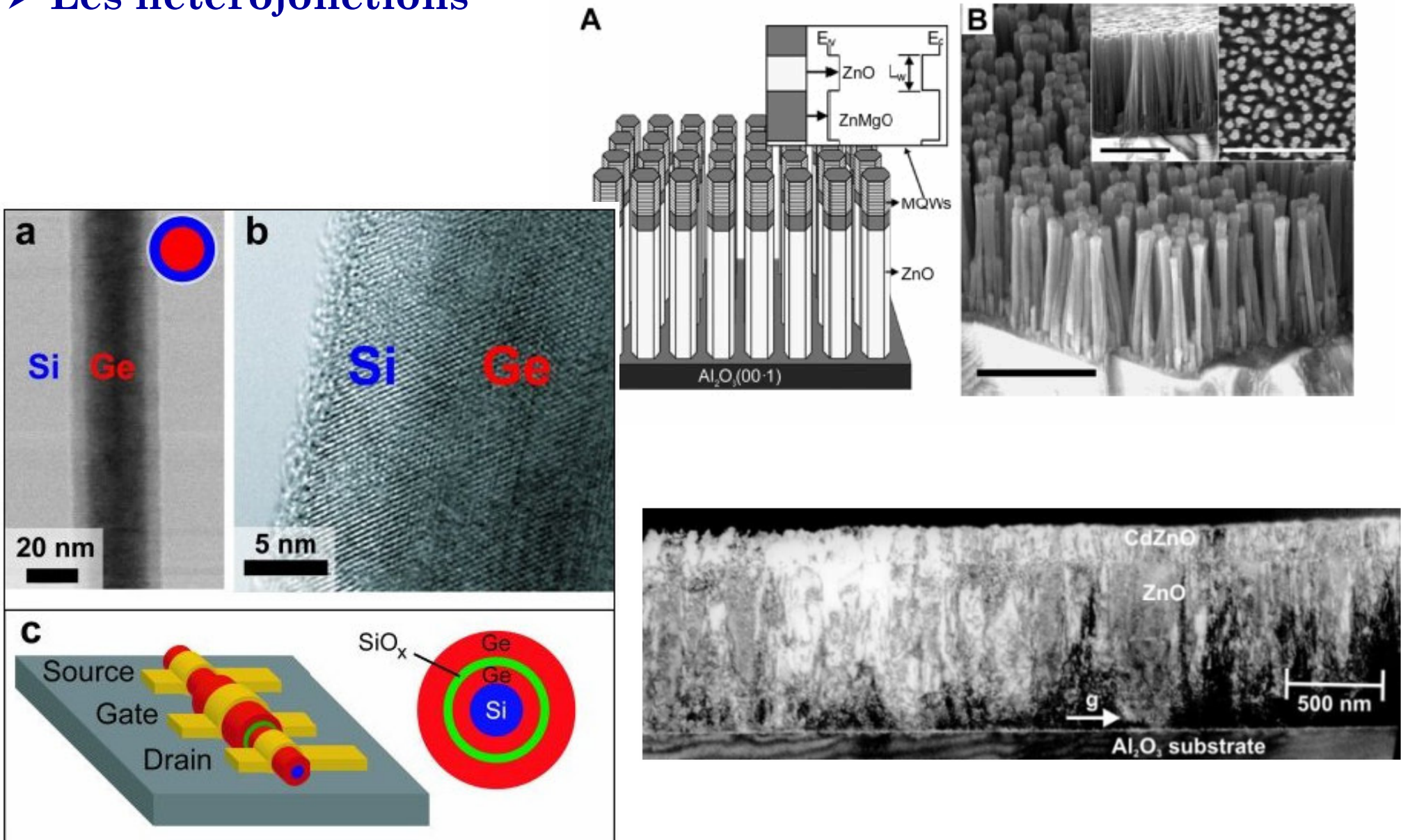


❑ Etat inoccupé ■ Etat occupé

➤ Les hétéro-jonctions

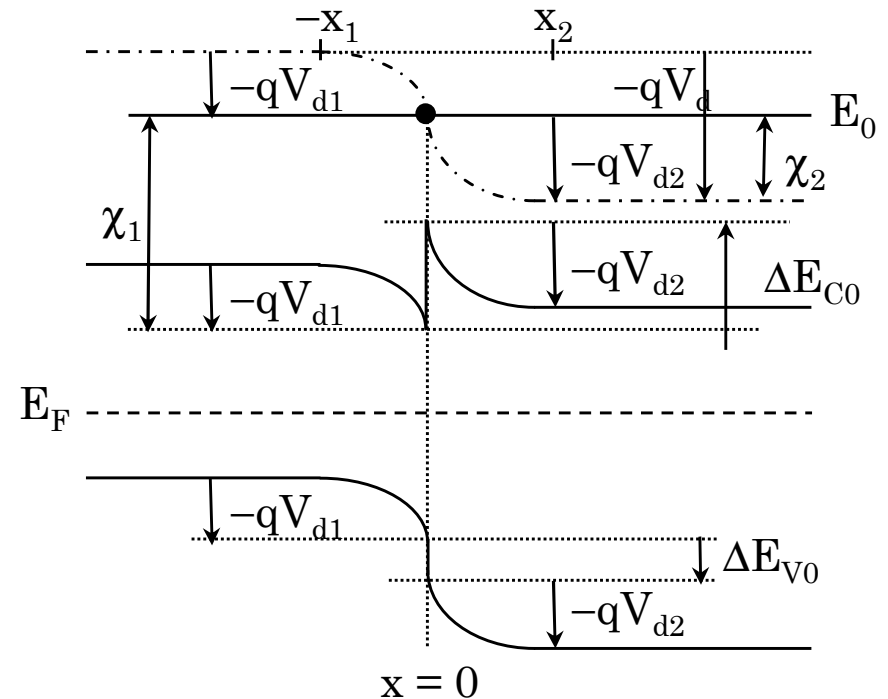
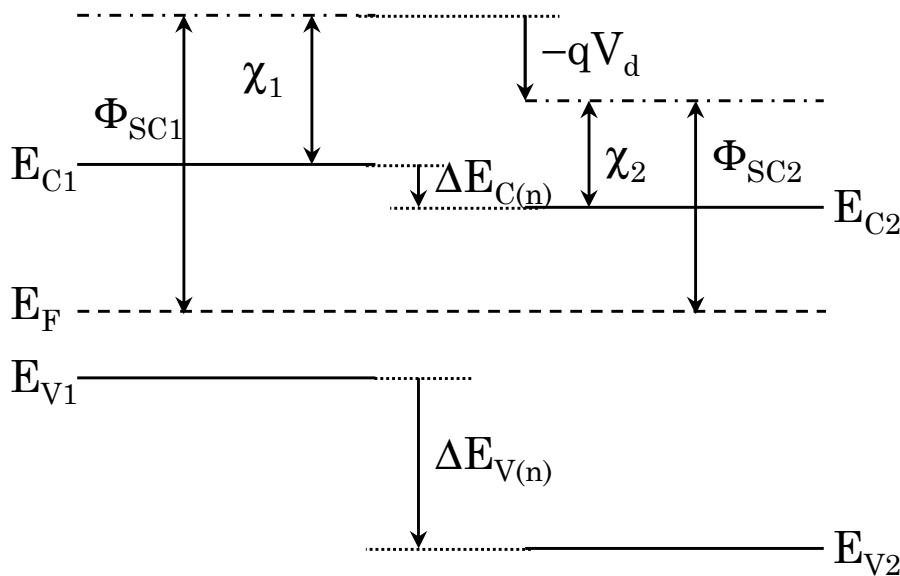
- Semi-conducteurs de même type (p ou n) : hétérojonction "isotype"; "anisotype".
- Couche épitaxiée d'un semi-conducteur sur un autre.
- Semi-conducteurs ayant les mêmes symétries cristallines (dans le plan de l'interface), des paramètres cristallins (telle que la constante du réseau) voisins, et des coefficients de dilatation proches (épitaxie à température élevée)
- Hétérojonctions : à la base de réalisations de dispositifs à hautes performances, en particulier dans les domaines des hautes fréquences et de l'optoélectronique (transistors à effet de champ "HEMT", ou bipolaire à hétérojonction "HBT", diodes électroluminescentes ou diodes laser).

➤ Les hétérojonctions



➤ Les hétérojonctions

- Diagramme des bandes d'énergie au voisinage de l'interface.
- Des ZCE apparaissent dans chacun des semi-conducteurs, de part et d'autre de l'interface et se traduisent par des courbures des bandes d'énergie.
- Ce résultat est valable si la densité d'états d'interface peut être négligée, ce qui n'est pas toujours le cas.



➤ Les livres

- A. VAPAILLE et R. CASTAGNE, *Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs*, Dunod, 1990, ISBN 2-04-019714-1
- J.P. MATHIEU, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, Masson, 1998
- S.M. SZE, *Physics of Semiconductor Devices*, VLSI Technology 2nd edition, New-York, Wiley and Sons, 1988,

➤ Internet

- <http://www.eudil.fr/eudil/bbsc/sc00a.htm>
- <http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/contents.htm>
- <http://webservices.ieee.org/spectrum/down/index.html>