

CHAP 3:PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS

I_ Rappel sur les Semi-conducteurs, conducteurs et Isolants

Si l'on classe les éléments chimiques solides à la température ambiante en fonction de leurs résistivités, on constate qu'il se place dans leurs grande majorités en deux groupes.

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

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

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

I.1_ 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

I.2_Isolants

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. La plupart des bons isolants sont des matériaux composés de plusieurs éléments, contrairement aux conducteurs. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant.

I.3_ 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.

II_ RAPPELS SUR LA STRUCTURE DE LA MATIERE

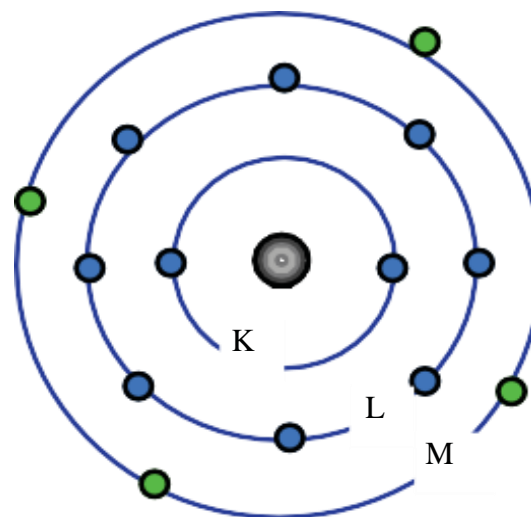
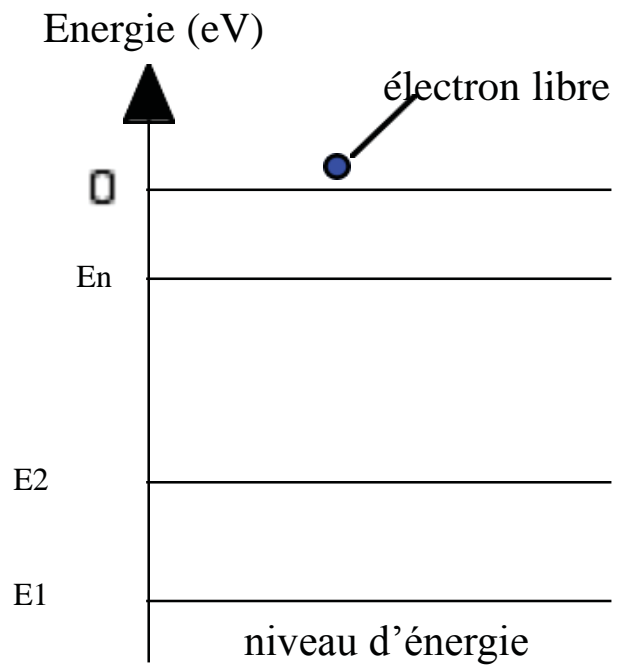
II.1 Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique q négative ($- 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Le noyau contient deux types de particules:

- Les neutrons qui ne sont pas chargés
- Les protons qui portent une charge électrique $+ q$.

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets $E_1, E_2 \dots E_n$, définissant chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine énergétique ($E = 0$ eV) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs des niveaux d'énergies E_n sont négatives (1 eV représente $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule). Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron.



Atome de silicium

On distingue :

- Les électrons internes qui occupent les premières couches. Ils sont alors très fortement liés au noyau
- Les électrons de valence (ou périphériques) qui occupent la couche la plus externe.

Ces électrons de valence sont peu liés au noyau.

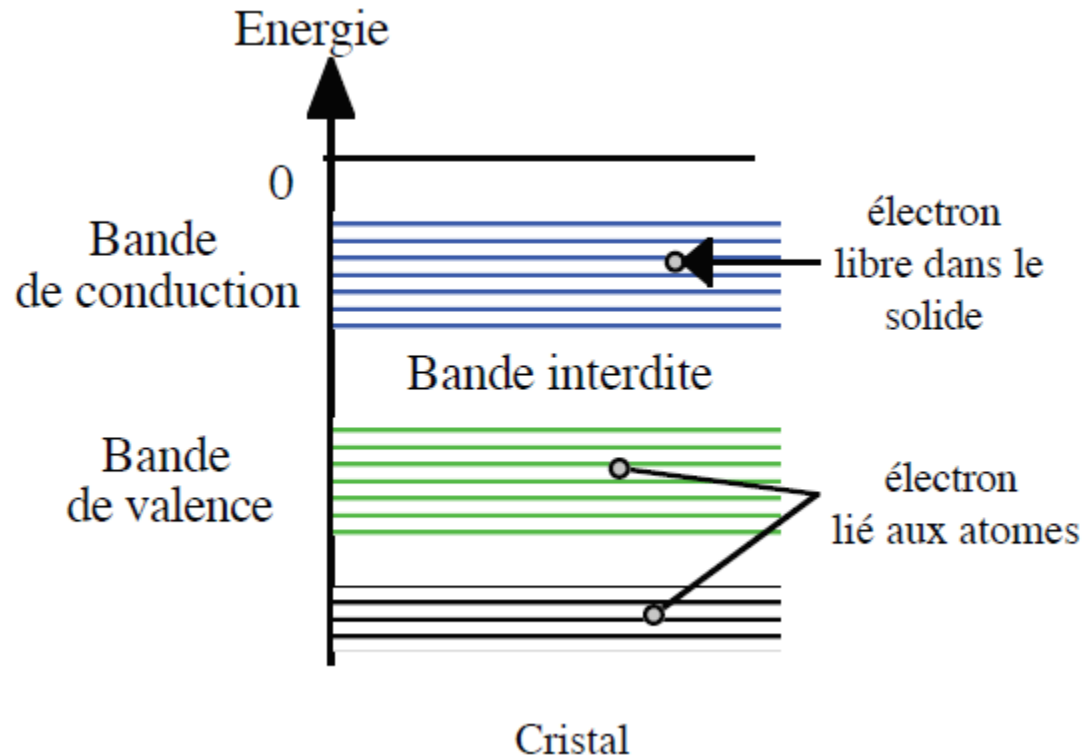
Considérons un atome de silicium qui possède 14 électrons ($Z = 14$). Ces électrons sont répartis sur trois couches électroniques :

- K (2 électrons)
- L (8 électrons)
- M (4 électrons)

Contrairement aux deux premières, la dernière couche (M) est incomplète, elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. **En effet, Il faut savoir que tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche périphérique: Règle de l'octet**

II.2 Structure d'un cristal

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence



Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes entre eux, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (où il n'y a pas d'états permis).

Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide comblent en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Par contre, un électron de la **bande de valence** est commun à plusieurs atomes. La bande située au-dessus de **la bande interdite** s'appelle la **bande de conduction**.

L'électron dont l'énergie se situe dans bande de conduction circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est soumis à une différence de potentiel (qui produit un champ électrique).

Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite qui lui est propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.

III_ SEMI-CONDUCTEUR PUR OU INTRINSEQUE

L'industrie fabrique les semi-conducteurs avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10^{11} atomes de semi-conducteur) : on parle alors de semi-conducteur intrinsèque. Par exemple, l'atome de silicium possède 4 électrons sur sa couche périphérique car il appartient à la 4^o colonne de la classification périodique des éléments indiquée ci-dessous.

II	III	IV	V
	Bore B (Z=5)	Carbone C (Z =6)	Azote N (Z = 7)
	Aluminium Al (Z = 13)	Silicium Si (Z = 14)	Phosphore P (Z = 15)
Zinc Zn (Z= 30)	Gallium Ga (Z = 31)	Germanium Ge (Z = 32)	Arsenic As (Z = 33)
Cadmium Ca (Z= 48)	Indium In (Z = 49)	Étain Sn (Z = 50)	Antimoine Sb (Z = 51)

SILICIUM

14 électrons

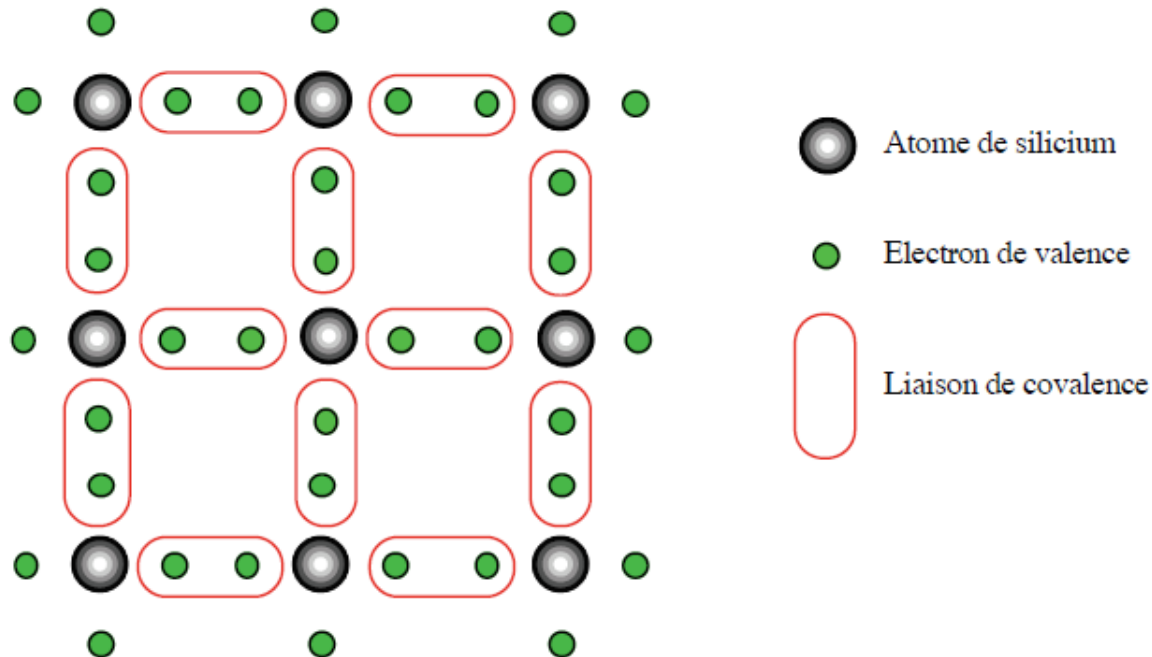
4 électrons de valence

5.10^{22} atomes cm^{-3}

Densité: 2.33 g.cm^{-3}

III.1_ Silicium non excité à $T = 0^\circ\text{K}$

Considérons un cristal de silicium pur, non excité, au zéro absolu (0°K) et dans l'obscurité. Afin de voir huit électrons sur sa couche externe, chaque atome de silicium met ses 4 électrons périphériques en commun avec les atomes voisins. On obtient ainsi, pour le cristal de silicium la représentation de la figure 1.



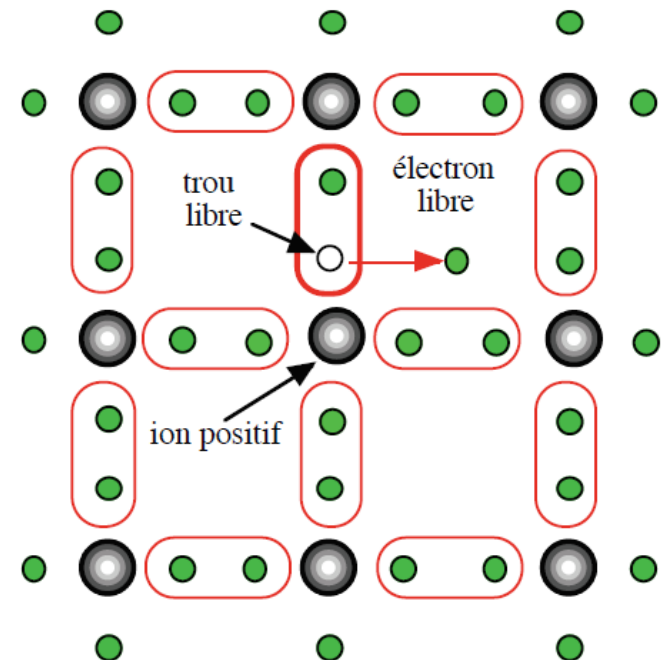
**Cristal de silicium
à 0°K**

La mise en commun des électrons périphériques, appelée liaison de covalence, assure la cohésion du cristal de silicium. Les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium. Il n'apparaît donc aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique. Le silicium est alors un isolant, en effet sa bande de valence est saturée.

III.2_ Ionisation thermique : génération de paires électrons trous

Lorsque la température augmente, l'agitation thermique désordonne la configuration figée précédente (0°K). En effet, les électrons qui possèdent une énergie positive supplémentaire, provoque la rupture de quelques liaisons de covalences

Création d'une paire électron trou par rupture d'une liaison de covalence sous l'effet de la température



Supposons qu'un des électrons participant à une liaison de covalence acquière une énergie suffisante pour quitter l'atome auquel il était lié (figure 2). Il devient alors un porteur libre, capable de se déplacer dans le cristal autorisant ainsi la circulation d'un courant électrique sous une différence de potentiel. Le cristal devient alors un mauvais isolant, d'où son appellation de semiconducteur.

Conséquences :

- La place vacante laissée par l'électron qui a quitté la bande de valence est devenue un trou.
- L'atome de silicium qui a perdu un électron n'est plus alors électriquement neutre: il est devenu un ion positif.

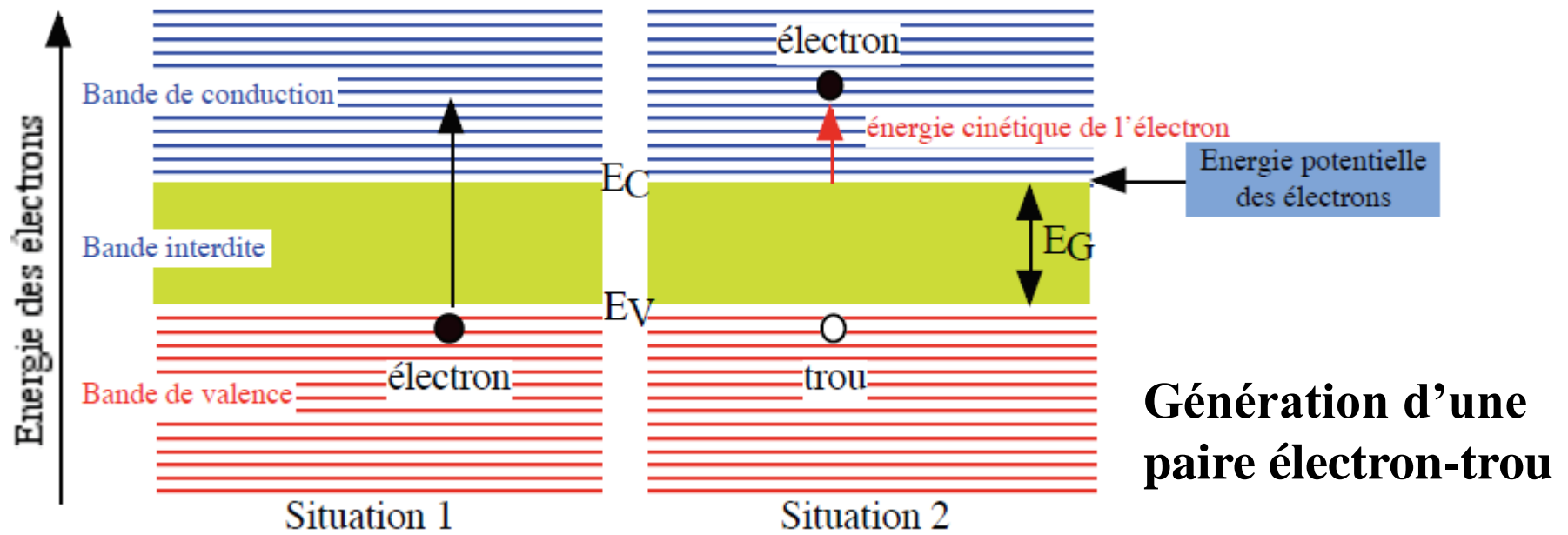
Remarque : ce phénomène d'ionisation thermique n'intéresse qu'un nombre très faible d'atomes de silicium (3 sur 10^3 à la température de 300 K).

III.3_ Hauteur de bande interdite et génération de paires électrons trous

Le paramètre essentiel qui caractérise le semi-conducteur est la quantité d'énergie minimale nécessaire pour briser une liaison de covalence, ce qui revient dans le modèle des « bandes d'énergie » à faire « grimper » un électron de l'un des niveaux de la bande de valence sur l'un des niveaux de la bande de conduction

Bandes d'énergie

La couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction.



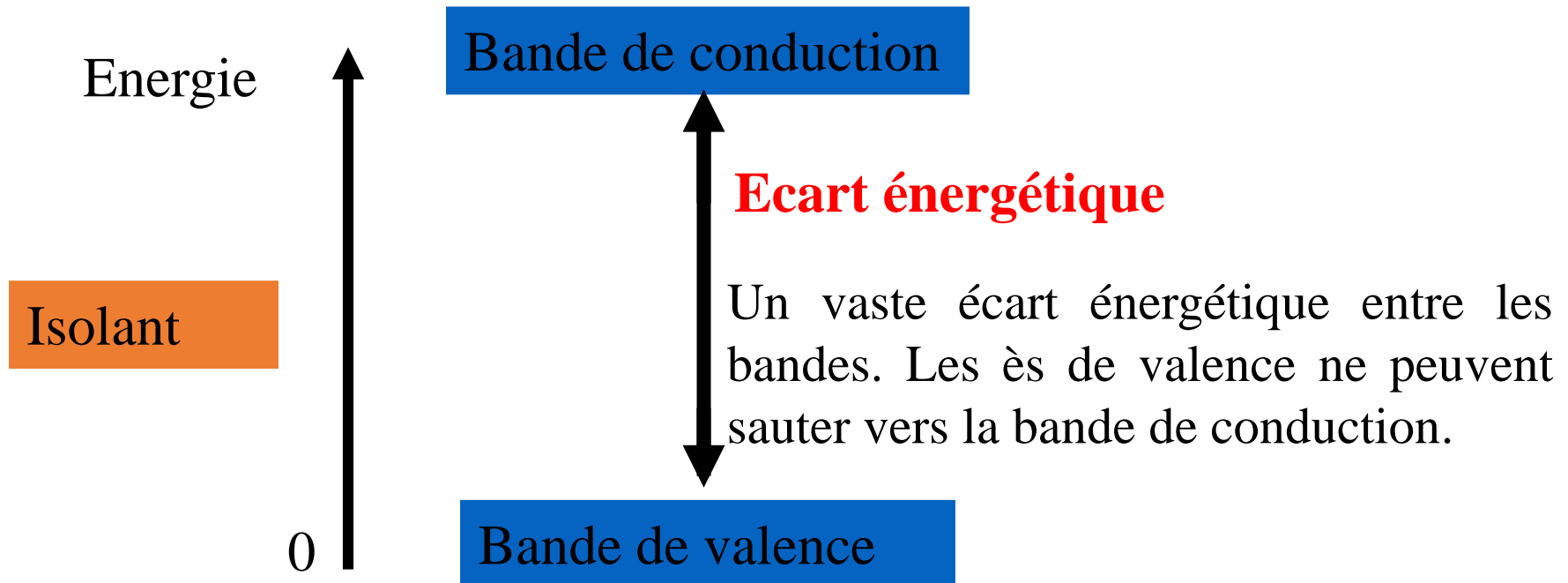
Ainsi, l'énergie minimale requise pour générer une **paire électron-trou** correspond à la **hauteur de bande interdite E_G** dont la valeur est indiquée dans le tableau suivant pour divers matériaux.

Semi-conducteur	E_G (eV) 300 °K	E_G (eV) 0°K
C diamant	5,47	5,51
G_e	0,66	0,75
S_i	1,12	1,16

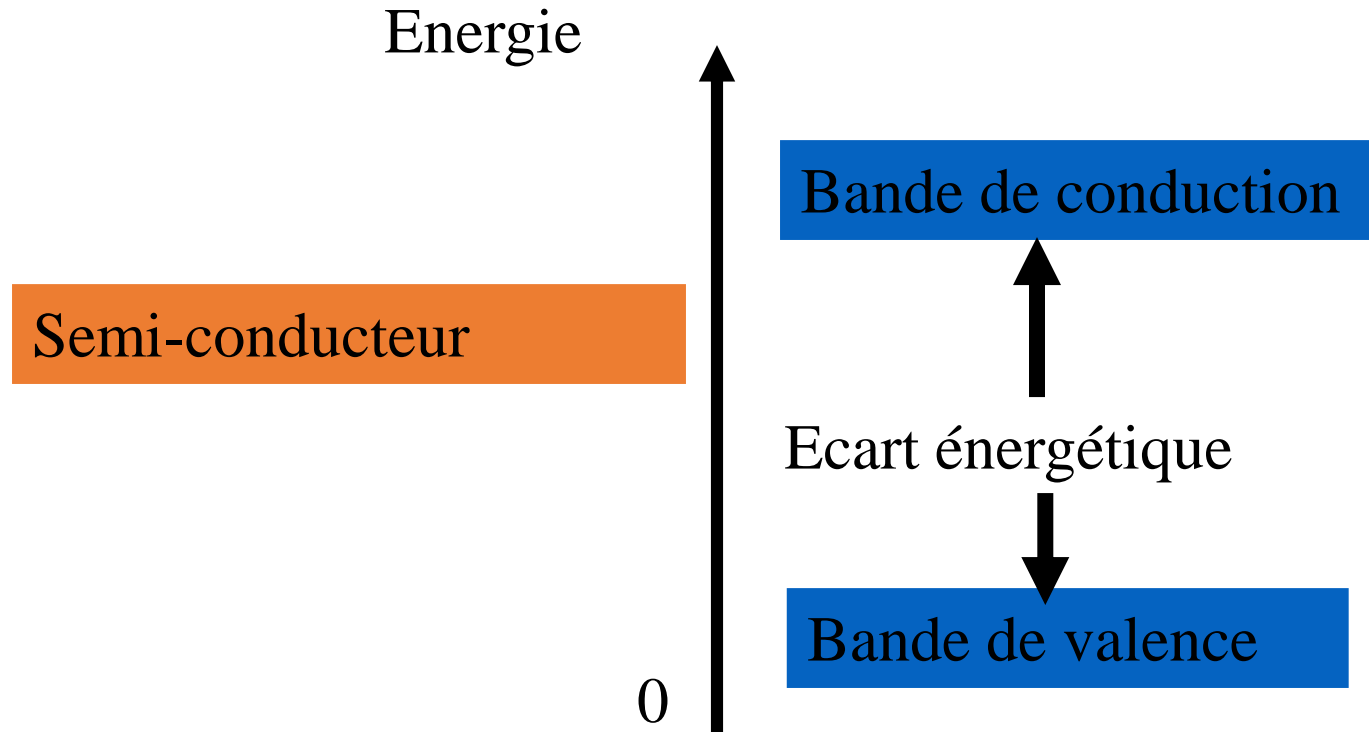
A une température différente du zéro absolu, un certain nombre d'électrons de valence acquiert assez d'énergie thermique pour rompre leurs liaisons et devenir des électrons libres. Ce gain d'énergie, qui doit être au moins égal à E_G , fait accéder les électrons à des places libres de la bande de conduction.

En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique.

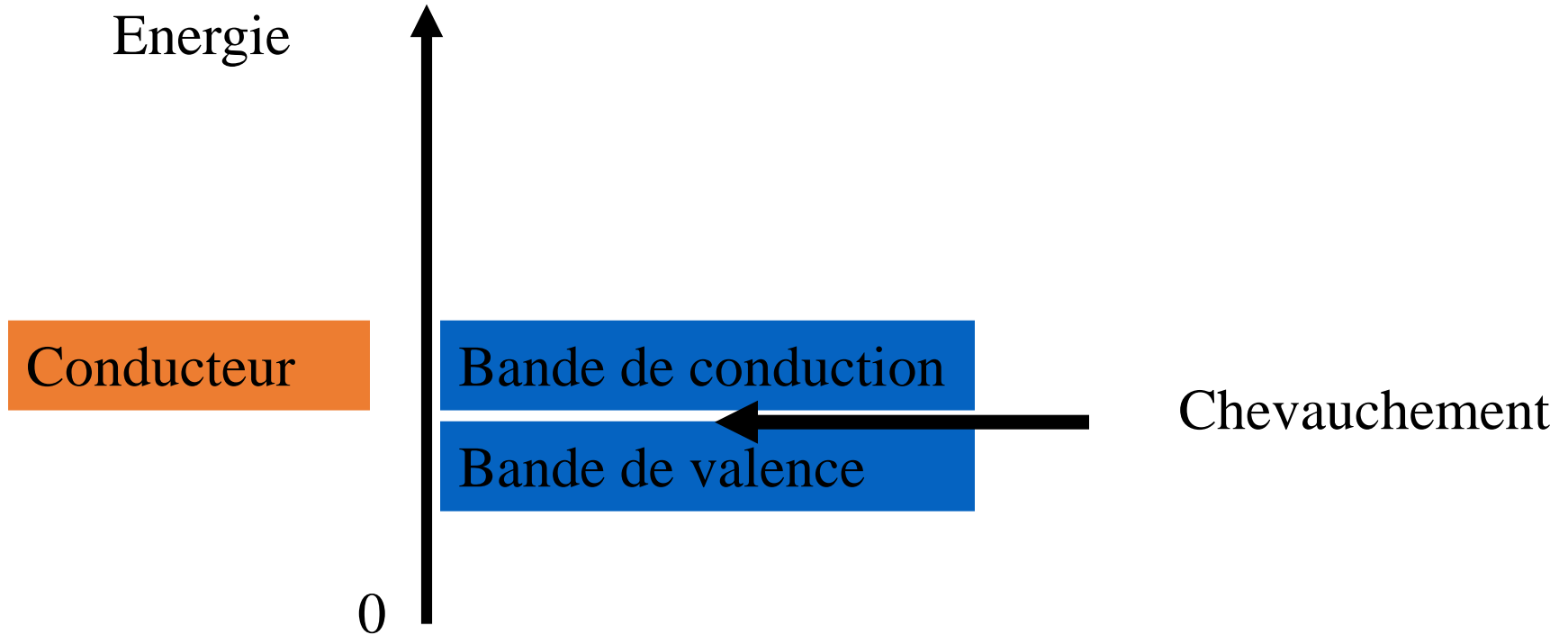
Les figures ci-dessous montrent les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.



Un semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et devenir des électrons libres (figure.2).



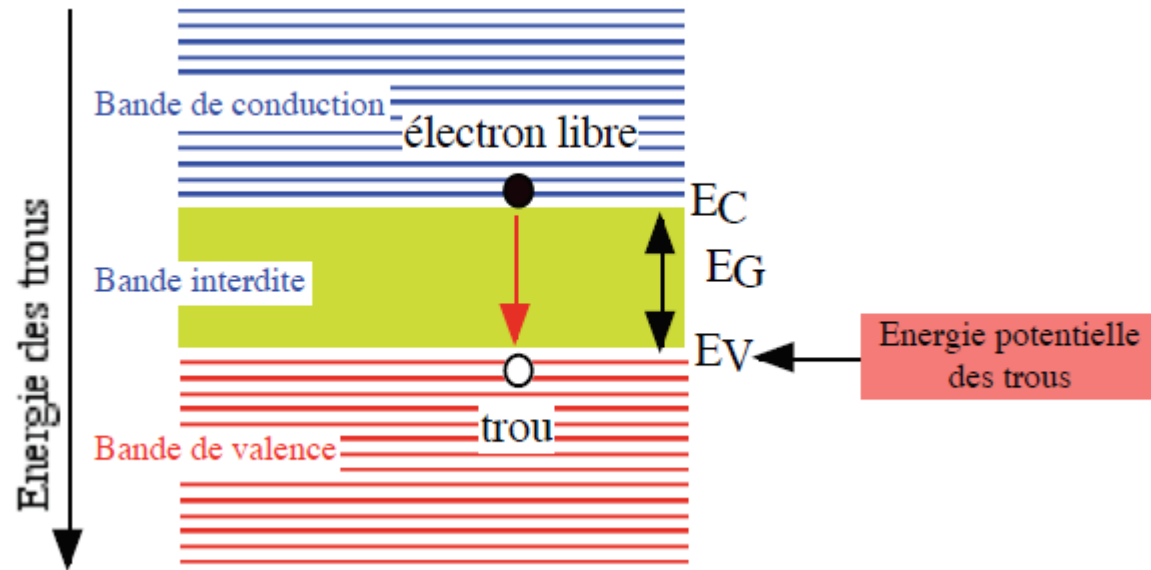
Les bandes énergétiques se chevauchent dans un conducteur. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres figure.3).



III.4_ Phénomène de recombinaisons des électrons libres

L'ionisation thermique devrait conduire à l'ionisation de tous les atomes de silicium à savoir : 5.10^{22} atomes par cm^3 . En fait, elle est compensée par un autre phénomène : les recombinaisons d'électrons libres.

Recombinaison d'une paire électron trou.



En effet, un électron libre, arrivant, lors de son déplacement dans le cristal, à proximité d'un ion positif peut être "capturé" par ce dernier afin de satisfaire sa liaison de covalence (trou libre). La liaison de covalence est alors rétablie. Dans le modèle des bandes un électron de la bande de conduction libère sa place et vient occuper une place libre dans la bande de valence, neutralisant alors un trou.

La liaison de covalence est alors rétablie. Dans le modèle des bandes (figure 4) un électron de la bande de conduction libère sa place et vient occuper une place libre dans la bande de valence, neutralisant alors un trou. Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon). Ce dernier effet est utilisé dans les diodes électroluminescentes (L.E.D.) ou les lasers semi-conducteurs. Le photon émis a une énergie égale à E_G selon :

$$\lambda.E_G = h.c$$

- λ : Longueur d'onde
- h : Constante de Planck
- c : Célérité
- E_G : Energie du Gap (ev)

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_G a le pouvoir de générer une paire électron trou.

La hauteur considérable de bande interdite du diamant (5.47 eV) en fait un parfait isolant. En effet même aux températures élevées, il est impossible de faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. L'oxyde de silicium SiO_2 matériau important pour la fabrication des circuits intégrés, avec une bande interdite de 9 eV, est lui aussi un isolant.

Remarque : les conducteurs métalliques ont une structure cristalline et à ce titre on leur associe un schéma de bandes. Celui-ci présente cependant une configuration particulière telle qu'à toutes les températures, il existe des électrons libres disponibles (environ 10^{23} cm^{-3}). En effet, soit la bande de conduction dispose toujours de places libres, soit il existe un chevauchement entre bandes de valence et de conduction supprimant alors la bande interdite.

III.5_ Diagramme de bande d'énergie des porteurs

Les porteurs dans un semiconducteur correspondent aux états d'énergie (E). Ces différentes énergies sont regroupées dans un diagramme appelé diagramme de bande d'énergie.

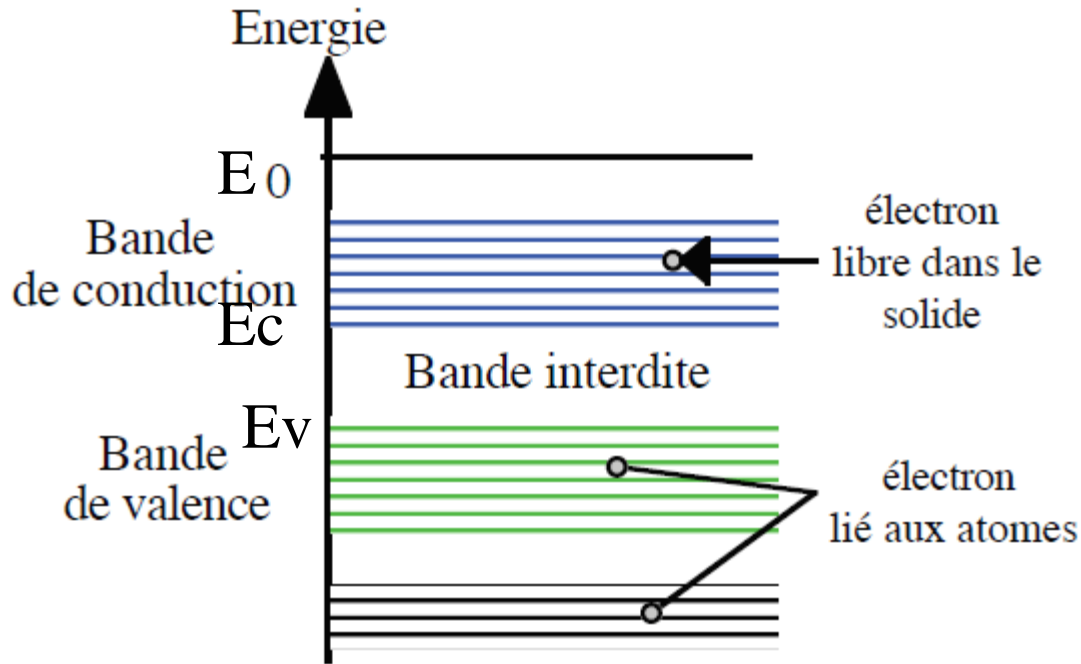


Diagramme de Bande d'énergie

- E_c : Bas de la bande de conduction
- E_v : Haut de la bande de valence
- E_0 : Niveau du vide

Le Diagramme montre 3 Bandes

La bande de conduction est occupée par les électrons libres;

La bande interdite n'est pas occupée par les porteurs;

La bande de valence est occupé par les trous libres et les électrons liés aux atomes.

III.6_ Fonction de distribution des électrons et des trous

A_ Densité d'état

Dans la bande de conduction ou de valence, un niveau d'énergie E peut être occupé par $N_c(E)$ électrons libres ou $N_v(E)$ trous libres. $N_c(E)$ et $N_v(E)$ sont appelés densité d'état des électrons dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence. Elles sont données par:

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E - E_c)^{\frac{1}{2}}$$

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E_v - E)^{\frac{1}{2}}$$

m_n^* Masse effective des électrons dans la bande de conduction

m_p^* Masse effective des trous dans la bande de valence

B_ Probabilité d'occupation des électrons et des trous (Statistique de Fermi-Dirac)

Dans la bande de conduction, les électrons libres occupent des niveaux d'énergie E avec une probabilité notée $f_n(E)$

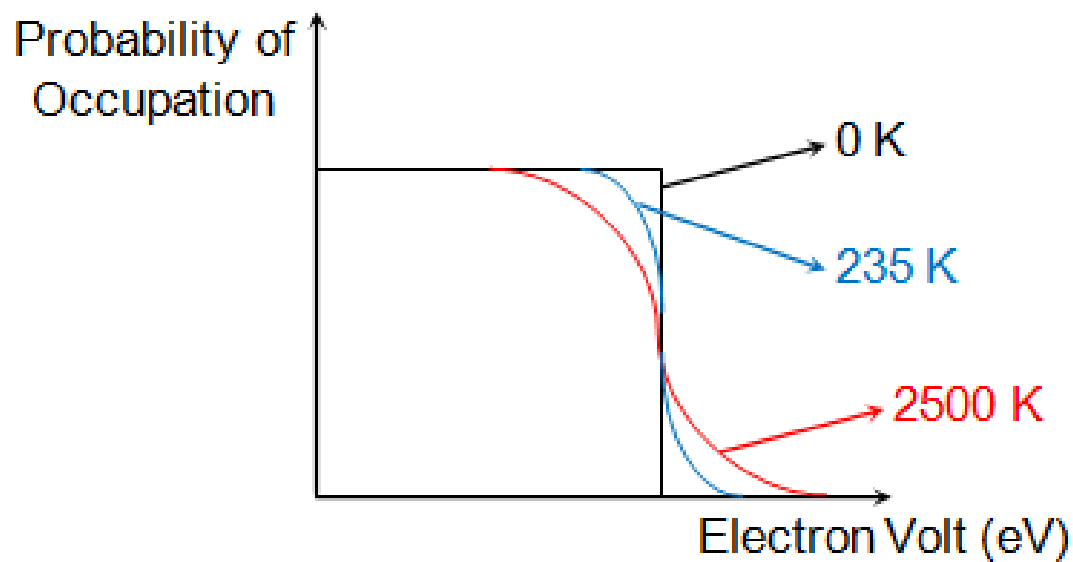
Aussi dans la bande de valence, les trous occupent des niveaux d'énergie E avec une probabilité notée $f_p(E)$.

Les probabilités $f_n(E)$ et $f_p(E)$ sont appelées probabilités d'occupation et elles sont données par la distribution de Fermi-Dirac,

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

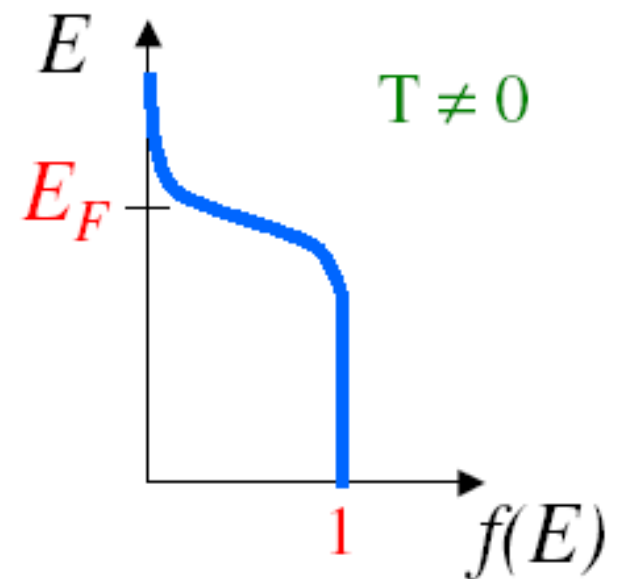
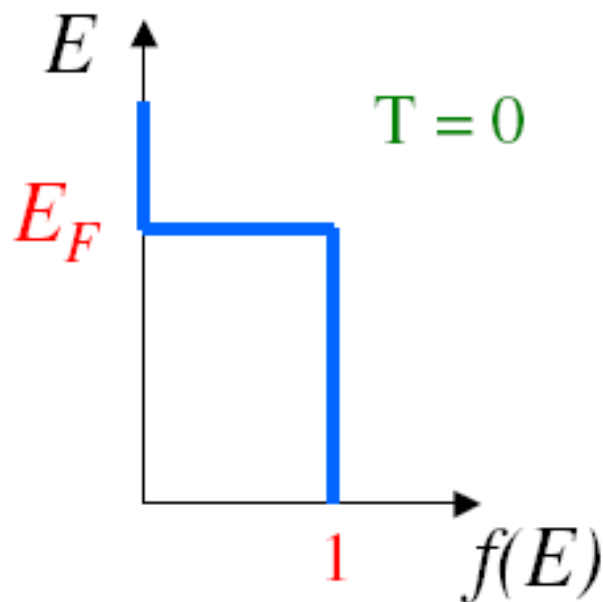
$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

E_F est le niveau de fermi qui correspond à une probabilité d'occupation égale à $\frac{1}{2}$, quelle que soit la température T



Distribution de Fermi:

$$f(E) = 1 / \{ \exp[(E - E_F) / k_B T] + 1 \}$$



III.7_ densité des électrons et des trous dans un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique

Un semiconducteur est en équilibre thermodynamique lorsqu'il n'échange aucune énergie avec son environnement,

A_ Expressions approchées: (calcul de \bar{n} et \bar{p})

Dans la bande de conduction, la densité d'électrons est:

$$\bar{n} = \int d\bar{n}(E) = \int f_n(E) \times N_c(E) \cdot dE = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{E_c}^{\infty} \frac{(E - E_c)^{\frac{1}{2}}}{e^{\frac{E - E_F}{KT}}} dE$$

Finalemment
$$\bar{n} = N_c \cdot e^{\frac{-(E_c - E_F)}{KT}}$$

Dans la bande de valence, la densité de trous est:

$$\bar{p} = \int d\bar{p}(E) = \int f_p(E) \times N_v(E) \cdot dE = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{-\infty}^{E_v} \frac{(E_v - E)^{\frac{1}{2}}}{e^{-\left(\frac{E - E_F}{KT}\right)}} dE$$

Finalemment
$$\bar{p} = N_v \cdot e^{\frac{(E_v - E_F)}{KT}}$$

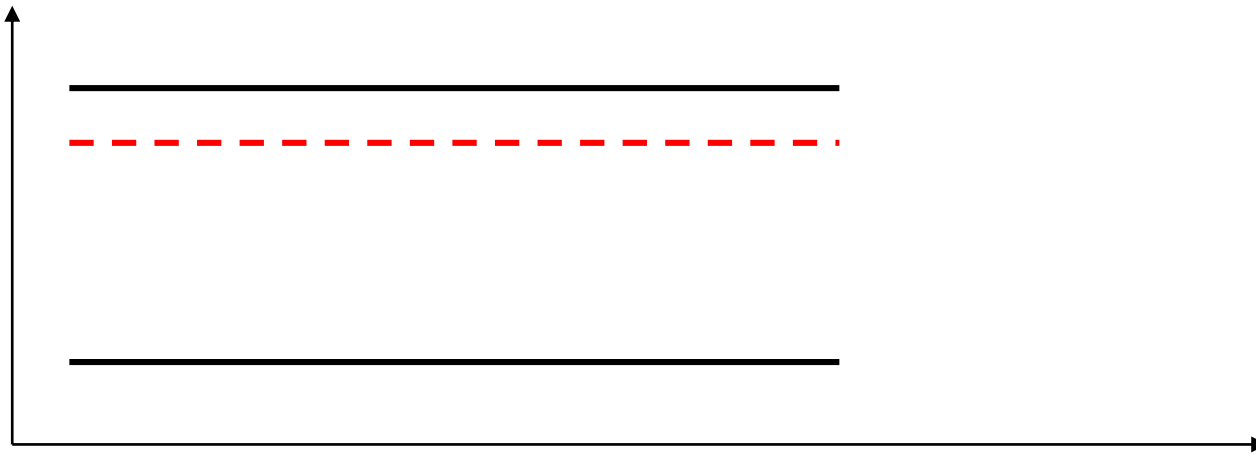
N_c et N_v sont les densités effectives, elles sont données par

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_n^* \cdot KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

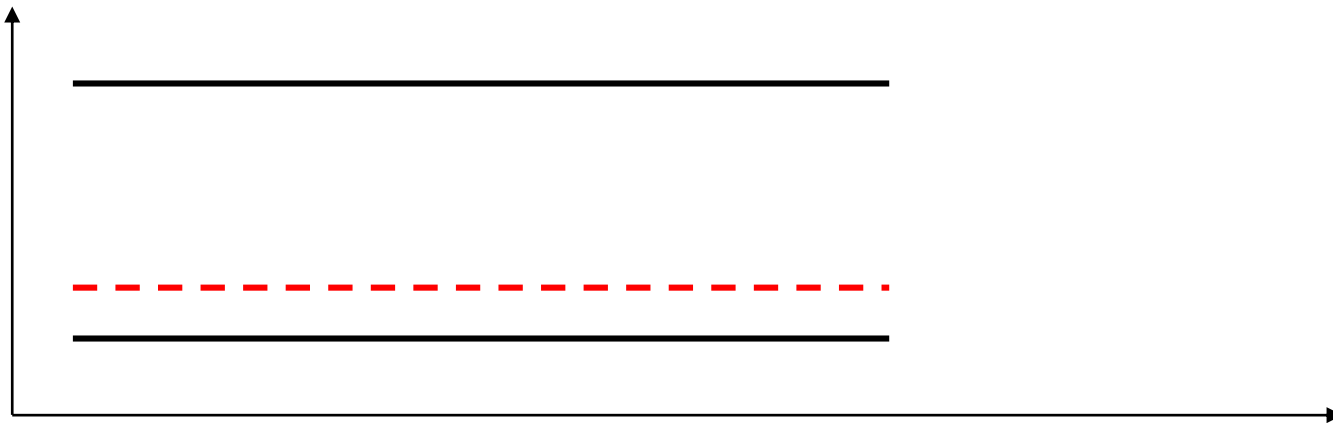
$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_p^* \cdot KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Ces relations montrent:

- La densité d'é (\bar{n}) et de trous (\bar{p}) dépendent de la température et de l'énergie de Fermi,
- Lorsque l'énergie de Fermi (E_F) se rapproche de E_c , la densité des électrons augmente et celle des trous diminue. On dira que les électrons sont majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires.



- Lorsque l'énergie de Fermi (E_F) se rapproche de E_v , la densité des trous augmente et celle des électrons diminue. On dira que les électrons sont des porteurs minoritaires et les trous sont des porteurs majoritaires.



Le produit \bar{n} par \bar{p} donne:

$$\bar{n} \cdot \bar{p} = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\left(\frac{E_c - E_F - E_v + E_F}{KT}\right)} = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\left(\frac{E_c - E_v}{KT}\right)}$$

Puisque $E_c - E_v = E_g$, alors

$$\bar{n} \cdot \bar{p} = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{KT}\right)} \quad \text{Il dépend uniquement de } E_g \text{ et de } T$$

E_g est la largeur de la bande interdite. Le produit des nombres volumiques d'électrons et de trous est une fonction de la température seulement et croît exponentiellement quand la température augmente:

C'est la **loi d'action de masse** qui peut aussi s'écrire sous la forme

$$\bar{n} \cdot \bar{p} = ni^2 \quad \text{ni est la densité intrinsèque, caractéristique du SC.}$$

La loi d'action de masse au sens thermodynamique indique que les populations d'électrons et de trous sont à l'équilibre thermique. L'expression est donc une condition d'équilibre qui décrit le Semiconducteur en l'absence de toute source d'excitation extérieure.

$$n_i = \sqrt{\bar{n} \cdot \bar{p}} = \sqrt{N_c \cdot N_v \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{KT}\right)}} = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{2KT}\right)}$$

$$n_i = A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{2KT}\right)} \quad \text{A est une constante}$$

B_ Densité d'é et de trous dans un Semiconducteur intrinsèque

Un semiconducteur intrinsèque est un semiconducteur dépourvu de toute impureté qui peuvent modifier la densité d'électrons et de trous (Semiconducteur Pur).

Les électrons et les trous résultent directement de la rupture d'une liaison. Il en résulte $\bar{n} = \bar{p} = n_i$

TAF: Dans un semiconducteur intrinsèque, déterminer la position de l'énergie de Fermi, noté $E_F = E_{Fi}$.

C_ Densité d'é et de trous dans un Semiconducteur extrinsèque

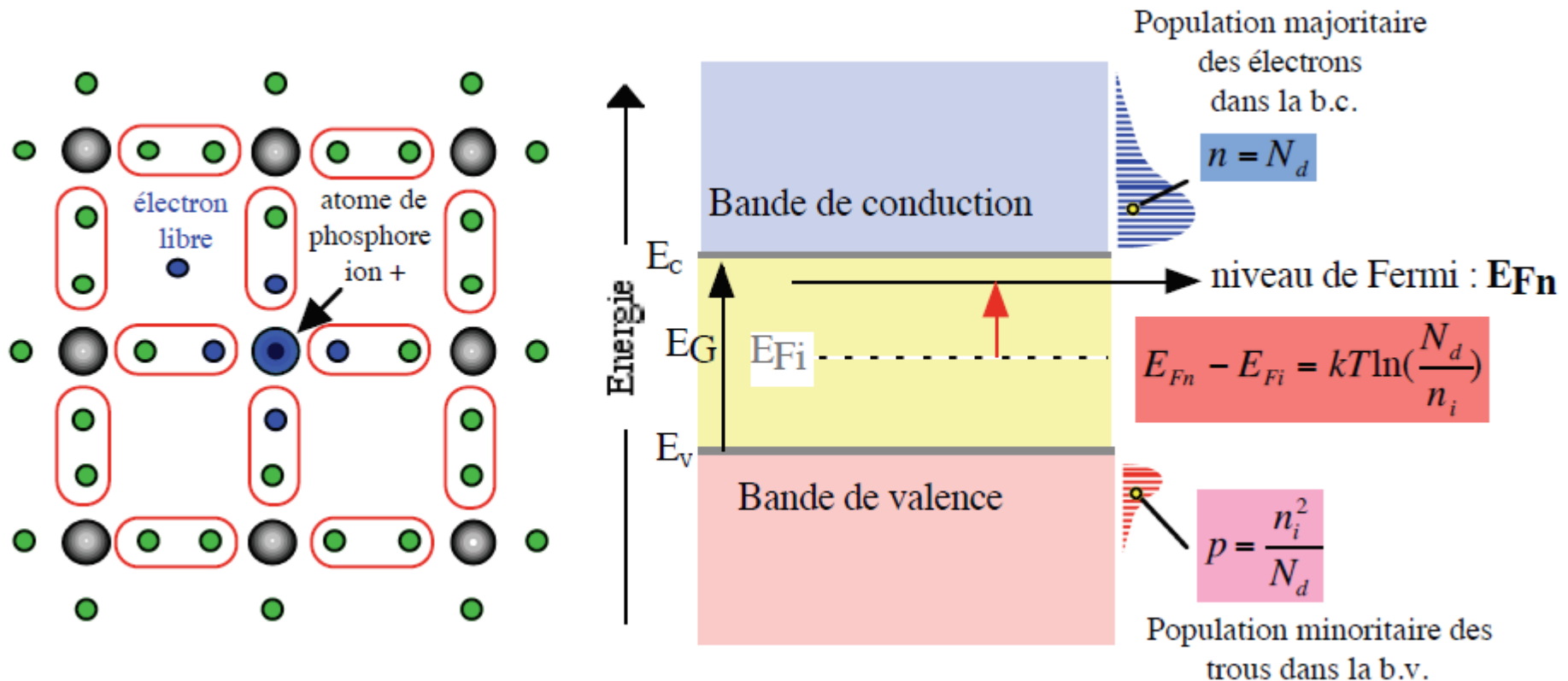
Semi-conducteurs de type N et de type P

1 - Dopage : Les conductibilités du silicium et du germanium peuvent être augmentées de façon drastique (sévère) et contrôlées par l'addition d'impuretés dans le semi-conducteur intrinsèque (pur). Ce procédé, appelé **dopage**, augmente le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les catégories d'impuretés sont de type N et de type P.

2- Semi-conducteurs de type N

Pour augmenter le nombre d'électrons de la bande de conduction dans un silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté pentavalents. Ce sont des atomes avec cinq électrons de valence, tels l'arsenic (As), le phosphore (P), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb).

Dans un semi-conducteur de type N, les électrons libres sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires (figure.5).

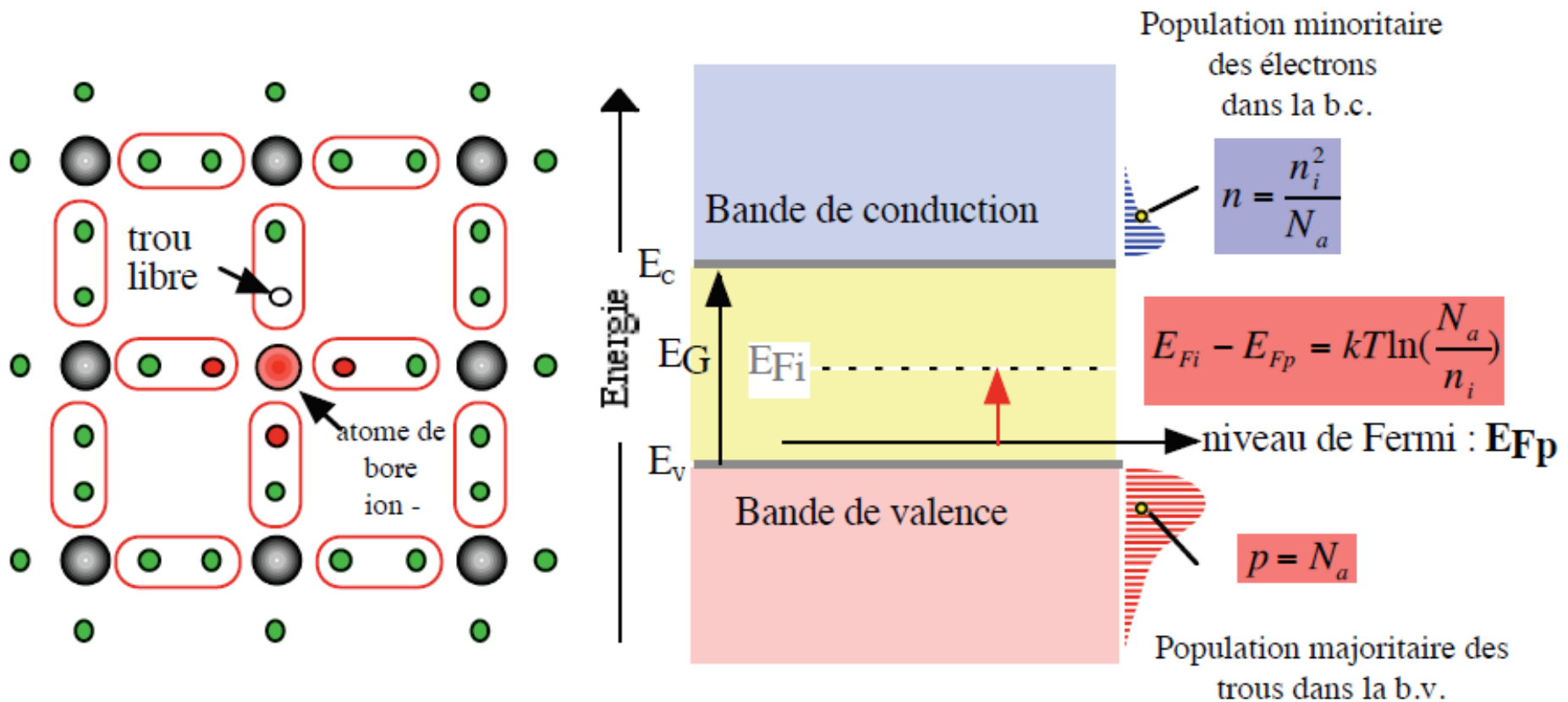


Les atomes donneurs sont des atomes pentavalents que l'introduit dans le semi-conducteur pour le rendre extrinsèque; ces atomes sont susceptibles de donner un libre. On parle d'un dopage de type N.

Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences. Le 5^e électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

Semi-conducteur de type P

Pour augmenter le nombre de trous dans le silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté trivalents. Ce sont des atomes avec trois électrons de valence, tels l'aluminium (Al), le bore (B) et la gallium (Ga). Le nombre de trou peut être contrôlé par la quantité d'impureté trivalents ajoutée au silicium. Un trou créé par cette méthode de dopage n'est pas accompagné d'un électron de conduction (libre). Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont majoritaires et les électrons sont minoritaires (figure.6).



On appelle atomes accepteurs les atomes trivalents que l'introduit dans le semi-conducteur pour le rendre extrinsèque; ces atomes sont susceptibles d'accepter un électron de valence. On parle d'un dopage de type P.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si N_a est la concentration par cm^3 des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer une population p de trous libres égale à la concentration N_a . La population correspondante des électrons libres (n) est gérée à nouveau par la loi d'action de masse : $pn = ni^2$

Exemple : $N_a = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ on obtient $n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300\text{K}$. Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires

cas général : dopages successifs du silicium

Le silicium lors de la fabrication de composants électroniques subit des dopages successifs. Par exemple, un premier dopage au bore a été suivi par un deuxième dopage au phosphore. Après ces deux opérations, la population en électrons libres (n) et en trous libres (p) est encore donnée par la loi d'action de masse

$$\bar{n} \cdot \bar{p} = ni^2$$

Cependant on doit aussi tenir compte de la neutralité électrique du cristal à savoir :

charges + (trous libres et ions +) = charges - (électrons libres et ions -),
qui conduit à satisfaire une deuxième relation :

$$q(\bar{p} + N_d) = q(\bar{n} + N_a)$$

Dans ces conditions, on obtient les expressions des concentrations en porteurs libres :

$$n = \frac{(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$p = \frac{-(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Conséquences :

- $N_a > N_d$, le matériau est de type P
- $N_d > N_a$, le matériau est de type N
- $N_a = N_d$, le matériau est de type intrinsèque par compensation

La situation la plus courante est celle où l'une des concentrations domine très largement l'autre :

- $N_a \gg N_d$, le matériau est de type P affirmé
- $N_d \gg N_a$, le matériau est de type N affirmé

Conductivité :

La conductivité est un paramètre qui indique la faculté de conduction de courant électrique d'un matériau, plus elle est grande , plus le matériau est un bon conducteur de courant.

Pour un semi-conducteur elle s'exprime en fonction des densités de porteurs et de leurs mobilités.

$$\sigma = q (n\mu_n + p\mu_p)$$

μ_n : Mobilité pour les électrons

μ_p : Mobilité pour les trous

n :densité des porteurs pour les électrons

p :densité des porteurs pour les trous

Mobilité

La mobilité est un paramètre qui rend compte de l'inertie du réseau cristallin ou des frottements qu'exerce ce réseau sur les électrons et sur les trous. C'est une constante pour un matériau donné à une température donnée.

Diffusion

Mouvement d'un ensemble de particule dans un milieu, sous l'action de différence concentration, température... etc.

Résistivité

La résistivité est l'inverse de la conductivité, c'est un paramètre qui indique le pouvoir isolant du matériau. Plus la résistivité est élevé plus le matériau est isolant.

Quand on crée localement un excès de porteurs, ceux-ci, même en l'absence de champ électrique, diffusent de la région à plus forte concentration vers la région à plus faible concentration: Phénomène de diffusion (voir précédemment). Et on a

Relation d'ENSTEIN
$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} = U_T$$

$$U_T = 25.85 \text{ mV} \# 26 \text{ mV à } 300^\circ\text{K}$$

D : Constante de diffusion

U_T : Potentiel thermodynamique
$$U_T = \frac{KT}{q}$$

K: Constante de Boltzmann = $1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

T: Température ambiante

q: charge d'électricité

A l'échelle macroscopique, les trous et les électrons prennent des vitesses d'ensembles

Exemple de coefficient de diffusion pour certains matériaux:

Germanium:

D_n : 90 cm²/s pour les électrons

D_p : 44 cm²/s pour les trous

Silicium

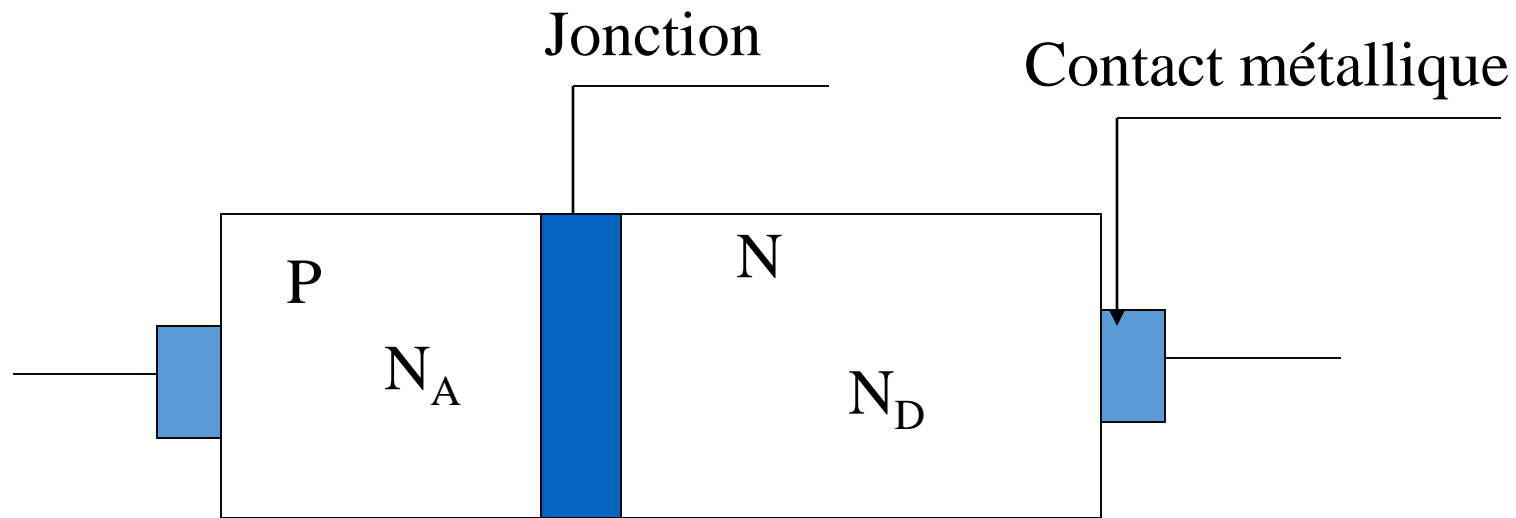
D_n : 31 cm²/s pour les électrons

D_p : 13 cm²/s pour les trous

IV- Jonction PN

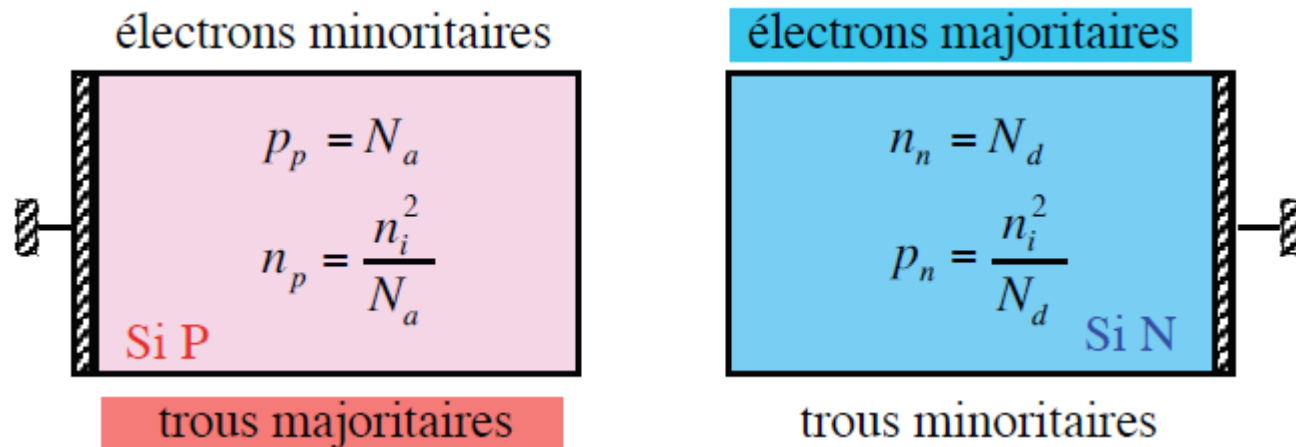
IV.1- Définition:

- On appelle jonction PN, un monocristal semi-conducteur dans lequel existent deux régions dopées avec des impuretés de signe contraires de densité N_A (densité des Accepteurs) côté P, et N_D (densité des donneurs) côté N séparées par une surface plane.

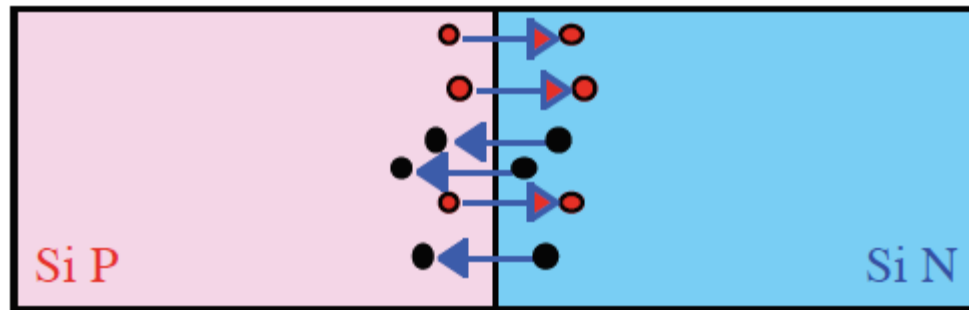


Le terme jonction PN, au sens large généralement, désigne la zone de charge spatiale qui s'étend de part et d'autre de la jonction métallurgique. La jonction métallurgique est la surface de transition entre une région P et une région N.

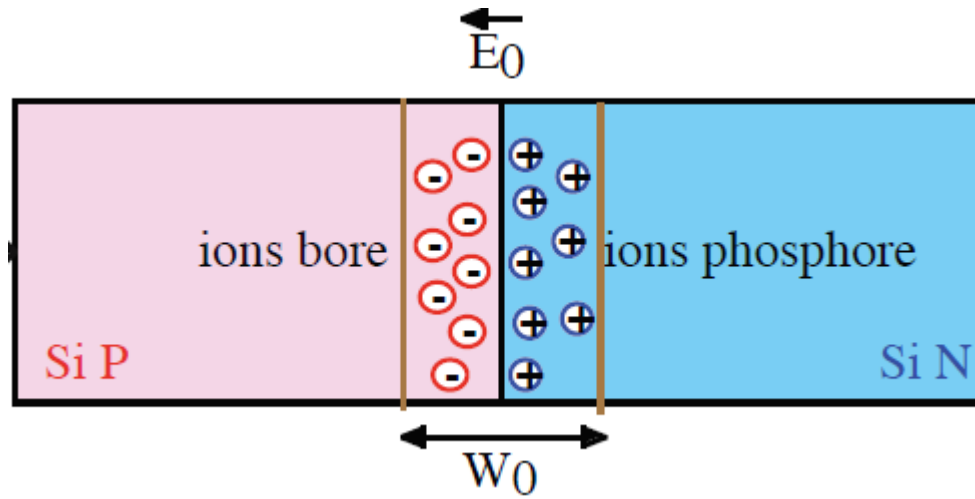
Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.



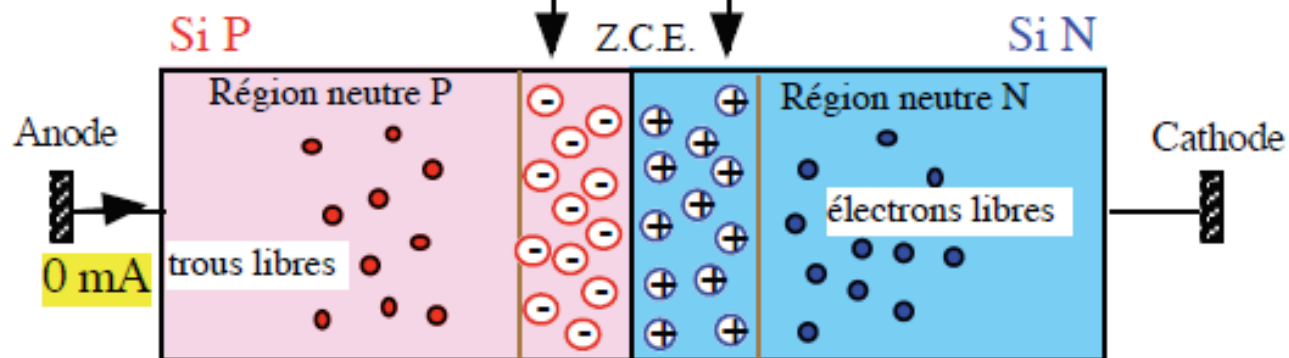
Diffusion des trous vers SiN



Diffusion des électrons vers SiP

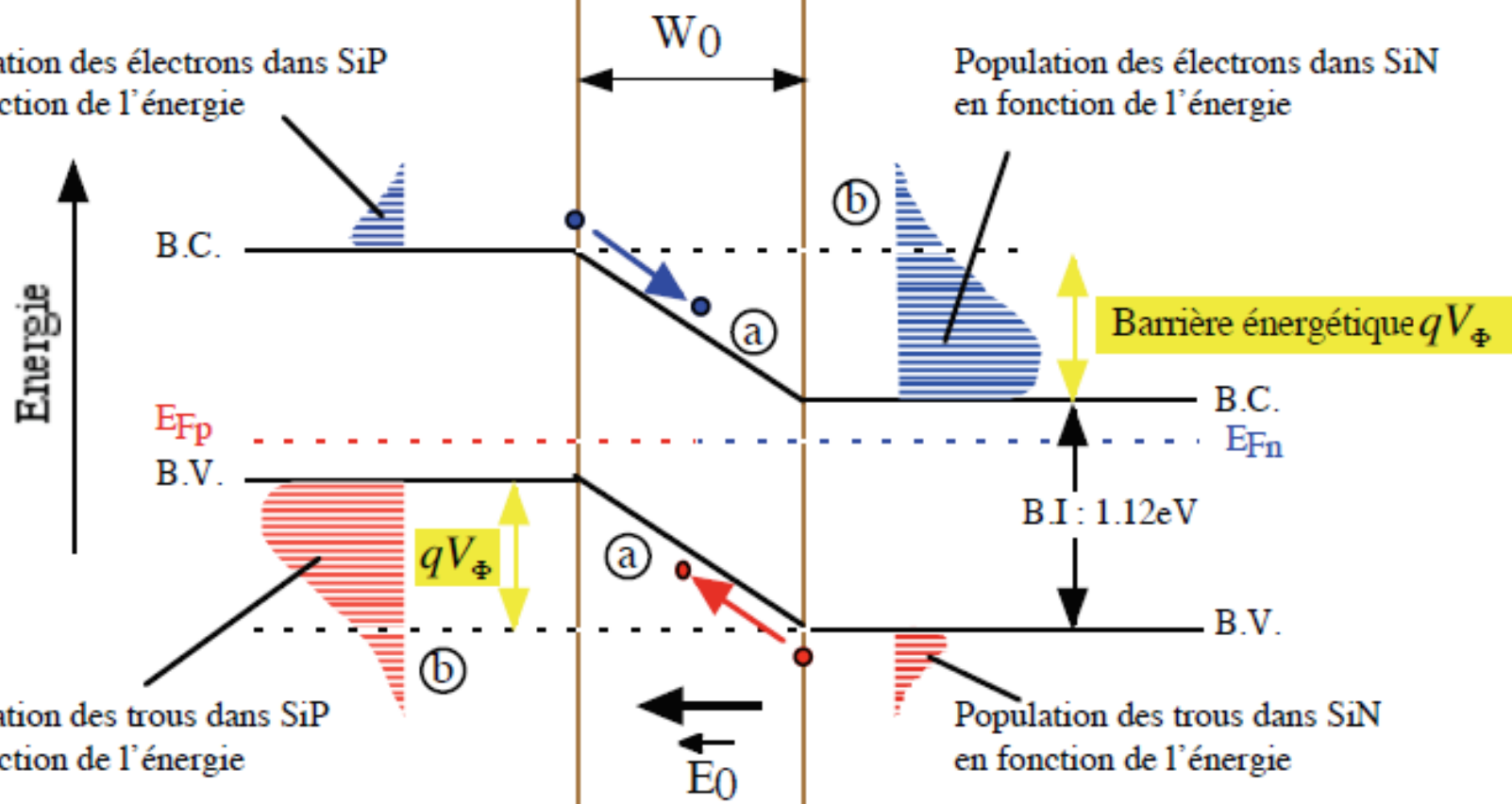


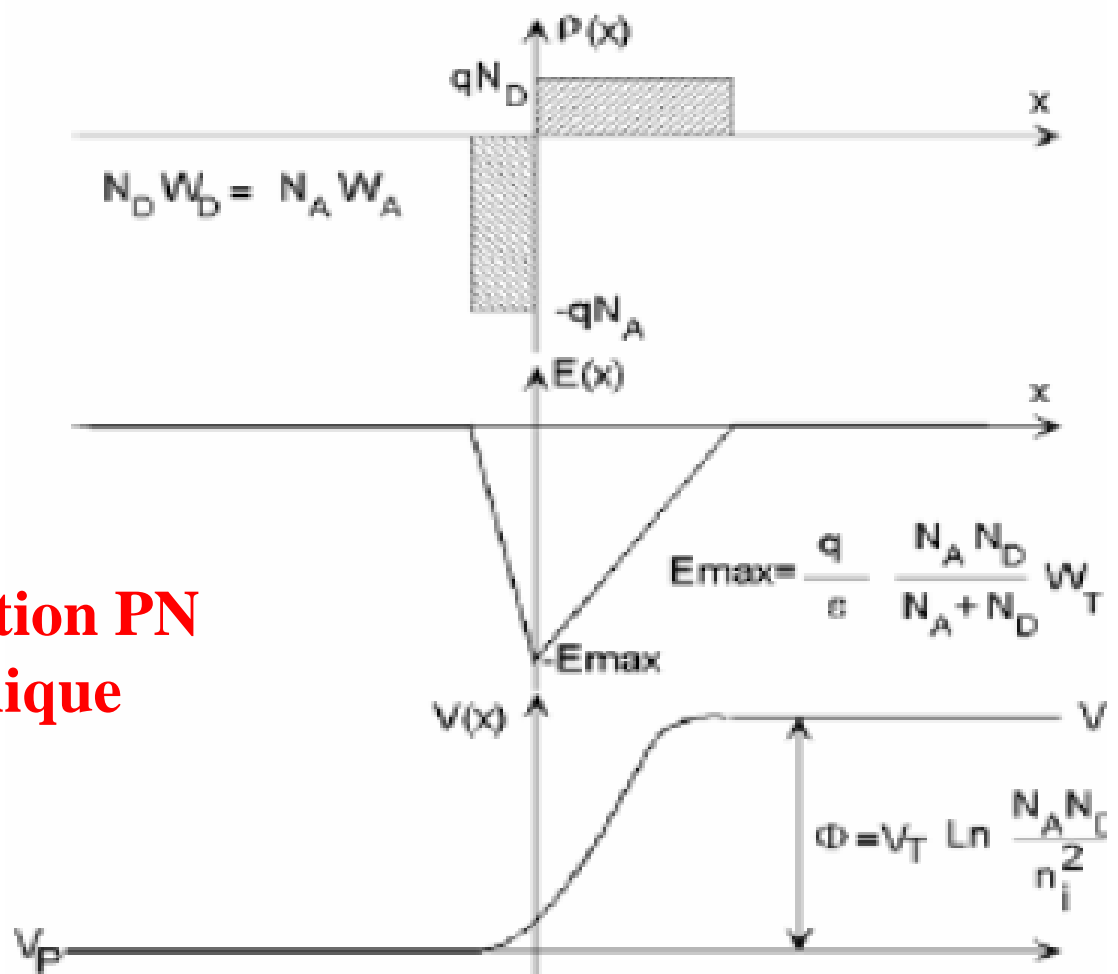
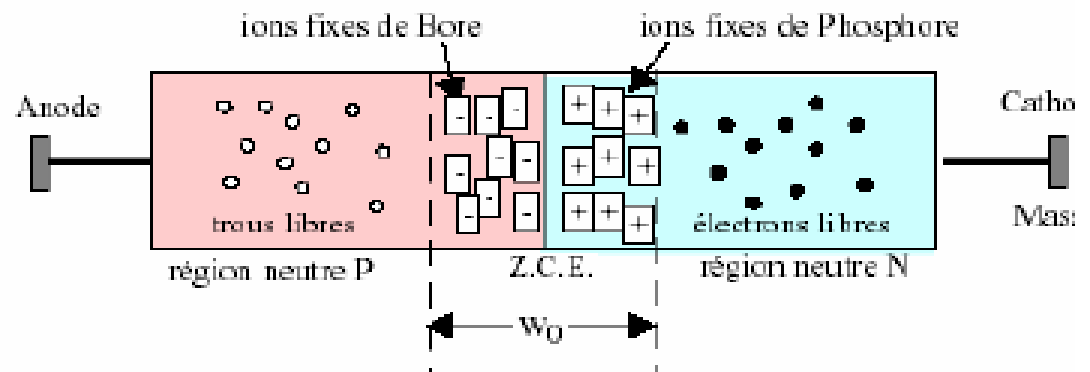
Zone de charge d'espace
ions bore et phosphore



Population des électrons dans SiP
en fonction de l'énergie

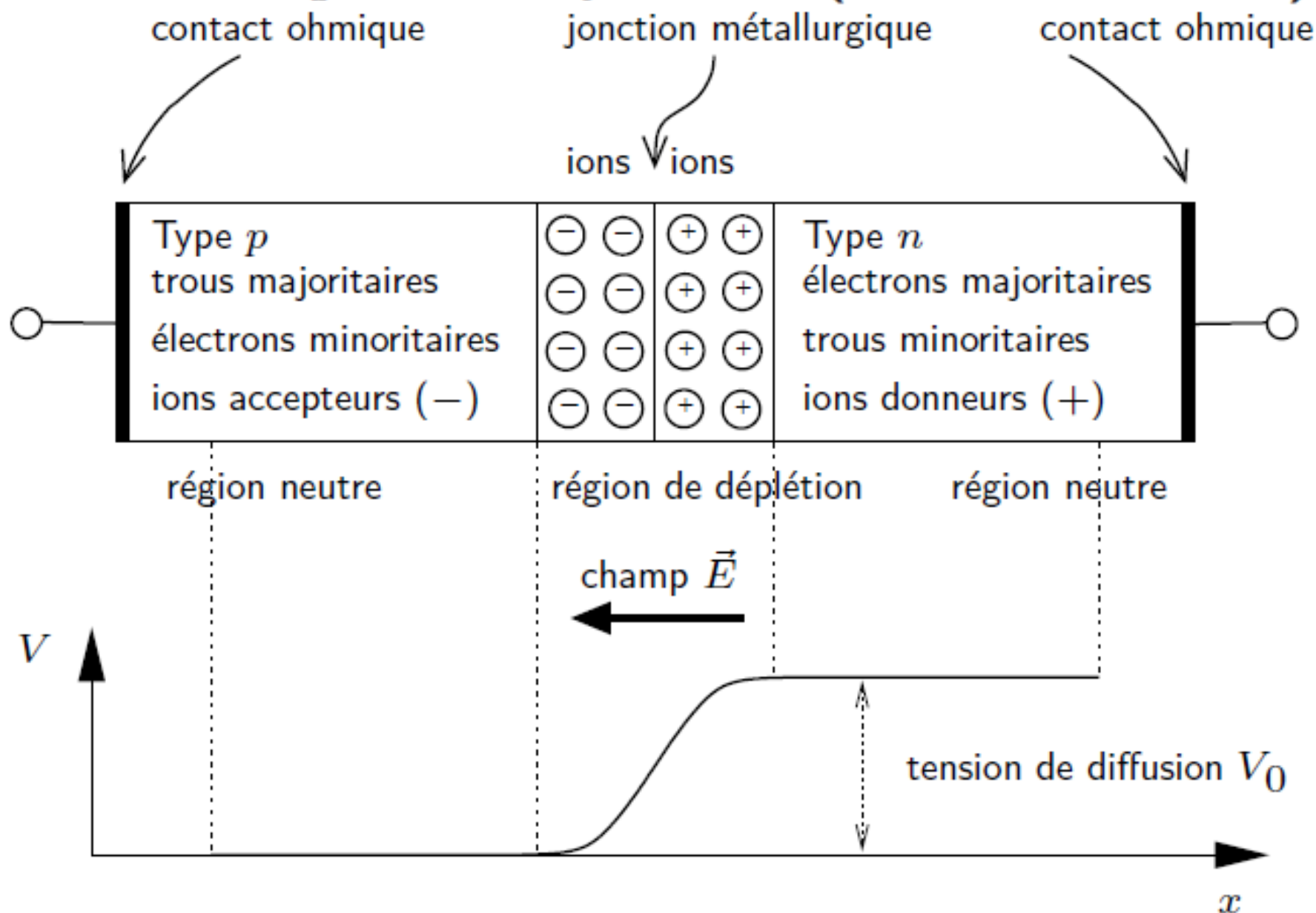
Population des électrons dans SiN
en fonction de l'énergie

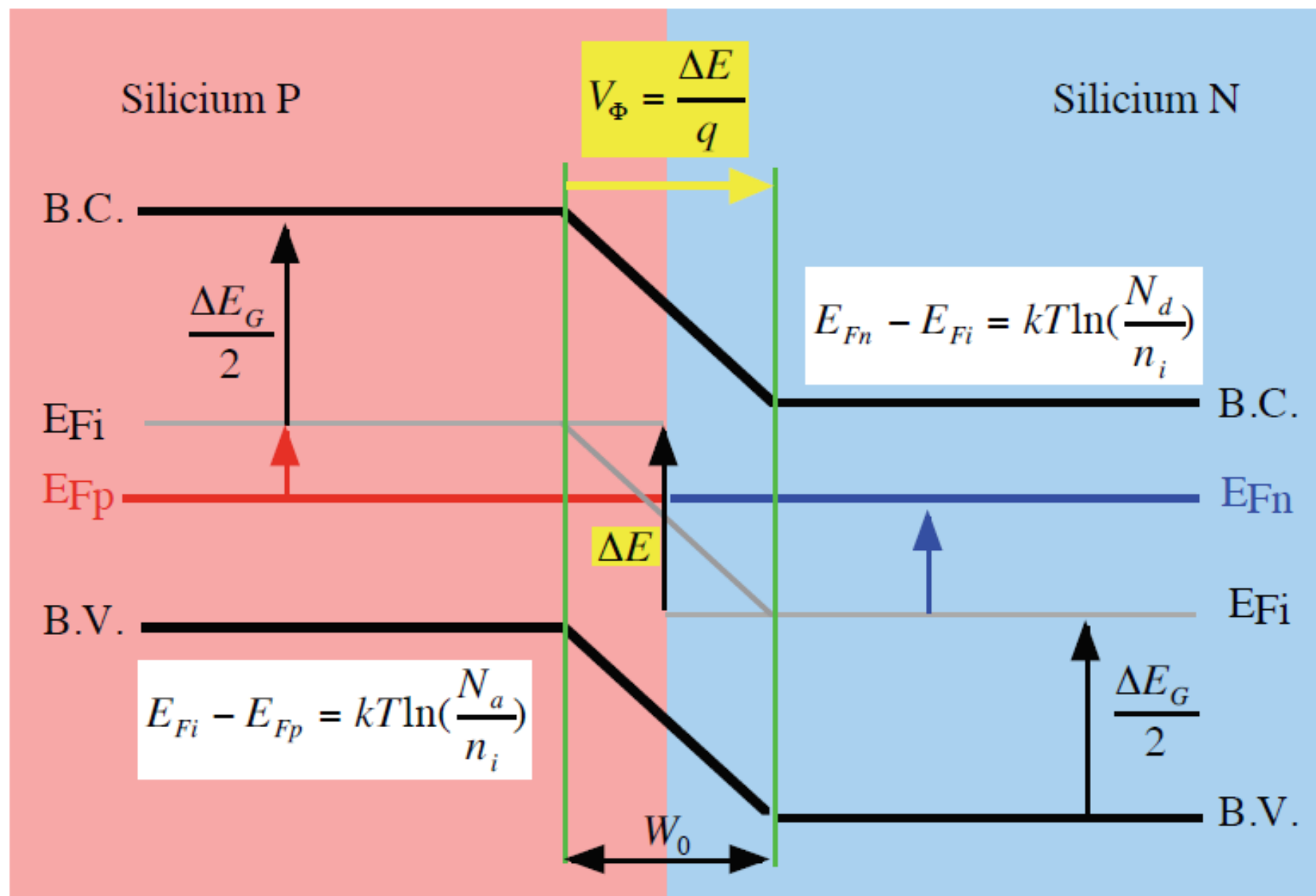




**Représentation d'une jonction PN
à l'équilibre thermodynamique**

Jonction pn à l'équilibre ($i = 0$ et $v = 0$)





La région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée *zone de charge d'espace (ZCE)*.

Elle a une épaisseur de l'ordre de 0,5 μm . La forme générale de la densité de charges dépend essentiellement du profil de dopage de la jonction.

Dans le cas idéal on peut déduire aisément la forme du champ électrique $E(x)$ ainsi que du potentiel $V(x)$ par application des équations de l'électrostatique.

En effet le potentiel $V(x)$ et le champ électrique $E(x)$ s'expriment en fonction de la densité de charges (x).

La loi de Gauss se traduit par:

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{\varepsilon} \rho(x)$$

L'expression du champ électrique s'écrira :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$

De plus la neutralité électrique globale du barreau impose la relation :

$$N_a \cdot W_a = N_d \cdot W_d$$

On peut remarquer que conformément à la relation de Boltzmann il existe une barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction.

$$V_\phi = U_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad \text{où} \quad U_T = \frac{KT}{q}$$

La largeur de la zone de transition est donnée par :

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) V_\phi}$$

Pour : $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,

$W_0 = 0.96 \text{ }\mu\text{m}$, $V_\phi = 0.71 \text{ V}$ et $E_{0\text{max}} = 1.56 \cdot 10^4 \text{ V.cm}^{-1}$

Avec $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $\epsilon_{Si} = 12$.

RESUME: Jonction PN et formation de la zone de déplétion ZCE

- Un bloc de silicium est dopé sur une moitié avec des atomes trivalents (accepteurs) et sur l'autre moitié avec des atomes pentavalents (donneurs) → **jonction pn**.
- Frontière entre les régions P et N : jonction métallurgique.
- Région P : ions négatifs, trous majoritaires et électrons minoritaires.
- Région N : ions positifs, électrons majoritaires et trous minoritaires.

- Les trous, majoritaires dans la région P, diffusent dans la région N.
 - Les électrons, majoritaires dans la région N, diffusent dans la région P.
 - Au voisinage de la jonction métallurgique, les électrons et les trous subissent des recombinaisons.
 - Dans cette région, les charges des ions (accepteurs ou donneurs) ne sont pas compensées par celles des porteurs libres. Les ions sont découverts. Ils sont ancrés au réseau.
 - Il en résulte une charge d'espace et un champ électrique interne.
 - Ce champ s'oppose à la diffusion des porteurs libres.
- ⇒ équilibre entre la diffusion et l'entraînement par le champ électrique.

IV.2 Courants à l'équilibre

- **Courant dû aux porteurs majoritaires :**

- les trous diffusent de p vers n : $I_{p\text{-diff}} > 0$;
- les électrons diffusent de n vers p : $I_{n\text{-diff}} > 0$.

Au total, $I_{\text{diff}}(v = 0) = I_{p\text{-diff}} + I_{n\text{-diff}} > 0$.

- **Courant dû aux porteurs minoritaires :**

Certains porteurs générés thermiquement dans les régions neutres au voisinage de la région de déplétion parviennent à celle-ci sans subir de recombinaison.

Ces porteurs sont entraînés par le champ électrique de la région de déplétion vers la région opposée.

Ainsi, un trou généré dans la région N et atteignant la région de déplétion est entraîné vers la région P, ce qui engendre un courant négatif. Le courant total des porteurs minoritaires est le courant de saturation inverse ou courant de fuite $I_{\text{inv}} = -I_s < 0$.

IV.3 Jonction PN à l'équilibre

A l'équilibre, le courant total est nul

$$I_{\text{diff}} + I_{\text{inv}} = 0 \quad \longrightarrow \quad I_{\text{diff}} = - I_{\text{inv}}$$

$$I_{\text{diff}} (v=0) = I_S > 0$$

- I_S dépend de la concentration des porteurs minoritaires et dépend donc fortement de la température et des concentrations des impuretés de dopage.
- La tension de diffusion V_0 dépend de la température, de la concentration de dopage et du gap du matériau. Pour le Si, $V_0 \simeq 0.6$ à 0.8 V à $T = 300$ K.
- La différence de potentiel entre l'anode et la cathode vaut zéro, pas V_0 !
- Valeurs typiques de la largeur de la région de déplétion : de 0.1 à 10 μm .

IV.4 Jonction PN polarisée en direct

Pour faire passer un trou de la région P vers la région N, il faut travailler contre le champ électrique interne, ou, en d'autres mots, vaincre la barrière de potentiel $e V_0$. ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ est la charge électrique d'un trou).

- **Courant des majoritaires :**

Si on applique une différence de potentiel positive entre la région P et la région N, on diminue l'intensité du champ électrique interne \Rightarrow un plus grand nombre de porteurs majoritaires peuvent franchir la région de déplétion !

On peut montrer que $I_{diff}(v) = I_{diff} \Big|_{v=0} e^{\frac{v}{V_T}} = I_S e^{\frac{v}{V_T}}$

$V_T = \frac{K.T}{e}$ est la tension thermique : $V_T \approx 26 \text{ mV}$ à $T = 300 \text{ K}$.

- **Courant des minoritaires :** il est inchangé !

$$I_{inv} = -I_S < 0$$

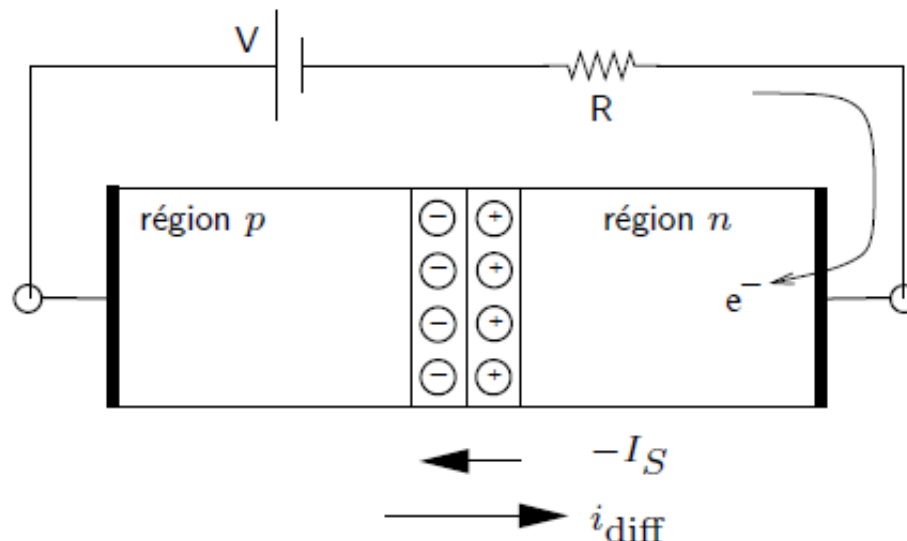
- Courant total:

$$I = I_{diff} - I_S = I_{diff} \Big|_{v=0} e^{\frac{v}{V_T}} - I_S = I_S e^{\frac{v}{V_T}} - I_S$$

$$I = I_S \left(e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right)$$

L'apport de porteurs majoritaires au voisinage de la jonction métallurgique conduit à une réduction de la largeur de la région de déplétion.

Courant d'une Diode polarisée en direct :



IV.5 Jonction PN polarisée en inverse

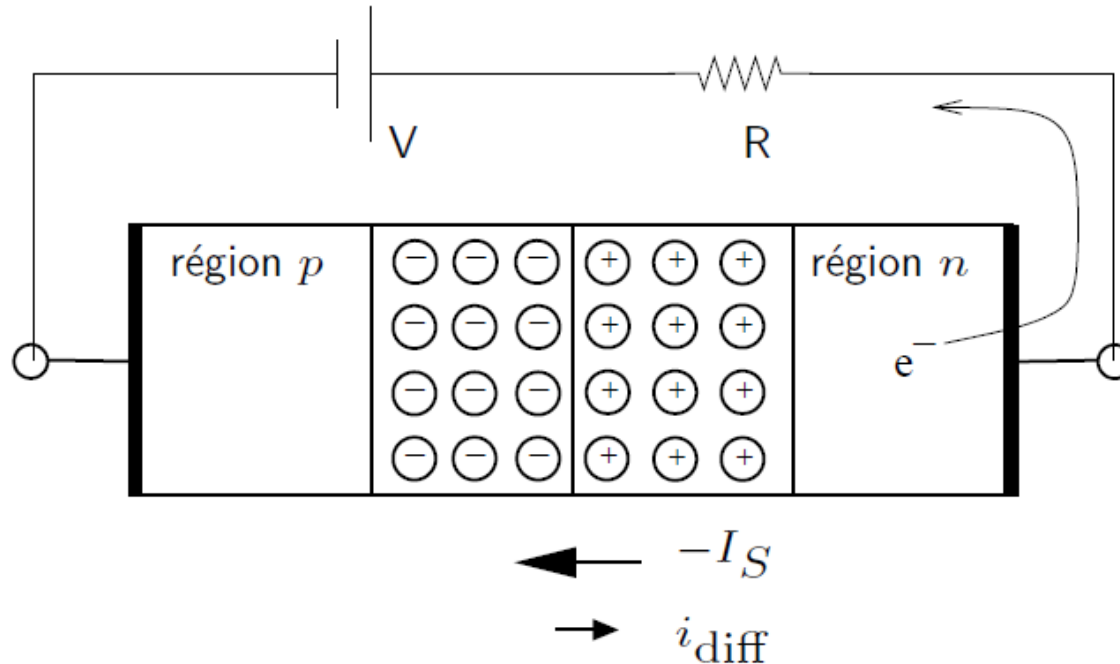
Polarisation : différence de potentiel positive entre la région N et la région P.

- L'intensité du champ électrique interne augmente.
- La barrière de potentiel qui s'oppose au courant des majoritaires est plus élevée qu'au repos.
- Le courant I_{diff} diminue :

$$I_{\text{diff}}(v) = I_S e^{\frac{v}{V_T}} = I_S e^{\frac{-|v|}{V_T}} < I_S \quad v \text{ négatif}$$

- Le courant des minoritaires reste inchangé.
- Le courant total est négatif : $i = I_{\text{diff}}(v) - I_S < 0$.
- La largeur de la région de déplétion augmente.

Diode polarisée en inverse :



Remarque importante : aussi bien en polarisation directe qu'en polarisation inverse, le courant des fils de connexion est transporté par des électrons !