# SEMICONDUCTEURS

Les semiconducteurs ont été découverts en 1833 par Michael Faraday (un très grand nom de l'électromagnétisme…), qui a constaté que contrairement aux métaux la conductivité augmentait avec la température (c'était du $Ag_2S$). Mais c'est avec l'invention du « transistor bipolaire » vers 1950 que l'électronique à base de semiconducteurs a vraiment démarré, grâce à la possibilité de maîtriser la conductivité par dopage et la possibilité d'associer des semiconducteurs de type N et de type P.

Dans cet exercice, on va étudier la variation de la concentration de porteurs avec la température et le dopage, puis l'impact sur la conduction.

Michael Faraday

On s’intéresse ici à un matériau semiconducteur, sans précision de sa nature particulière.

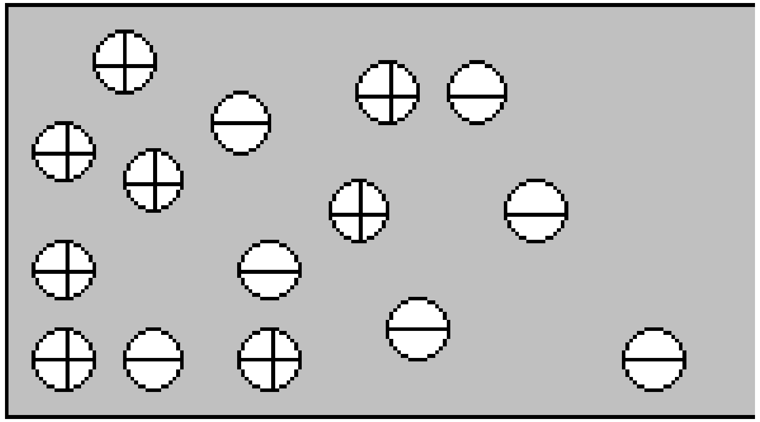
1. Dans cette question, le semiconducteur est un matériau cristallin parfaitement pur.

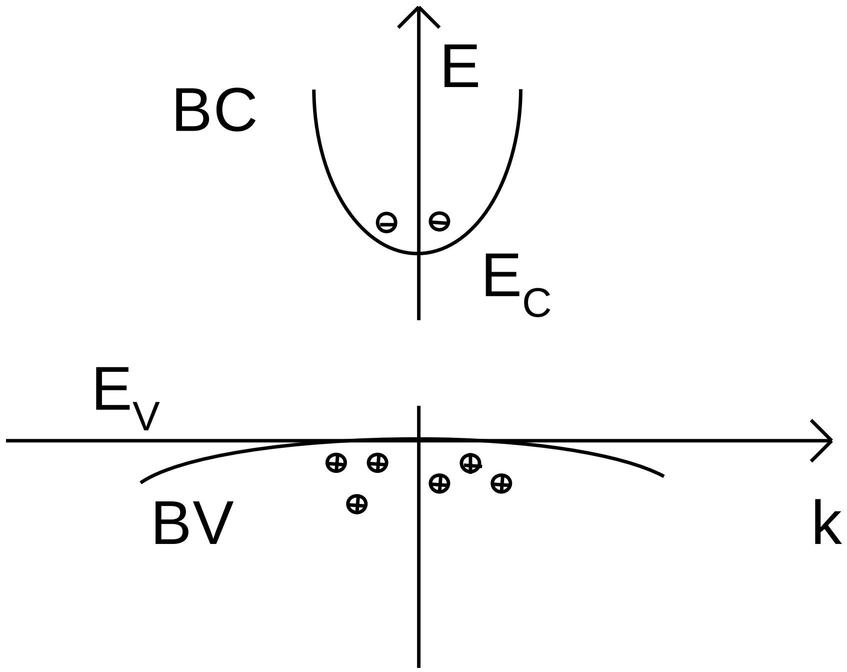
Quels sont les « porteurs de charge » ?

On s’intéresse ici à un matériau semiconducteur, sans précision de sa nature particulière.

1. Dans cette question, le semiconducteur est un matériau cristallin parfaitement pur.

Quels sont les « porteurs de charge » ?

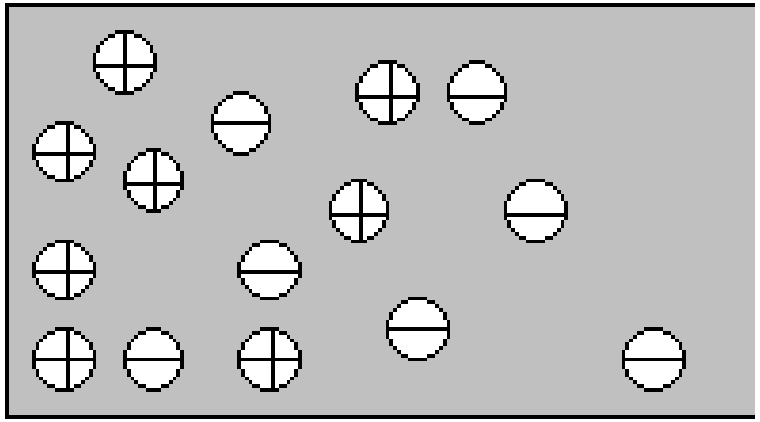


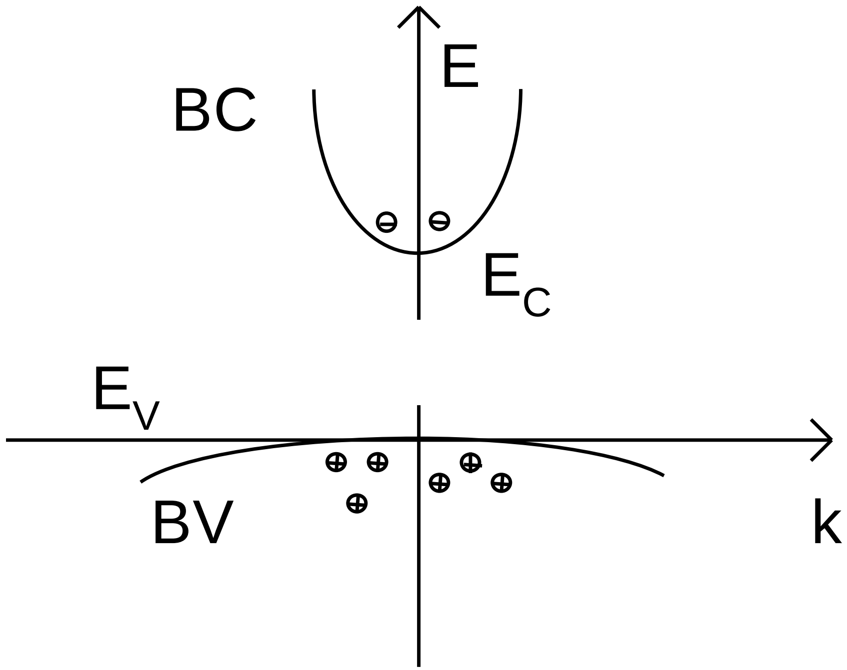


On s'intéresse ici à un matériau semiconducteur, sans précision de sa nature particulière.

1. Dans cette question, le semiconducteur est un matériau cristallin parfaitement pur.

Quels sont les « porteurs de charge » ? Que peut-on dire de la valeur relative de leur densité ?



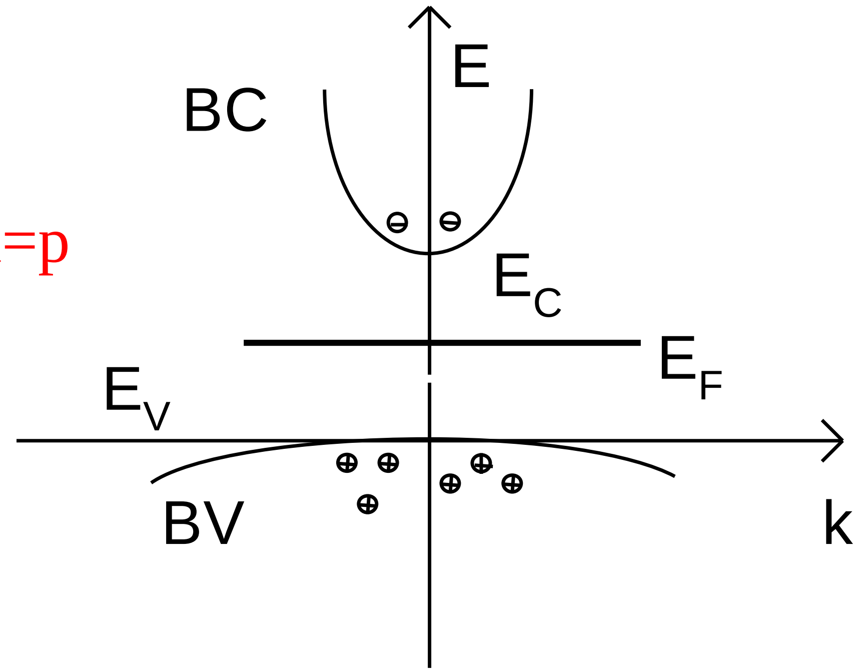


On s'intéresse ici à un matériau semiconducteur, sans précision de sa nature particulière.

1. Dans cette question, le semiconducteur est un matériau cristallin parfaitement pur.

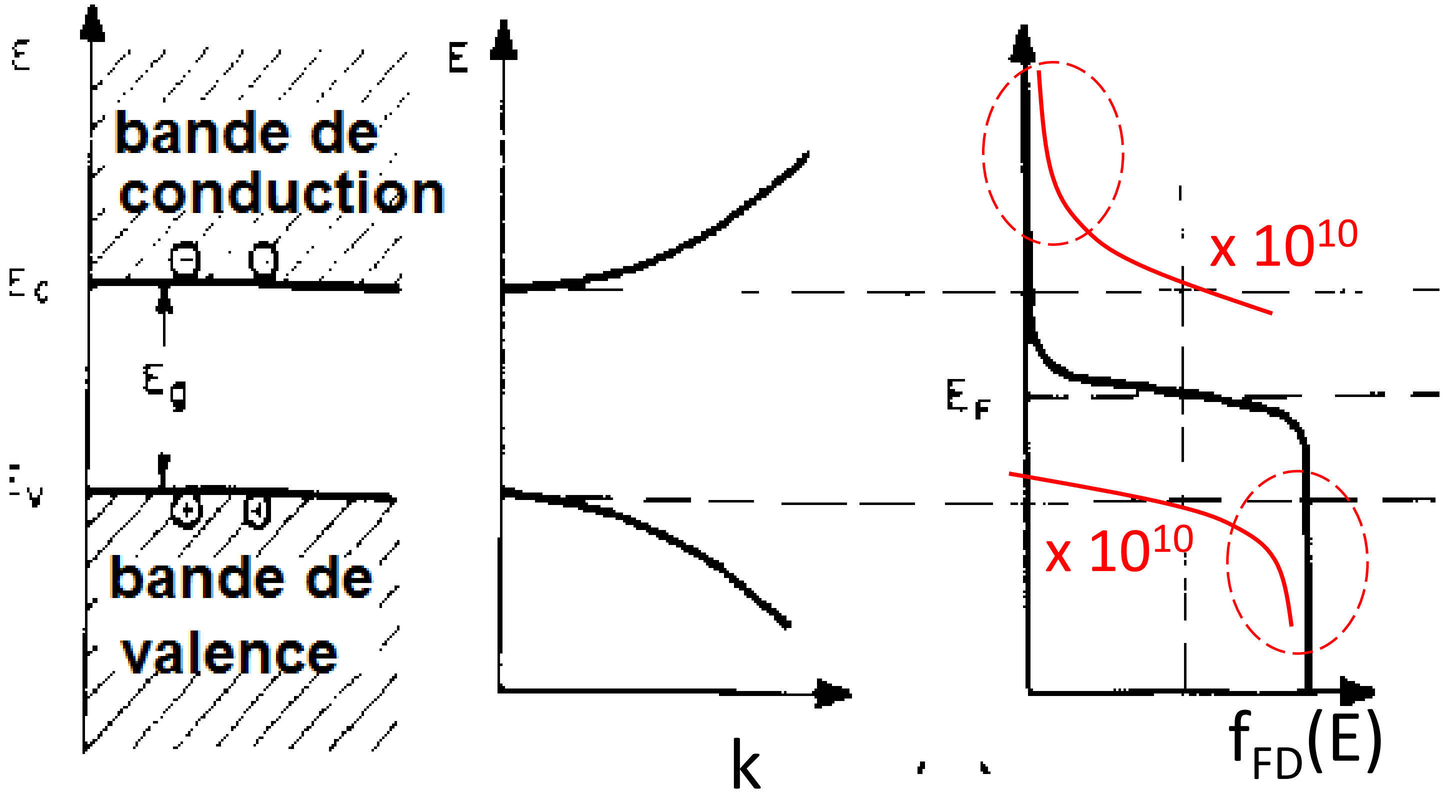
Quels sont les « porteurs de charge » ? Que peut-on dire de la valeur relative de leur densité ?

Dans le cas pur (intrinsèque), on a exactement n=p

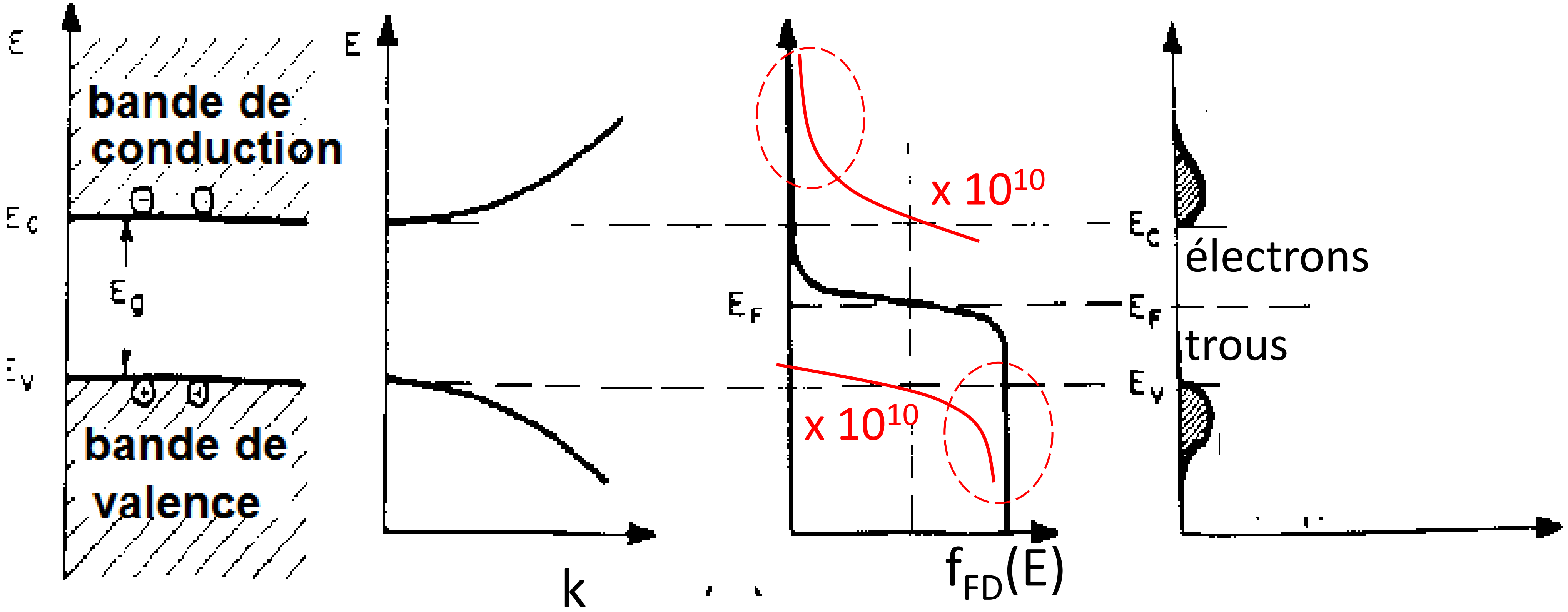


Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température

Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température

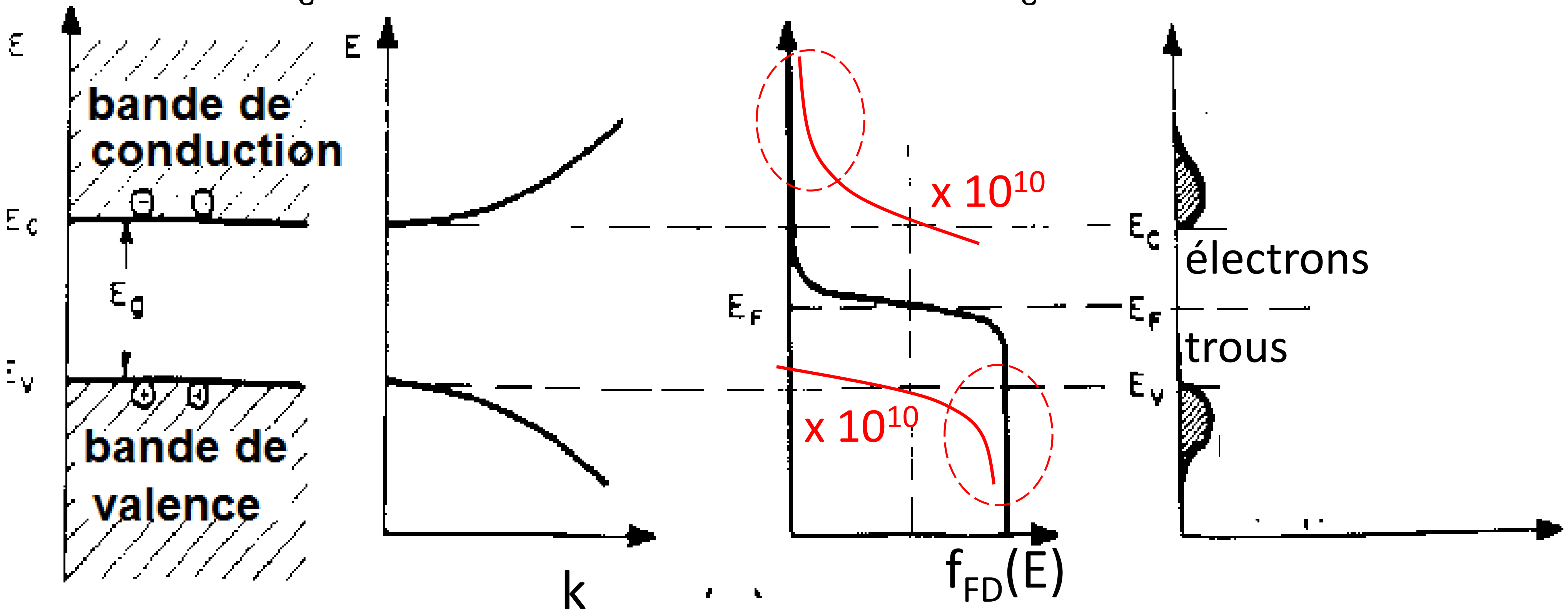


Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température



Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température

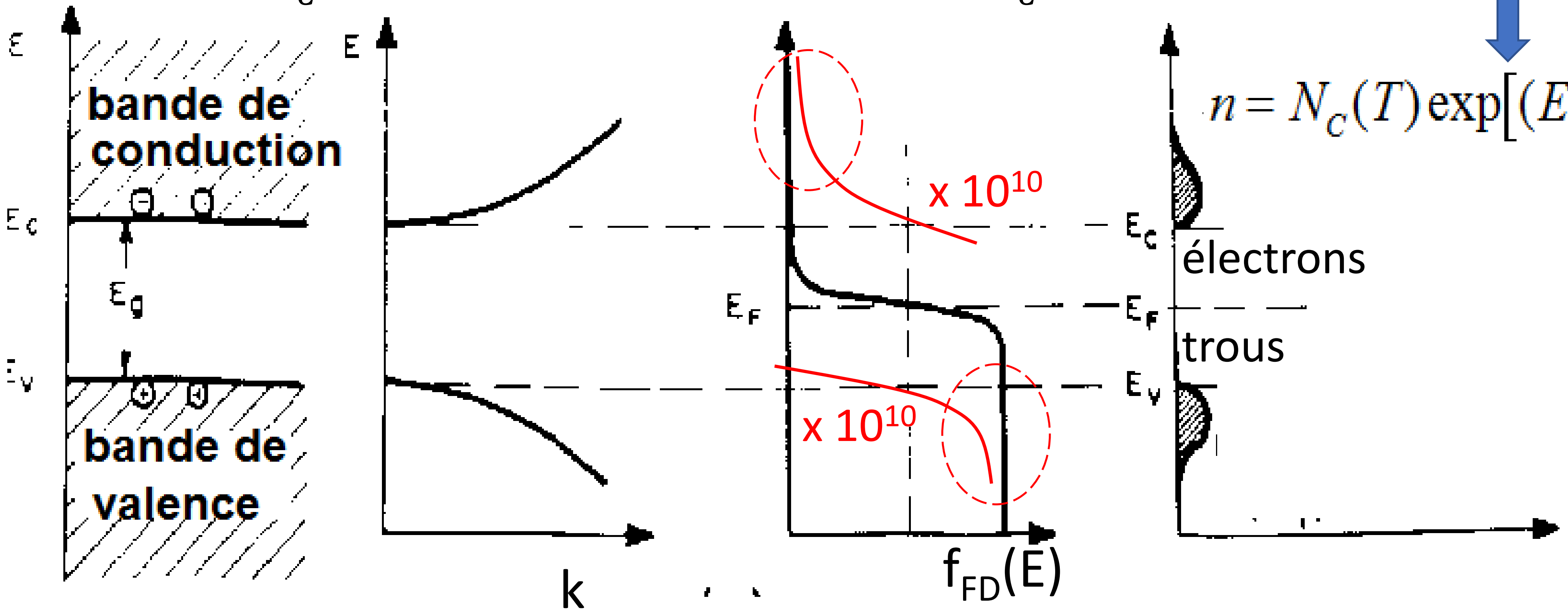
$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{\rho_{BC}(E)}{1 + exp[(E - E_F)/k_B T]} dE \cong \int_{E_C}^{\infty} \rho_{BC}(E)\, exp[-(E - E_F)/k_B T]\, dE$$



Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{\rho_{BC}(E)}{1 + exp[(E - E_F)/k_B T]} dE \cong \int_{E_C}^{\infty} \rho_{BC}(E)\, exp[-(E - E_F)/k_B T]\, dE$$

$$n = N_C(T)\exp\left[(E_F - E_C)/k_B T\right]$$



Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température

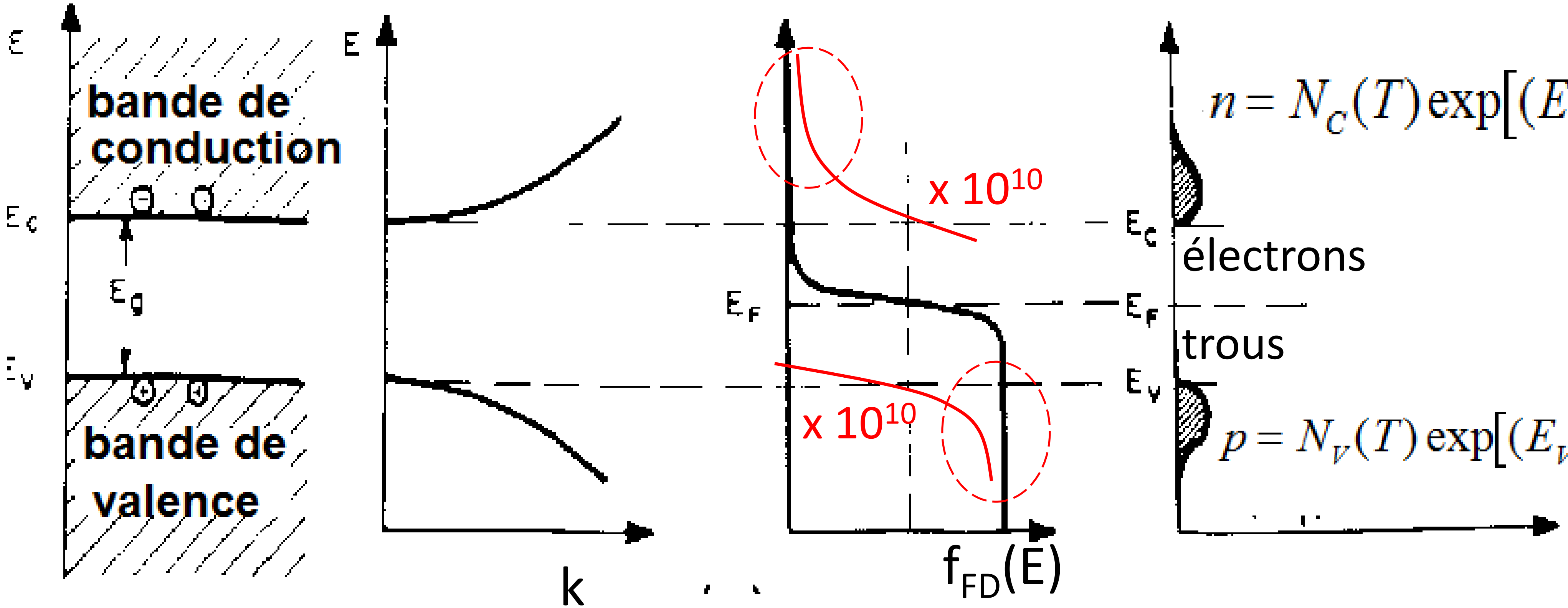
Trous :

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} \rho_{BV}(E)\left(1 - \frac{1}{1 + exp[(E - E_F)/k_B T]}\right) dE$$

$$= \int_{-\infty}^{E_V} \frac{\rho_{BV}(E)}{1 + exp[(E_F - E)/k_B T]} dE \cong \int_{-\infty}^{E_V} \rho_{BV}(E)\, exp[-(E_F - E)/k_B T]\, dE$$

$$\Rightarrow \quad p = N_V(T) \exp\left[(E_V - E_F)/k_B T\right]$$

Exprimer la densité de chaque type de porteurs (n et p) en fonction d'une grandeur dépendant uniquement du matériau, de la position relative du niveau de Fermi par rapport au niveau bas de la bande de conduction $E_C$ ou au niveau haut de la bande de valence $E_V$, et de la température




$$n = N_C(T)\exp\left[(E_F - E_C)/k_BT\right]$$

$$p = N_V(T)\exp\left[(E_V - E_F)/k_BT\right]$$

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l’énergie d’activation » gouvernant la variation exponentielle avec la température ?

Quelle est l’énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l'énergie d'activation » gouvernant la variation exponentielle avec la température ?

Quelle est l'énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

Comme on a n=p, cela impose : $N_C exp\left(\frac{E_f-E_C}{kT}\right) = N_V exp\left(\frac{E_V-E_f}{kT}\right)$

D'où $E_F = \frac{E_V+E_C}{2} + \frac{k_BT}{2} ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right) = E_i$

Autremement dit, $E_F$ est proche du milieu de la bande interdite. On l'appelle Niveau de Fermi intrinsèque (noté $E_i$).

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l'énergie d'activation » gouvernant la variation exponentielle avec la température ?

Quelle est l'énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

Comme on a n=p, cela impose : $N_C exp\left(\frac{E_f - E_C}{kT}\right) = N_V exp\left(\frac{E_V - E_f}{kT}\right)$

D'où $E_F = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{k_B T}{2} ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right) = E_i$

Autrement dit, $E_F$ est proche du milieu de la bande interdite. On l'appelle Niveau de Fermi intrinsèque (noté $E_i$).

Le produit np est inchangé : $np = N_c N_v \exp(-E_g / kT) = A = n_i^2$ où $n_i$ est la densité intrinsèque.

En effet ce produit traduit une loi d'action de masse relatif à la réaction $e^- + t^+ \leftrightarrows$ énergie.

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l'énergie d'activation » gouvernant la variation exponentielle avec la température ?

Quelle est l'énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

Comme on a n=p, cela impose : $N_C exp\left(\frac{E_f-E_C}{kT}\right) = N_V exp\left(\frac{E_V-E_f}{kT}\right)$

D'où $E_F = \frac{E_V+E_C}{2} + \frac{k_BT}{2} ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right) = E_i$

Autrement dit, $E_F$ est proche du milieu de la bande interdite. On l'appelle Niveau de Fermi intrinsèque (noté $E_i$).

Le produit np est inchangé : $np = N_c N_v \exp(-E_g / kT) = A = n_i^2$ où $n_i$ est la densité intrinsèque.

En effet ce produit traduit une loi d'action de masse relatif à la réaction $e^- + t^+ \leftrightarrows$ énergie.

n=p=$N_i(T) = \sqrt{N_C(T) N_V(T)} \exp(-E_G / 2k_BT)$

La concentration de porteurs suit donc essentiellement une loi d'activation thermique (si on omet les lentes variations de $N_C$ et $N_V$ avec T), faisant intervenir une énergie d'activation qui est la moitié du gap.

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l'énergie d'activation » gouvernant la variation exponentielle avec la température ?

Quelle est l'énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

Ordre de grandeur : si $N_C = N_V = 10^{25}$ m-3, que valent ces densités à température ambiante pour un semiconducteur de bande interdite 1 eV ?

On rappelle que $k_B T$ vaut 25 meV à 300K.

Le produit np est inchangé : $np = N_c N_v \exp(-E_g / kT) = A = n_i^2$ où $n_i$ est la densité intrinsèque.

En effet ce produit traduit une loi d'action de masse relatif à la réaction $e^- + t^+ \leftrightarrows$ énergie.

n=p=$N_i(T) = \sqrt{N_C(T) N_V(T)} \exp(-E_G / 2k_B T)$

La concentration de porteurs suit donc essentiellement une loi d'activation thermique (si on omet les lentes variations de $N_C$ et $N_V$ avec T), faisant intervenir une énergie d'activation qui est la moitié du gap.

2. En déduire la valeur de chacune de ces densités.

Quelle est « l'énergie d'activation » gouvernant la variation avec la température ?

Quelle est l'énergie du niveau de Fermi (dite « intrinsèque » pour ce semiconducteur pur) ?

**Dans l'AN, on trouve un peu moins de $2 \times 10^{16}$ porteurs de chaque type / $m^3$. Cela peut sembler beaucoup, mais ça correspond à moins de $2 \times 10^{10}$ porteurs / $cm^3$, ou encore 1 porteur par cube de 3 µm de côté, et pour parfaire environ un porteur de chaque type pour 50 milliards d'atomes de silicium !**

Le produit np est inchangé : $np = N_c N_v \exp(-E_g / kT) = A = n_i^2$ où $n_i$ est la densité intrinsèque.

En effet ce produit traduit une loi d'action de masse relatif à la réaction $e^- + t^+ \leftrightarrows$ énergie.

n=p=$N_i(T) = \sqrt{N_C(T) N_V(T)} \exp(-E_G / 2k_B T)$

La concentration de porteurs suit donc essentiellement une loi d'activation thermique (si on omet les lentes variations de $N_C$ et $N_V$ avec T), faisant intervenir une énergie d'activation qui est la moitié du gap.

3. Le semiconducteur est maintenant de type N, avec un niveau de dopage $N_D$ (tous les donneurs sont ionisés). Quels sont les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires ? Quelle est la position approximative du niveau de Fermi ?

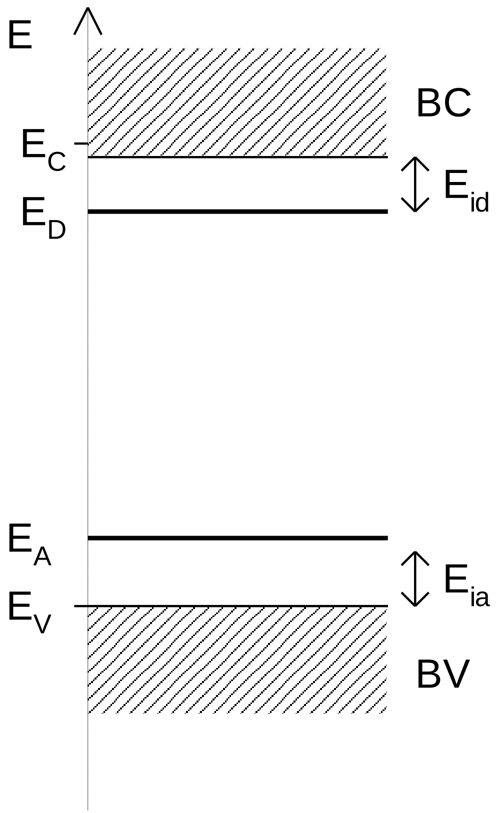
Calculer la valeur de p.

On écrira également n et p en fonction de l'écart entre $E_F$ et $E_i$,

3. Le semiconducteur est maintenant de type N, avec un niveau de dopage $N_D$ (tous les donneurs sont ionisés). Quels sont les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires ? Quelle est la position approximative du niveau de Fermi ?

Calculer la valeur de p.

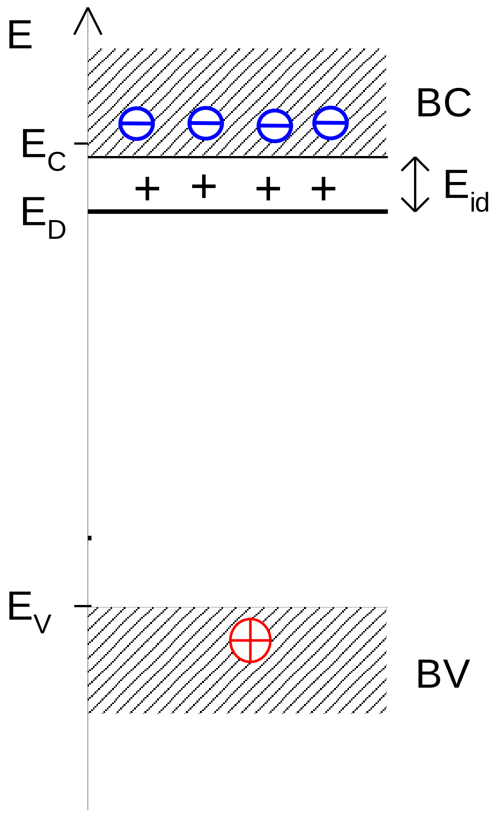
On écrira également n et p en fonction de l'écart entre $E_F$ et $E_i$,



3. Le semiconducteur est maintenant de type N, avec un niveau de dopage $N_D$ (tous les donneurs sont ionisés). Quels sont les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires ? Quelle est la position approximative du niveau de Fermi ?

Calculer la valeur de p.

On écrira également n et p en fonction de l'écart entre $E_F$ et $E_i$,




$$n = N_C(T)\exp[(E_F - E_C)/k_BT] \qquad p = N_V(T)\exp[(E_V - E_F)/k_BT]$$

$$np = N_c N_v \exp(-E_g/kT) = A = n_i^2 \qquad p \approx n_i^2 \;/\; N_D$$

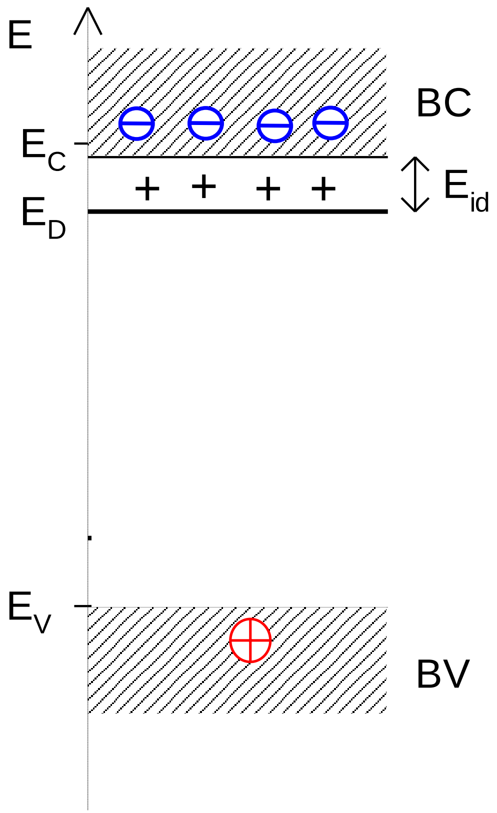
$$n = n_i exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_BT}\right) \qquad p = n_i exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_BT}\right)$$

$E_F \sim E_D$ pour que la population de la BC soit proche de $N_D$

3. Le semiconducteur est maintenant de type N, avec un niveau de dopage $N_D$ (tous les donneurs sont ionisés). Quels sont les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires ? Quelle est la position approximative du niveau de Fermi ?

Calculer la valeur de p.

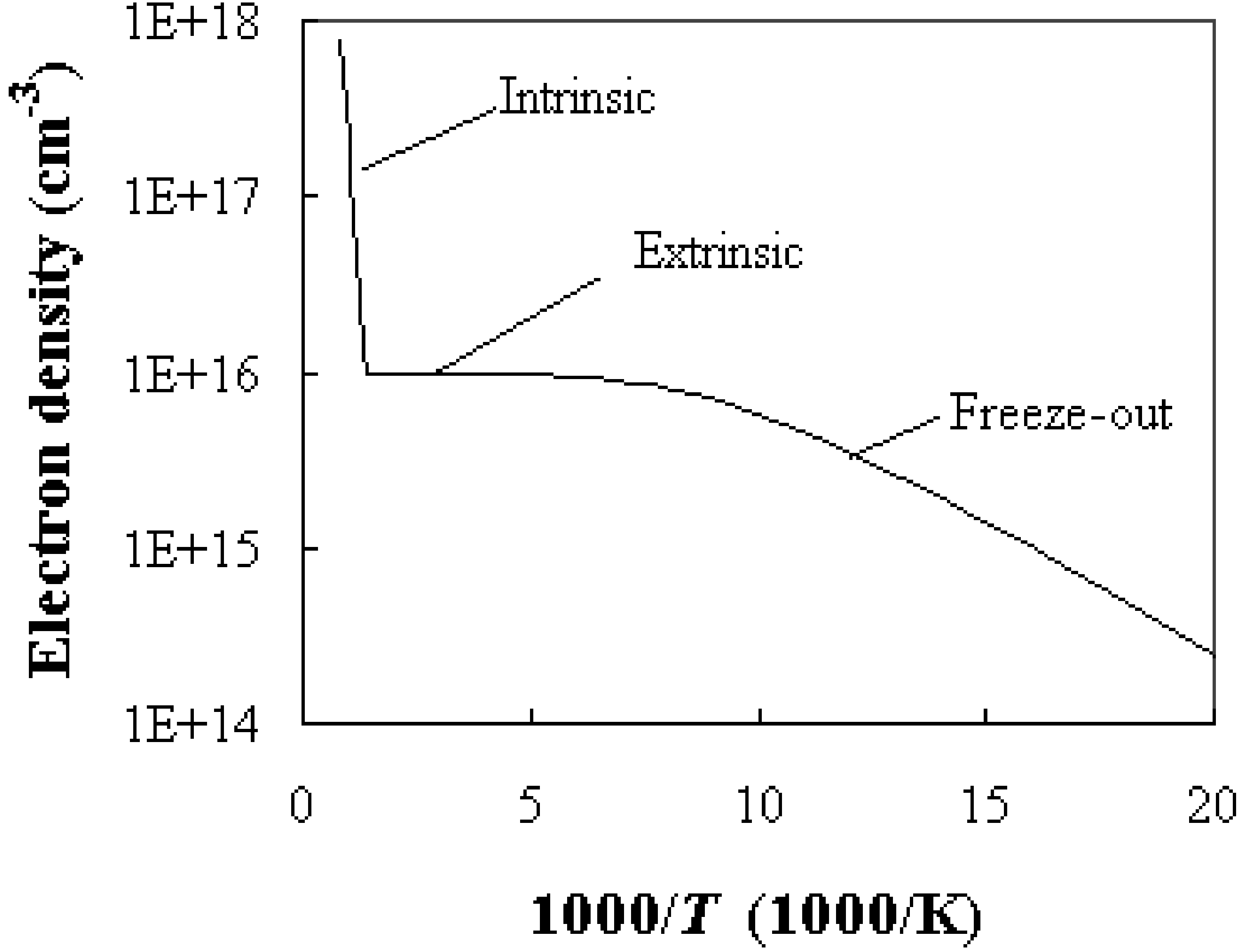
On écrira également n et p en fonction de l'écart entre $E_F$ et $E_i$,




$$n = N_C(T)\exp[(E_F - E_C)/k_BT] \qquad p = N_V(T)\exp[(E_V - E_F)/k_BT]$$

$$np = N_cN_v\exp(-E_g/kT) = A = n_i^2 \qquad p \approx n_i^2 \ / \ N_D$$

**Dans l'AN, on trouve de l'ordre de $10^{10}$ trous / $m^3$, soit encore de l'ordre de 10 trous par $mm^3$, ce qui est extrêmement faible.**

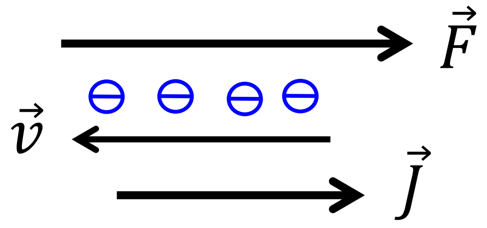


1E+18
1E+17
1E+16
1E+15
1E+14
Intrinsic
Extrinsic
Freeze-out
0
5
10
15
20
Electron density (cm$^{-3}$)
1000/*T* (1000/K)

4. On s’intéresse maintenant aux mécanismes de transport des porteurs. Rappeler pour l’un et l’autre type de porteurs l’expression de la densité de courant électrique, d’une part en présence d’un champ électrique et d’autre part en présence d’un gradient de densité de porteurs.

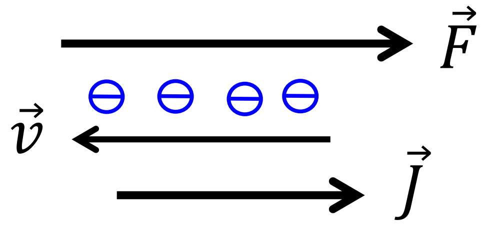
4. On s’intéresse maintenant aux mécanismes de transport des porteurs. Rappeler pour l’un et l’autre type de porteurs l’expression de la densité de courant électrique, d’une part en présence d’un champ électrique et d’autre part en présence d’un gradient de densité de porteurs.

courant de « dérive » : $\vec{J} = (n\mu_n + p\mu_p)|e|\vec{F}$



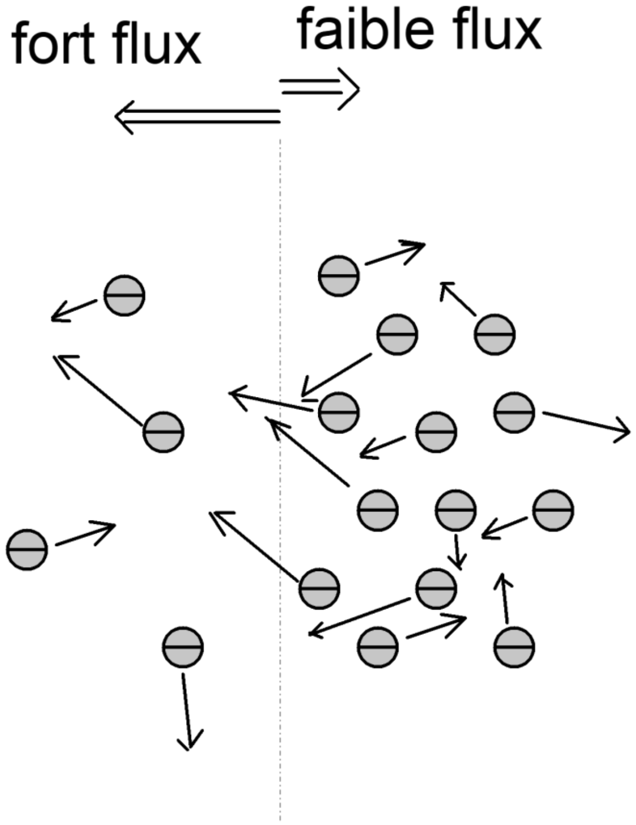
4. On s'intéresse maintenant aux mécanismes de transport des porteurs. Rappeler pour l'un et l'autre type de porteurs l'expression de la densité de courant électrique, d'une part en présence d'un champ électrique et d'autre part en présence d'un gradient de densité de porteurs.

courant de « dérive » : $\vec{J} = (n\mu_n + p\mu_p)|e|\vec{F}$



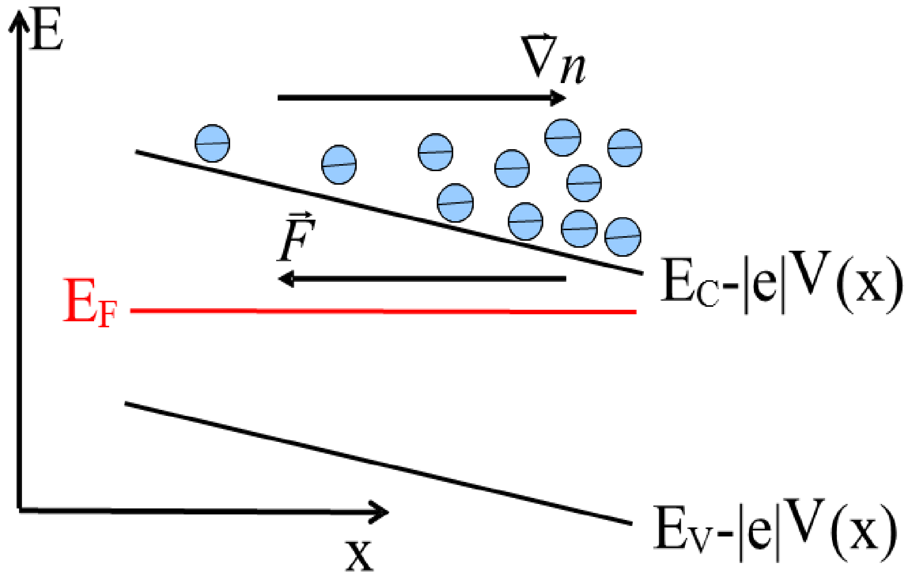

Courant de diffusion :
(ex. des électrons)

$$\vec{J}_{n,diff} = -eD_n\vec{\nabla}n \;=+|\mathrm{e}|\; D_n\vec{\nabla}n$$



5. On considère une zone du semiconducteur où coexistent un champ, électrique et un gradient de densité de porteurs. Dans le cas de l'équilibre thermodynamique, montrer qu'il en résulte une relation entre le coefficient de diffusion et la mobilité (relation d'Einstein).

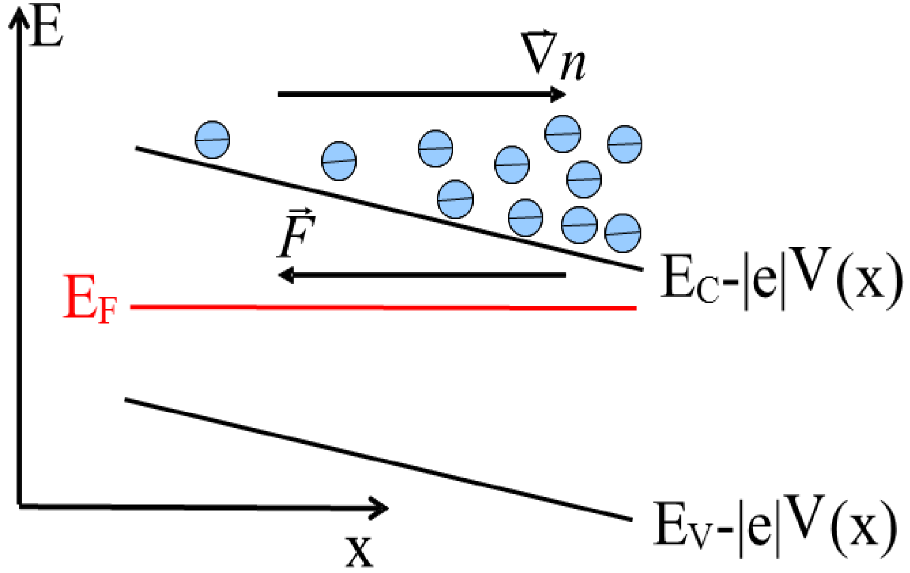
$$\vec{J}_n = |e|(D_n \vec{\nabla} n + n\mu_n \vec{F})$$



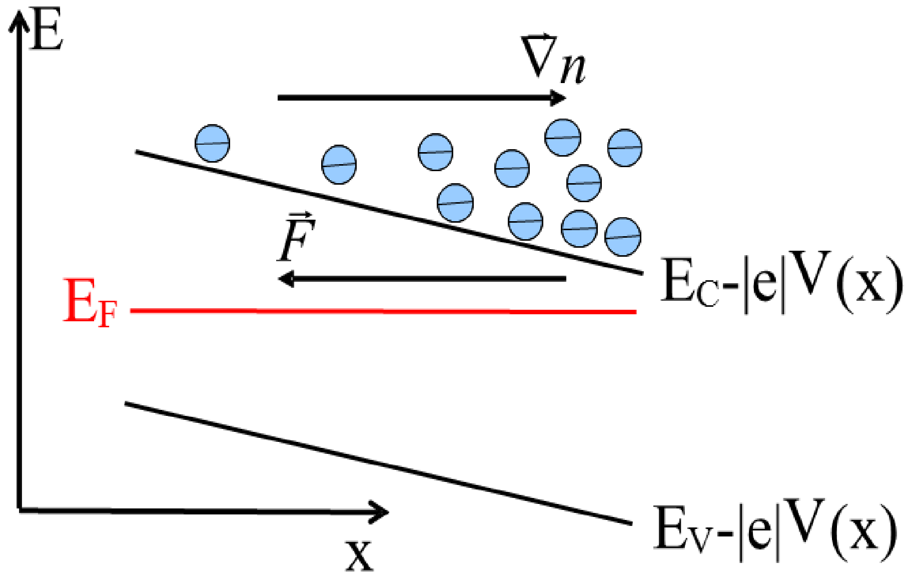
5. On considère une zone du semiconducteur où coexistent un champ, électrique et un gradient de densité de porteurs. Dans le cas de l'équilibre thermodynamique, montrer qu'il en résulte une relation entre le coefficient de diffusion et la mobilité (relation d'Einstein).

$$\vec{J}_n = |e|(D_n \vec{\nabla} n + n\mu_n \vec{F}) \quad = \vec{0} \quad \text{à l'équilibre}$$

$$D_n \frac{dn}{dx} - n\mu_n \frac{dV}{dx} = 0 \qquad\qquad \frac{dn}{dx} = n \frac{\mu_n}{D_n} \frac{dV}{dx}$$



5. On considère une zone du semiconducteur où coexistent un champ, électrique et un gradient de densité de porteurs. Dans le cas de l'équilibre thermodynamique, montrer qu'il en résulte une relation entre le coefficient de diffusion et la mobilité (relation d'Einstein).

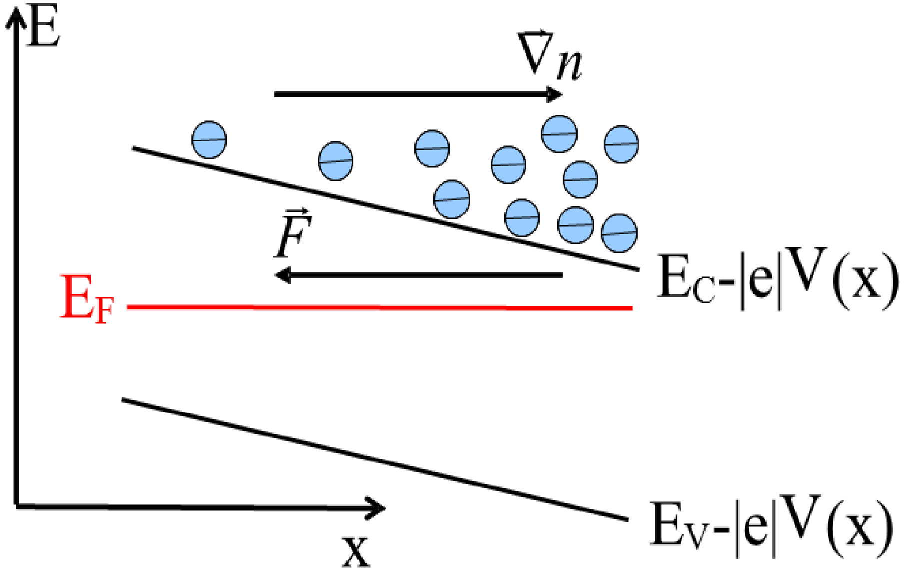



$$\vec{J}_n = |e|(D_n \vec{\nabla} n + n\mu_n \vec{F}) \quad = \vec{0} \quad \text{à l'équilibre}$$

$$D_n \frac{dn}{dx} - n\mu_n \frac{dV}{dx} = 0 \qquad \frac{dn}{dx} = n \frac{\mu_n}{D_n} \frac{dV}{dx}$$

$$n(x) = \int \quad exp\left[-\frac{(E - |e|V(x) - E_F)}{k_B T}\right] \rho_{BC}(E)\, dE = n_0\, exp\left[\frac{|e|V(x) + E_F}{k_B T}\right]$$

5. On considère une zone du semiconducteur où coexistent un champ, électrique et un gradient de densité de porteurs. Dans le cas de l'équilibre thermodynamique, montrer qu'il en résulte une relation entre le coefficient de diffusion et la mobilité (relation d'Einstein).




$$\vec{J}_n = |e|(D_n \vec{\nabla} n + n\mu_n \vec{F}) \quad = \vec{0}$$ à l'équilibre

$$D_n \frac{dn}{dx} - n\mu_n \frac{dV}{dx} = 0 \qquad \frac{dn}{dx} = n\frac{\mu_n}{D_n}\frac{dV}{dx}$$

$$n(x) = \int \quad exp\left[-\frac{(E - |e|V(x) - E_F)}{k_B T}\right]\rho_{BC}(E)\, dE = n_0\, exp\left[\frac{|e|V(x) + E_F}{k_B T}\right]$$

$$\frac{dn}{dx} = \frac{n|e|}{k_B T}\frac{dV}{dx}$$

$$D_n = \frac{k_B T}{|e|}\mu_n$$ Relation d'Einstein