III. Le déplacement des charges

A. La conduction

1. Notions

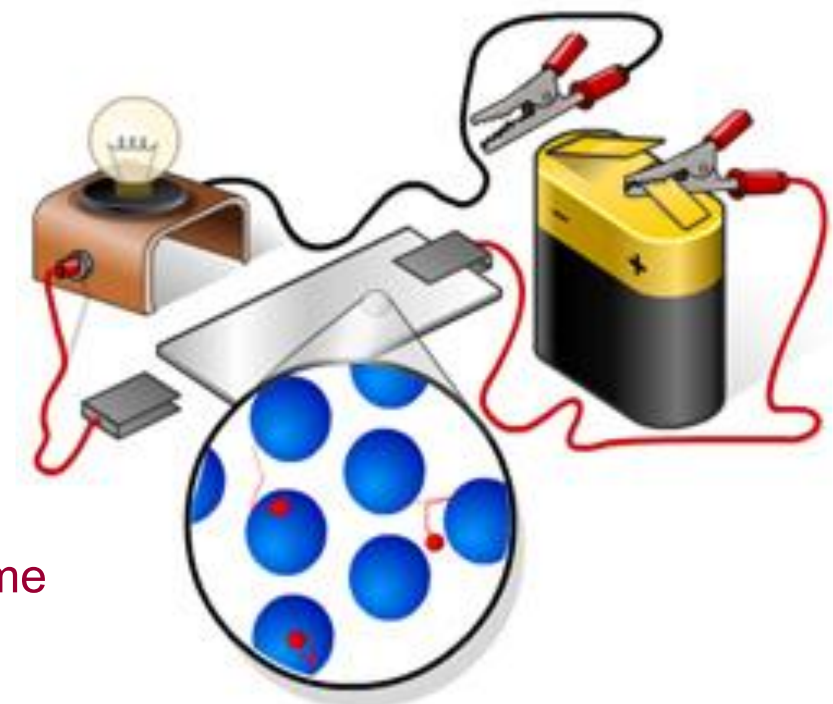
Dans la plaquette de Si, on trouve :

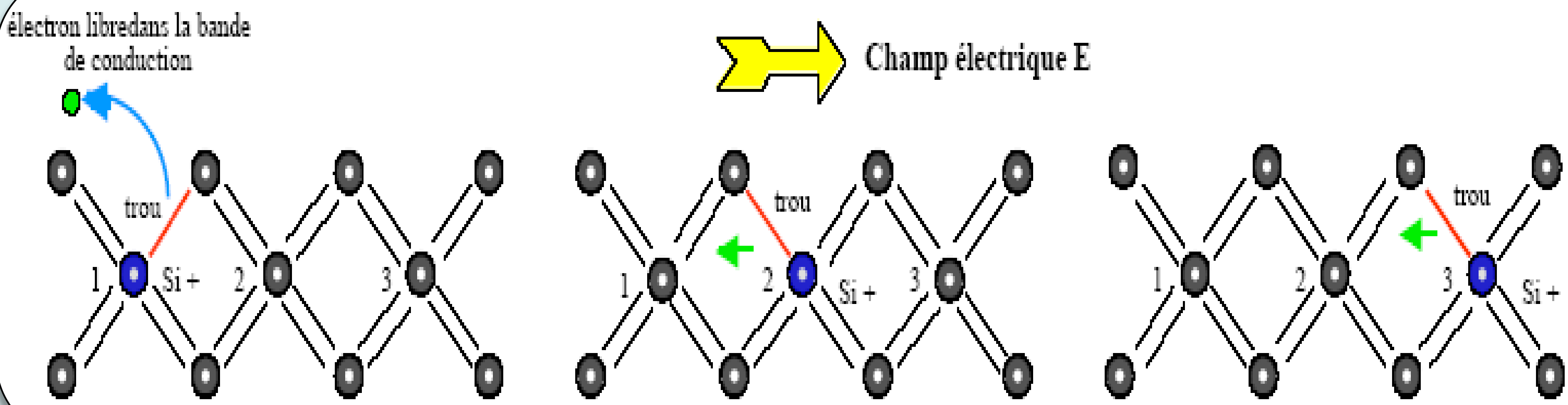
- les atomes de Si (immobiles)
- Les porteurs de charges (mobiles)

e- sur la BC

h+ sur la BV

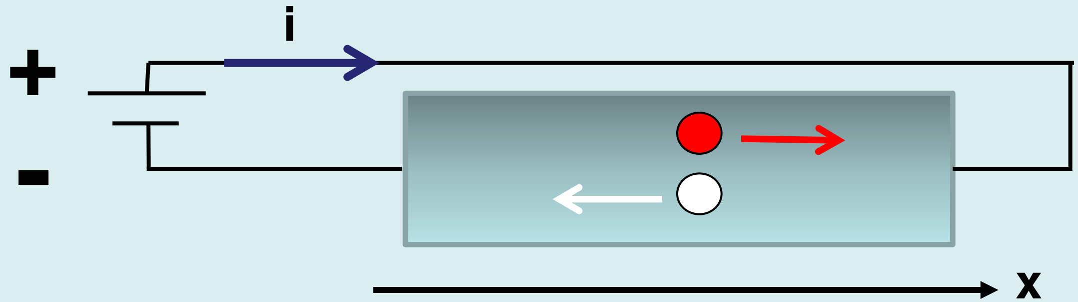
Ces porteurs de charges passent d'un atome a un autre.





a. Représentation dans l'espace « physique »

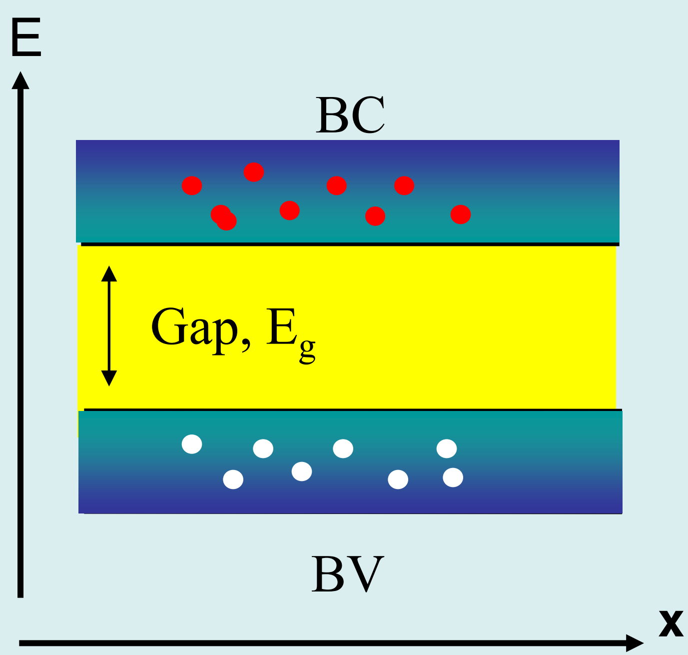
Soit un morceaux de Si semi-conducteur, aux extrémités duquel on branche un générateur de potentiel.

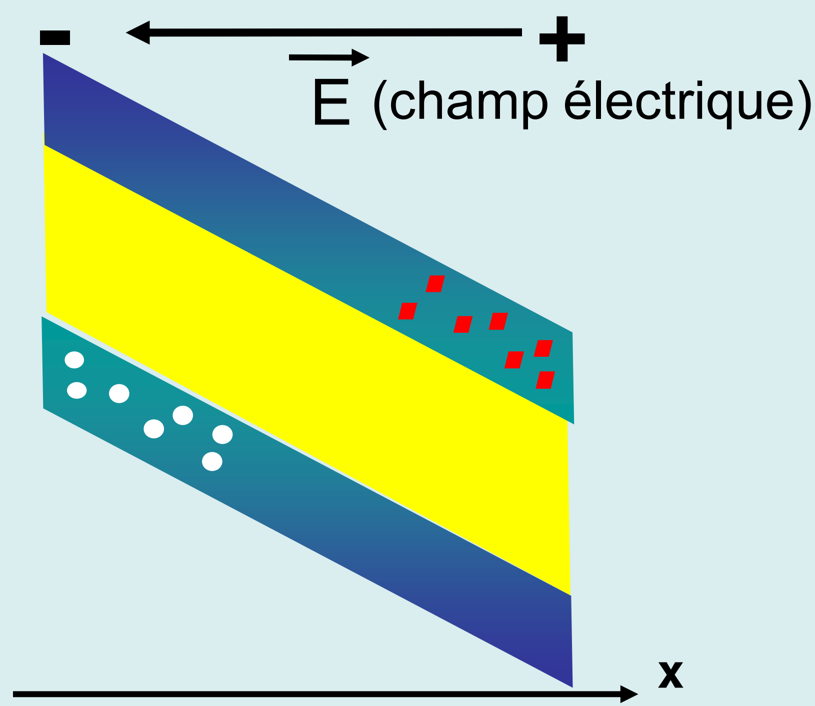


e- (électron)

h+ (trou)

b. Représentation mixte énergétique / espace physique (E, x)





c. Vitesse de dérive ; Mobilité

Le courant électrique est donc un déplacement des charges libres sous l'action d'un champ électrique $\vec{E}$

La force qui s'exerce sur la charge est (Coulomb) : $\boxed{\vec{F} = q\,\vec{E}}$

La charge est donc animée d'une vitesse v : $\vec{v}_n$ pour l'électron

v est appelée « dérive »

$\vec{v}_p$ pour le trou

$$\boxed{\begin{array}{l} \vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \\ \vec{v}_P = +\mu_P \vec{E} \end{array}}$$

μ : la mobilité

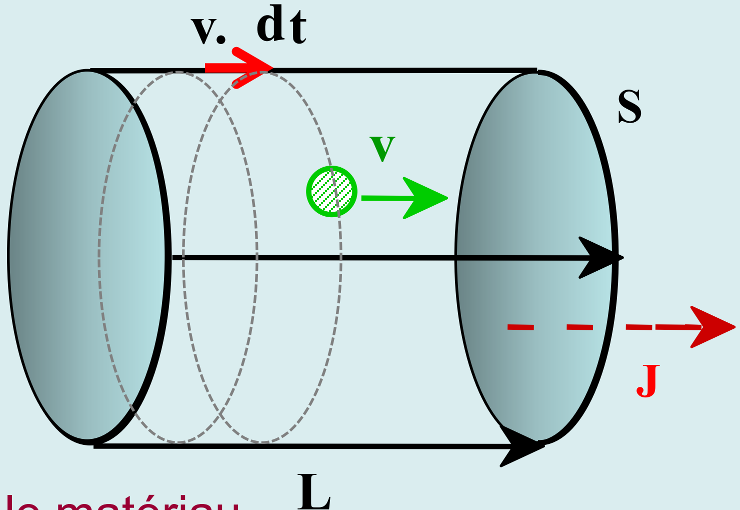
On peut définir un courant de conduction.

C'est le nombre de charges « passant » par seconde.

Analogie : flux de voitures sur une autoroute (nb. de voiture traversant un plan perpendiculaire à la route, par seconde)

2. Courant de conduction. Conductivité. Loi d’Ohm microscopique

a. Calcul d’un flux



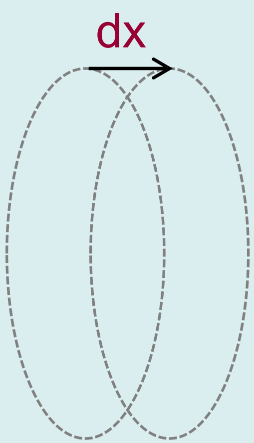
Soit un morceaux cylindrique d’un semi-conducteur.
Section **S** (surface des extrémités)
Longueur **L**

Soit une charge mobile, animée d’une vitesse **v**.

Soit **C** la concentration en porteurs de charge dans le matériau (exprimée en nb. d’électron / cm^3, ou en nb. de trou / cm^3).

Soit Γ la concentration en charges dans le matériau

Γ **= q.C**, avec q = -e pour un électron, et q = +e pour un trou



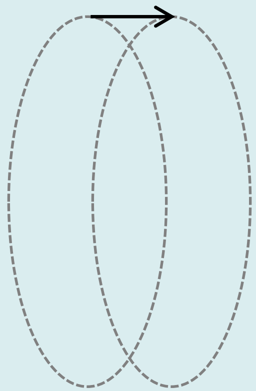
La charge parcourt une distance dx = v.dt pendant un temps dt.

Le volume de la « tranche » de matériaux est **V** = S.dx = S.v.dt

Soit **Q** le nombre de charges dans le matériau.
Q = Γ**.V**
Q = q.C.V = q.C.S.L = q.C.S.v.t

b. Densité de courant J ; Conductivité σ

$$Q = q.C.V = q.C.S.L = q.C.S.v.t$$



Puisque q, C, S et v sont constantes,

$$dQ = q.C.S.v.dt$$

$$dQ = \pm eC.S.v.dt$$

Soit J_c le flux surfacique de charge :

$$J_c = \frac{1}{S}\frac{dQ}{dt}$$ (par définition d'un flux)

$$\boxed{\vec{J_c} = q\,C\,\vec{v}}$$

- **Électrons :** dans ce cas, C = n et q = -e

$$J_{n,c} = -e.n.v_n = +\,e.n.\mu_n.E$$

$$J_{n,c} = \sigma_n.E$$

avec $\sigma_n = e.n.\mu_n$

- **Trous :** dans ce cas, C = p et q = +e

$$J_{p,c} = +\,e.p.v_p = +\,e.p.\mu_p.E$$

$$J_{p,c} = \sigma_p.E$$

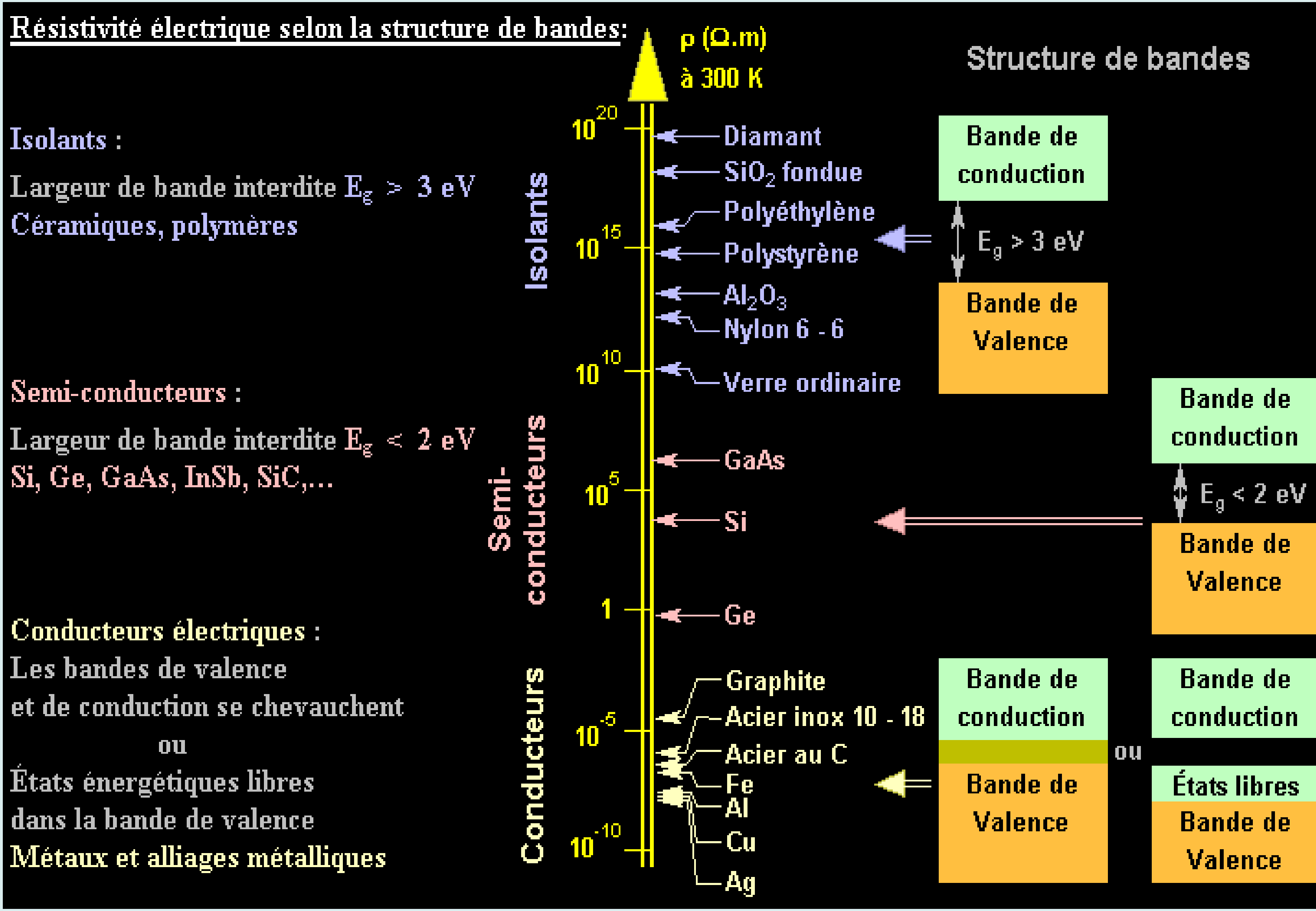
avec $\sigma_p = e.p.\mu_p$

- **Total (loi d'Ohm microscopique):**

$$\boxed{J_c = \sigma.E \quad \text{avec } \sigma = e.(n.\mu_n + p.\mu_p)}$$

La conductivité σ s'exprime en $(\Omega\,.cm)^{-1} = S.cm^{-1}$ $\quad \Omega = C.V^{-1}.s^{-1}$ et $S = \Omega^{-1}$

c. Quelques valeurs de résistivité ($\rho = 1 / \sigma$)



3. Conductivité en fonction de T (et du gap)

a. Quelques valeurs de mobilités

Mobilité à T = 300°K	électrons ($cm^2 V^{-1} s^{-1}$)	trous ($cm^2 V^{-1} s^{-1}$)
Ge	3900	1900
Si	1500	475
GaAs	8500	400

b. Expression

La mobilité varie en $AT^{-3/2}$

On montre donc que : $\mu(T) = \mu(T_0) \times (T/T_0)^{-3/2}$

varie lentement avec T (et diminue)

On sait que n_i varie avec T et E_g

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

varie rapidement avec T (et augmente)

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

On montre donc que :

$$\boxed{\sigma = \sigma_0 \exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right]}$$

On considère que σ varie en exponentielle de $-T^{-1}$

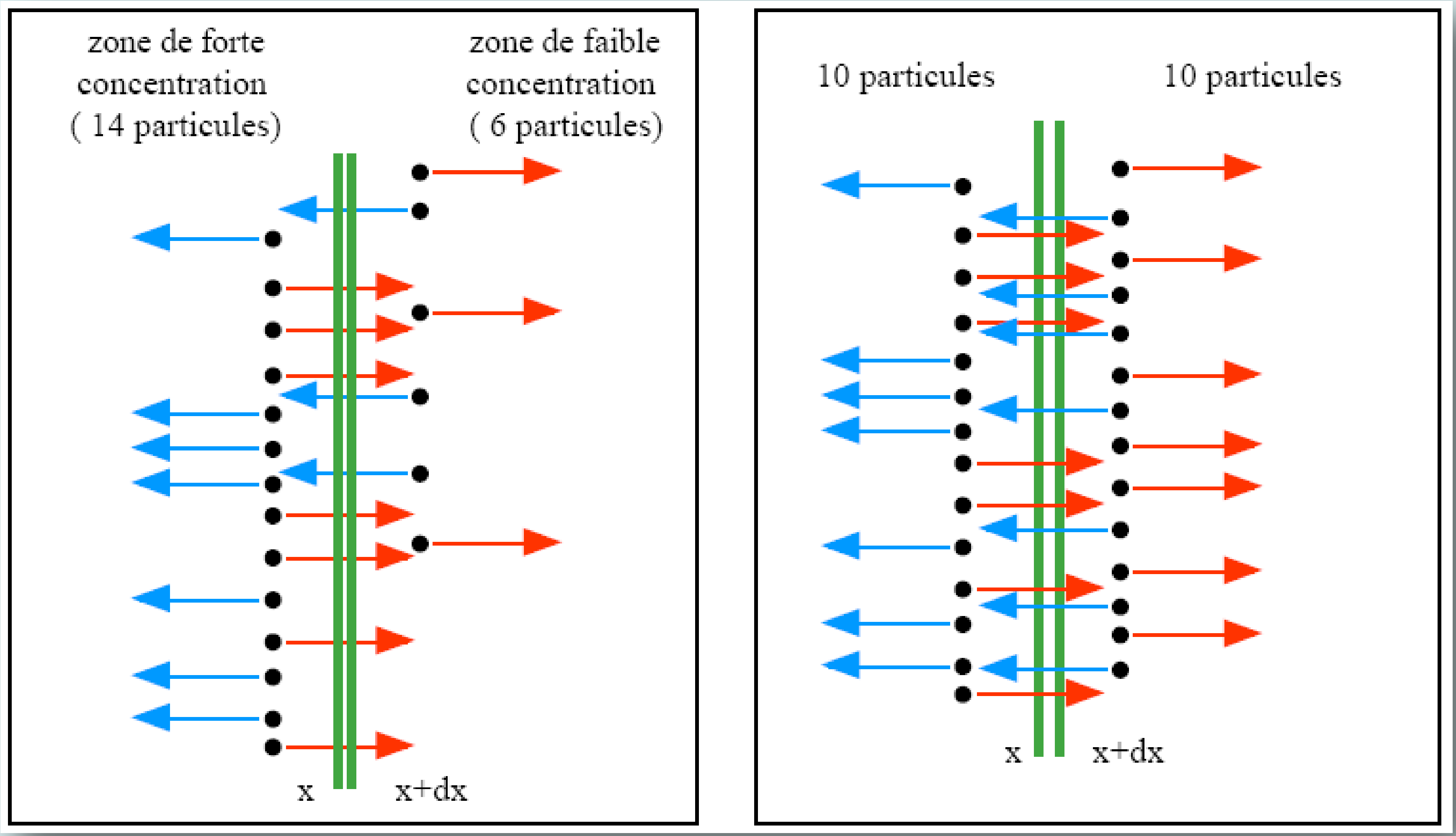
B. La diffusion

1. Illustration du phénomène

Animation

2. Notions

C’est le déplacement de charge sous l’action d’une différence de concentration (verser une goutte d’eau colorée dans de l’eau pure ⟶ diffusion



Statistiquement, les particules se déplacent au hasard. 50% de chance d’aller à droite, 50% de chance d’aller à gauche. Mais s’il y a + de particules à gauche, + iront à droite ! Jusqu’à l’équilibre (autant à gauche qu’à droite)

3. Courant de diffusion. Loi de Fick

La loi qui régit la diffusion : loi de Fick $\vec{\Phi} = -D\ \overrightarrow{\mathrm{grad}}\ C$

Φ est le flux de particules, dont la concentration est C

D est le « coefficient de diffusion » de l'espèce mobile

$\overrightarrow{\mathbf{grad}}$ est l'opérateur « gradient », soit $\overrightarrow{\mathrm{Grad}} \left| \begin{array}{l} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{array} \right.$

(la diffusion a lieu dans les 3D de l'espace)

Au lieu du flux on peut définir un courant (pour des particules, chargées q)

$$\boxed{\vec{J}_d = -q\,D\,\overrightarrow{\mathrm{grad}}\ n}$$

(analogue à la conduction $\vec{J}_c = q\,n\,\vec{v}$)

Si on se limite à une seule dimension (x par exemple) :

$$\boxed{\vec{J}_{d,x} = -q\,D\,\frac{\partial n}{\partial x}\,\vec{x}}$$

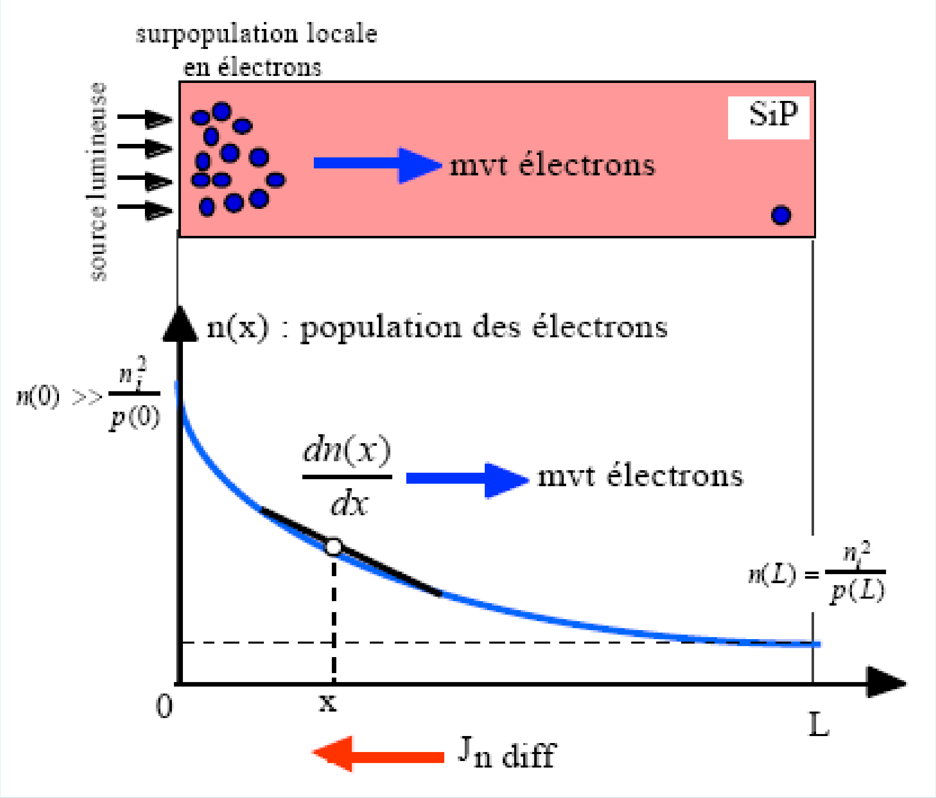
On a 2 types de porteurs : les trous (q = +e) et les électrons (q = -e)

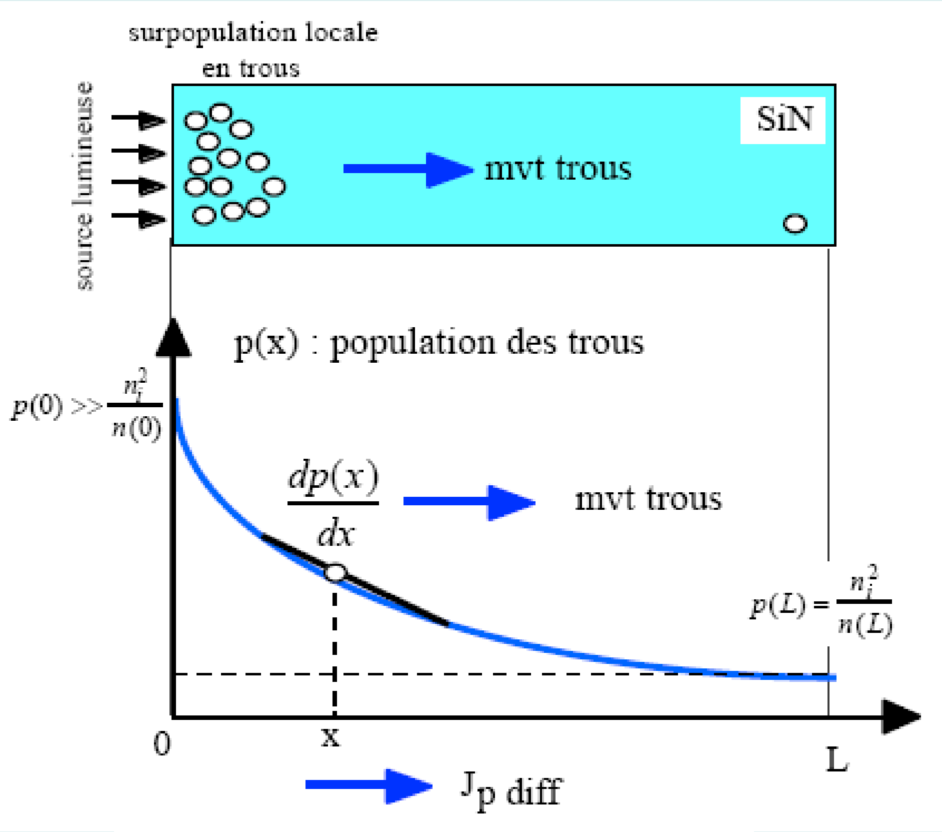
$$\boxed{J_{n,x} = +e\,D_n\,\frac{\partial n}{\partial x} \qquad J_{p,x} = -e\,D_p\,\frac{\partial p}{\partial x}}$$

4. Exemple. Surpopulation par illumination

Illustration de la loi de Fick :

On illumine le côté d'un semicon n ou p ⇨ Surpopulation en h^+ ou e^-





$$n(x) = n(0)\ exp\ (-\frac{x}{L_n})$$

$$p(x) = p(0)\ exp\ (-\frac{x}{L_p})$$

L_n et L_p représentent la « longueur de diffusion » des e^- et des h^+