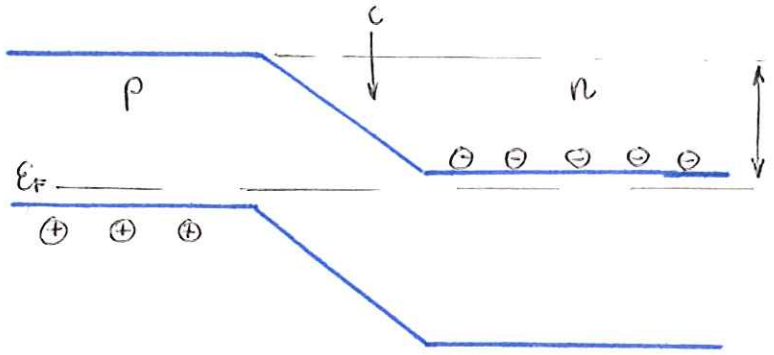
ETATS HORS D'EQUILIBRE

1 Rappels !



zone de charge d'espace

$$n_n = N_D = N_C \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_{Fn}}{kT}\right) \quad \text{zone } n$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = N_C \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_{Fp}}{kT}\right) \quad \text{zone } p$$

$$\frac{n_p}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_A N_D} = \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_{Fp}}{kT} + \frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_{Fn}}{kT}\right)$$

$$n_p = n_n \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_{Fn} - \mathcal{E}_{Fp}}{kT}\right)$$

$$= n_n \exp\left(-\frac{e|\Delta V|}{kT}\right) \qquad e = |q|$$

Vrai aussi de la zone intermédiaire.

2 Courant de conduction

Champ électrique : $\vec{E}$ → densité de courant $\vec{J}$

→ $\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho}\vec{E}$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ici porteurs mobiles : e^-_{BC} + $V_{trous\,BV}$

e^-_{BC} : vitesse $\vec{v_n}$ ⇒ $\vec{J_e} = n q_n \vec{v_n}$

→ $\vec{v_n} = \mu_n \vec{E}$ $\quad \mu_n = 0{,}15 \ m^2/V/s$

→ $\vec{j_e} = n q_n \mu_n \vec{E}$

+ pour les trous : $\boxed{\vec{j} = n q_n \mu_n \vec{E} + p q_p \mu_p \vec{E}}$

en C : champ électrique ⇗ : $E \sim 10^6$ V/m
$n \simeq 10^{22}$; 10^{24} m^{-3} $\quad \mu = 0{,}15$

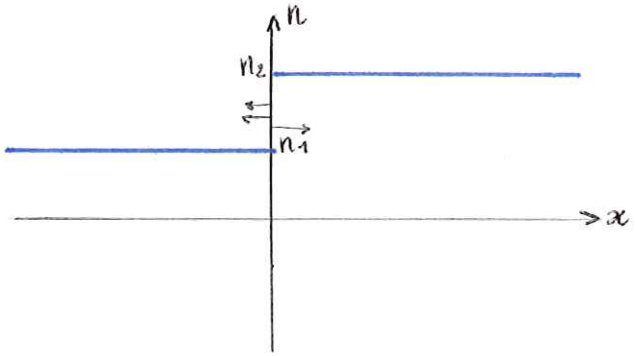
$\Big\}$ $j = 10^{22} 10^{-19} 10^{-1} 10^6 = 10^8 \ A m^{-2}$
$= 10^2 \ A/mm^2$

grâce à l'éq → $\vec{j} = 0$!! → pas d'éq.

3 Courant de diffusion

le courant de conduc est compensé exactement par le courant de diffusion = si densité variable de particules.

n s'étonne qd $n \sim p$: densité variable.



chaque entité microscopique est en mvt par agitation thermique.

en $x = 0$: + d'é venant de la droite que venant de la gauche.

droite $\xrightarrow{n^b e^-}$ gauche $= f(n_2)$
gauche $\xrightarrow{n^b e^-}$ droite $= f(n_1)$
$\Big\}$ courant net droite → gauche

→ Fick : $\boxed{\vec{j} = -q D_n \frac{\partial n}{\partial x}}$ $\quad D_n$ = coeff de diffusion

le courant de diffusion doit compenser la conduct° :

$$\vec{j} = n q \mu_n \vec{E} - q D_n \frac{\partial n}{\partial x} = 0$$

$$\rightarrow \quad n \mu_n \frac{\partial V}{\partial x} + D_n \frac{\partial n}{\partial x} = 0$$

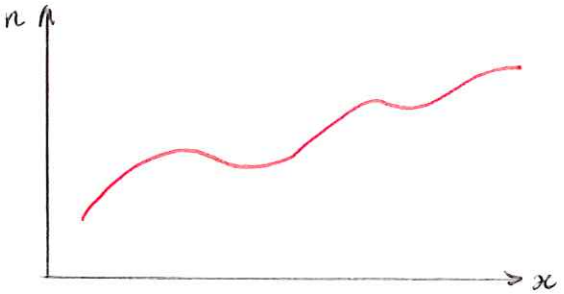
$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} = - \frac{\mu_n}{D_n} \frac{\partial V}{\partial x}$$

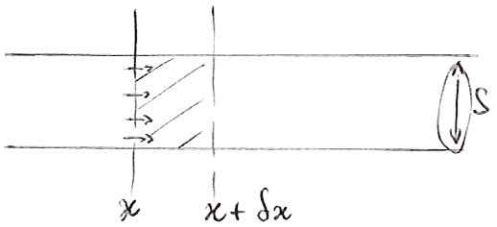
$$\rightarrow \quad n = n_0 \, e^{-\frac{\mu_n}{D_n} V} \quad \rightarrow \quad \frac{\mu_n}{D_n} = \frac{q_n}{kT}$$

$$\rightarrow \quad \boxed{D_n = \mu_n \frac{kT}{q_n}} \qquad Si : D_n = 3{,}9 \; 10^{-3} \; m^2/s$$

relat° d'Einstein

4 Equat° de la diffusion





évolut° de la charge ds la branche $S.dx$

$$\rightarrow \quad \delta Q = q \, \delta n \, \delta x \, S$$

$$= j(x) \, S \, \delta t - j(x+dx) \, S \, \delta t$$

$$= - S \, \delta t \, \frac{\partial j}{\partial x} \, \delta x$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad \frac{\delta n}{\delta t} = q \frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x}$$

$$\vec{j} = - q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad \rightarrow \quad q \frac{\partial n}{\partial t} = q D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

→ $\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}}$ 1D

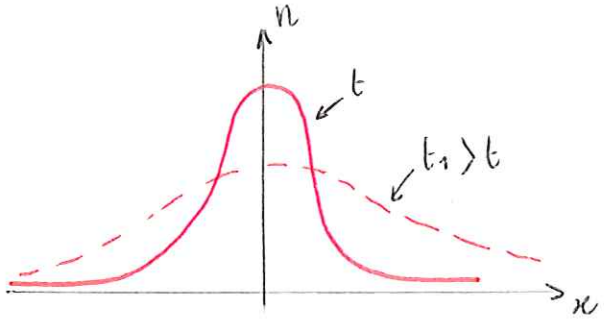
3D : $\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \Delta n$

solution : $n(x,t) = \frac{A}{\sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$ ①

$n(x,t) = n_0 \, \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ ②

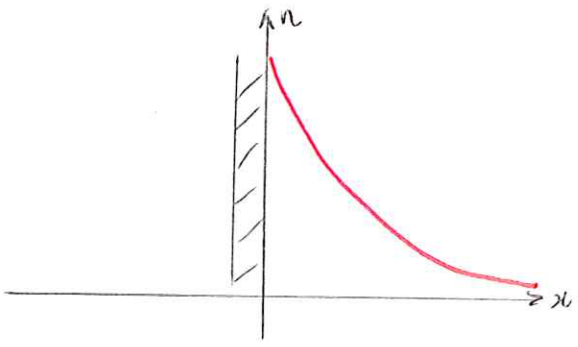
$\mathrm{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-s^2} ds$

pour ① :



diffusion à C_0 au départ

pour ② :

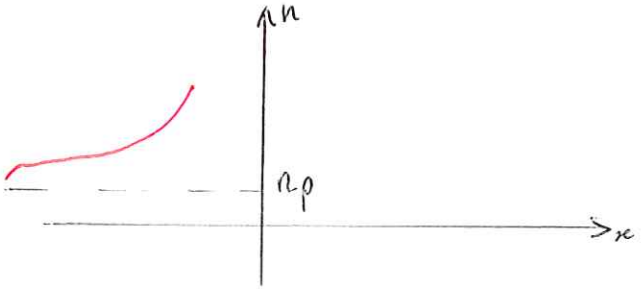


$x = 0 \rightarrow n(0,t) = 0$

diffusion à [ ] constante à l'interface.

5 Longueur de diffusion

$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$



au phénom de diffusion se superpose 1 2ème phénom, de recombinaison des porteurs e⁻/trous.

si $n \neq n_p$: recombinaisons ayant tendance à ramener le cristal en posⁿ d'éq.

$n > n_p$: n^b e^- ↓ par recombinaison
$n < n_p$: tendance à générat° de paires électrons trous, $n^b e^-$ ↗

Ce retour à l'éq sera d'autant + rapide qu'on est loin de l'éq (grad ↗)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -K(n - n_p) = -\frac{n - n_p}{\tau}$$

τ = dée de t de recombinaison

En 1 pt : recombinaison + diffusion

$$\rightarrow \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{rec} + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{diff}$$

$$\rightarrow \boxed{\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right) = -\frac{n - n_p}{\tau} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}}$$

en 1 pt où il n'y a pas de courant de conduct°.

intéressant : stationnaires $\Rightarrow$ $\frac{n - n_p}{\tau} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$

$$\rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{1}{L^2}(n - n_p)} \quad \text{avec } L^2 = D_n \tau$$

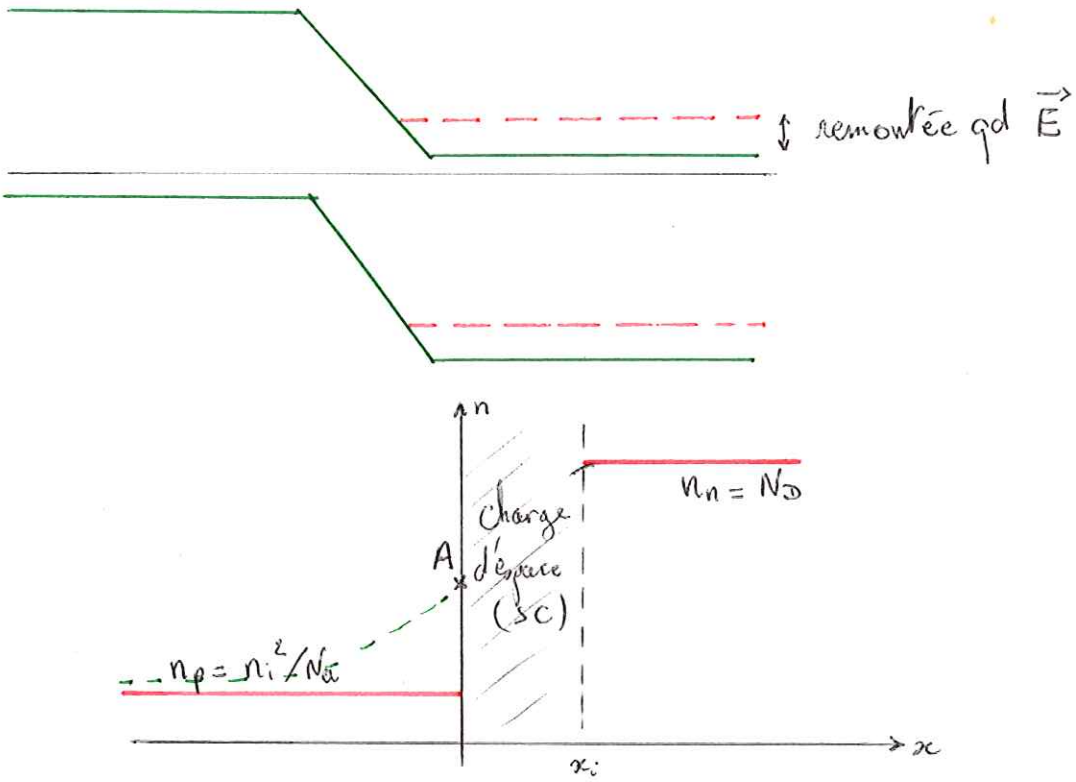
$$n - n_0 = A e^{\frac{x}{L}} + B e^{-\frac{x}{L}}$$

L = longueur de diffusion : caractéristique du SC.

Si indus : $L \simeq 10, 50\ \mu m$
AsGa indus : $L \simeq 1 ; 3\ \mu m$

On veut généralement $L > 0,1\ \mu m$ car si τ ↓↓ : instrumentalisable.

courant ds 1 j P.N. : applicat°



n = densité de porteur en x

on admet : décroissance de la densité en e⁻ ds SC : selon la loi de Boltzmann.

mais : $n(x=0) = n_p\, e^{\frac{qV}{kT}}$

→ recombinaison des e⁻ en trop.

loi de décroissance ($x<0$) : $n(x) - n_p = A\, e^{x/L} + B\, e^{-x/L}$

loi de diffusion

$$n(x=0) - n_p = A = n_p\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

$$\rightarrow\quad n(x) = n_p + n_p\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) e^{x/L}$$

→ le courant traversant la jonct° est le courant de diffusion.

$$\rightarrow\quad j = -q\, D_n \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_{x=0}$$

$$= -\frac{q D_n}{L}\, n_p \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

$n_p p_p = n_i^2 \qquad p_p = N_A$

$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$

$$\rightarrow \boxed{j = -\frac{q D_n n_i^2}{N_A L_n}\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)}$$

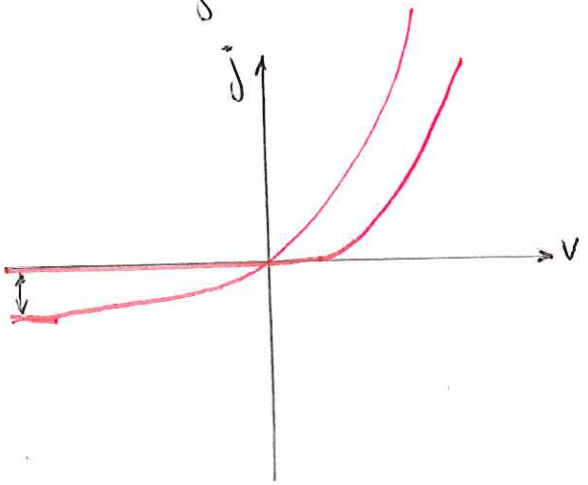
id pour le trous.

éq : $V = 0 \rightarrow j = 0$

si $V \rightarrow -\infty \rightarrow j \rightarrow -1$ saturation

si $V \rightarrow +\infty \rightarrow j \rightarrow +\infty$

} → propriété de redresseur

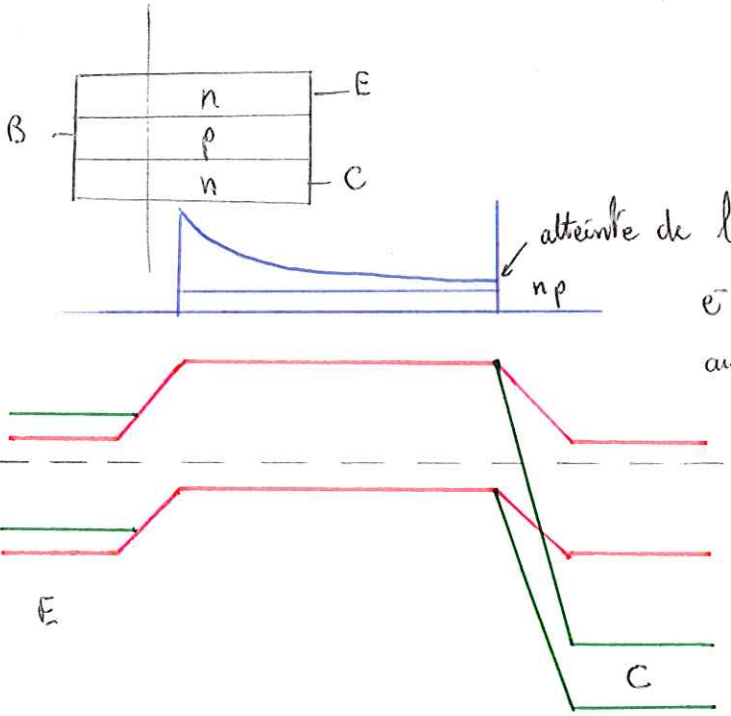


les 2 courbes sont identiques, seule l'échelle varie

ce qui peut varier : N_A et L

il faut L // pour $\vec{j}_{inv}$ ↓

transistor bipolaire :



atteinte de la jonction C-B pour tous les e⁻ émis par l'émetteur qui auront pu diffuser à travers la base.

sous champ

si mise en champ (polarisat° émetteur / base) : apparit° d'1 courant, pouvant être piloté par 1 courant de base très ↘. Courant EC contrôlé par la diffusion ds la base (tension à laquelle est portée la base).