# PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

Chapitre 4

# Conductivité – Dérive dans un champ électrique

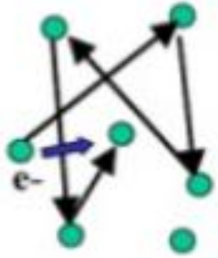
## Mobilité- Conductivité

Soit un cristal semi-conducteur contenant des électrons et trous libres de densité n et p.

En l'absense d'un champ électrique E la vitesse moyenne d'entrainement est nul:

Collisions multiples dues à l'agitation thermique d'origines:
- atomes du réseau
- impuretés ionisées
- défauts

$$\Rightarrow \langle v_{th} \rangle = 0$$




Trajectoire linéaire entre choc

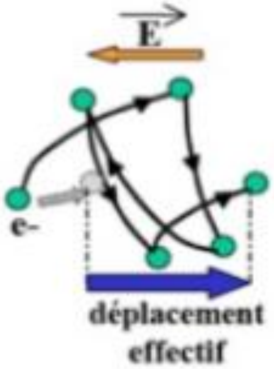
En présence d'un champ électrique E constant et uniforme, La force à laquelle est soumis l'électron est :

$$F = F_{appliquée}$$

$$\vec{F} = -q\vec{E} = m_0\vec{\gamma} = m_0\frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\vec{v}(t) = -\frac{q}{m_0}\vec{E}t$$

Trajectoire incurvée entre choc




Les porteurs ont une vitesse thermique moyenne, orientée dans toutes les directions de l'espace qui est légèrement modifiée en imposant une direction statistique préférentielle par la présence du champ électrique.

## La vitesse d'entraînement vaut donc:

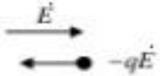
$$\langle v(t)\rangle = \langle v\rangle = -\frac{q}{m_0}\vec{E}\tau$$

Soit μ la mobilité: $\boxed{\mu = \frac{q\tau}{m_0}}$ $\Rightarrow$ $\boxed{\langle v\rangle = -\mu\vec{E}}$

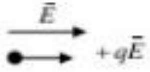
## Pour les Semiconducteurs:

Si $v \ll v_{th}$ ou E faible

$< \vec{v}_n >$ Vitesse moyenne des électrons $< \vec{v}_n > = -\mu_n\vec{E}$




$< \vec{v}_p >$ Vitesse moyenne des trous $< \vec{v}_p > = \mu_p\vec{E}$




$$\boxed{\mu_n = \frac{q\tau}{m_n^*}} \qquad \boxed{\mu_p = \frac{q\tau}{m_p^*}}$$

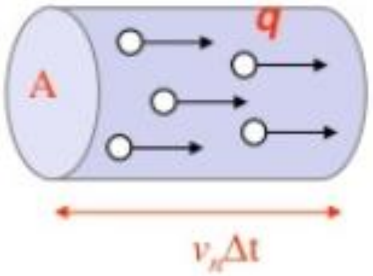
**μ(cm²/Vs)**

$m_p^*$ et $m_p^*$ sont les masses effectives de conduction

# La densité de courant de conduction

Courant causé par le champ électrique due aux électrons:

$$j = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t} = \frac{-qn\langle \upsilon_n \rangle \Delta t A}{A \Delta t}$$




$$j = -qn\langle \upsilon_n \rangle = -\frac{nq^2\tau_n}{m_n^*}E = nq\mu_n E \quad \text{(A/cm}^2\text{)}$$

Loi d'Ohm : $j = \sigma E$ $\Rightarrow$ $\boxed{\sigma_n = \frac{nq^2\tau_n}{m_n^*} = qn\mu_n}$ (due aux électrons seulement)

Courant total due aux électrons et aux trous:

$$\boxed{j = -qn\langle \upsilon_n \rangle + qp\langle \upsilon_p \rangle = \left(nq\mu_n + pq\mu_p\right)E = \sigma E}$$

$$\boxed{\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p}$$

**$j_n$ et $j_p$ sont les courants de dérive dans le champ électrique.**

Pour les trous, $$\boxed{\langle \upsilon_p \rangle = \frac{q\tau_p}{m_p^*}E = \mu_p E}$$ ( $\mu_p$ est la mobilité des trous)

La loi d'Ohm locale (microscopique) :

$$J_n = \frac{nq^2 E \tau_n}{m_n^*} = \sigma_n E$$ pour les électrons, et

$$J_p = \frac{pq^2 E \tau_p}{m_p^*} = \sigma_p E$$ pour les trous.

**Def:** Les conductivités électriques s'écrivent :

$$\sigma_n = \frac{nq^2 \tau_n}{m_n^*} = nq\mu_n \qquad (\Omega^{-1} cm^{-1})$$ pour les électrons, et

$$\sigma_p = \frac{pq^2 \tau_p}{m_p^*} = pq\mu_p \qquad (\Omega^{-1} cm^{-1})$$ pour les trous.

Le courant total étant la somme des courants de trous et d'électrons, la conductivité totale du matériau s'écrit naturellement:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$$

Le courant total étant la somme des courants de trous et d'électrons,

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = \frac{nq^2\vec{E}\tau_n}{m_n^*} + \frac{pq^2\vec{E}\tau_p}{m_p^*} =$$

$$= (\sigma_n + \sigma_p)\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

la conductivité totale du matériau s'écrit naturellement:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$$

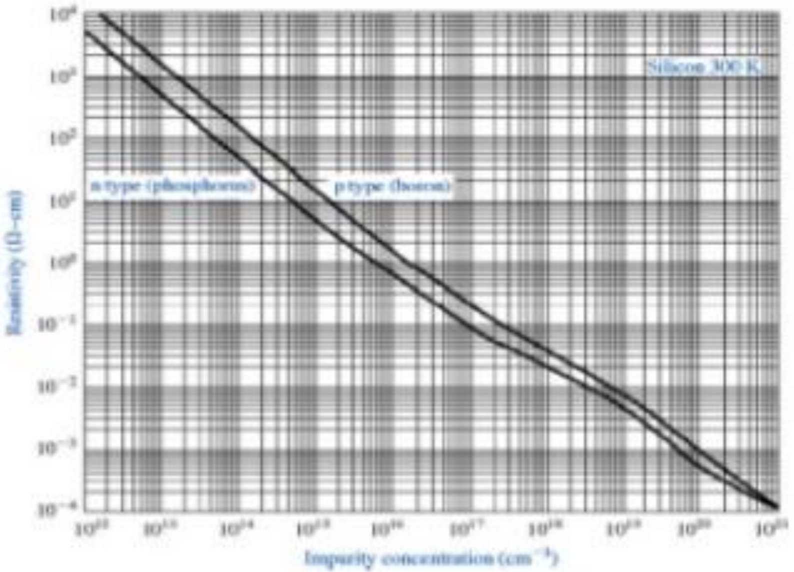
La résistivité ρ d'un matériau est l'inverse
de la conductivité σ

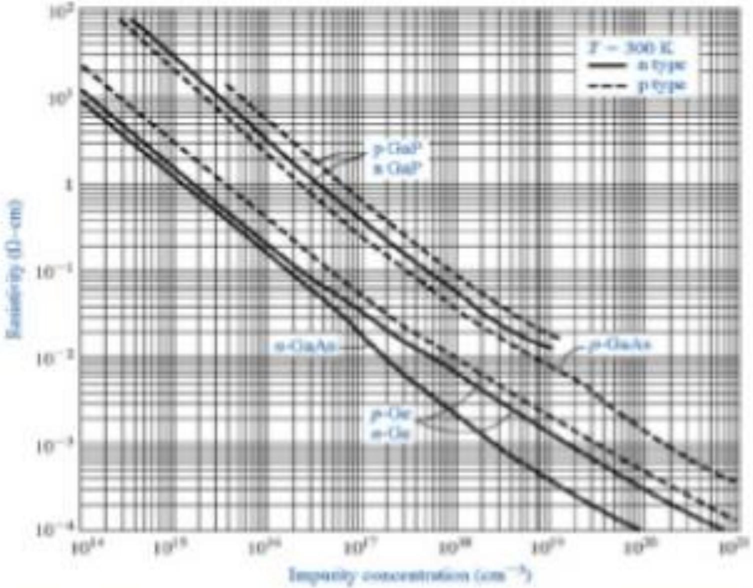
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (\Omega cm)$$

$$\rho_n = \frac{1}{qn\mu_n} \quad si \quad n >> p$$

$$\rho_p = \frac{1}{qp\mu_p} \quad si \quad p >> n$$

# Résistivité




- Cas du silicium intrinsèque à 300K :

  $\mu_n$=1350 cm²/V.s et $\mu_p$=480 cm²/V.s

  $p=n=n_i=1{,}5\ 10^{10}$ cm$^{-3}$

  $\rho=3{,}4\ 10^{5}$ Ωcm et

  $\sigma= 2{,}9\ 10^{-6}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$

- Cas du silicium dopé à 300K :

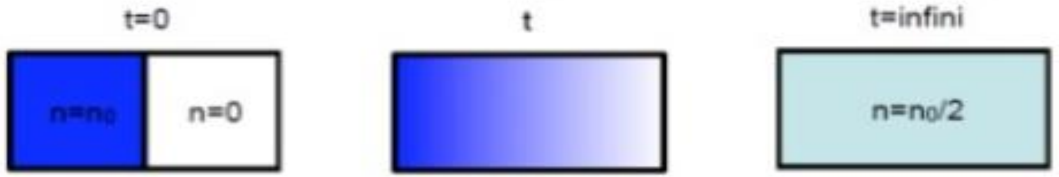
  $\mu_n$=280 cm²/V.s et $\mu_p$=90 cm²/V.s

  $n=N_D=10^{18}$ cm$^{-3}$ et $p=2{,}2\ 10^{2}$ cm$^{-3}$

  $\rho=2{,}2\ 10^{-2}$ Ωcm et

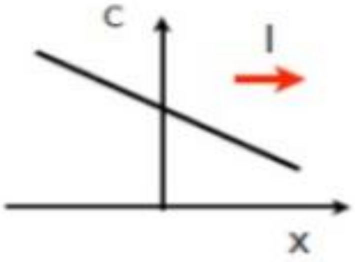
  $\sigma= 48\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$

# Diffusion des porteurs




Il apparaît un courant qui tend à homogénéiser la concentration

Ce courant est d'autant plus faible que la différence de concentration est faible (il tend vers 0 à l'équilibre)




$$I = \boxed{-}\boxed{\frac{\partial C(x)}{\partial x}}$$

négatif parce que les particules diffusent vers les régions de plus faible concentration

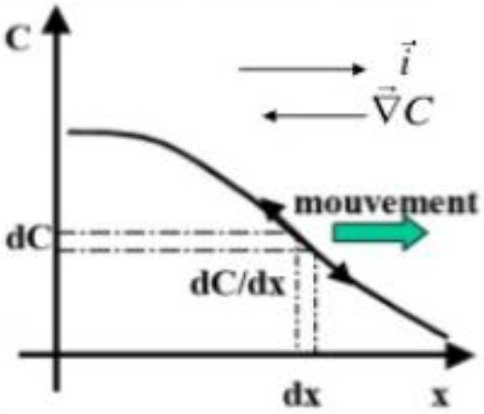
proportionnel au gradient de concentration

Il y a diffusion des régions de forte concentration vers les régions de faible concentrations

$$\vec{\nabla} C = \frac{\partial C}{\partial x} \vec{i}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} < 0$$

C : concentration de l'espèce




❑**Loi de Fick** : le mouvement des porteurs de charges s'effectuera dans une direction qui a tendance à uniformiser leur distribution spatiale. Ce phénomène est équivalent à celui de l'équilibre de la pression d'un gaz dans une enceinte.

(Loi de Fick) : ➔ $F = -D \vec{\nabla} C$ D : coefficient de diffusion ($cm^{-2}s^{-1}$)

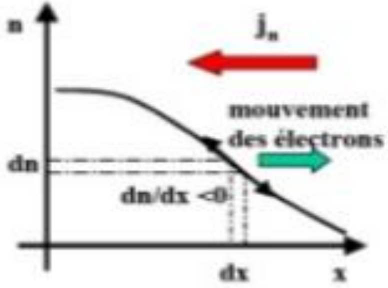
Le flux des particules F est proportionnel au gradient de concentration

❑Le signe( - ) vient du fait que pour qu'il y ait étalement, le gradient doit être < 0. Cette loi est générale et s'applique aussi bien aux électrons, aux trous , aux atomes et aux ions.

➢ **Courants de Diffusion** : En considérant macroscopiquement la diffusion des électrons et des trous, leur déplacement est équivalent à un courant. On peut donc exprimer les densités de courant de diffusion des électrons et des trous en multipliant le flux des porteurs par la charge élémentaire.

➢ **Cas des électrons :**

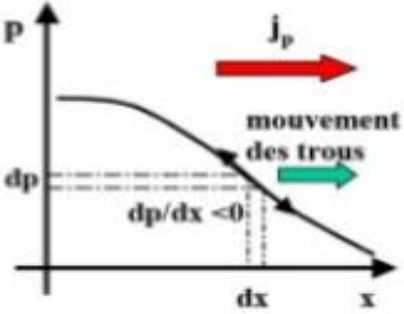
$$F_n = -\frac{1}{q}.J_{n,D} \qquad \rightarrow \qquad J_{n,D} = +q.D_n \vec{\nabla} n$$




$D_n$ : coefficient de diffusion des électrons.
Par convention la densité de courant est de sens opposé au déplacement des électrons. Les électrons étant de charge <0, se déplaçant vers les x>0, le gradient de concentration <0, la densité de courant est <0.

➢ **Cas des trous :**

$$F_p = \frac{1}{q}.J_{p,D} \qquad \rightarrow \qquad J_{p,D} = -q.D_p \vec{\nabla} p$$




$D_p$ : coefficient de diffusion des trous

Par convention la densité de courant est dans le même sens que celui des tous. Les trous étant de charge>0, se déplaçant vers les x>0, le gradient de concentration<0, la densité de courant est>0.

# Densité de courant de diffusion

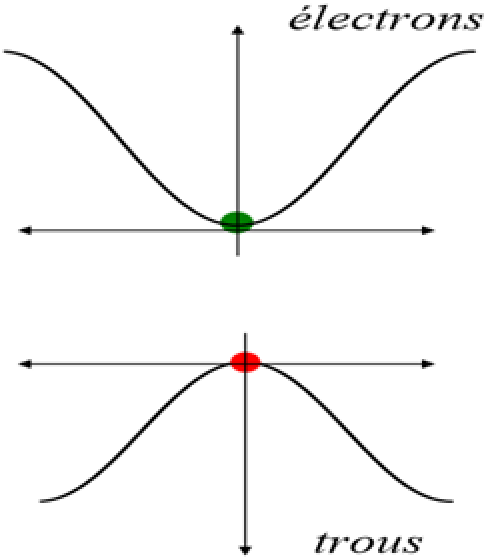
$$J_{n,D} = (-q).F_n = +q.D_n \vec{\nabla} n$$ Pour les électrons

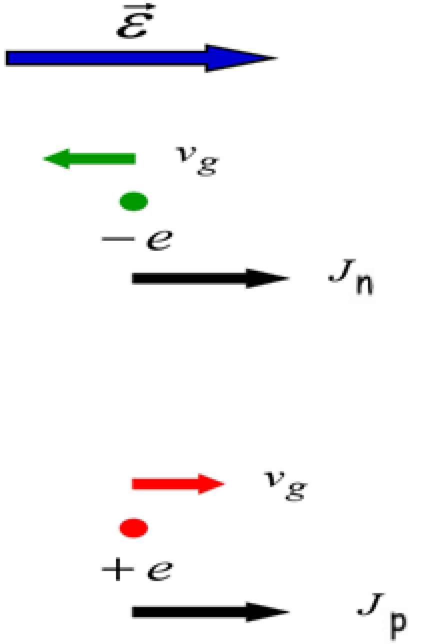
$$J_{p,D} = (+q).F_p = -q.D_p \vec{\nabla} p$$ Pour les trous

$$J_D = q.(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p)$$ Total

# Densité de courant total

**Électrons et trous**




$$J_{total} = J_n + J_p$$

- Densité de courant total d'électrons dans un semi-conducteur :

$$J_n = J_{n,deriv} + J_{n,Dif} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

- Densité de courant total de trous dans un semi-conducteur :

$$J_p = J_{p,deriv} + J_{p,Dif} = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

- Densité de courant total dans un semi-conducteur :

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = \sum_{n,p} J_{deriv} + \sum_{n,p} J_{diff}$$

- Les coefficients de diffusion s'expriment en $cm^2/s$. Ils sont de l'ordre de grandeur de l'unité et en général tels que $D_n > D_p$.

- Le modèle utilisé ici unidimensionnel permet de mener à bien des calculs analytiques.

# Relation d'Einstein

- A l'équilibre le courant de diffusion est équilibré par le courant de conduction:

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} = 0 \Rightarrow E(x) = \frac{D_P}{\mu_P}\frac{1}{p(x)}\frac{dp(x)}{dx}$$

On a $p(x) = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{kT} \left( \frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

car $E_F$ est constante à l'équilibre

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$

$$\boxed{\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}}$$

Relation d'Einstein