

PHYSIQUE DES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

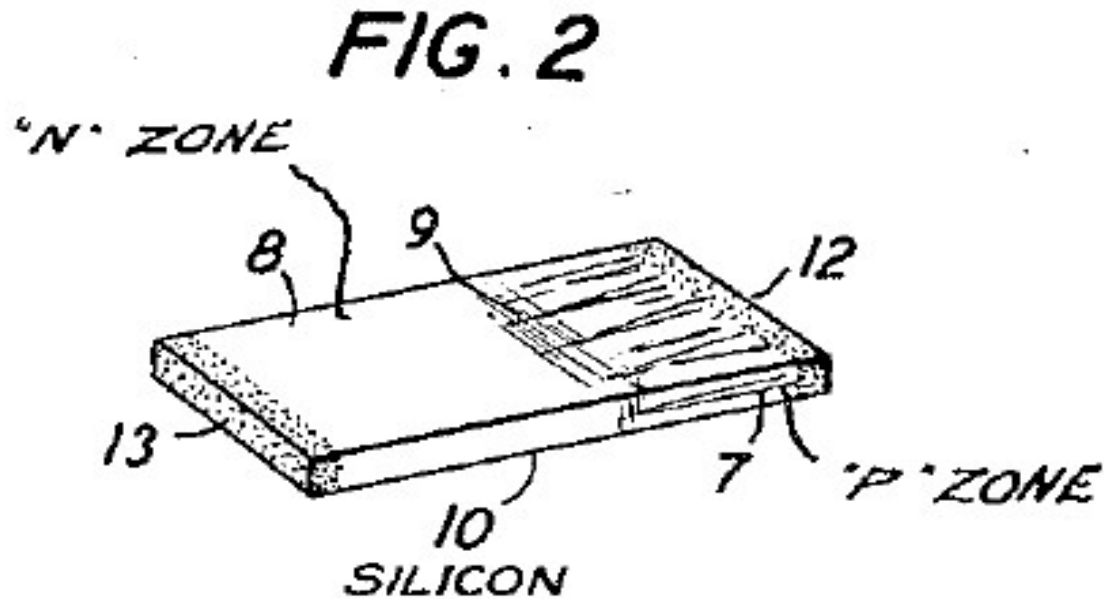
VI) Jonction p/n

P.A. Besse

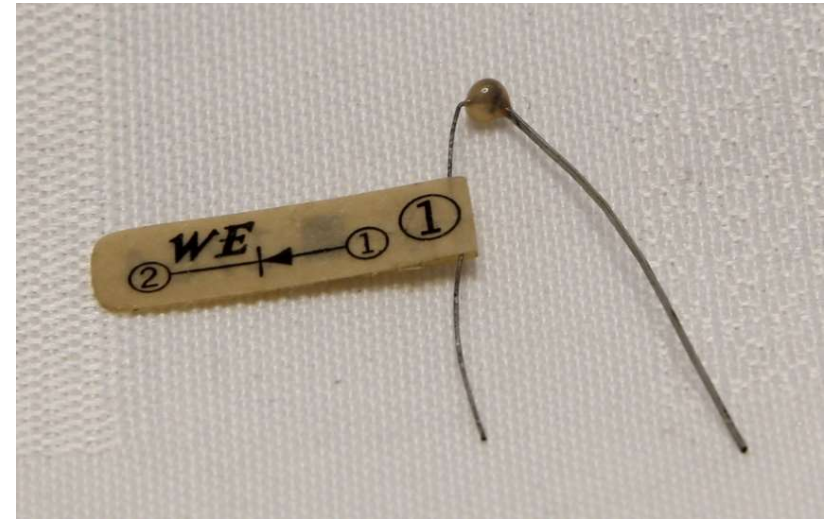
EPFL

1940 - Junction p/n Russel Ohl

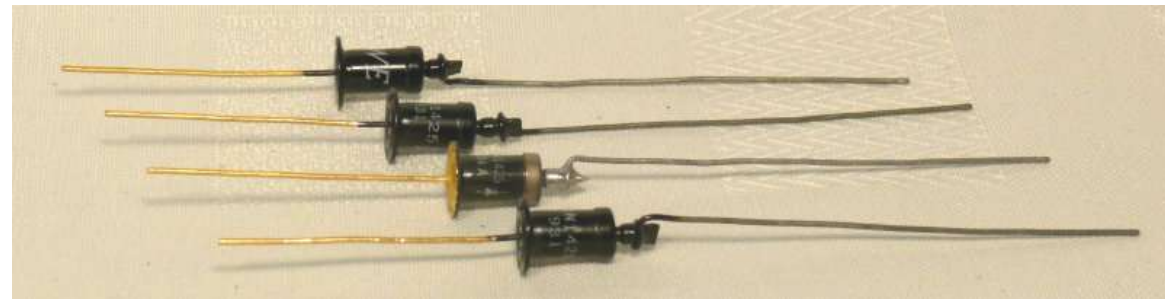
1952: Germanium PN diode (WE 1764)



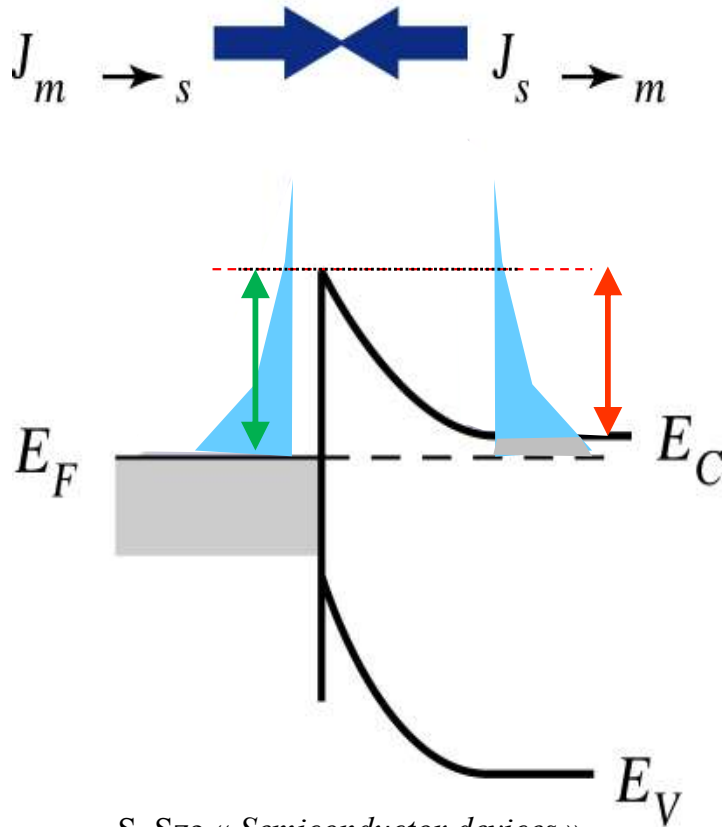
Ohl, US patent 1941



Germanium PN diode (WE 1N1425)



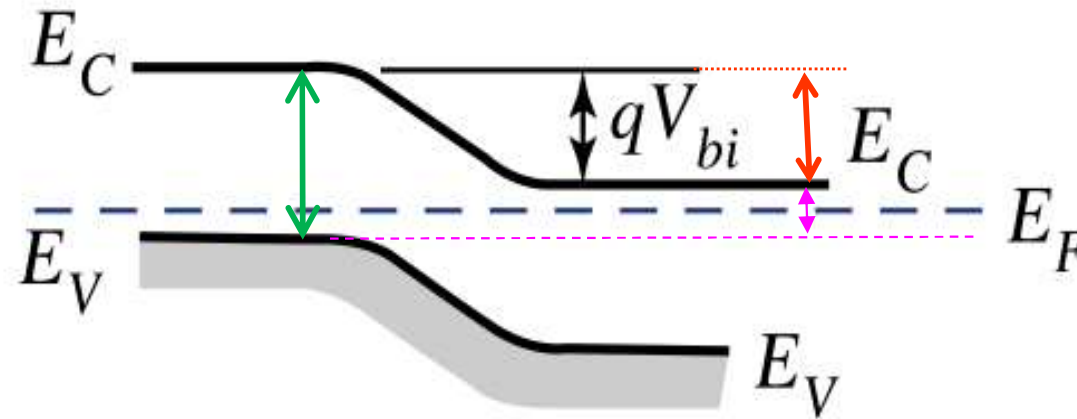
Jonction Schottky:
« courant direct »



S. Sze « *Semiconductor devices* »

$$J = J_s \cdot (e^{qV/kT} - 1)$$

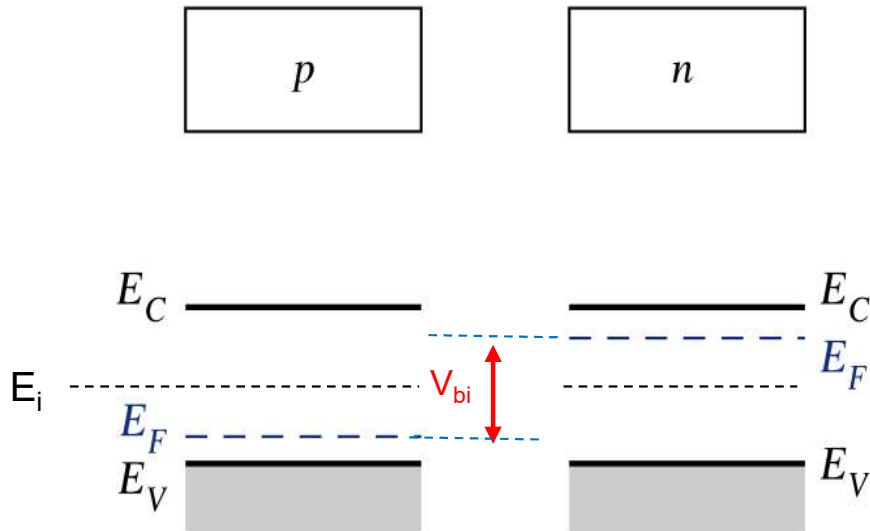
- Barrière « petite » ($\sim E_g/2$)
→ J_s élevé
- Injection de majoritaire
→ « thermalisation »
vitesse rapide

S. Sze « *Semiconductor devices* »

- Barrière « élevée » ($\sim E_g$)
→ J_s petit

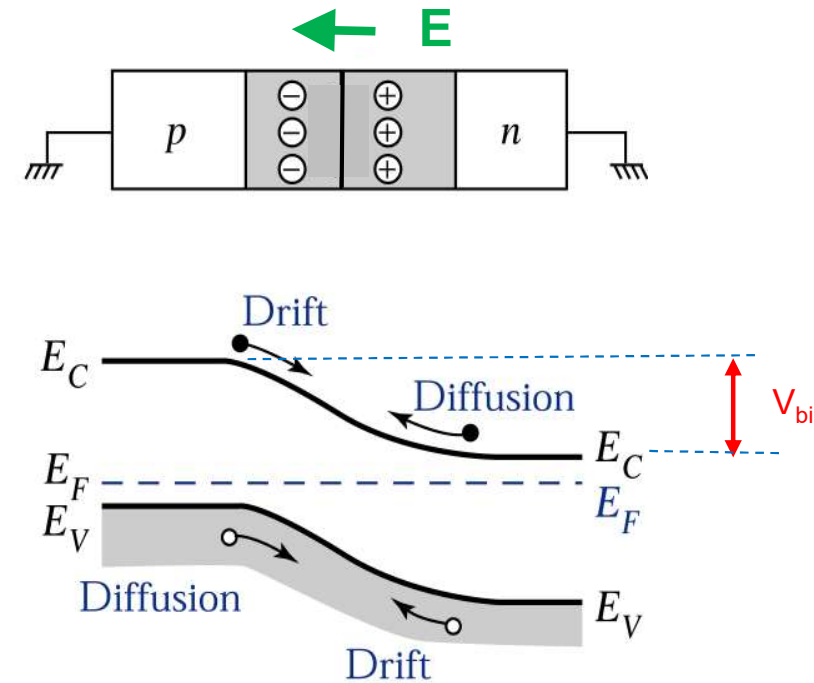
- Injection de minoritaires
→ « recombinaison »
vitesse lente

Régions p et n séparées



S. Sze
« Semiconductor devices »

Jonction p/n

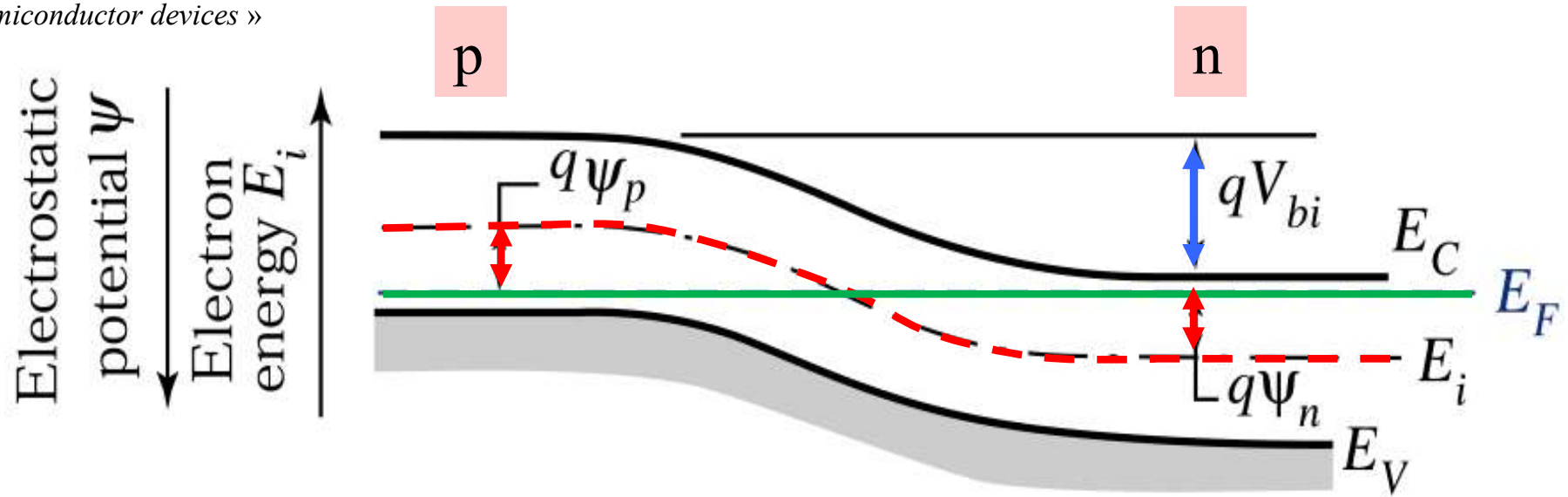


Le courant de diffusion crée une zone de déplétion.
Le champ électrique associé produit un courant de drift
et maintient le courant total nul et le niveau de Fermi constant.

Jonction p/n à l'équilibre: built-in potential

S. Sze

« Semiconductor devices »

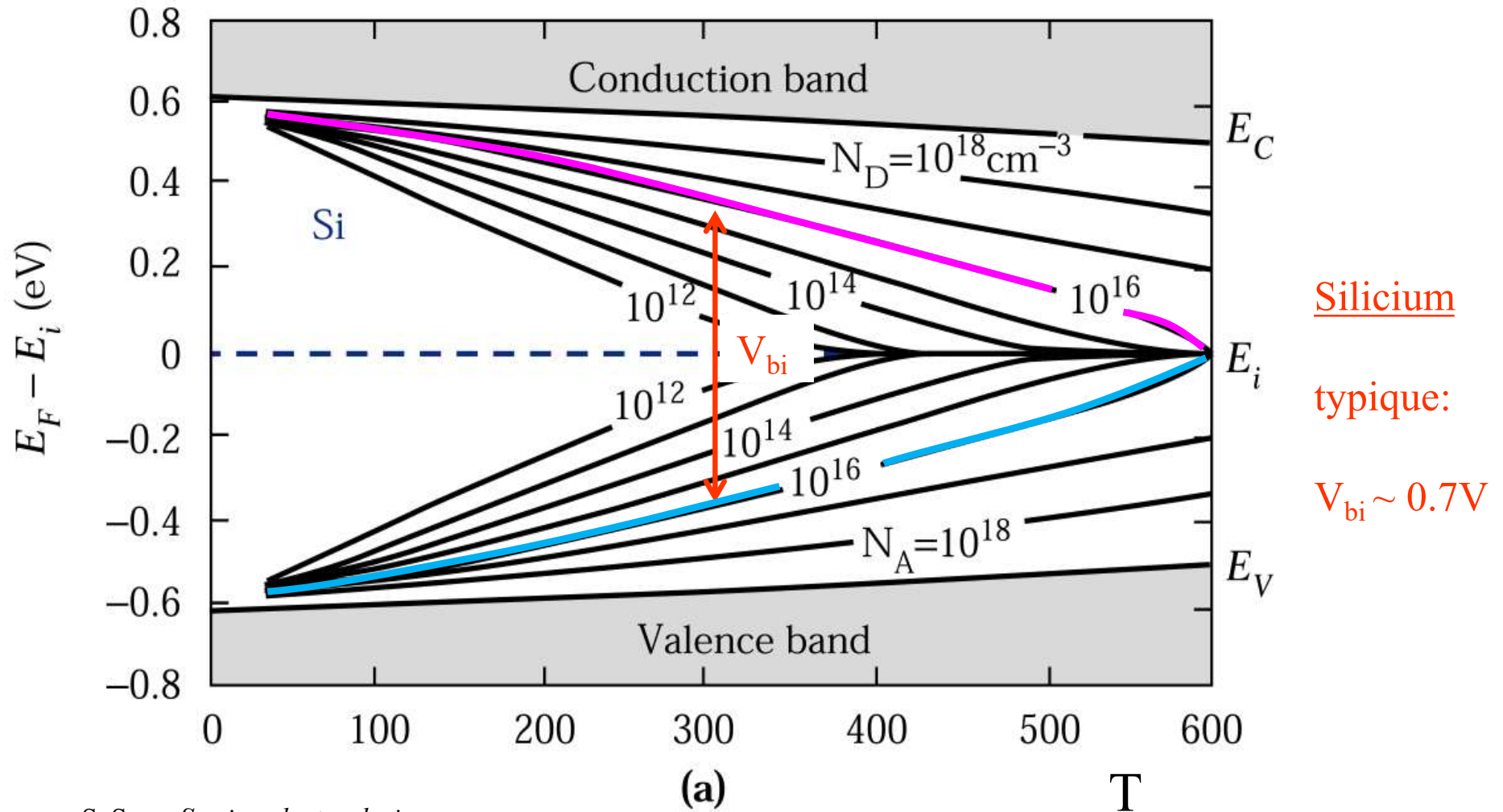


Il n'y a pas de courant à l'équilibre → E_F est constant

Le potentiel interne V_{bi} (« built-in ») est donné par:

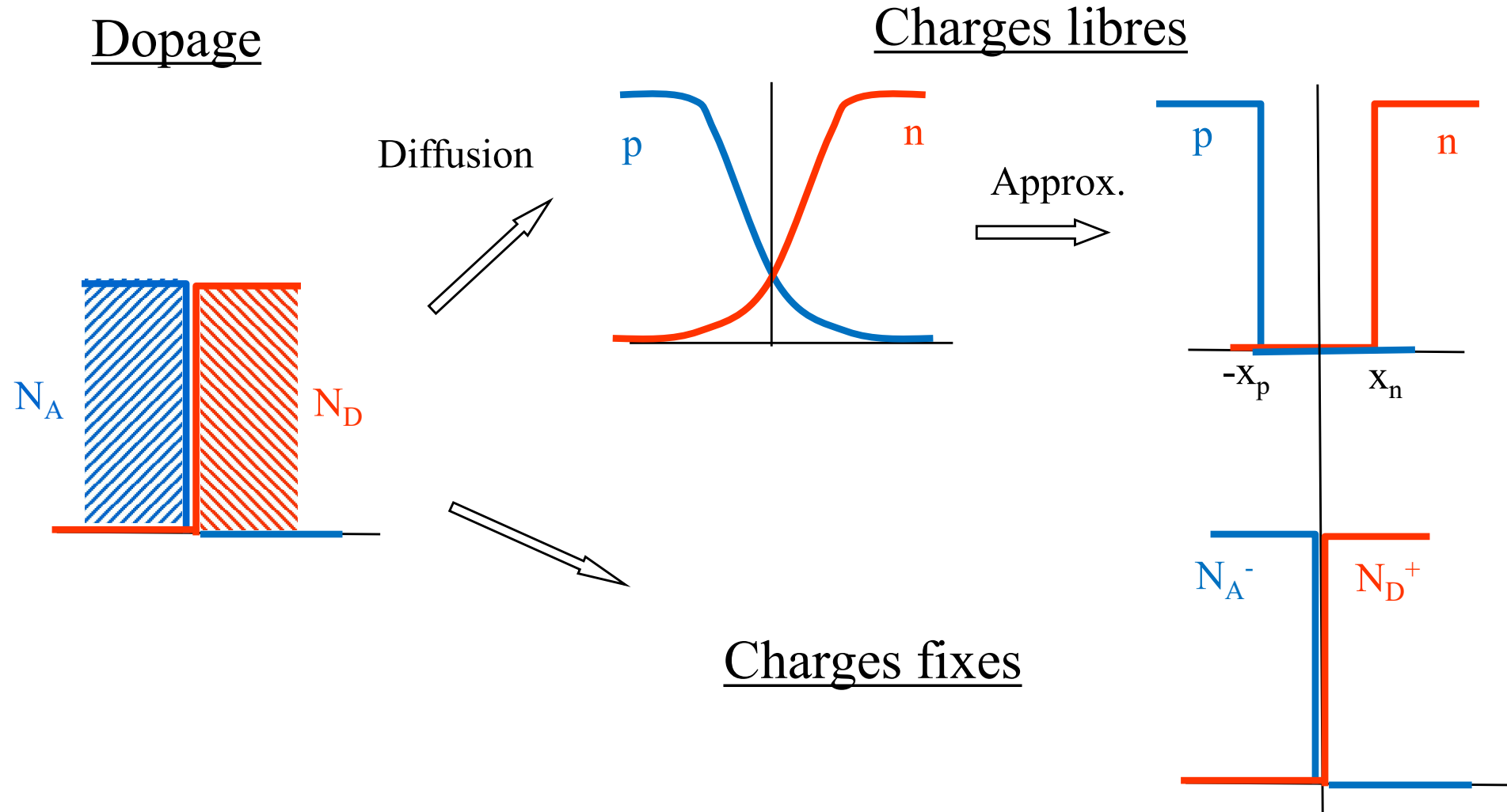
$$V_{bi} = |\psi_p| + |\psi_n| = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Potentiel de built-in



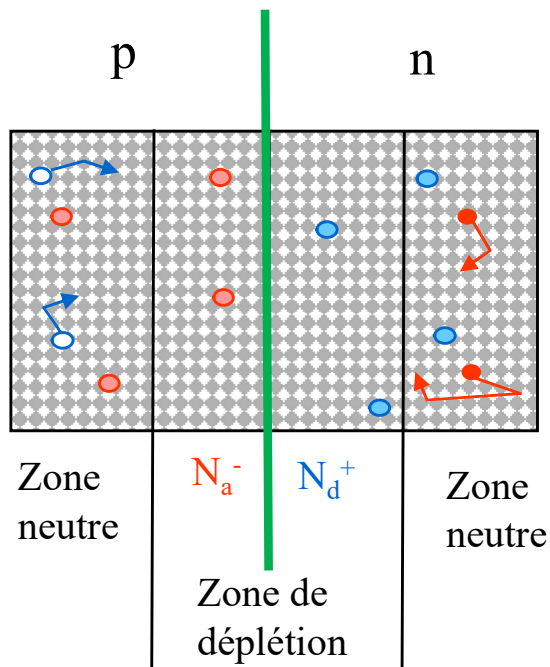
S. Sze « *Semiconductor devices* »

Approximation: «déplétion totale»

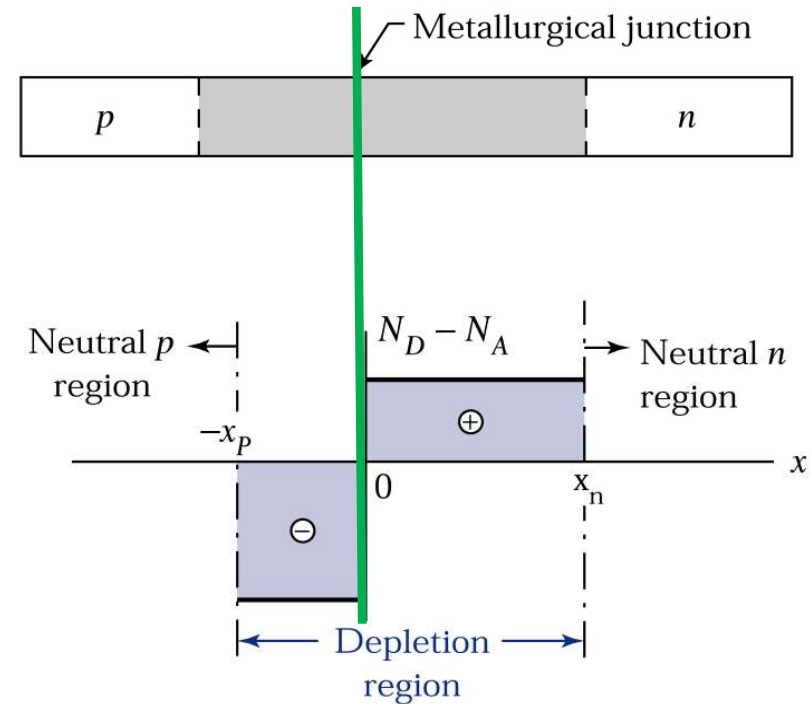


Jonction p/n à l'équilibre: zone de déplétion

S. Sze « *Semiconductor devices* »

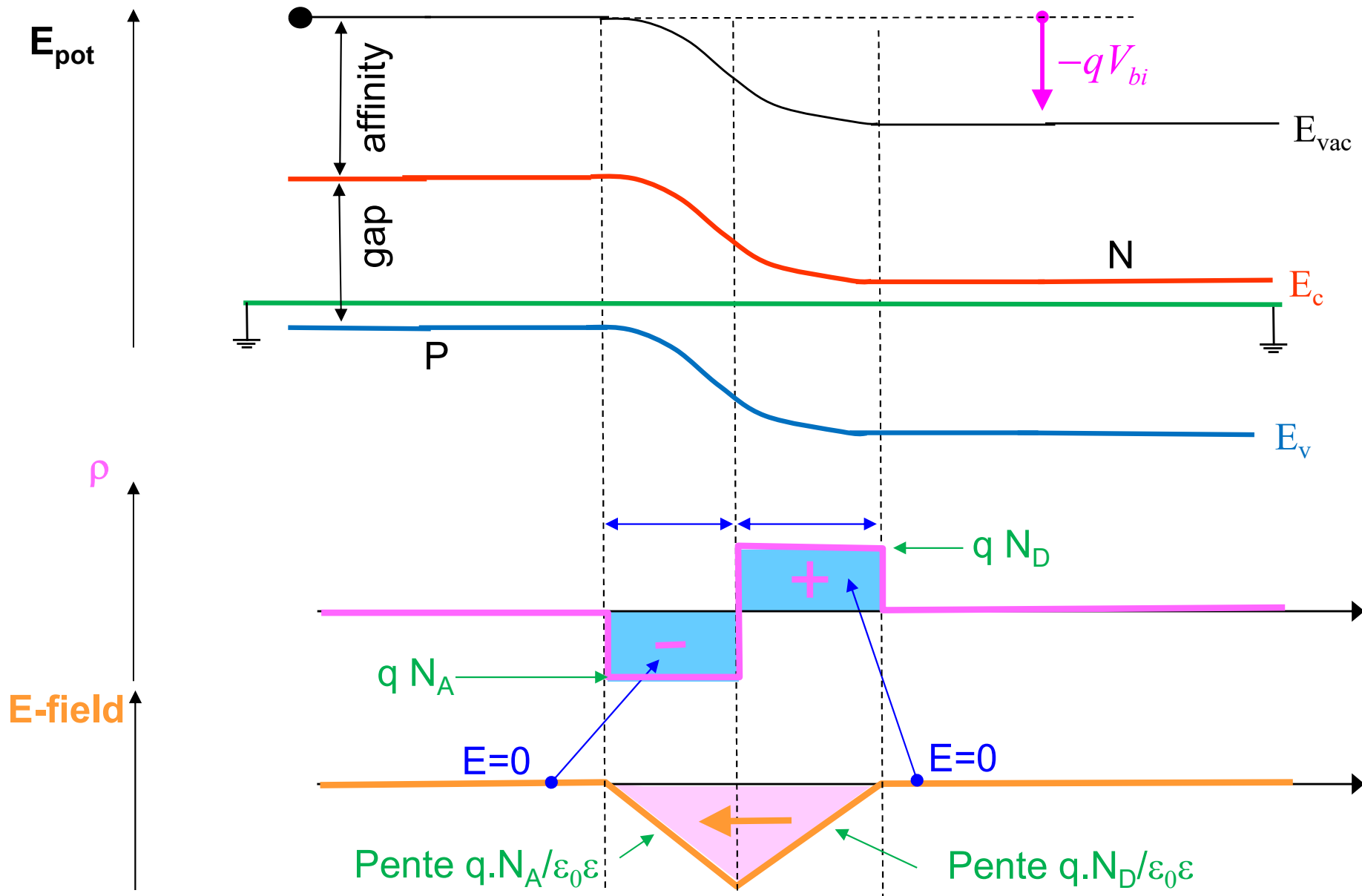


Les charges libres majoritaires diffusent.
Les charges fixes restent.



Approx.: profil de charge rectangulaire
→ Densité de charge donnée par le dopage !
→ Deux paramètres: x_p et x_n

Schéma de bande diode PN



- ① somme des charges négatives = somme des charges positives

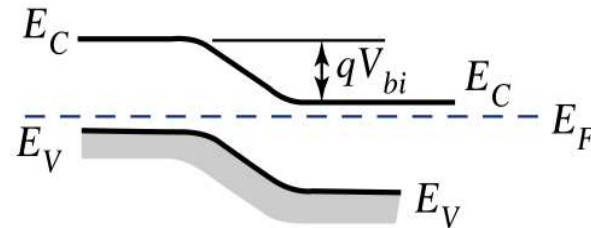
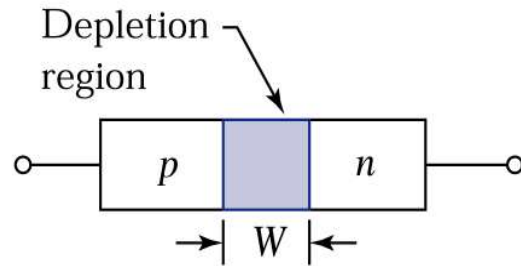
$$x_n \cdot N_D = x_p \cdot N_A \quad \Rightarrow \quad x_n + x_p = W = x_n \cdot \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right)$$

- ② Croissance constante du champ électrique (de la droite au centre du graphique)

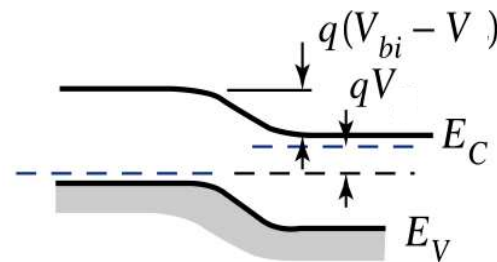
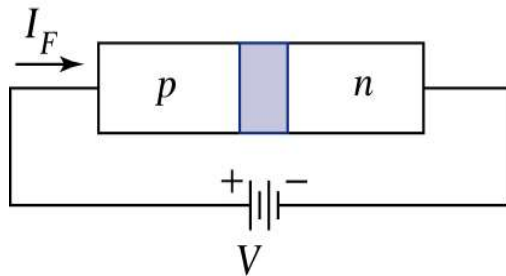
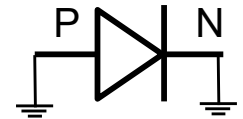
$$|E_{\max}| = \frac{qN_D}{\epsilon_0 \epsilon} \cdot x_n = \frac{qN_D}{\epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot W$$

- ③ Surface du triangle = V_{bi}

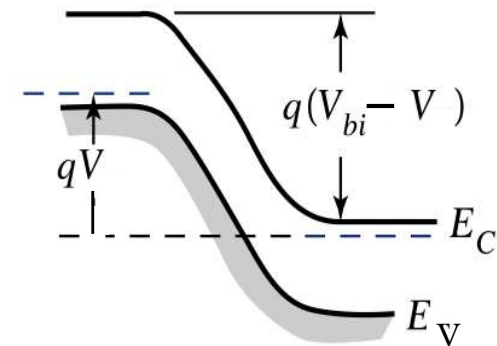
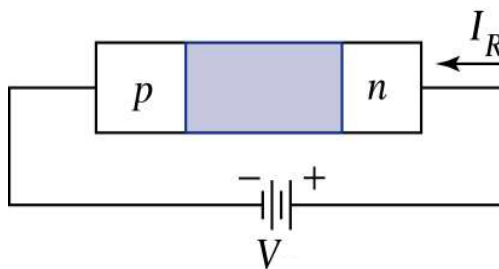
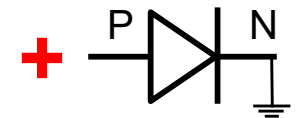
$$V_{bi} = \frac{1}{2} \cdot |E_{\max}| \cdot W = \frac{q}{2\epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{N_D \cdot N_A}{N_A + N_D} \cdot W^2 \quad \Rightarrow \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_D \cdot N_A} \cdot V_{bi}}$$



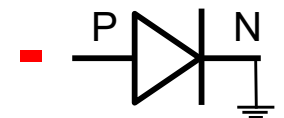
Equilibre



Passante
($V > 0$)



Bloquante
($V < 0$)



S. Sze « Semiconductor devices »

Jonction p/n abrupte hors équilibre: solutions

Le champ électrique aux extrémités est négligeable

→ les solutions sont similaires au cas à l'équilibre.

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{q \cdot N_A} \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot (V_{bi} - V)}$$

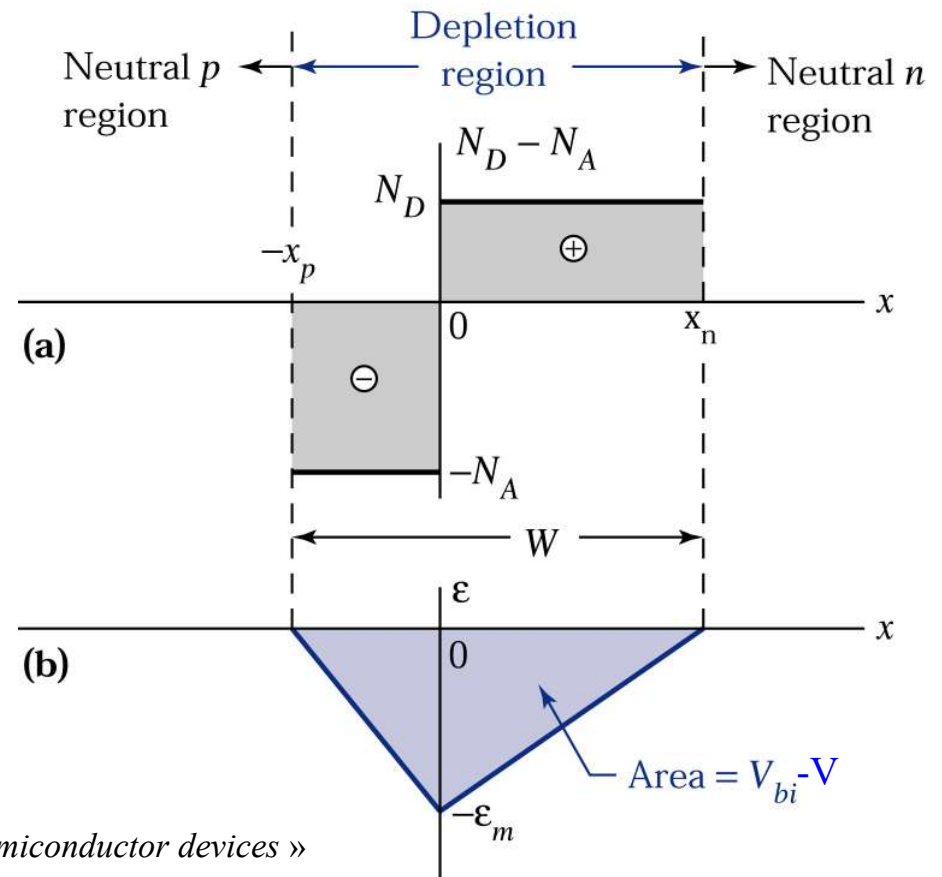
$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{q \cdot N_D} \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot (V_{bi} - V)}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \cdot (V_{bi} - V)}$$

$$E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_0\epsilon} (x_p - |x|) \quad \text{pour} \quad -x_p \leq x \leq 0$$

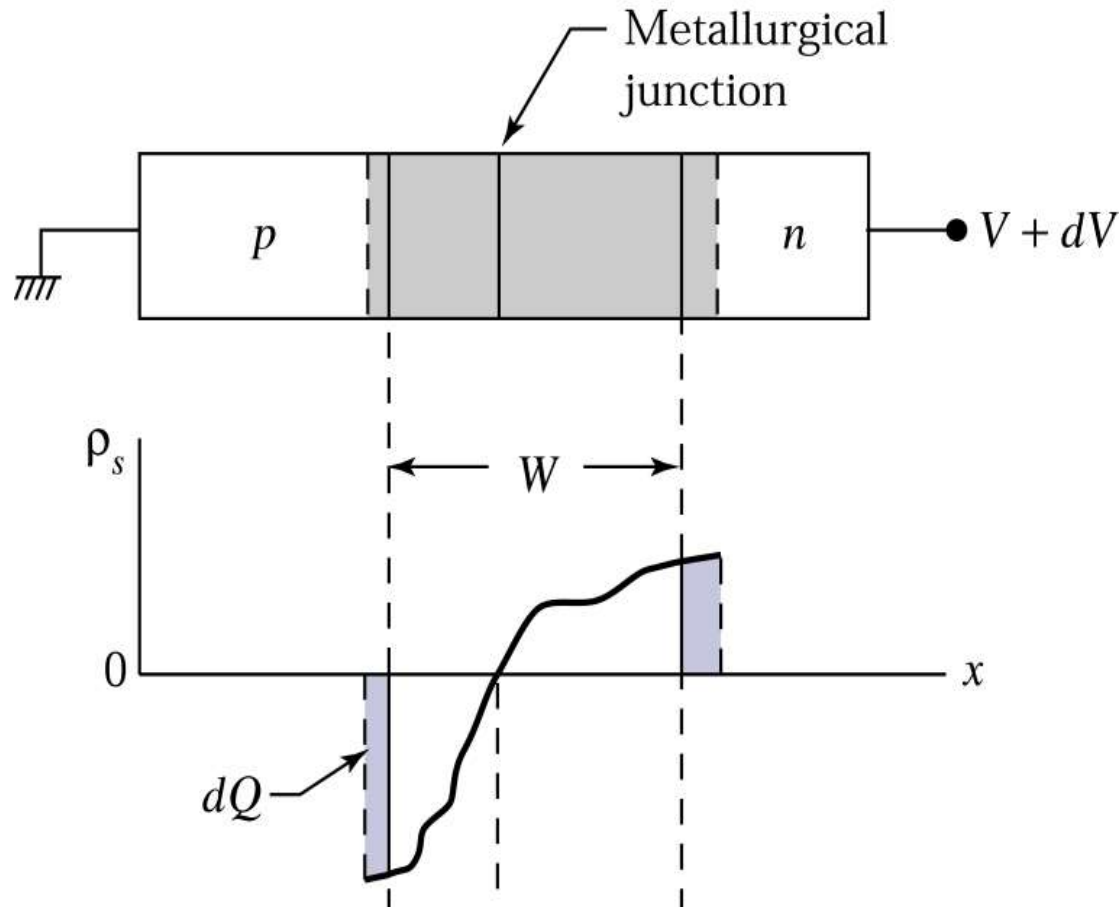
$$E(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon} (x_n - |x|) \quad \text{pour} \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$-q\psi(x) = -q\psi_{left} + q \int_{-x_p}^{x_n} E(x) dx$$



S. Sze « Semiconductor devices »

Jonction p/n hors équilibre: capacité de jonction



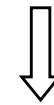
S. Sze « Semiconductor devices »

a) Tension appliquée:
 V

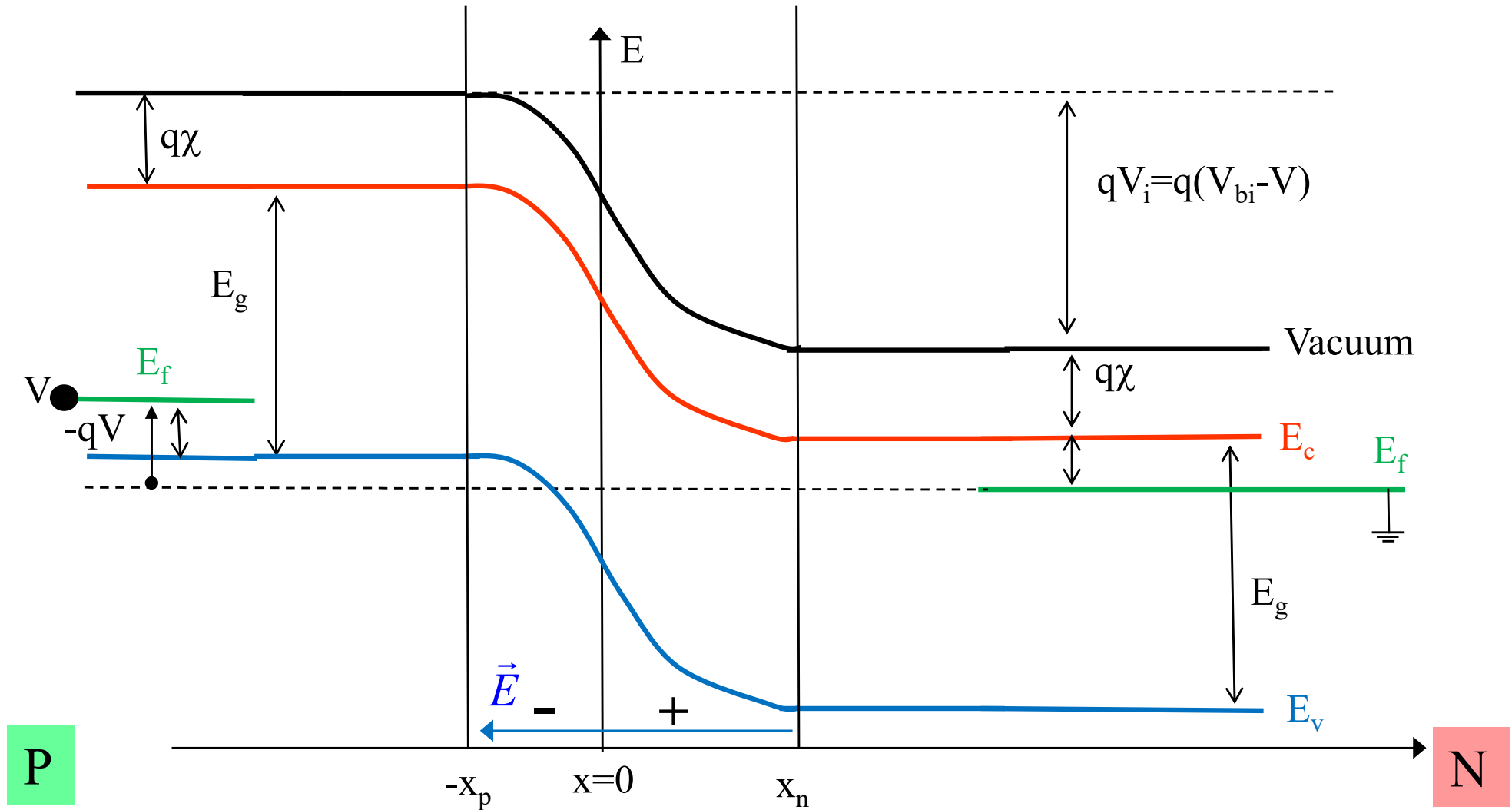
b) Charge accumulée sur une surface A :
 $Q = q N_D x_n A$

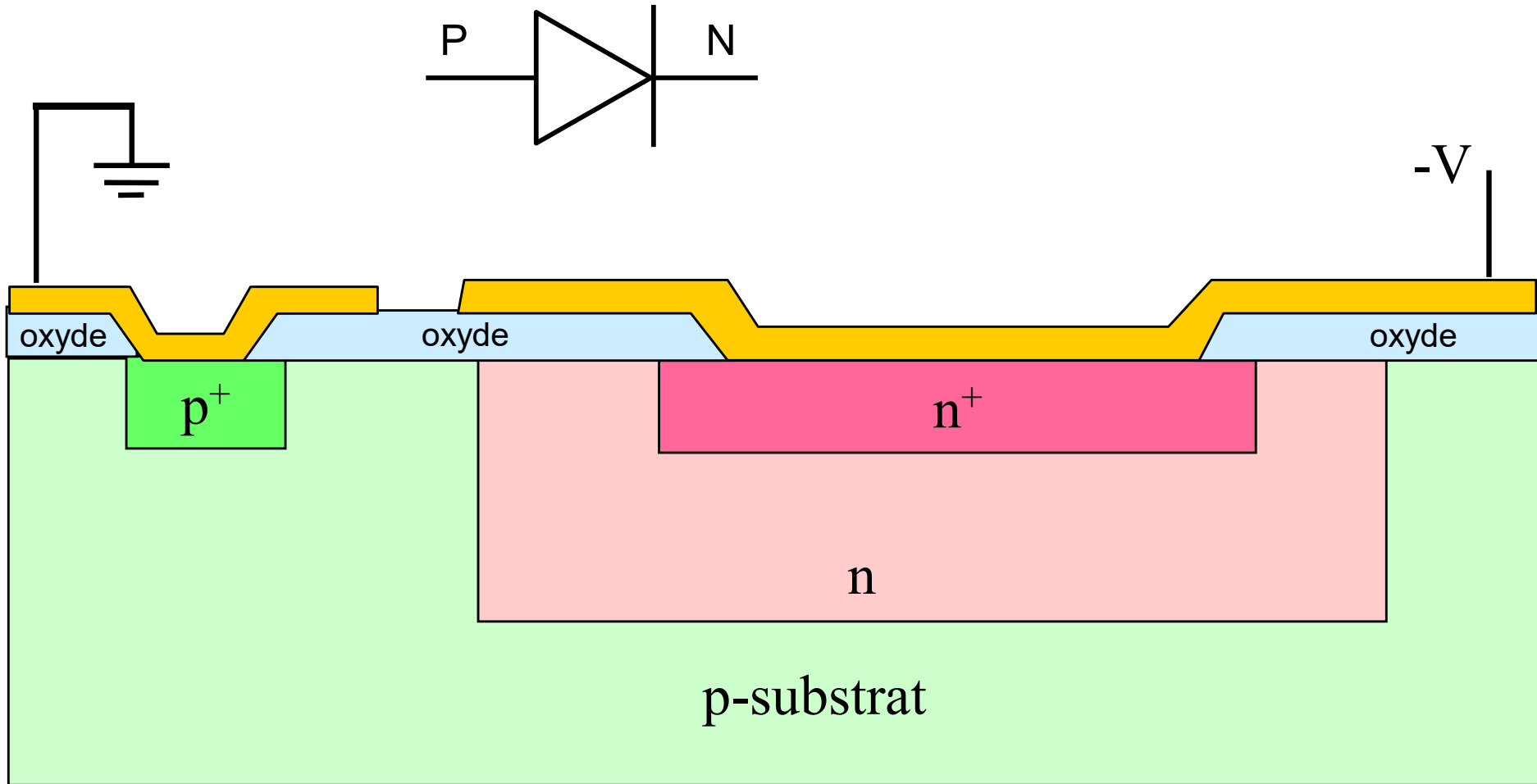
c) Capacité par surface:

$$C_j = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

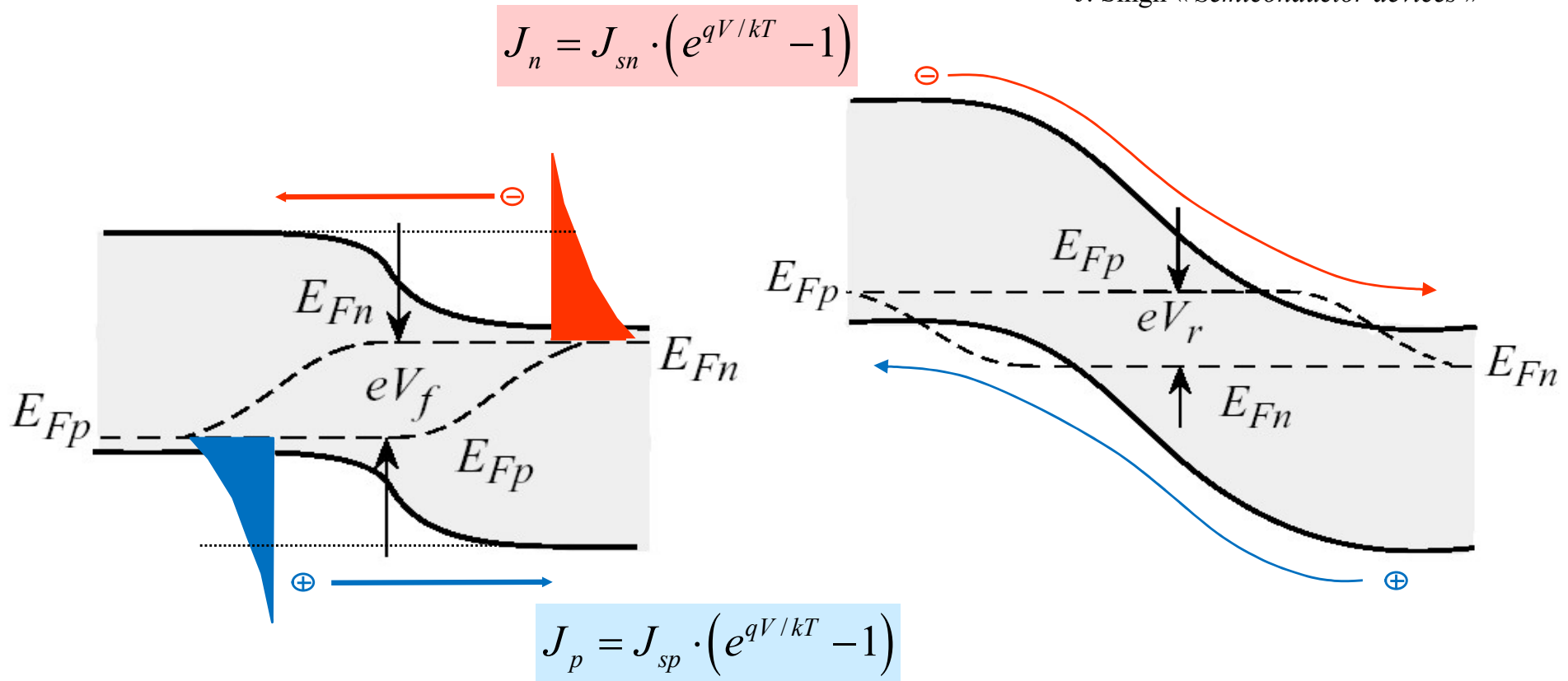


$$C_j = A \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon}{W}$$





Interprétation «naive» des courants: simple thermo-émission

Passante**Injection** de minoritairesBloquante**Extraction** de minoritairesJ. Singh « *Semiconductor devices* »

Mais: injection de minoritaires → accumulation

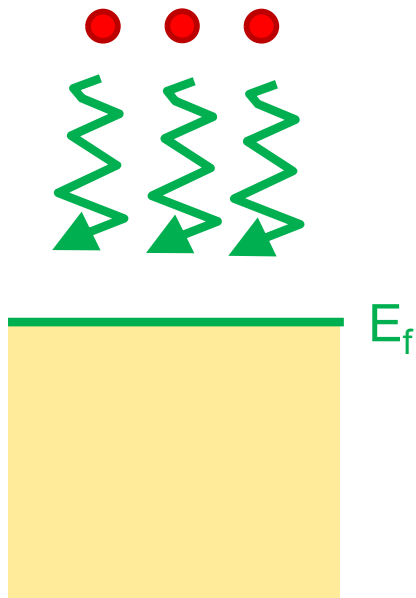


**Zones et courants
de diffusion**

Retour à l'équilibre: Thermalisation et/ou recombinaison

Métal

Injection de porteurs

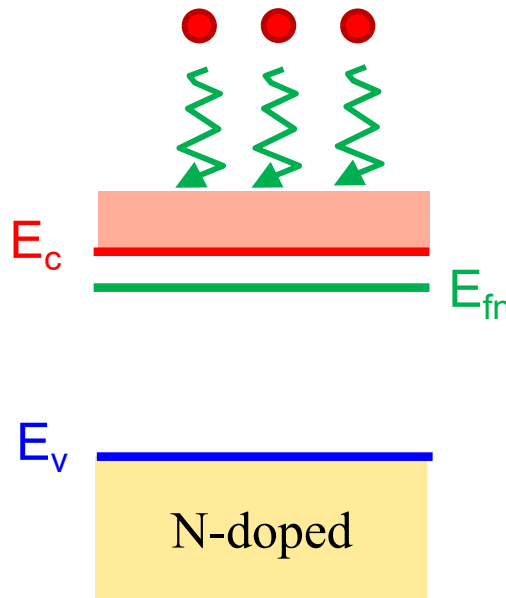


- Temps de thermalisation
- Retour à l'équilibre

➡ Processus rapide

Semiconducteurs

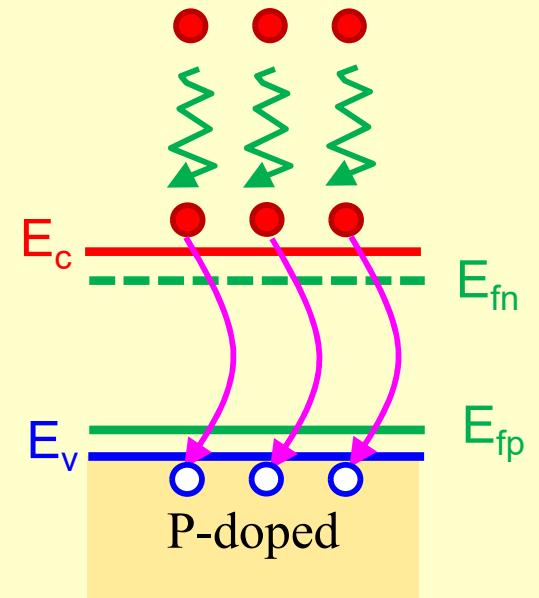
Injection de majoritaires



- Temps de thermalisation
- Retour à l'équilibre

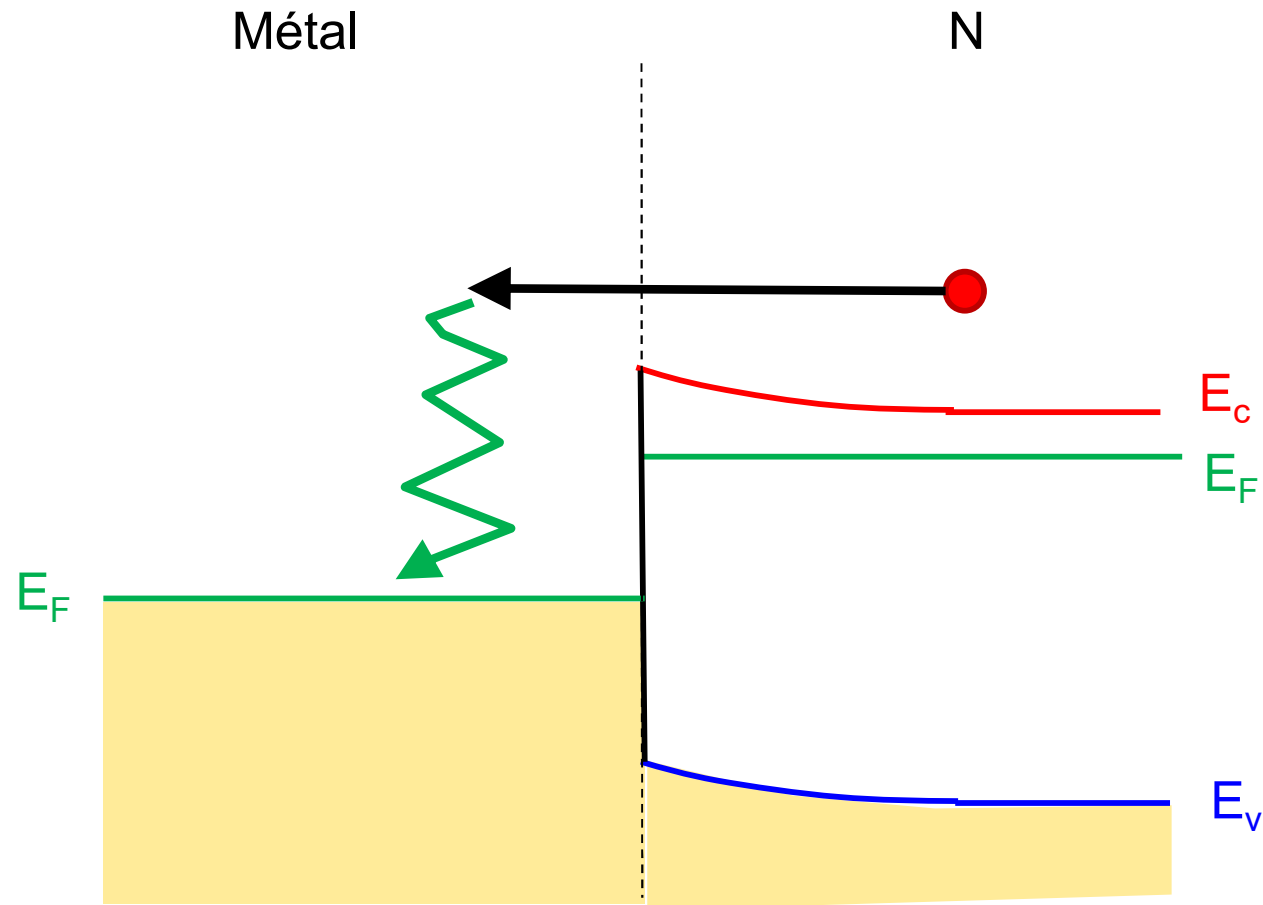
➡ Processus rapide

Injection de minoritaires



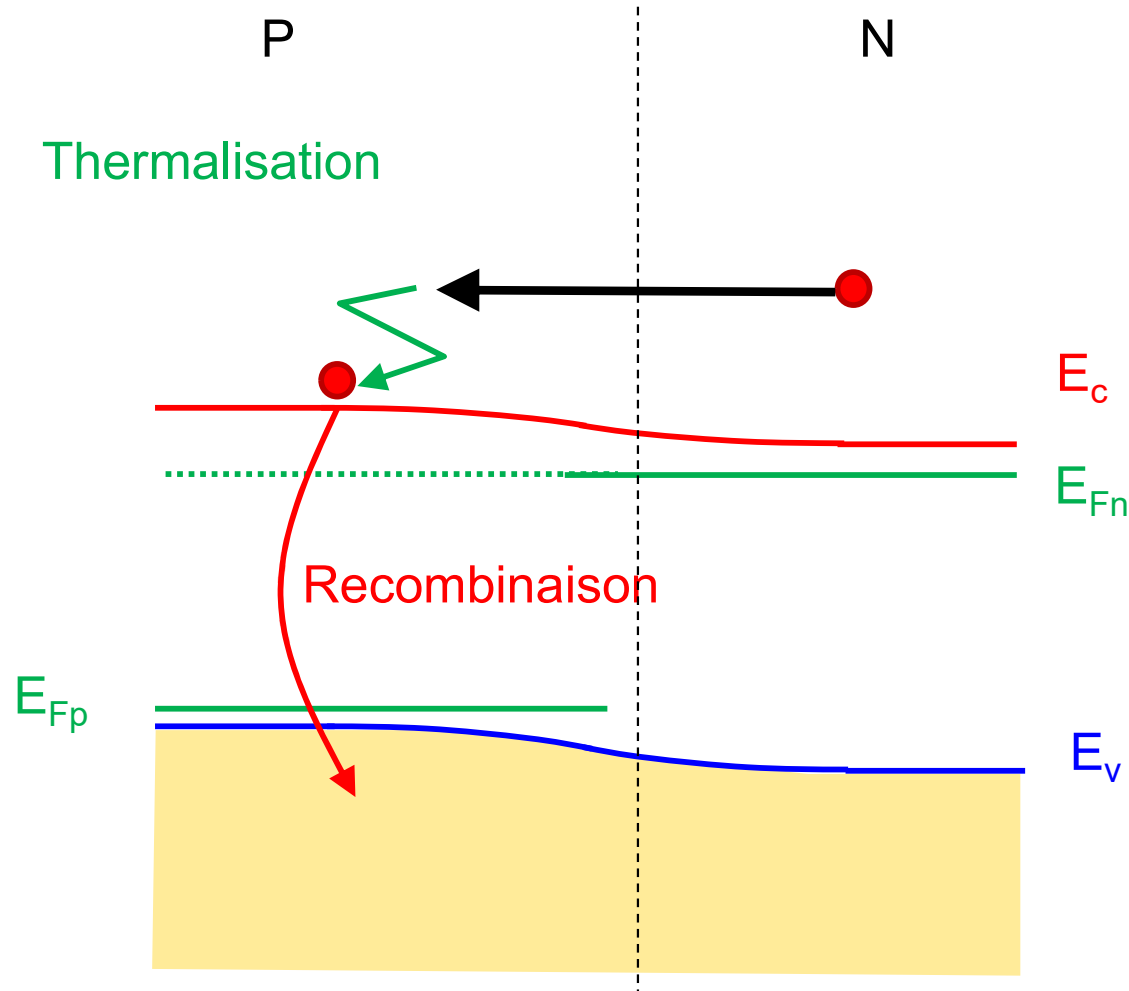
- Temps de thermalisation
- quasi-équilibre ($E_{fn} > E_{fp}$)
- Recombinaison (τ_m)
- Equilibre final

➡ **Processus lent**



La thermalisation est quasi «instantanée»

Temps de vie des minoritaires et diode PN



La recombinaison détermine le temps de vie des minoritaires

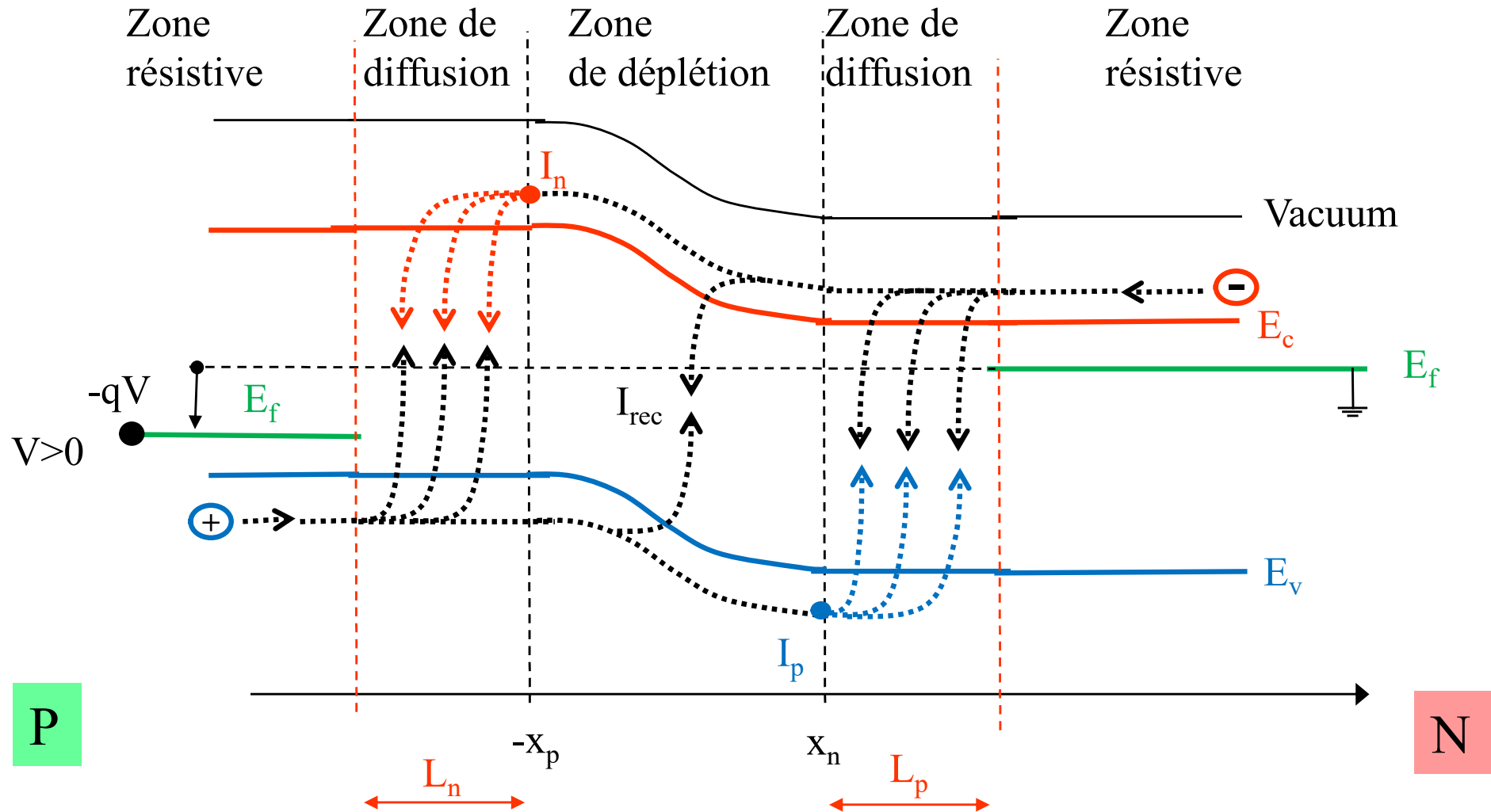
Injection de majoritaires
(Diode Schottky)

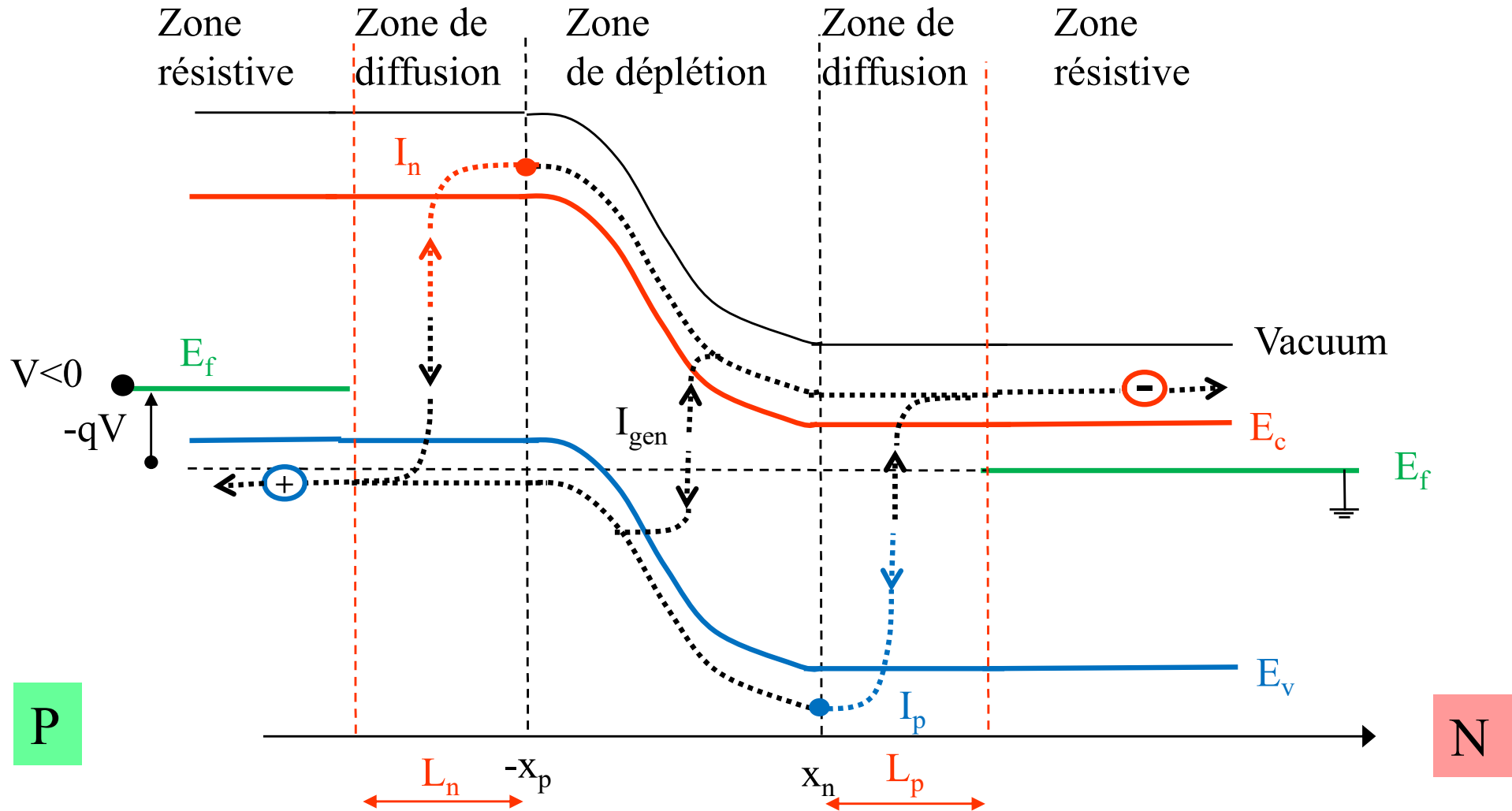


Lac de
majoritaires

Injection de minoritaires
(Diode PN)





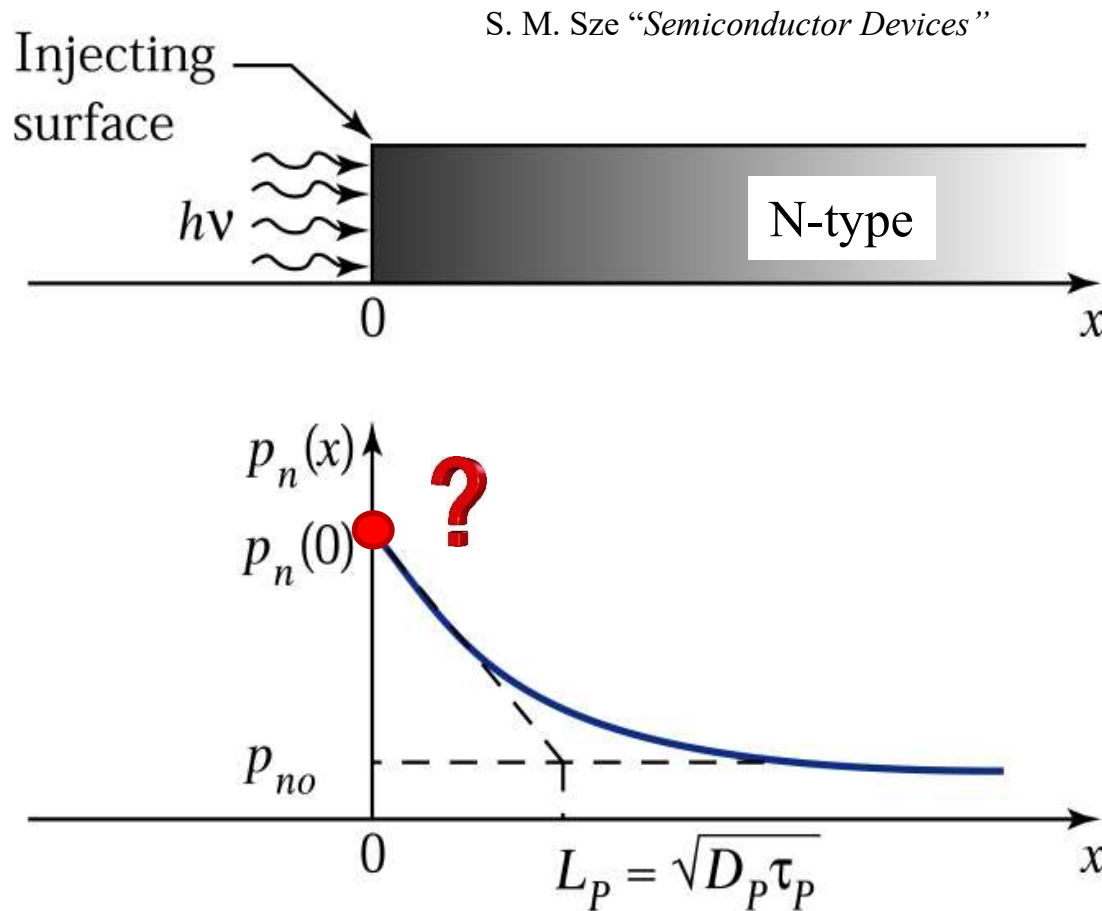


Diode idéale: la génération/recombinaison dans la zone de déplétion est négligeable
→ Il suffit de calculer l'injection de minoritaires

Etapes du calcul des courants idéaux:

- Approximation de la densité de minoritaires au bord des zones de diffusion
- Distribution des minoritaires dans les zones de diffusion
- Le courant de diffusion est le gradient de la densité des minoritaires

Rappel du chapitre 4: longueur de diffusion



Typique: L [μm - mm]

Minoritaires

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \cdot \nabla^2 p_n = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Delta p = \frac{1}{D_p \tau_p} \cdot \Delta p$$

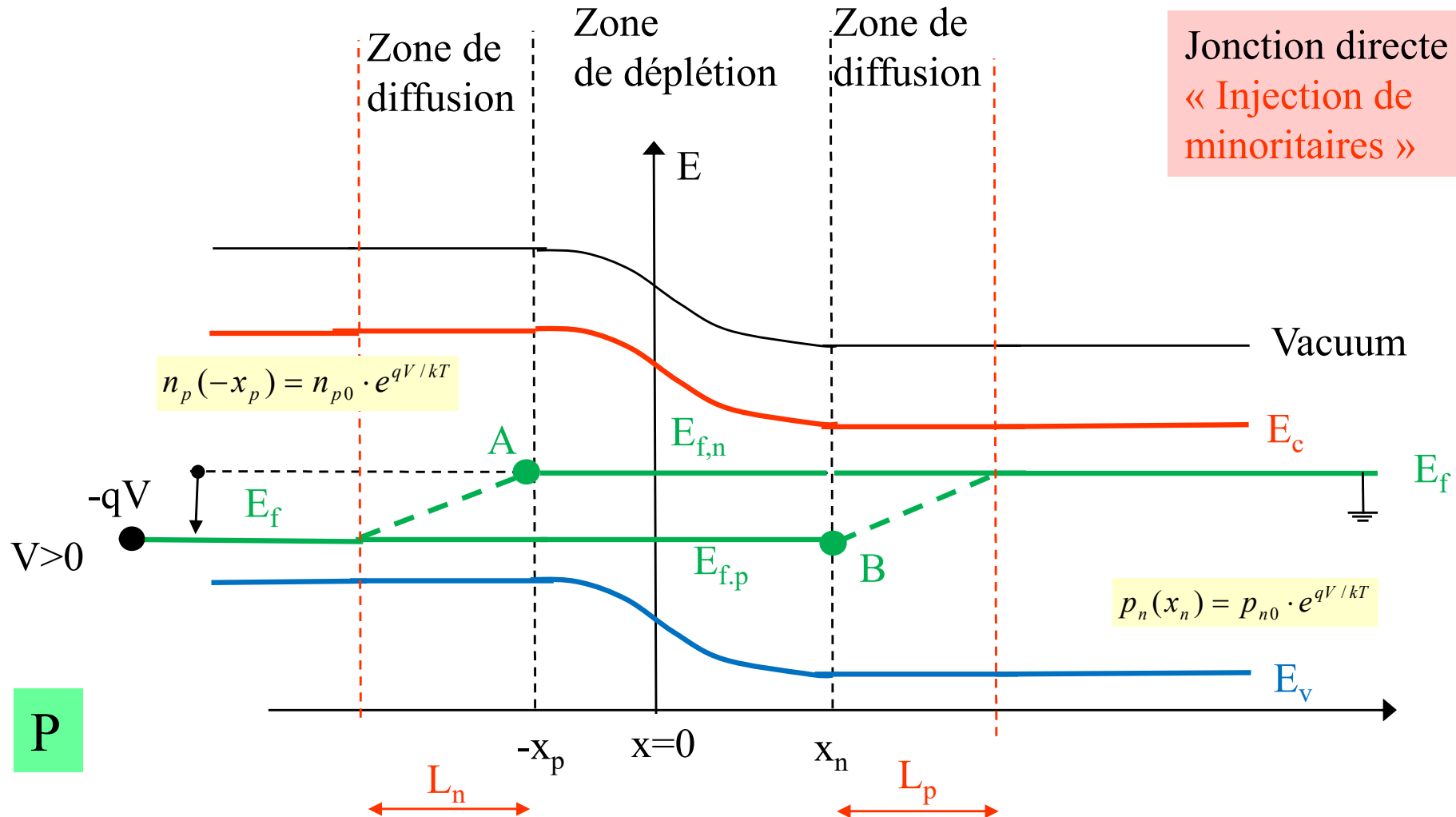
Solution:

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \text{Exp}(-x / L_p)$$

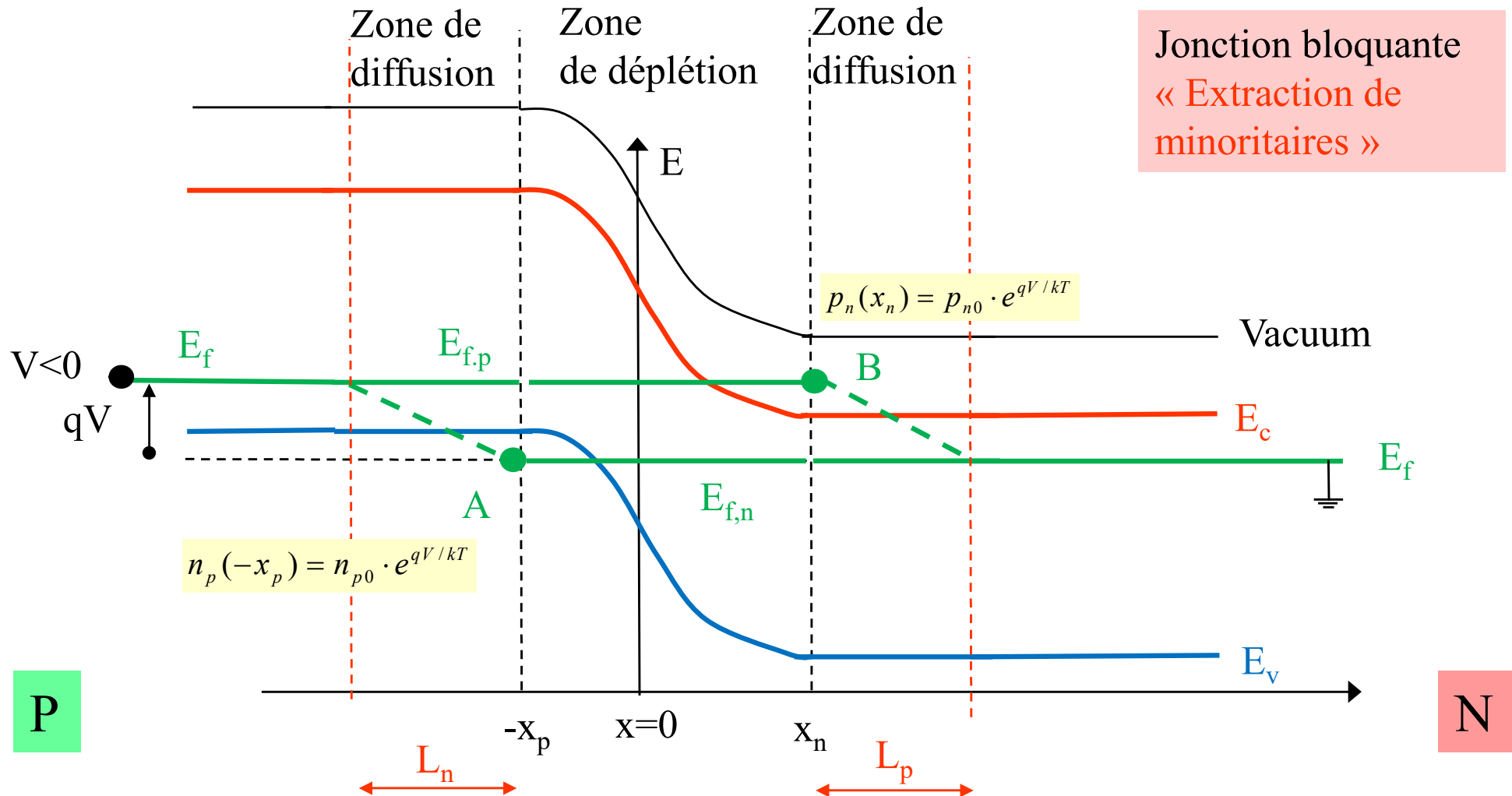
Longueur de diffusion:

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$$

Quasi-niveaux de Fermi: jonction passante

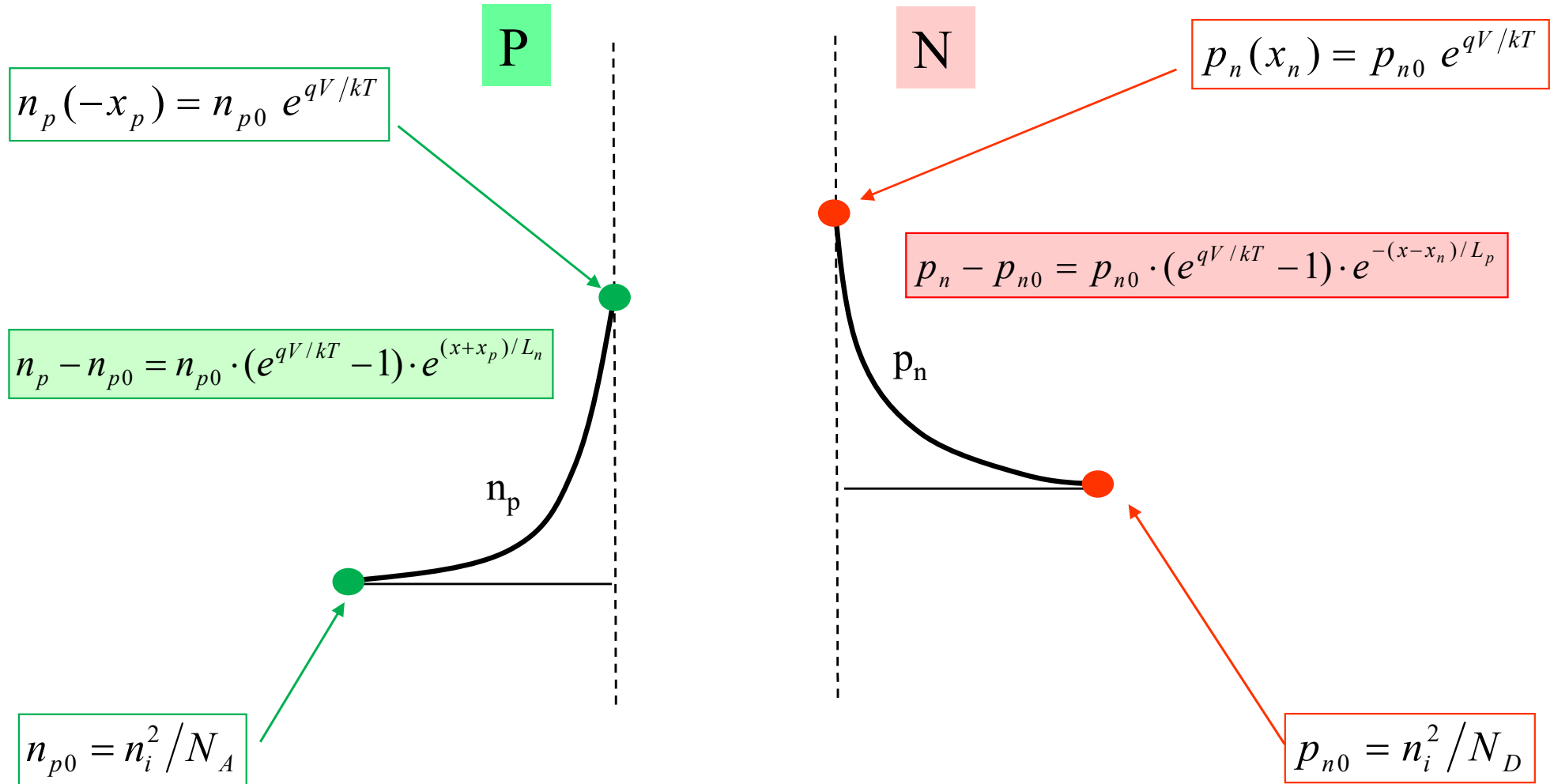


Quasi-niveaux de Fermi: jonction bloquante



Diode p/n: densité des minoritaires

Jonction passante



Diode p/n: densité des minoritaires

Jonction bloquante

P

N

$$n_p = n_{p0} + n_{p0} \cdot (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{(x+x_p)/L_n}$$

$$\approx n_{p0} \left(1 - e^{(x+x_p)/L_n} \right)$$

$$p_n = p_{n0} + p_{n0} \cdot (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-(x-x_n)/L_p}$$

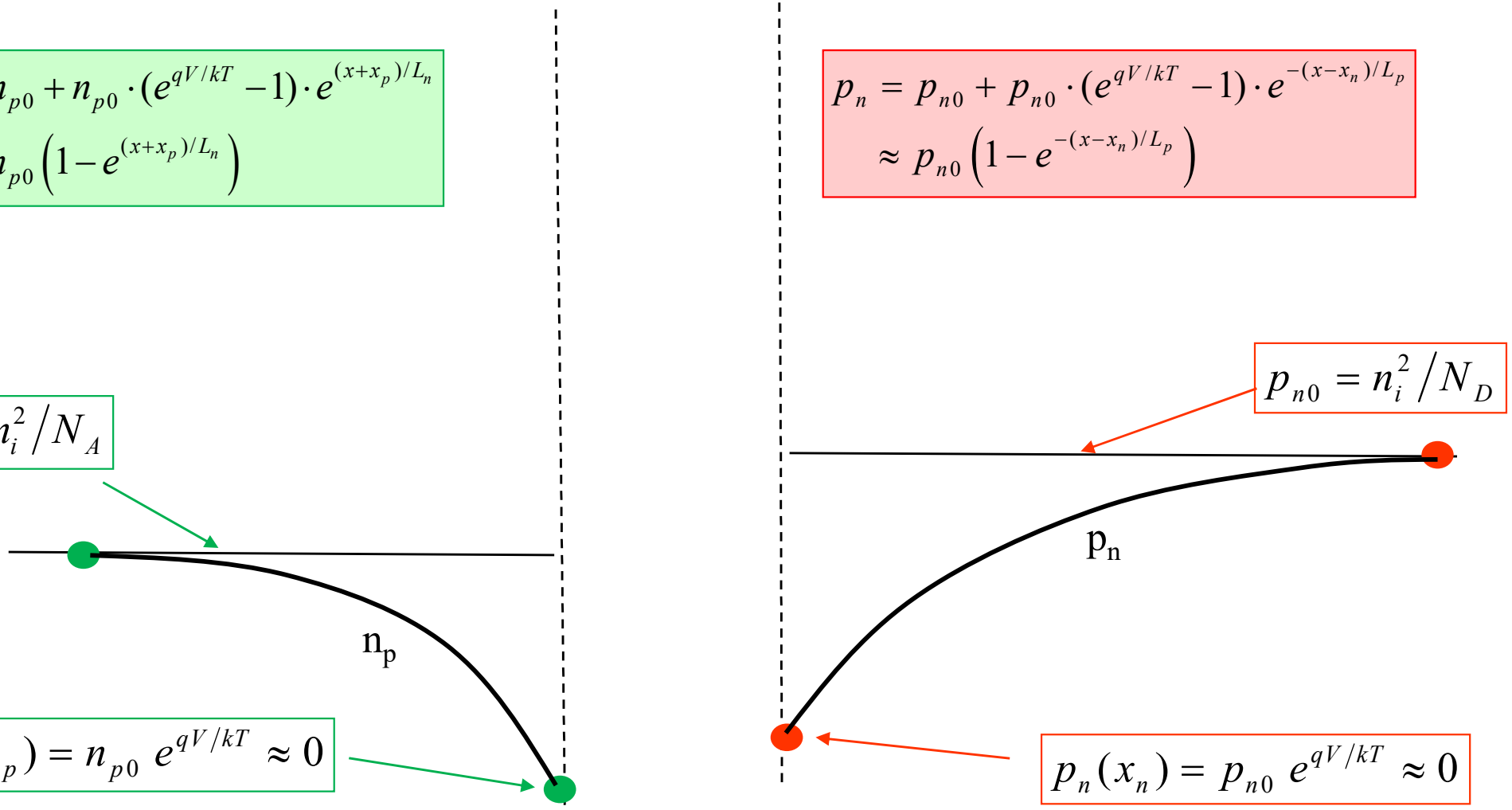
$$\approx p_{n0} \left(1 - e^{-(x-x_n)/L_p} \right)$$

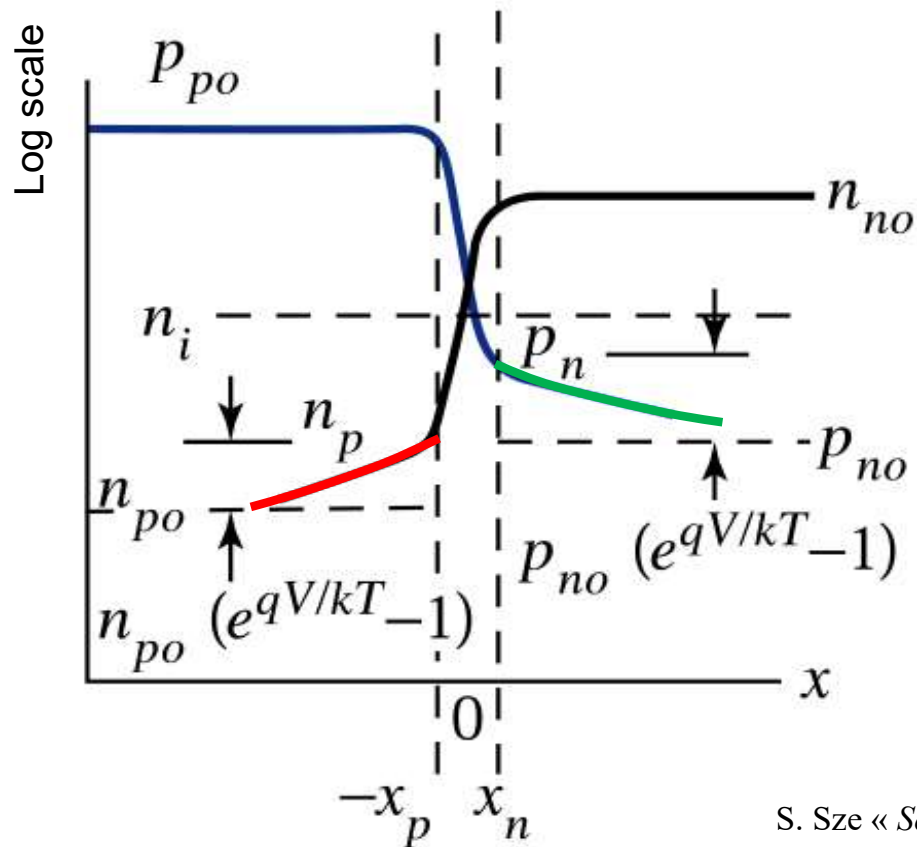
$$n_{p0} = n_i^2 / N_A$$

$$p_{n0} = n_i^2 / N_D$$

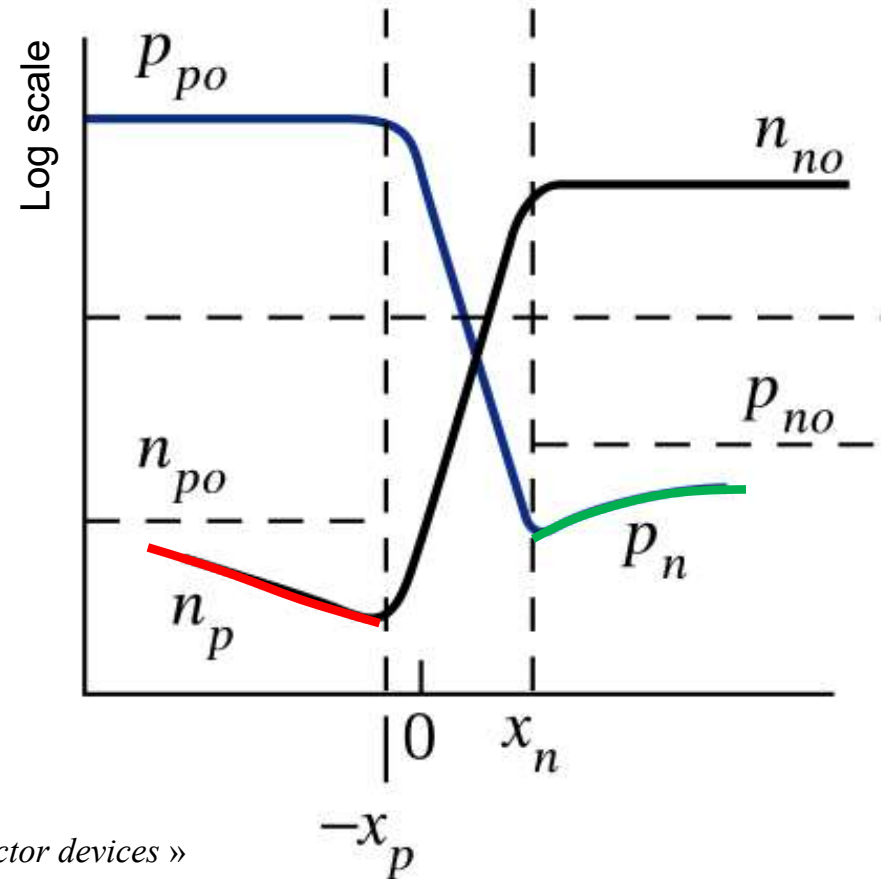
$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{qV/kT} \approx 0$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{qV/kT} \approx 0$$





« injection »



« extraction »

S. Sze « Semiconductor devices »

Diode p/n: **Jonction bloquante** densité des minoritaires

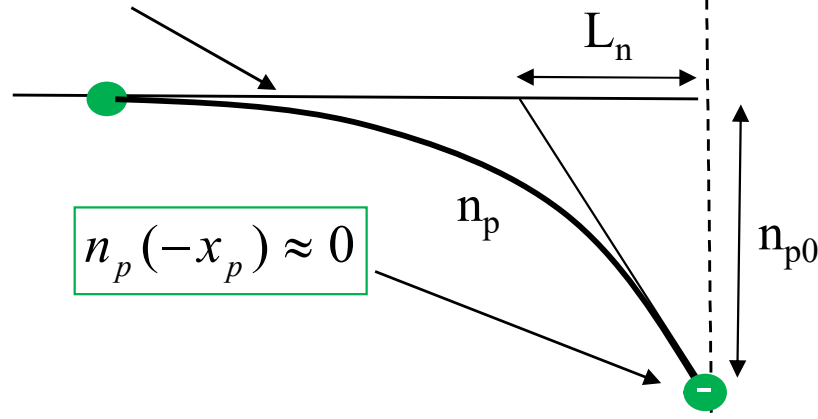
Courant de diffusion
des minoritaires

P

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-x_p} \approx -J_{sn}$$

$$J_{sn} = qD_n \frac{n_{p0}}{L_n} = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_{A,p}}$$

$$n_{p0} = n_i^2 / N_A$$



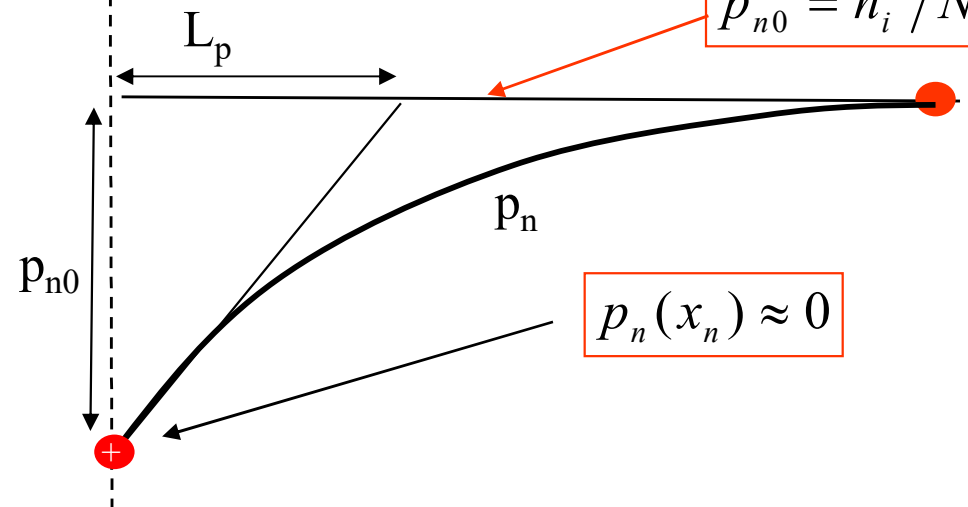
N

Courant de diffusion
des minoritaires

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x_n} \approx -J_{sp}$$

$$J_{sp} = qD_p \frac{p_{n0}}{L_p} = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_{D,n}}$$

$$p_{n0} = n_i^2 / N_D$$



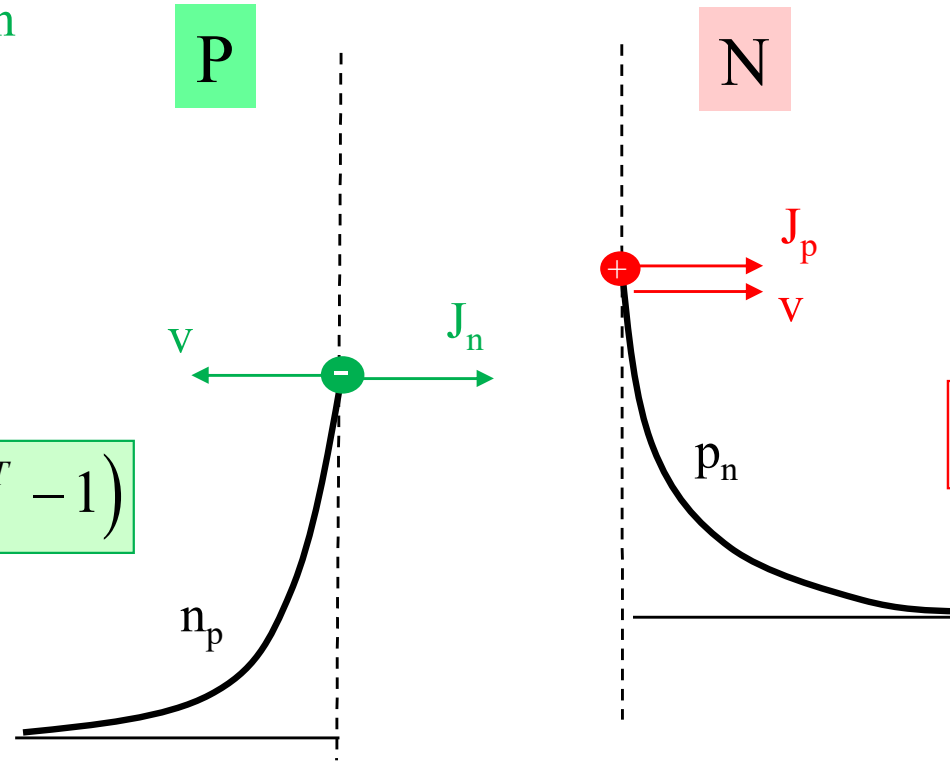
Diode p/n: **Jonction passante** courants de diffusion des minoritaires

Courant de diffusion
des minoritaires

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-x_p}$$

$$J_n = J_{sn} \cdot (e^{qV/kT} - 1)$$

$$J_{sn} \equiv \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_{A,p}}$$



Courant de diffusion
des minoritaires

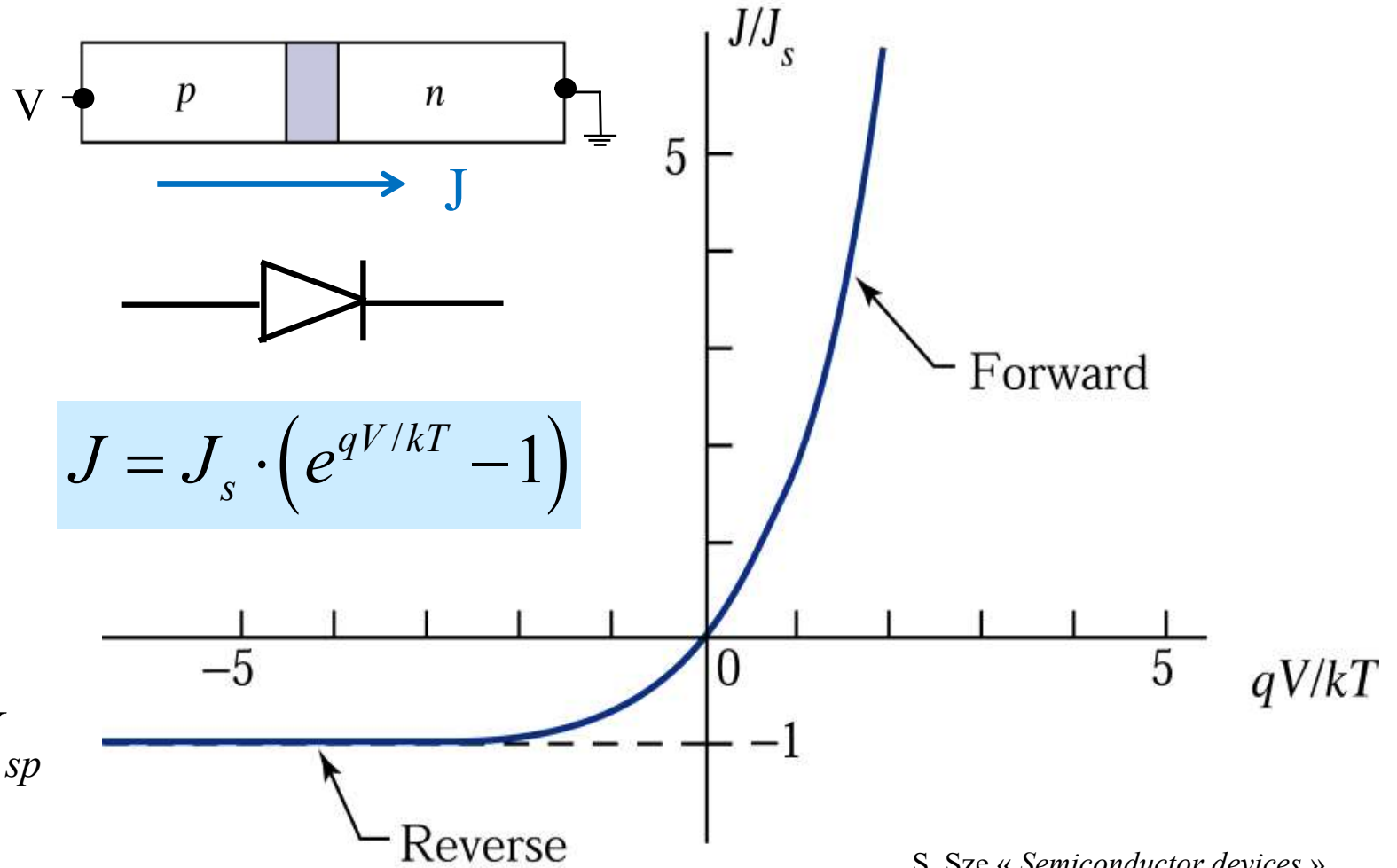
$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x_n}$$

$$J_p = J_{sp} \cdot (e^{qV/kT} - 1)$$

$$J_{sp} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_{D,n}}$$

Courant idéal total

$$J = (J_{sn} + J_{sp}) \cdot (e^{qV/kT} - 1)$$

S. Sze « *Semiconductor devices* »

Les minoritaires sont stockés dans les deux zones de diffusion.

Les charges totales stockées sont:

$$\frac{Q_n}{A} = -q \cdot \int_{-\infty}^{-x_p} (n_p - n_{p0}) \cdot dx = -q \cdot n_{p0} (e^{qV/kT} - 1) \cdot L_n$$

$$\frac{Q_p}{A} = q \cdot \int_{x_n}^{\infty} (p_n - p_{n0}) \cdot dx = q \cdot p_{n0} (e^{qV/kT} - 1) \cdot L_p$$

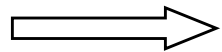
La capacité de diffusion est donc:

$$C_d \equiv \left| \frac{dQ_n}{dV} \right| + \left| \frac{dQ_p}{dV} \right| \cong A \cdot \frac{q^2}{kT} \cdot (L_n n_{p0} + L_p p_{n0}) \cdot e^{qV/kT}$$

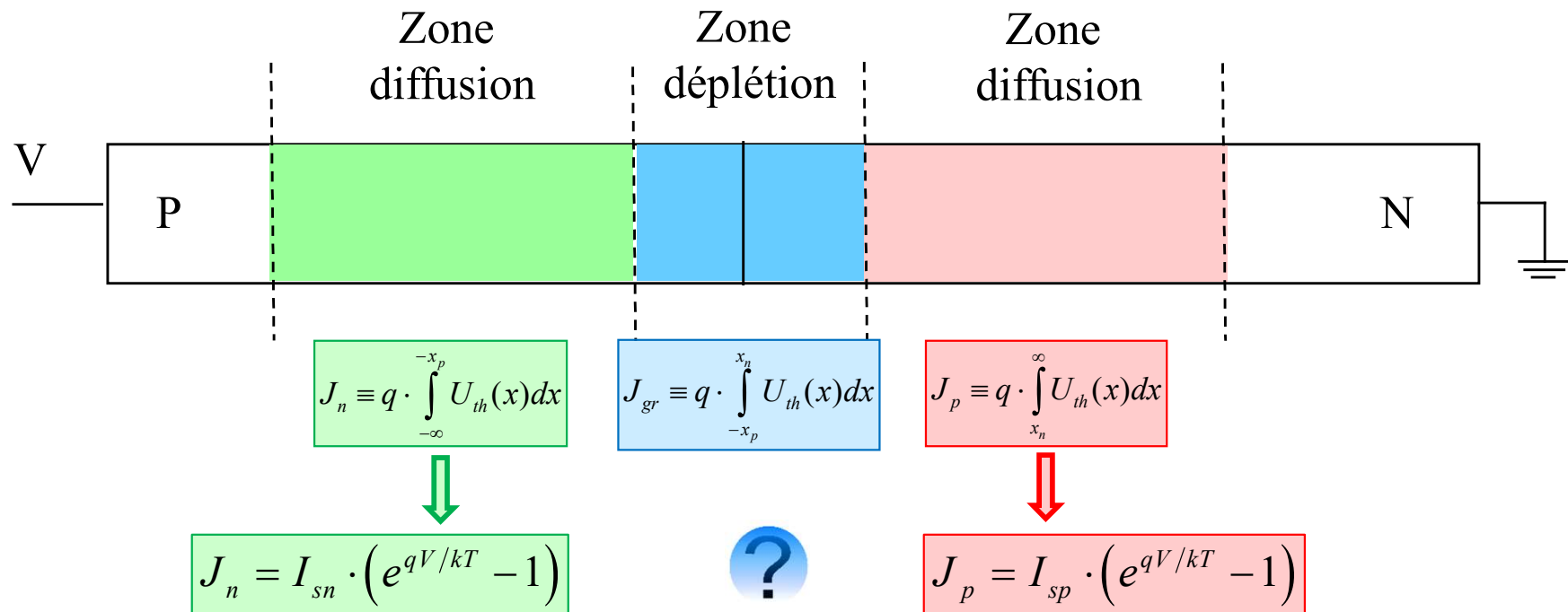
Diode pn réelle: courants de génération/recombinaison

Diode pn en silicium en mode bloquant ($V < 0.7V$):

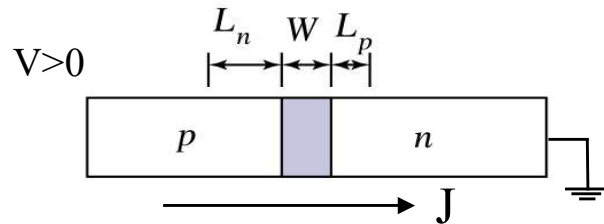
La génération/recombinaison dans la zone de déplétion n'est pas négligeable.



Nouveau modèle: intégration du taux net de recombinaison.



Courant de génération/recombinaison dans la zone de déplétion



S. Sze « *Semiconductor devices* »

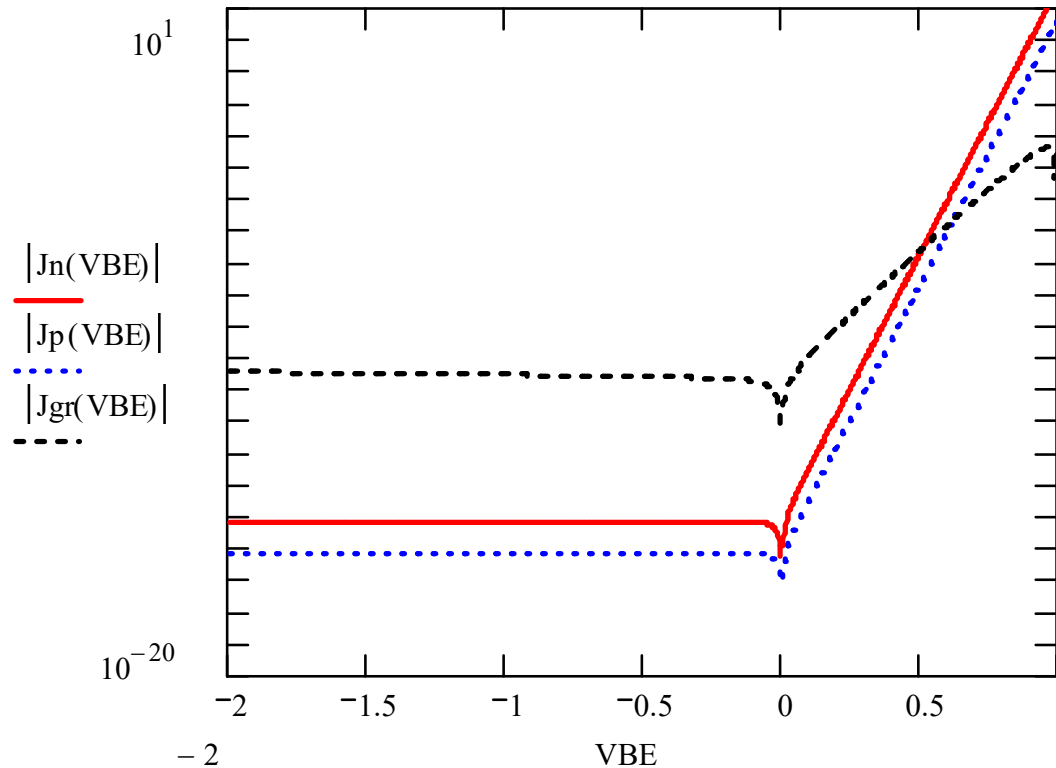
$$J_{gr} = q \cdot \int_{-x_p}^{x_n} U_{th}(x) dx \cong q \cdot U_{th}(0) \cdot W$$

$$U_{th} \cong \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{np - n_i^2}{n + p + 2n_i} \right)$$

Pour $x=0$: $np = n_i^2 e^{qV/kT} \Rightarrow n = p = n_i \cdot e^{qV/2kT}$

$$J_{gr} \cong J_{s,gr} \cdot \left(e^{qV/2kT} - 1 \right) \quad \text{avec} \quad J_{s,gr} \equiv q \cdot \frac{n_i}{2\tau} \cdot W(V)$$

Exemple: diode p/n silicium



$$N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = 6 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$D_p = 2 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$L_n = 15.5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L_p = 2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\tau = 1 \text{ } \mu\text{s}$$

Le courant de diffusion des minoritaires domine pour $V > 0.7\text{V}$

Le courant de gen./rec. dans la zone de déplétion est important pour $V < 0.7\text{V}$



Conductance différentielle

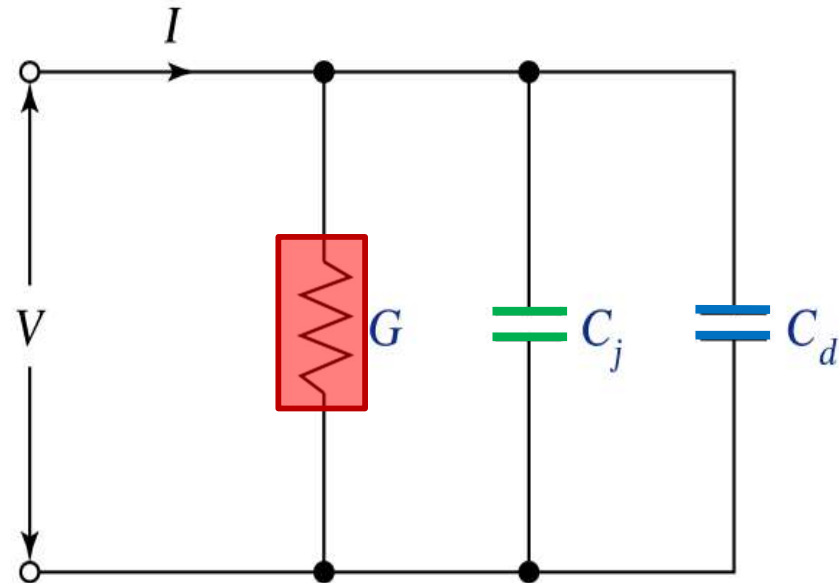
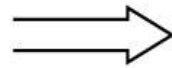
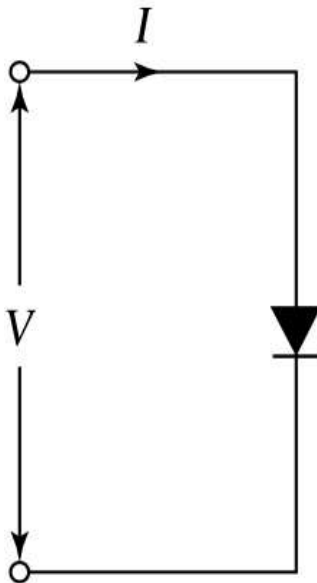
$$G \equiv \frac{d(A \cdot J)}{dV} \cong \frac{q}{kT} \cdot (I + I_s)$$

Capacité de jonction

$$C_j = A \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon}{W}$$

Capacité de diffusion

$$C_d \cong A \cdot \frac{q^2}{kT} \cdot (L_n n_{p0} + L_p p_{n0}) \cdot e^{qV/kT}$$

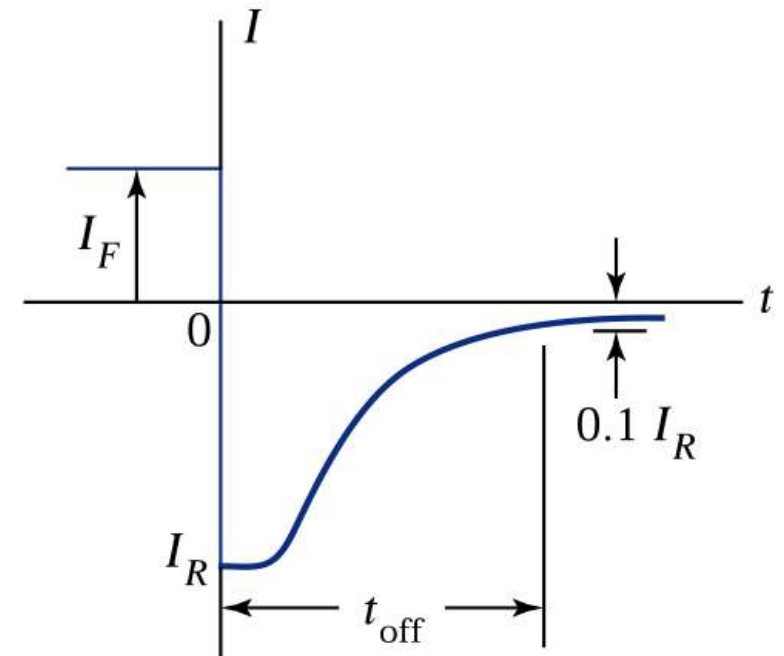
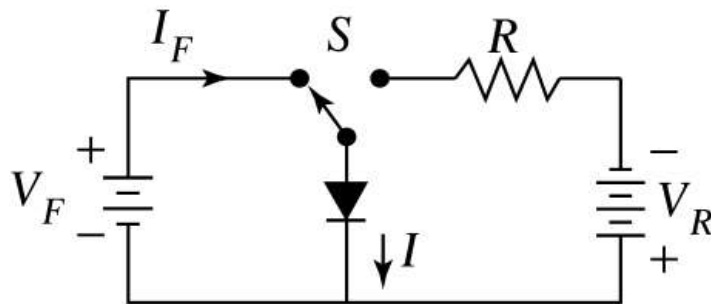


S. Sze « Semiconductor devices »

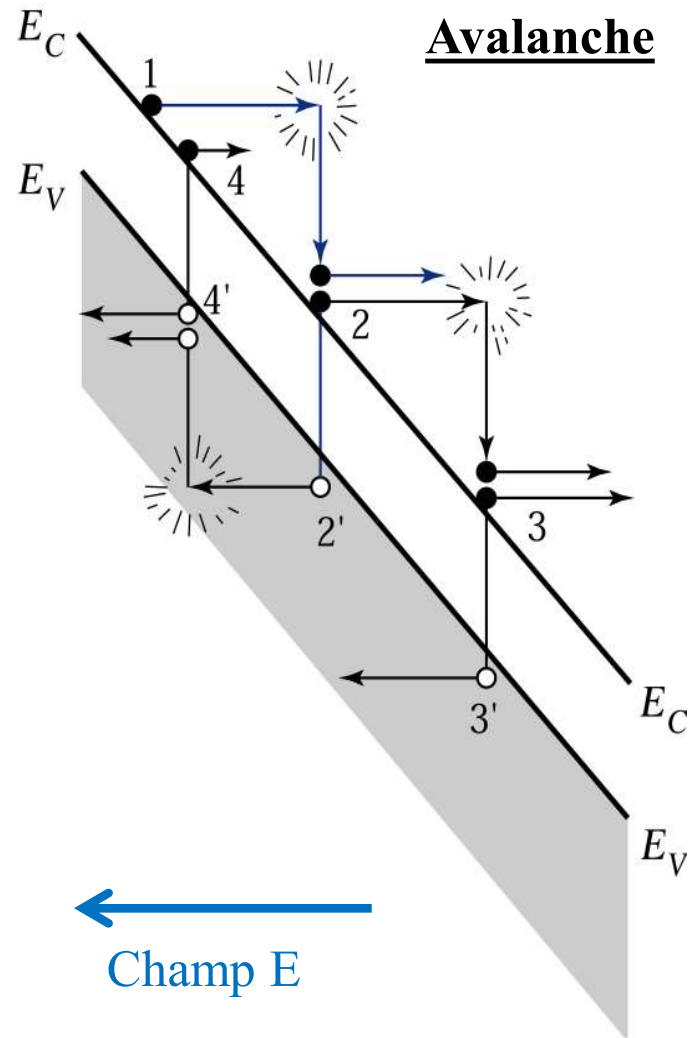
Diode: caractéristique de switch grand signal

Diode pn: temps de vie élevé des minoritaires

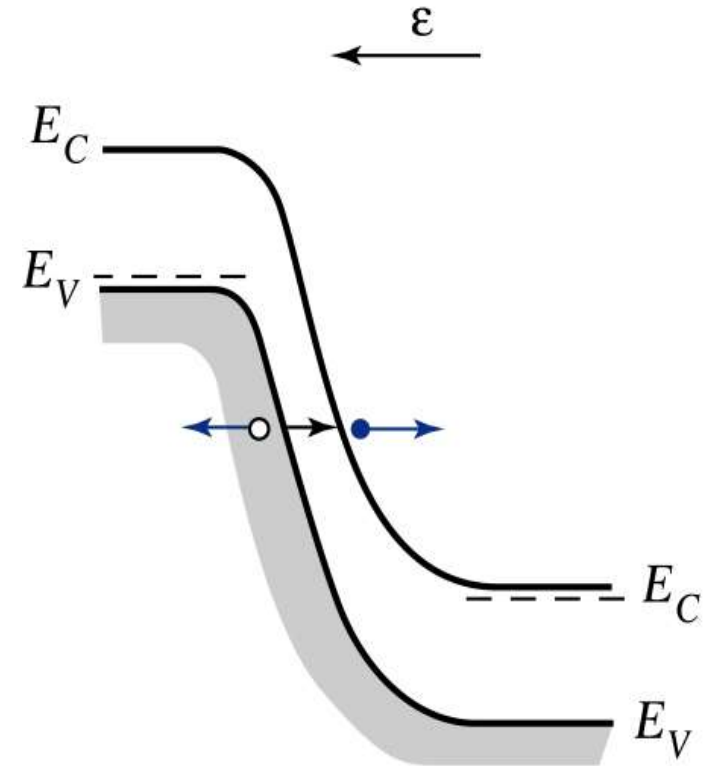
S. Sze
« Semiconductor
devices »



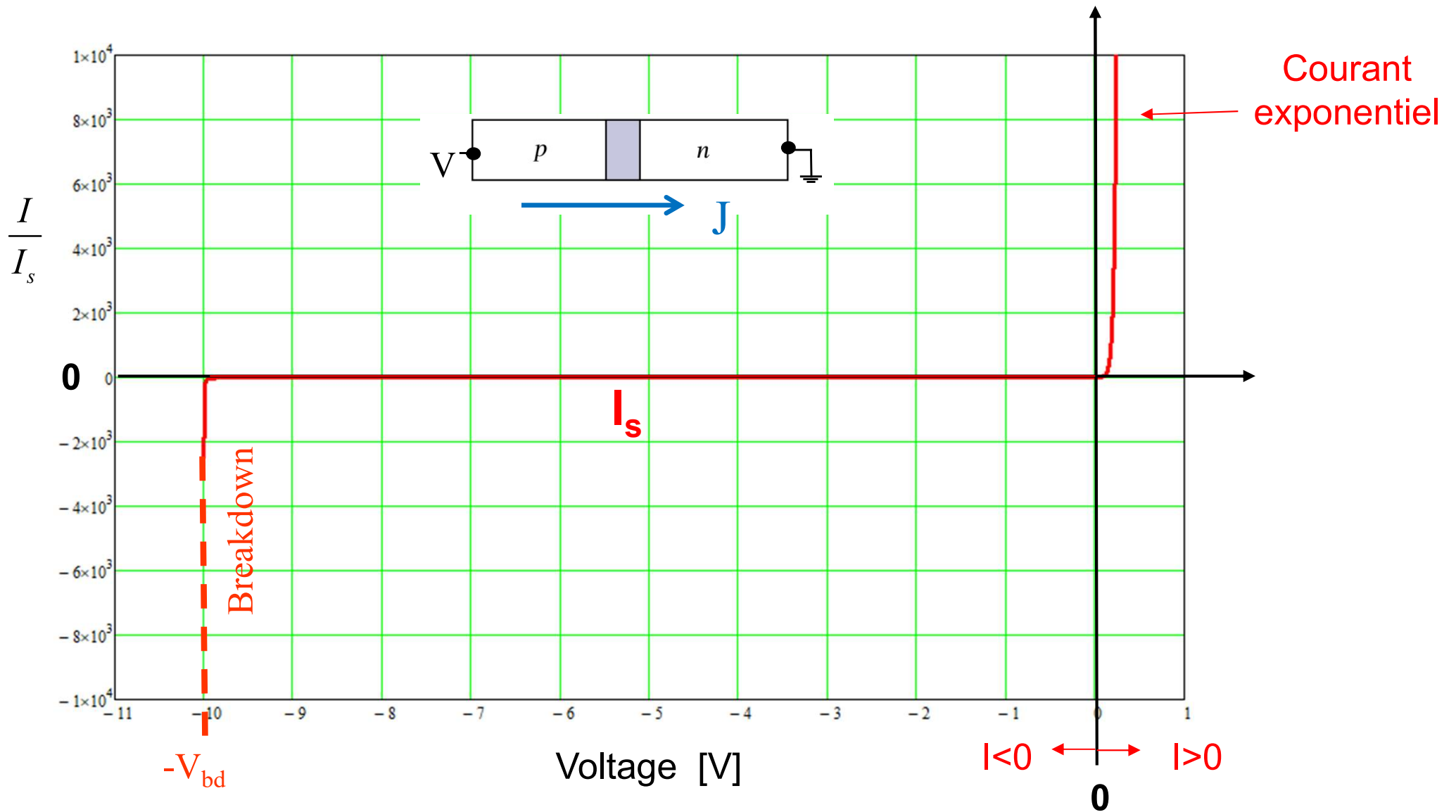
$$T_{\text{off}} (\text{p-n junction}) \approx 1\mu\text{s} \gg T_{\text{off}} (\text{Schottky diode}) \approx 1\text{ns}$$



S. Sze « *Semiconductor devices* »

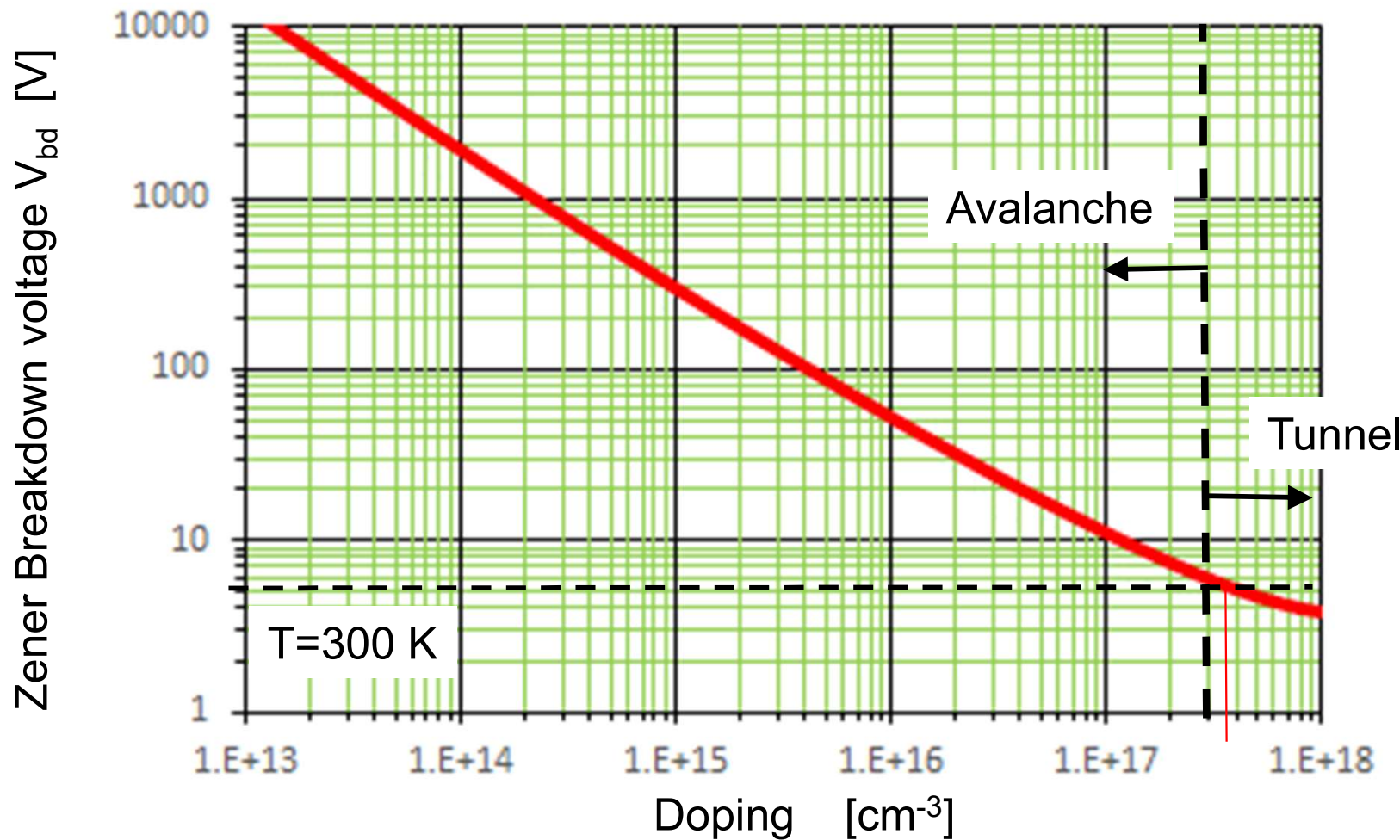


Effet « Band-to-band tunneling »
(Zener effect)

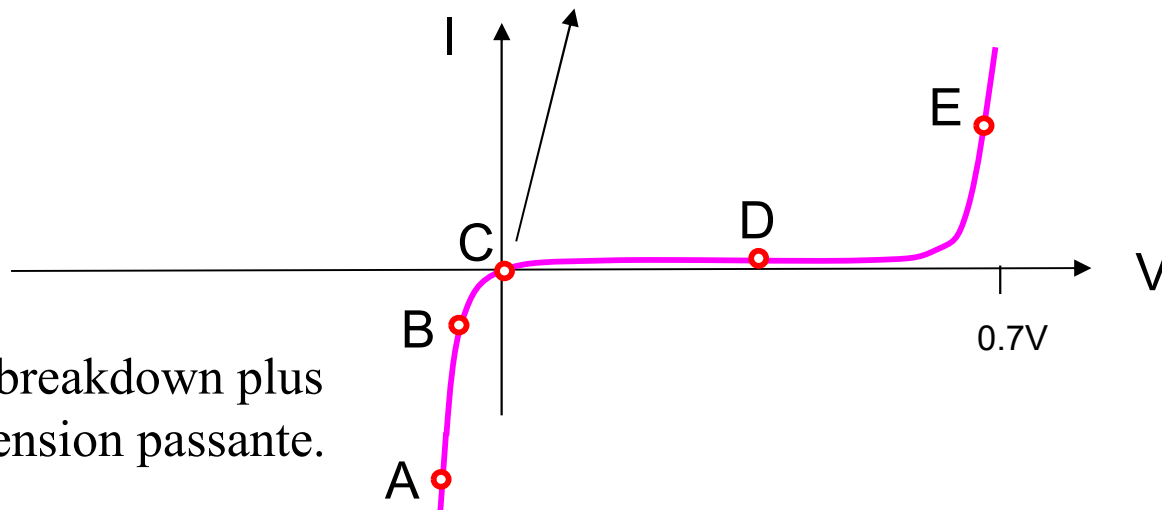
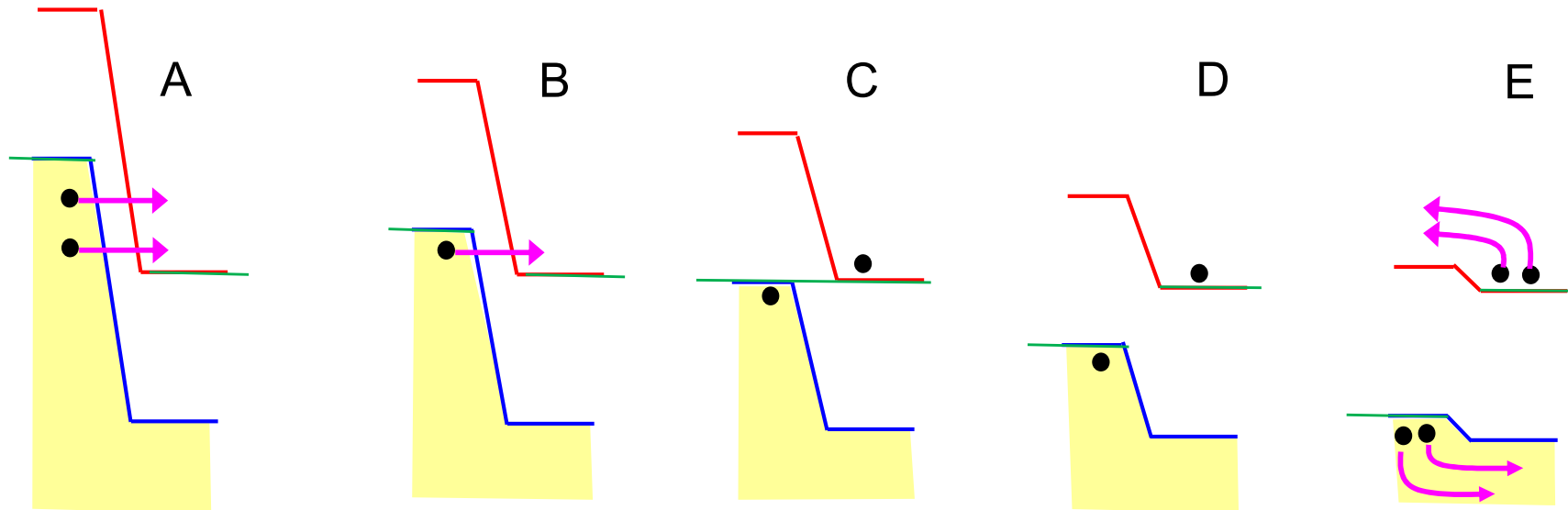


One-sided abrupt silicon PN diode

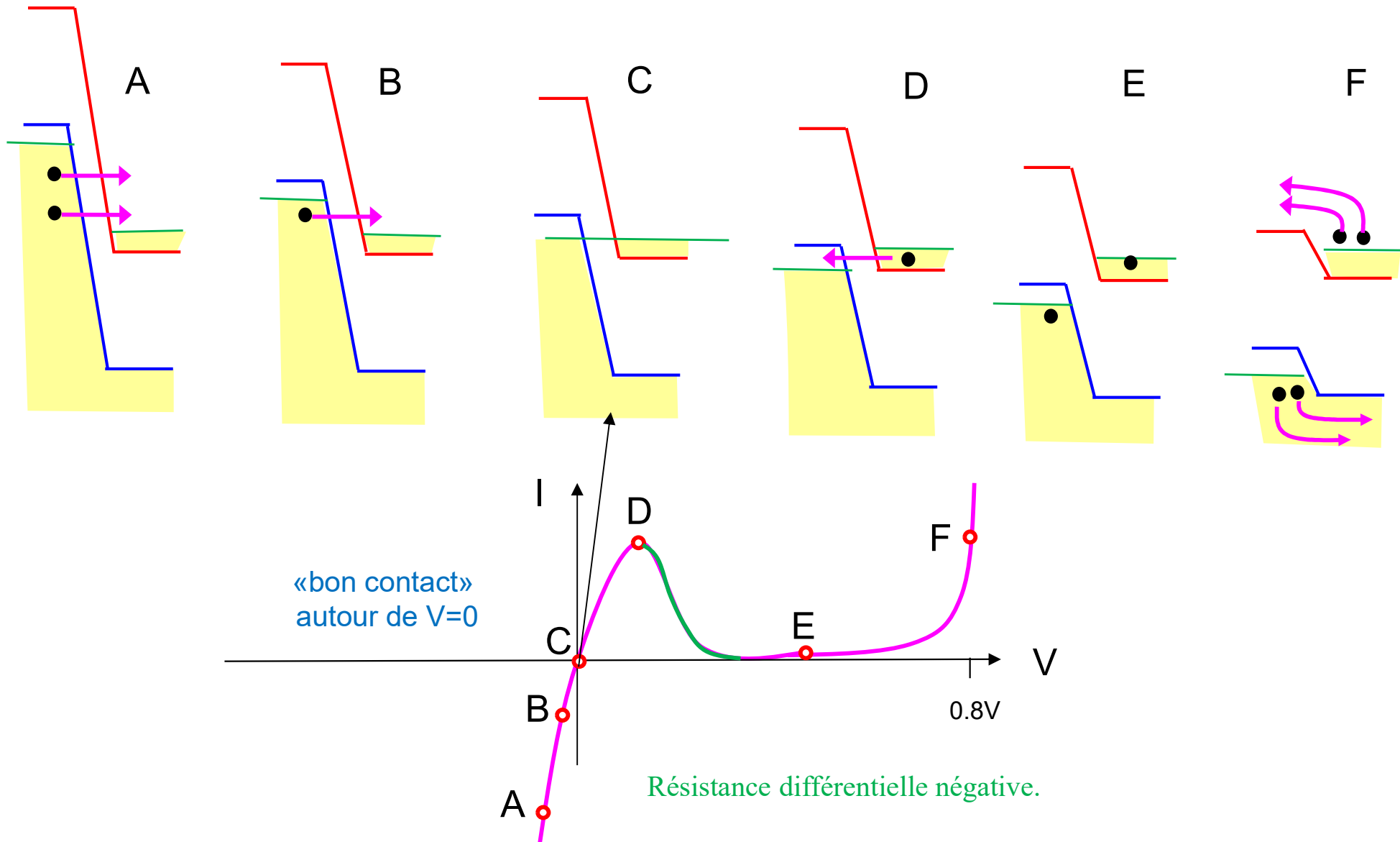
Inspiré de:

<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/breakdown.htm>

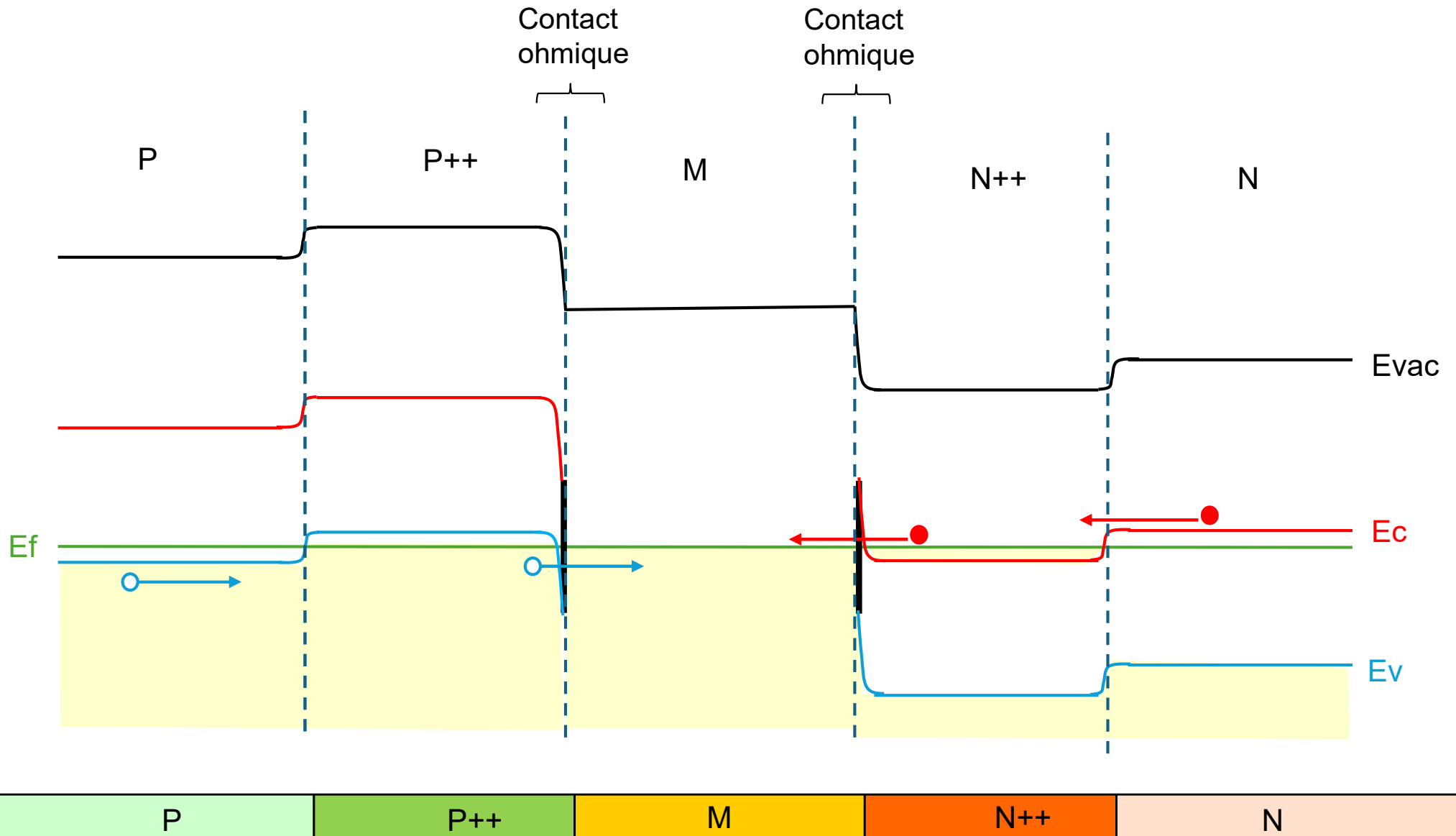
L'effet tunnel
demande
des dopages
très élevés



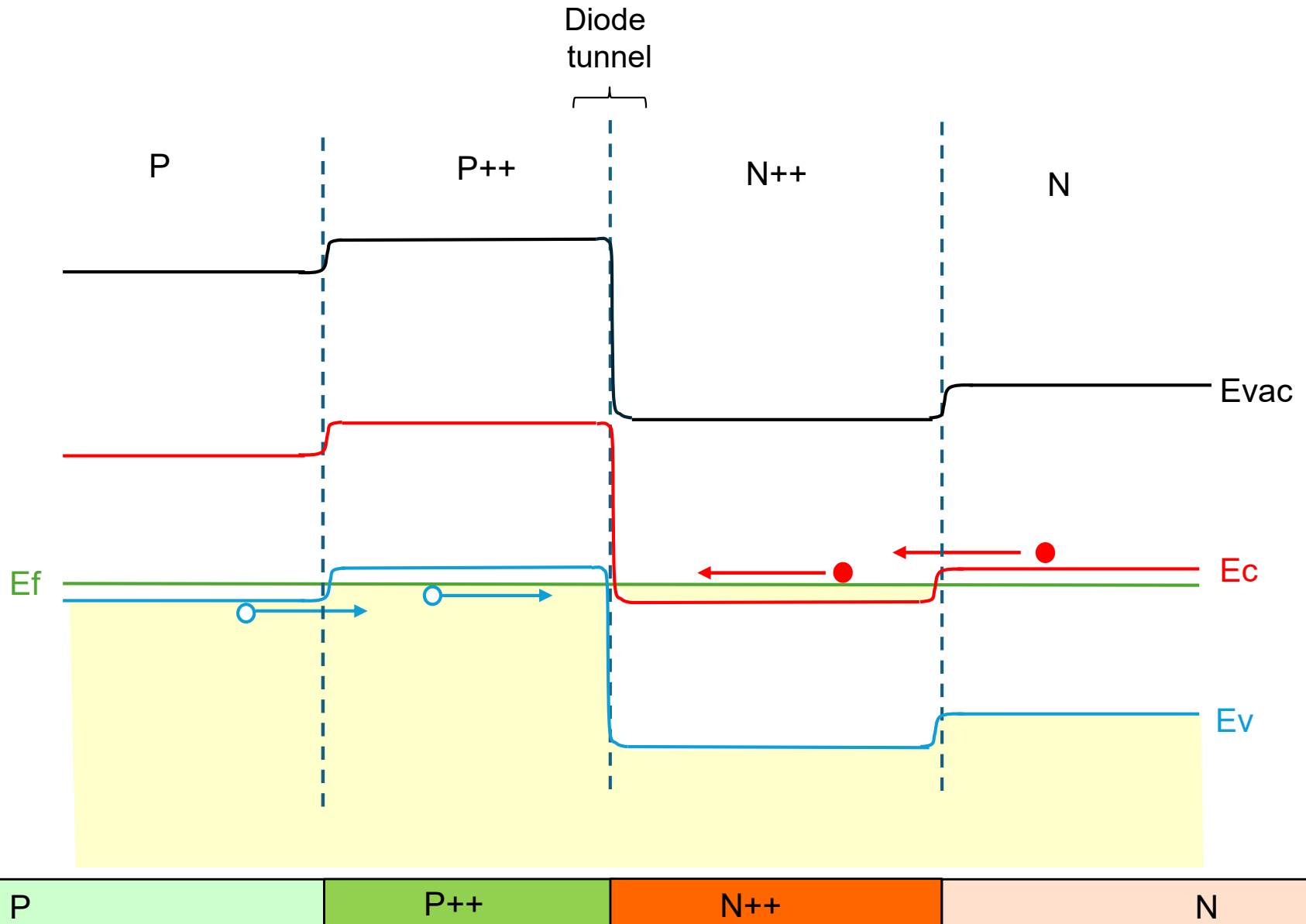
Tension de breakdown plus faible que tension passante.



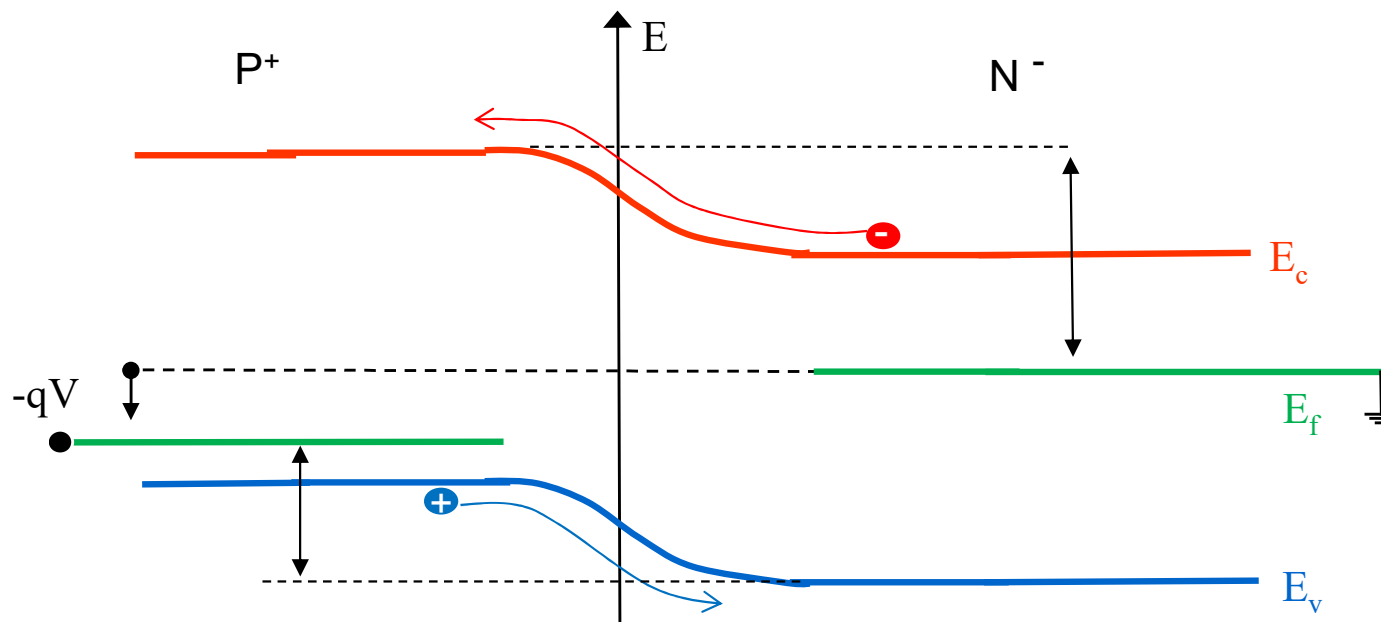
Contact ohmique PN standard: P⁺⁺ / Métal / N⁺⁺



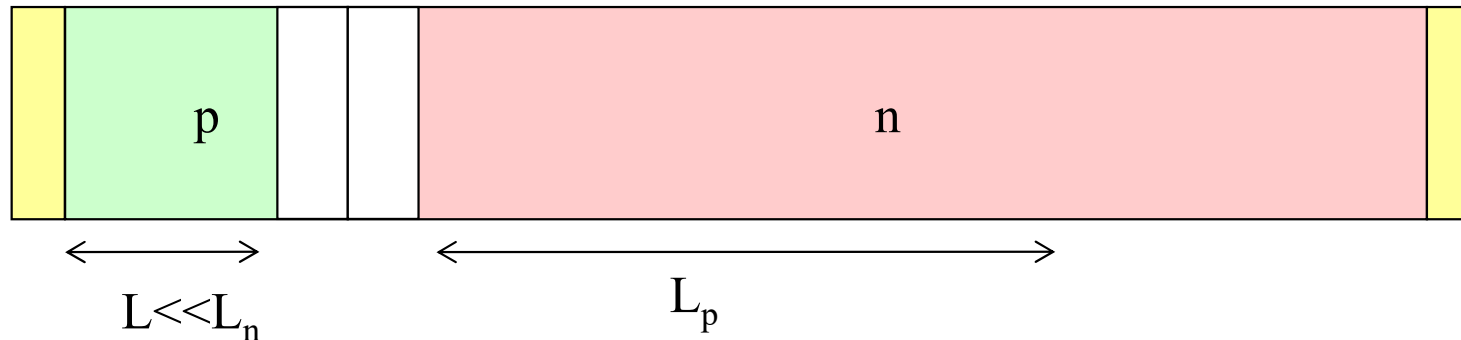
Contact ohmique PN :

$$P^{++} / N^{++}$$


Exercice E6.1: diode p^+/n^- , passante



En mode passant, le courant dans la jonction est-il dominé par des électrons ou par des trous ?

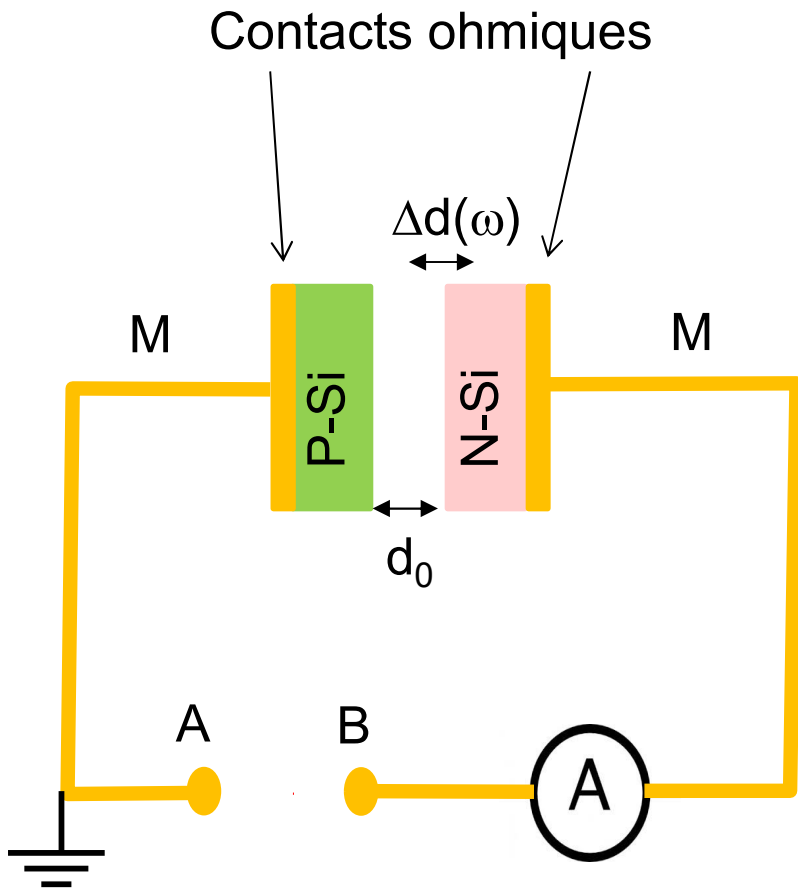


Les courants de diffusion des minoritaires sont obtenus en calculant le gradient des concentrations de minoritaires.

Celles-ci sont calculées en résolvant les équations de continuité avec deux conditions aux bords.

Supposons que ces deux conditions ne varient pas.

-Que se passe-t-il si la zone P devient nettement plus courte que la longueur de diffusion des électrons L_n ?



$$\phi_m = \chi_s + \frac{E_g}{2}$$

- 1) Lorsque les plaques de silicium se touchent ($d_0=0$):
 - Esquissez le schéma de bande
 - Quelle est la tension au point B ?
- 2) Les points A et B sont court-circuités.
 - Esquissez le schéma de bande pour $d_0 > 0$
 - Comment varient la tension et les charges à l'interface P-Si/N-Si en fonction de la distance d_0 ?
- 3) La distance d_0 est fixée et on ajoute une petite variation Δd à fréquence ω .
 - Montrez qu'un courant apparait à fréquence ω , les points A et B étant toujours court-circuités.
- 4) Une tension $-V_{bi}$ est imposée au point B.
 - Esquissez le schéma de bande.
 - Montrez que le courant disparaît, la variation $\Delta d(\omega)$ étant toujours appliquée.