

PHYSIQUE DES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

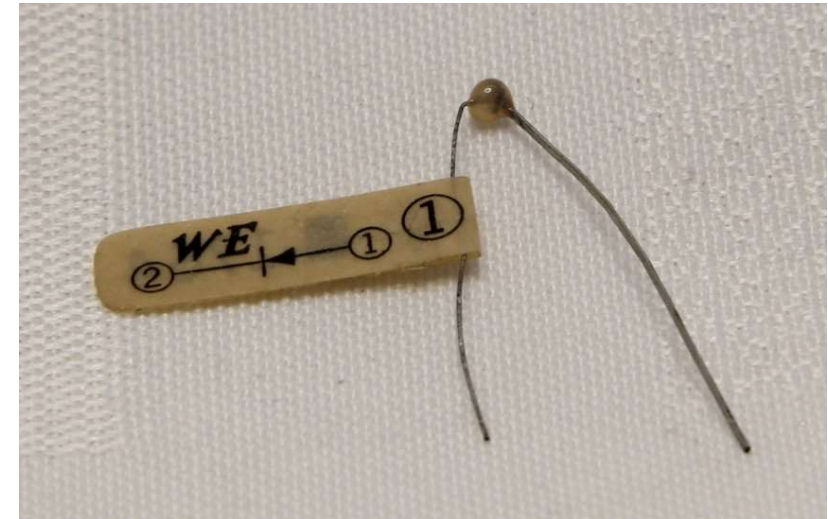
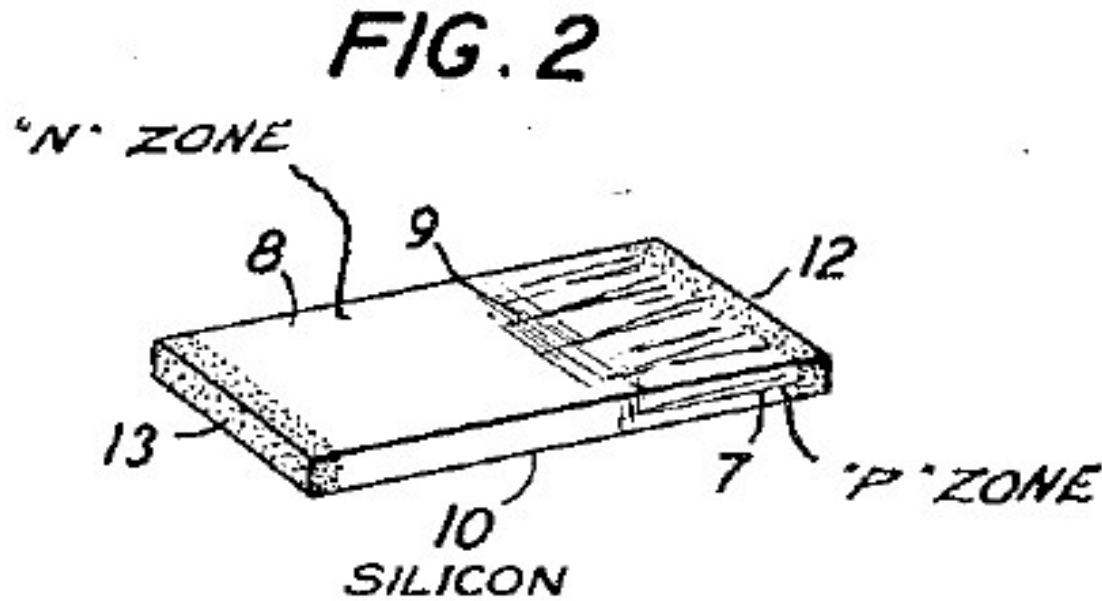
VI) Jonction p/n

P.A. Besse

EPFL

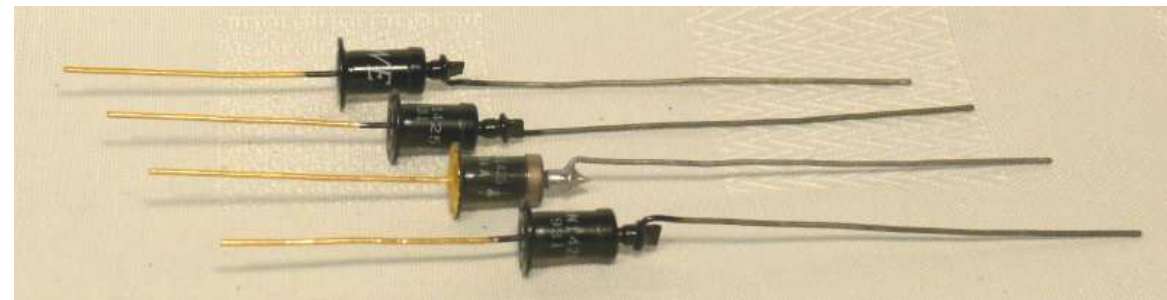
1940 - Junction p/n Russel Ohl

1952: Germanium PN diode (WE 1764)



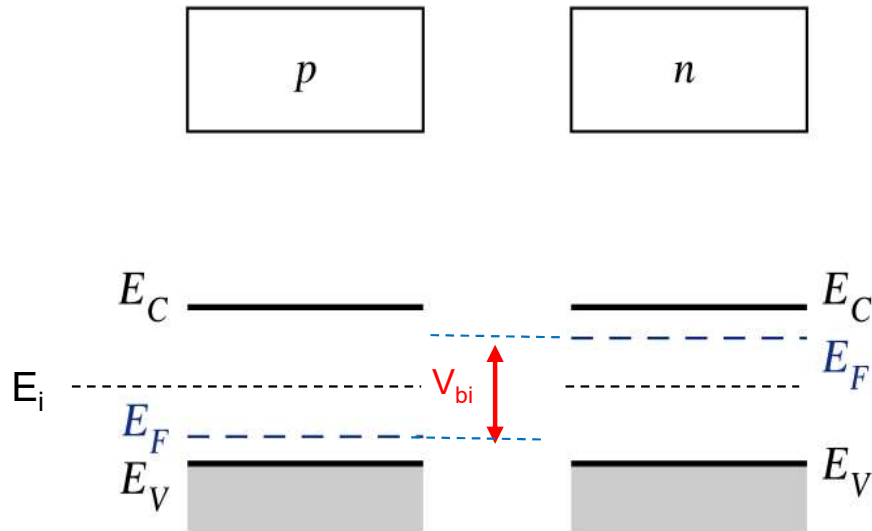
Germanium PN diode (WE 1N1425)

Ohl, US patent 1941



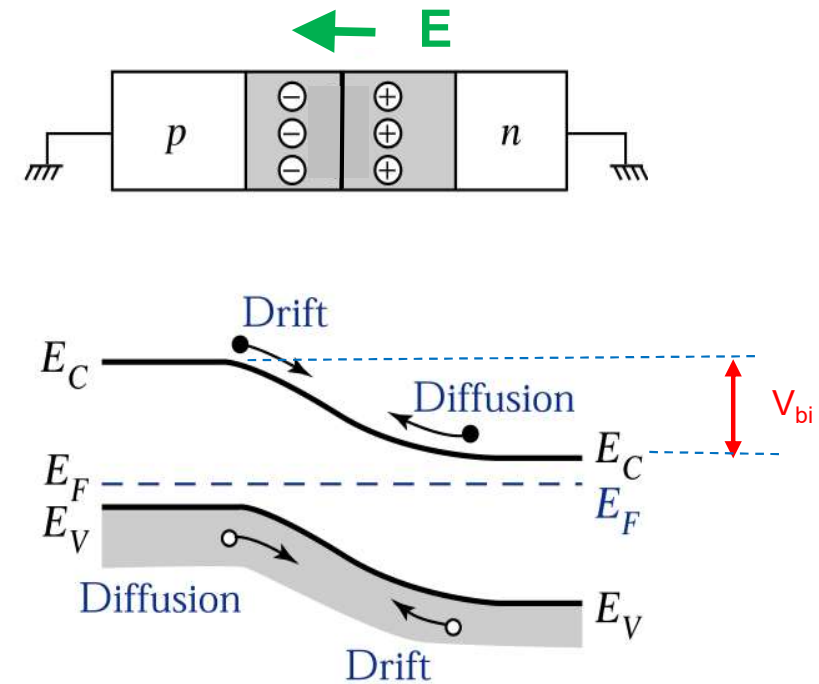
Jonction p/n à l'équilibre (1)

Régions p et n séparées



S. Sze
« Semiconductor devices »

Jonction p/n

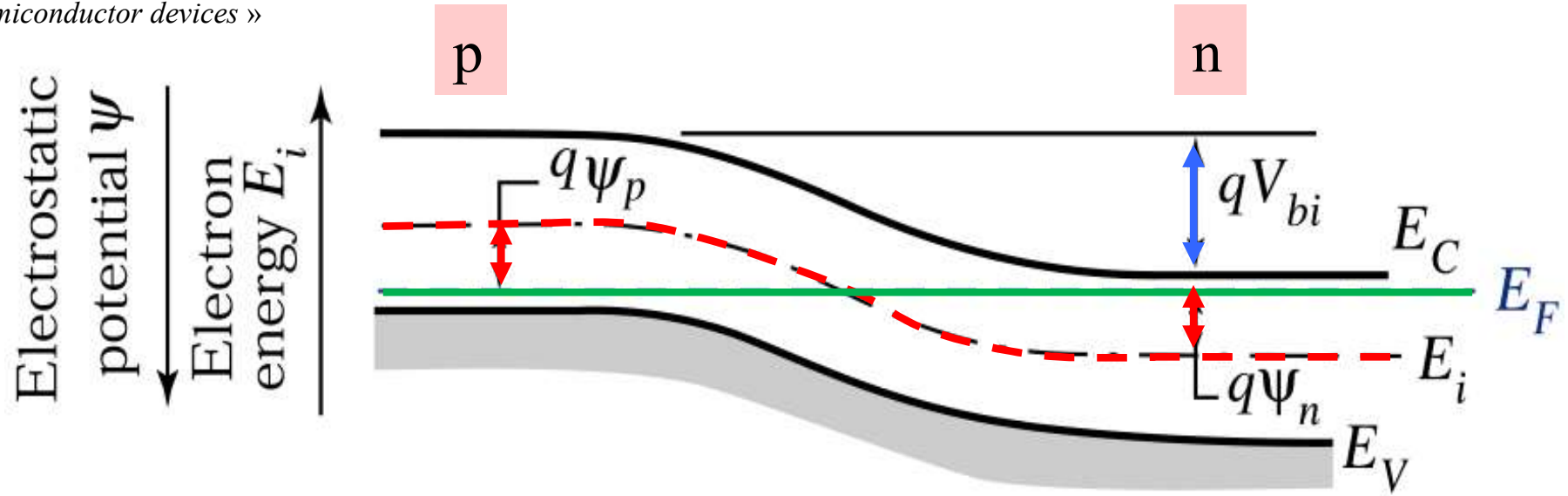


Le courant de diffusion crée une zone de déplétion.
Le champ électrique associé produit un courant de drift
et maintient le courant total nul et le niveau de Fermi constant.

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

S. Sze

« Semiconductor devices »

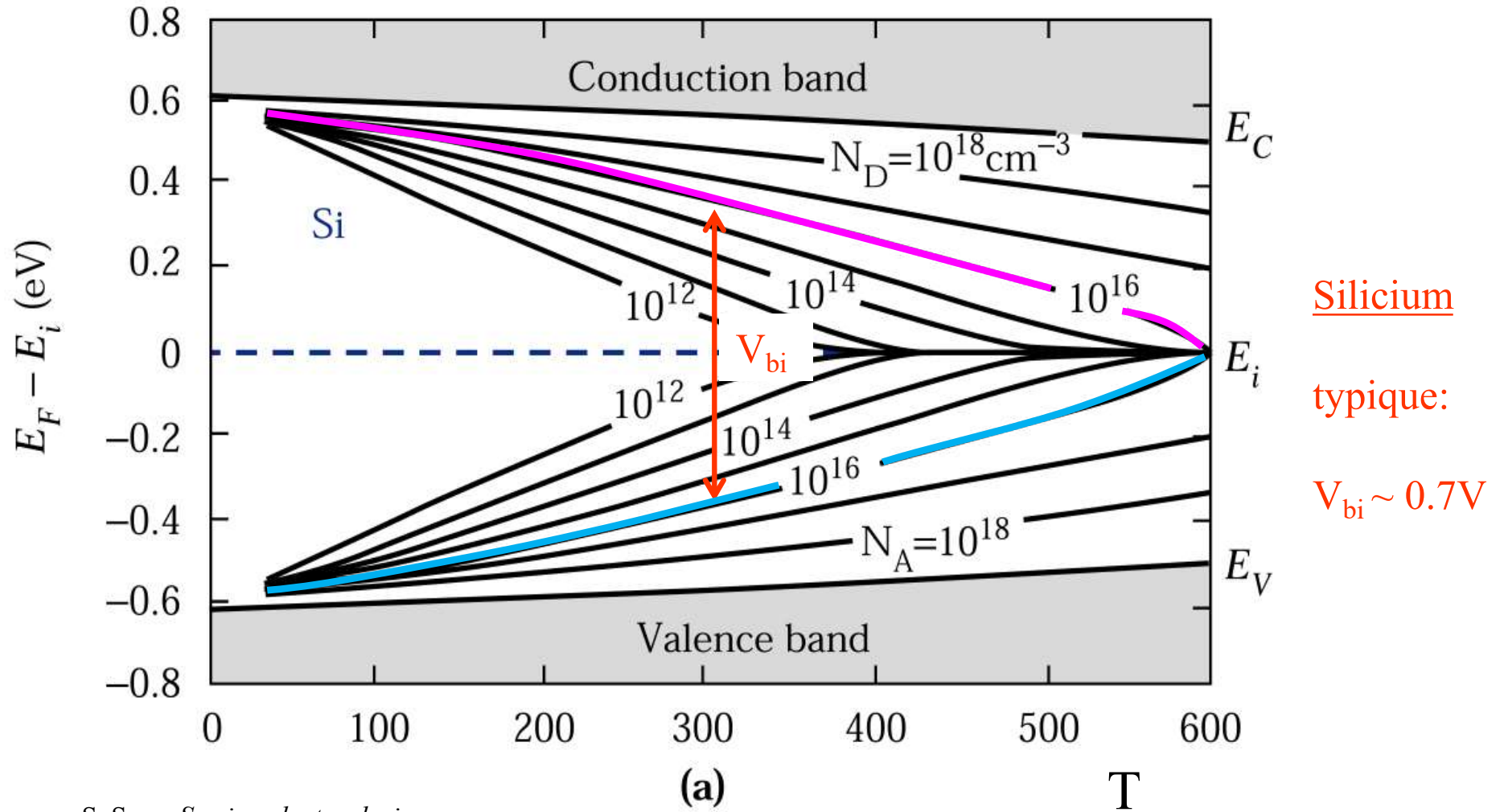


Il n'y a pas de courant à l'équilibre $\rightarrow E_F$ est constant

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

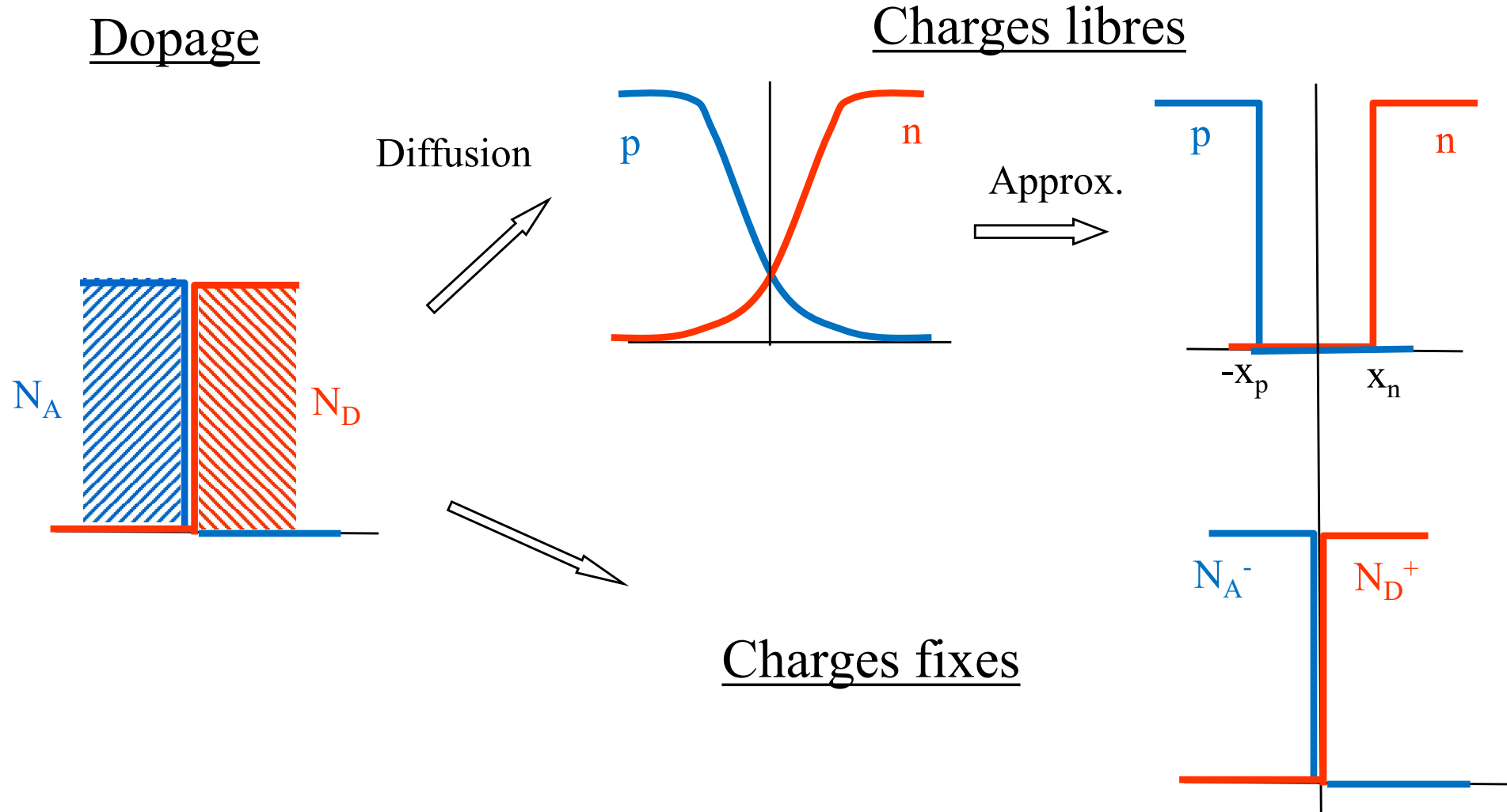


S. Sze « Semiconductor devices »

(a)

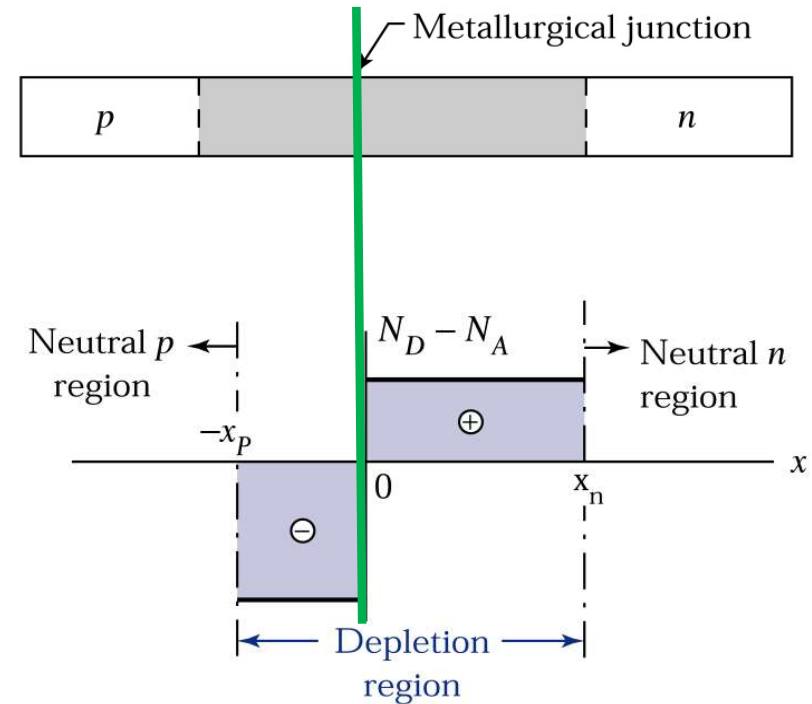
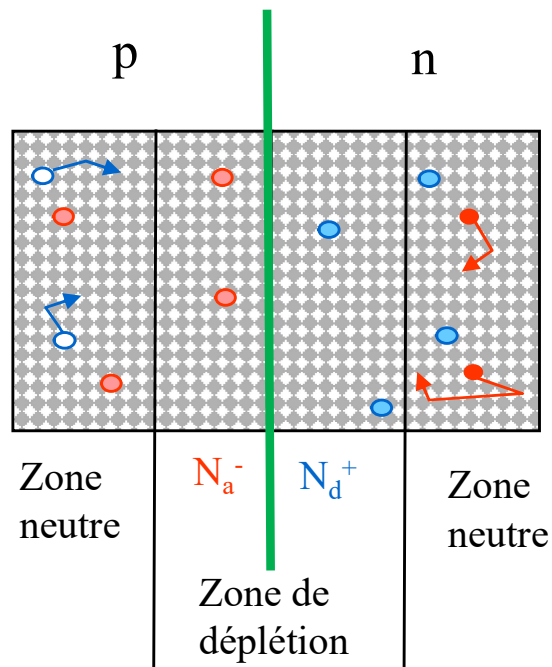
T

Approximation: «déplétion totale»



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

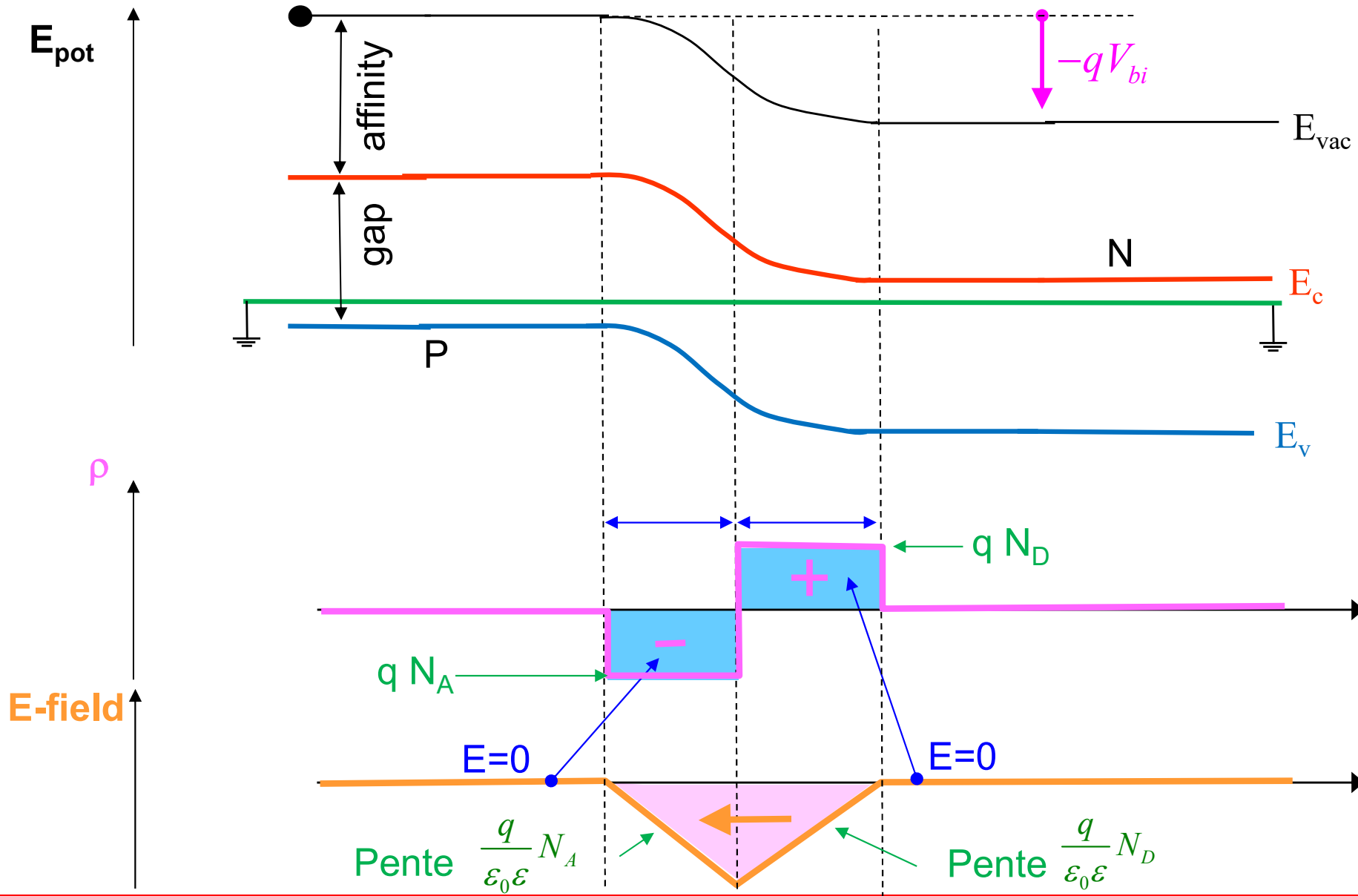
S. Sze « *Semiconductor devices* »



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

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

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

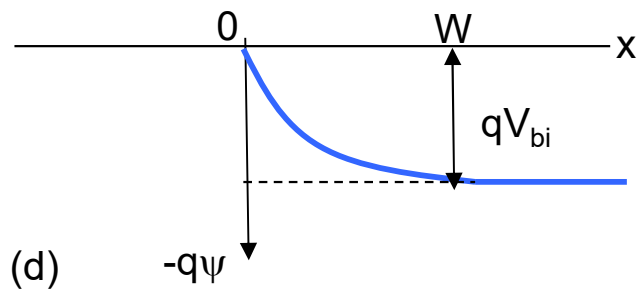
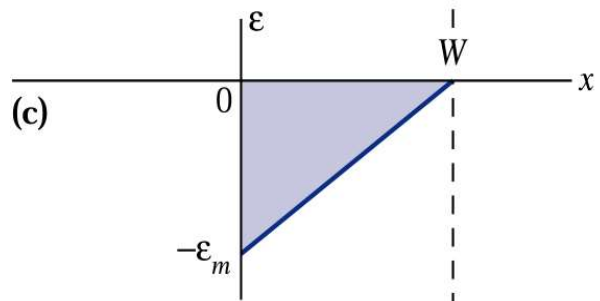
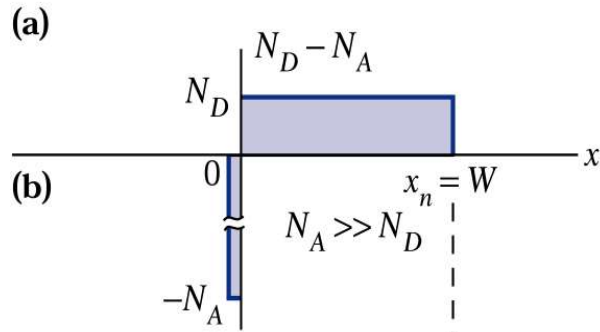
$$|E_{\max}| = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} N_D \cdot x_n = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{N_D \cdot N_A}{N_A + N_D} \cdot W$$

- ③ Surface du triangle = V_{bi}

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

Exemple: jonction p⁺/n⁻

Partiellement repris de S. Sze « *Semiconductor devices* »

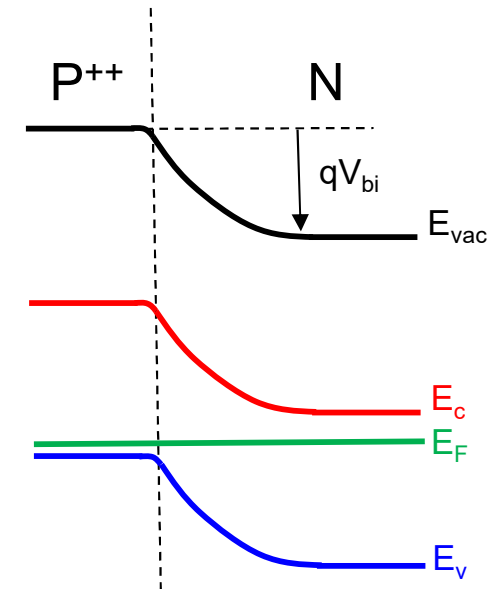
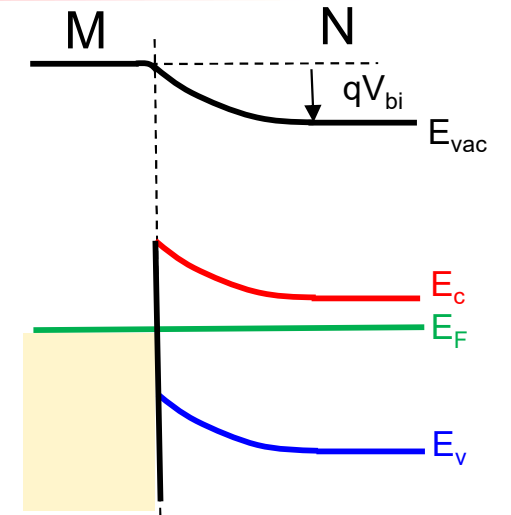


$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{q} \cdot \frac{1}{N_D} \cdot V_{bi}}$$

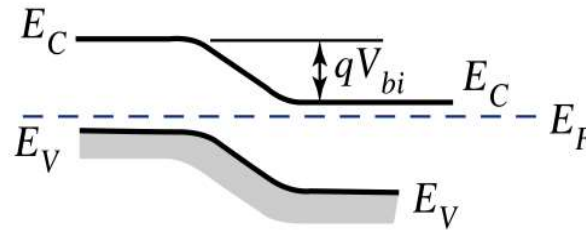
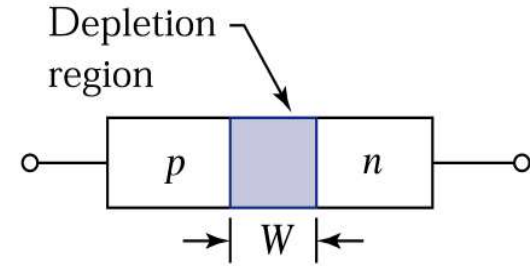
$$E_m = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon} \cdot N_D \cdot W$$

$$E = -E_m \cdot \left(1 - \frac{x}{W}\right)$$

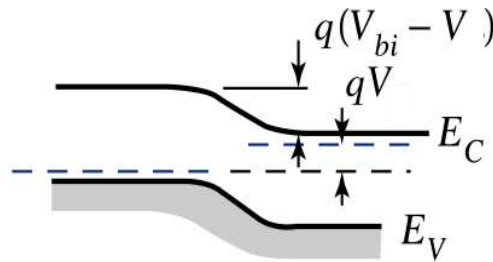
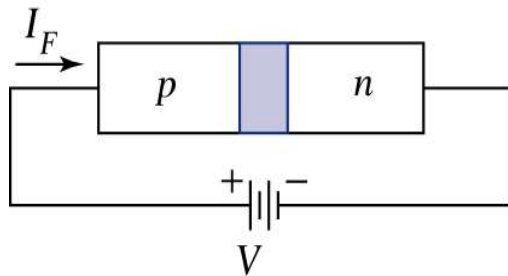
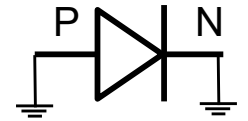
$$E_{vac}(x) = -q \cdot V_{bi} + \frac{q}{2} E_m \cdot W \cdot \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2$$



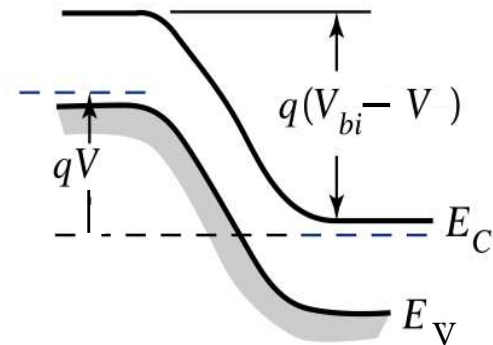
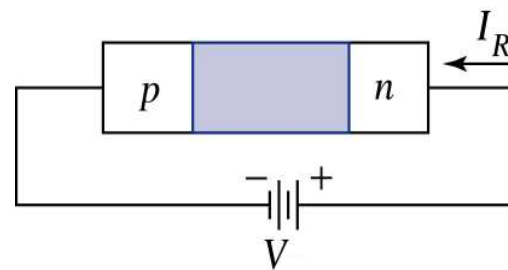
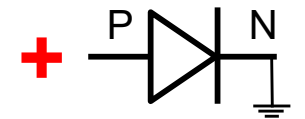
Jonction p/n hors équilibre: bandes



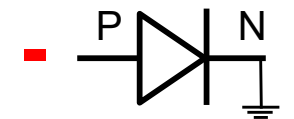
Equilibre



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.

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

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

S. Sze « Semiconductor devices »

$$x_p = W \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

$$x_n = W \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

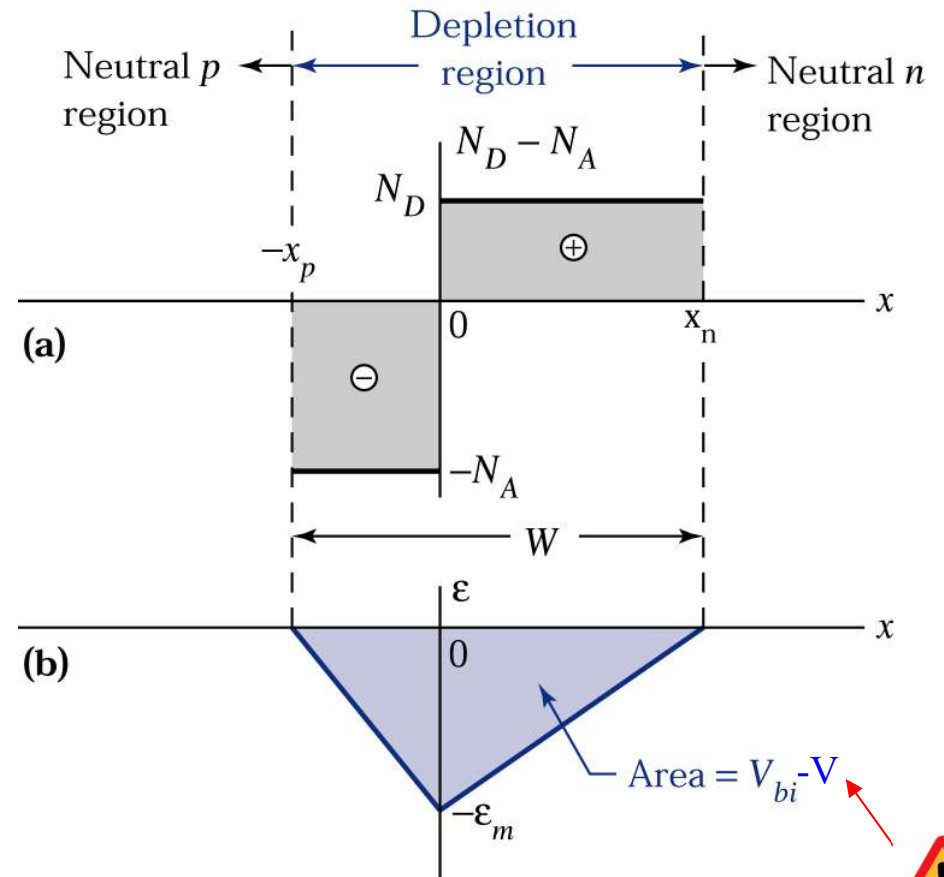
$$E_m = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon} \cdot N_D \cdot x_n = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon} \cdot N_D \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot W$$

$$E(x) = -E_m \cdot \left(1 - \frac{|x|}{x_p}\right) \quad \text{pour } -x_p \leq x \leq 0$$

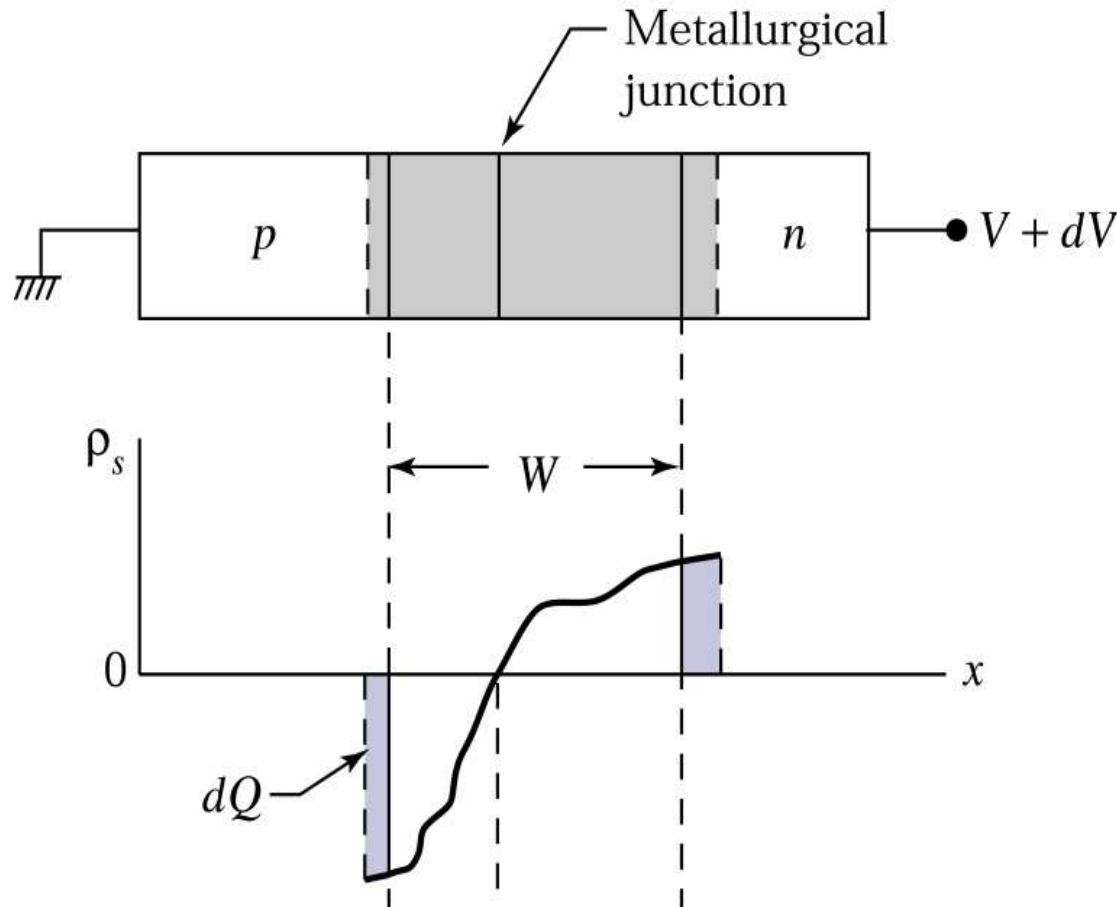
$$E(x) = -E_m \cdot \left(1 - \frac{|x|}{x_n}\right) \quad \text{pour } 0 \leq x \leq x_n$$

$$-q \cdot \phi(x) = -\frac{q}{2} E_m \cdot x_p \cdot \left(1 - \frac{|x|}{x_p}\right)^2 \quad \text{pour } -x_p \leq x \leq 0$$

$$-q \cdot \phi(x) = -q \cdot (V_{bi} - V) + \frac{q}{2} E_m \cdot x_n \cdot \left(1 - \frac{|x|}{x_n}\right)^2 \quad \text{pour } 0 \leq x \leq x_n$$



Jonction p/n hors équilibre: capacité de jonction



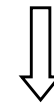
S. Sze « Semiconductor devices »

a) Tension appliquée:
 V

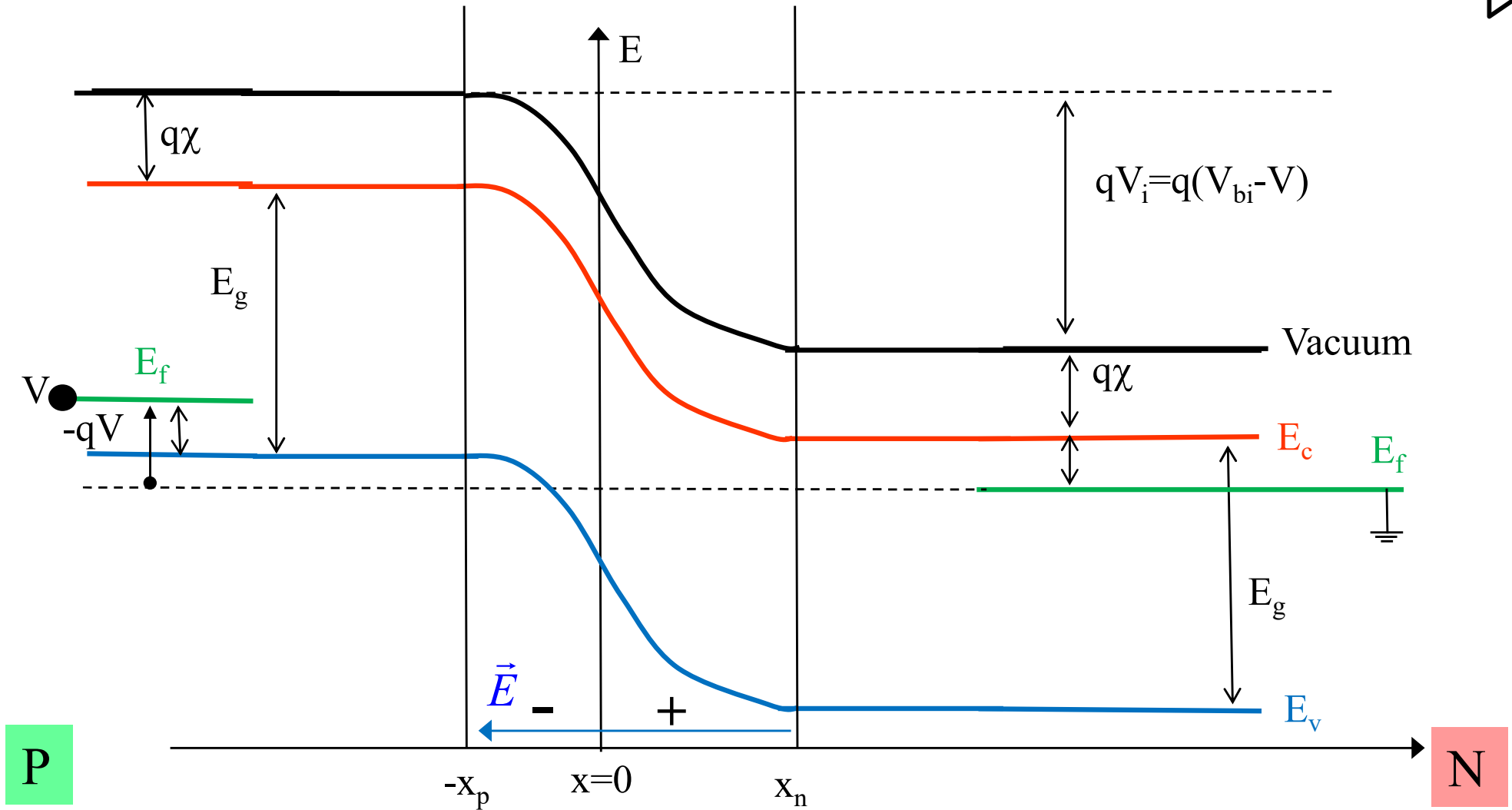
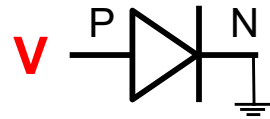
b) Charge accumulée sur une surface A :
 $Q = q N_D x_n A$

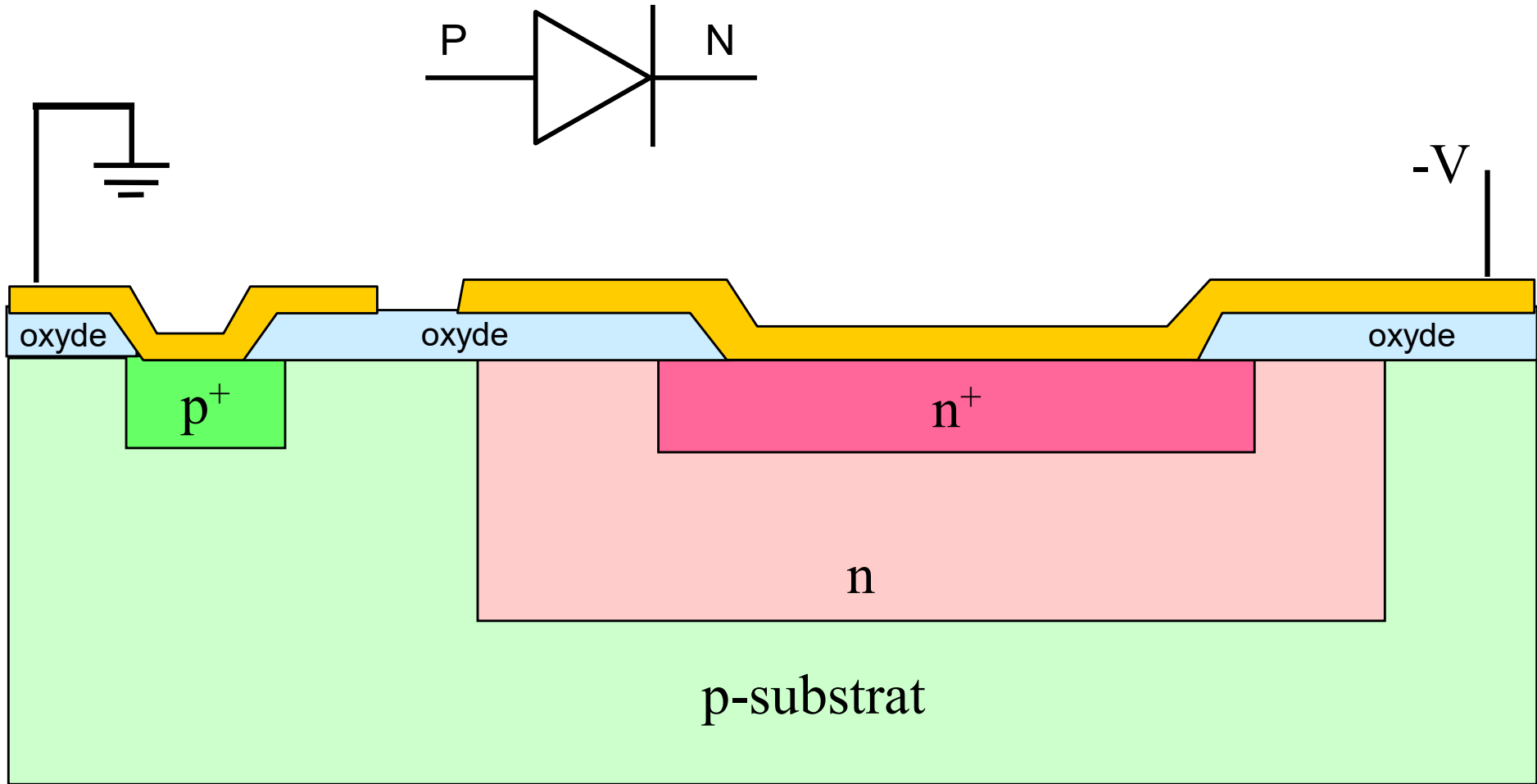
c) Capacité par surface:

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



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



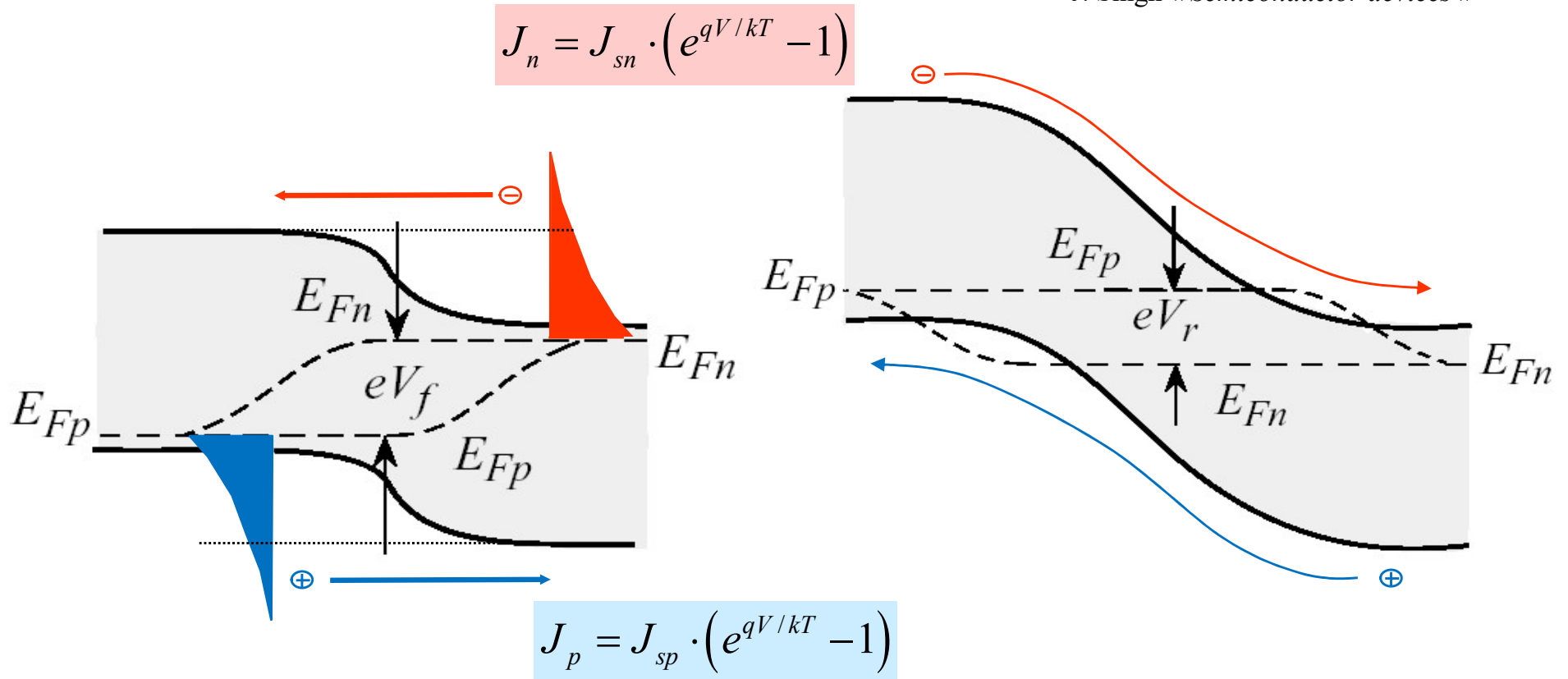


Interprétation «naive» des courants: simple thermo-émission

Passante Injection de minoritaires

Bloquante Extraction de minoritaires

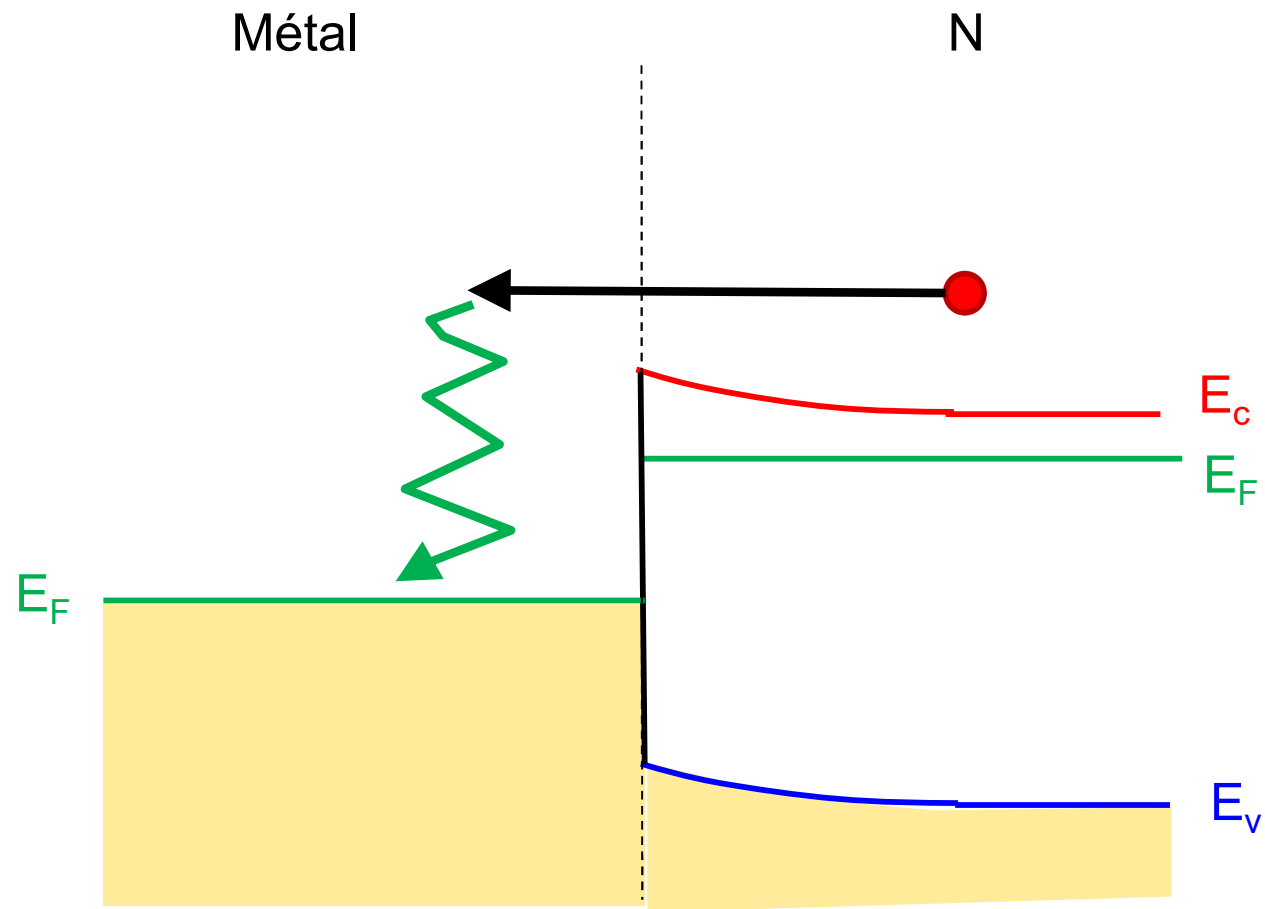
J. Singh « Semiconductor devices »



Mais: injection de minoritaires → accumulation

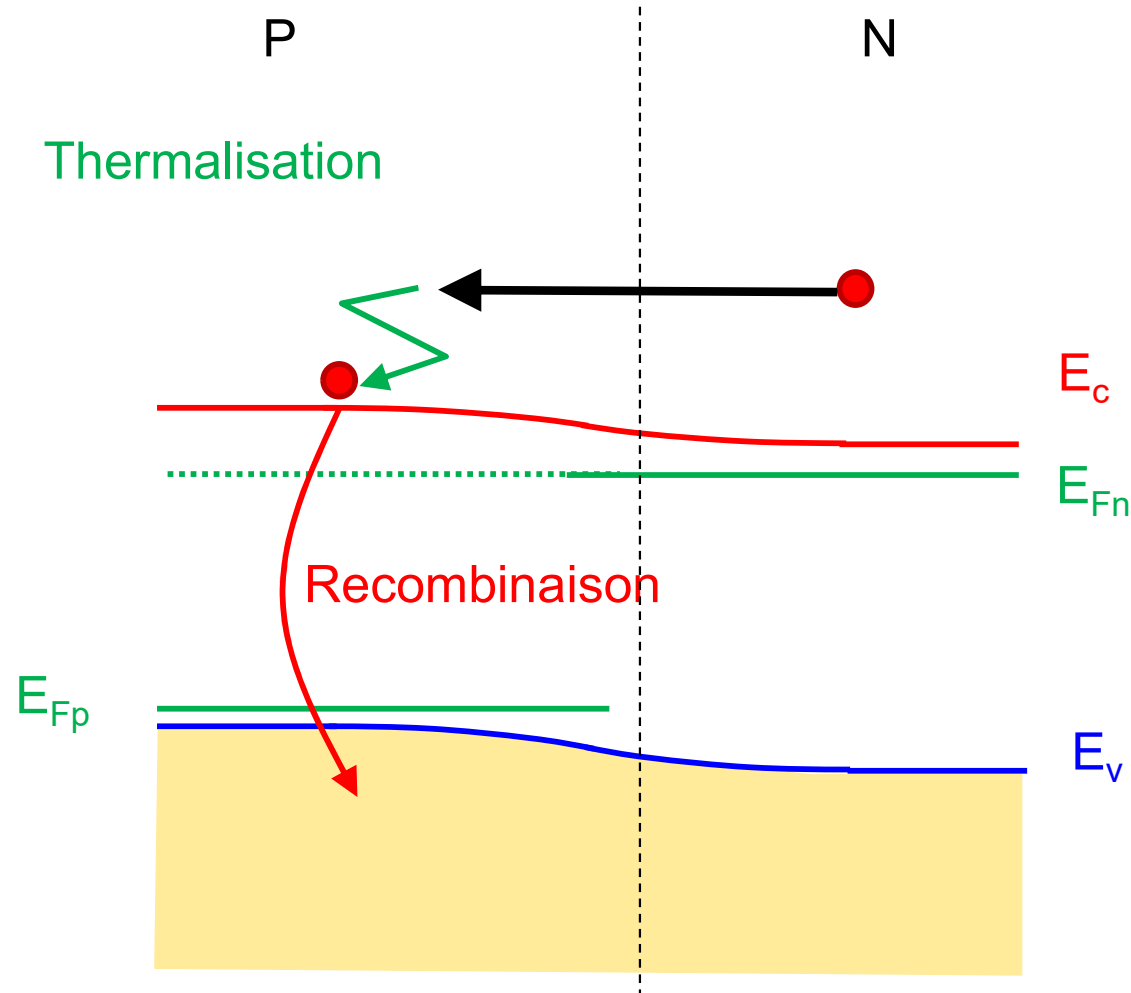


Zones et courants de diffusion

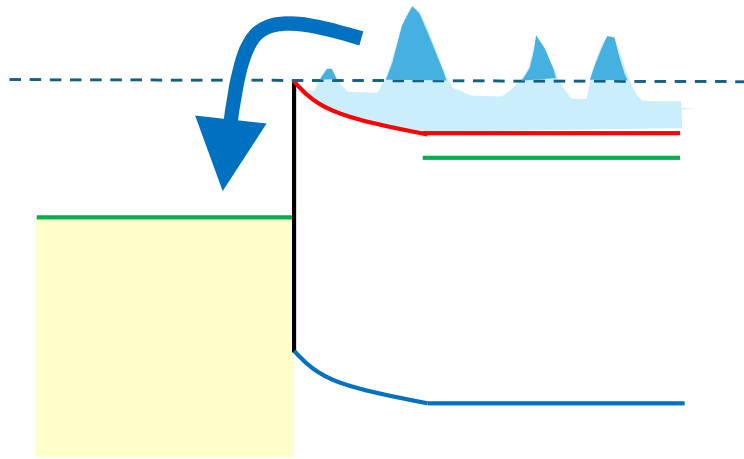


La thermalisation est quasi «instantanée»

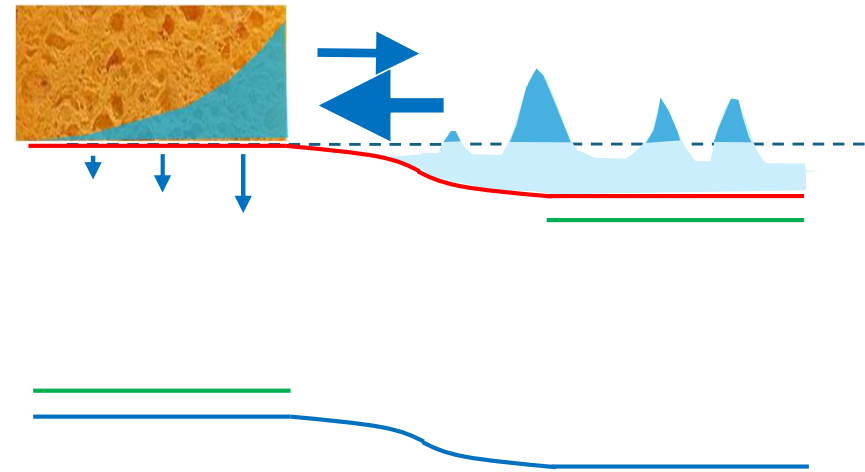
Temps de vie des minoritaires et diode PN



La recombinaison détermine le temps de vie des minoritaires

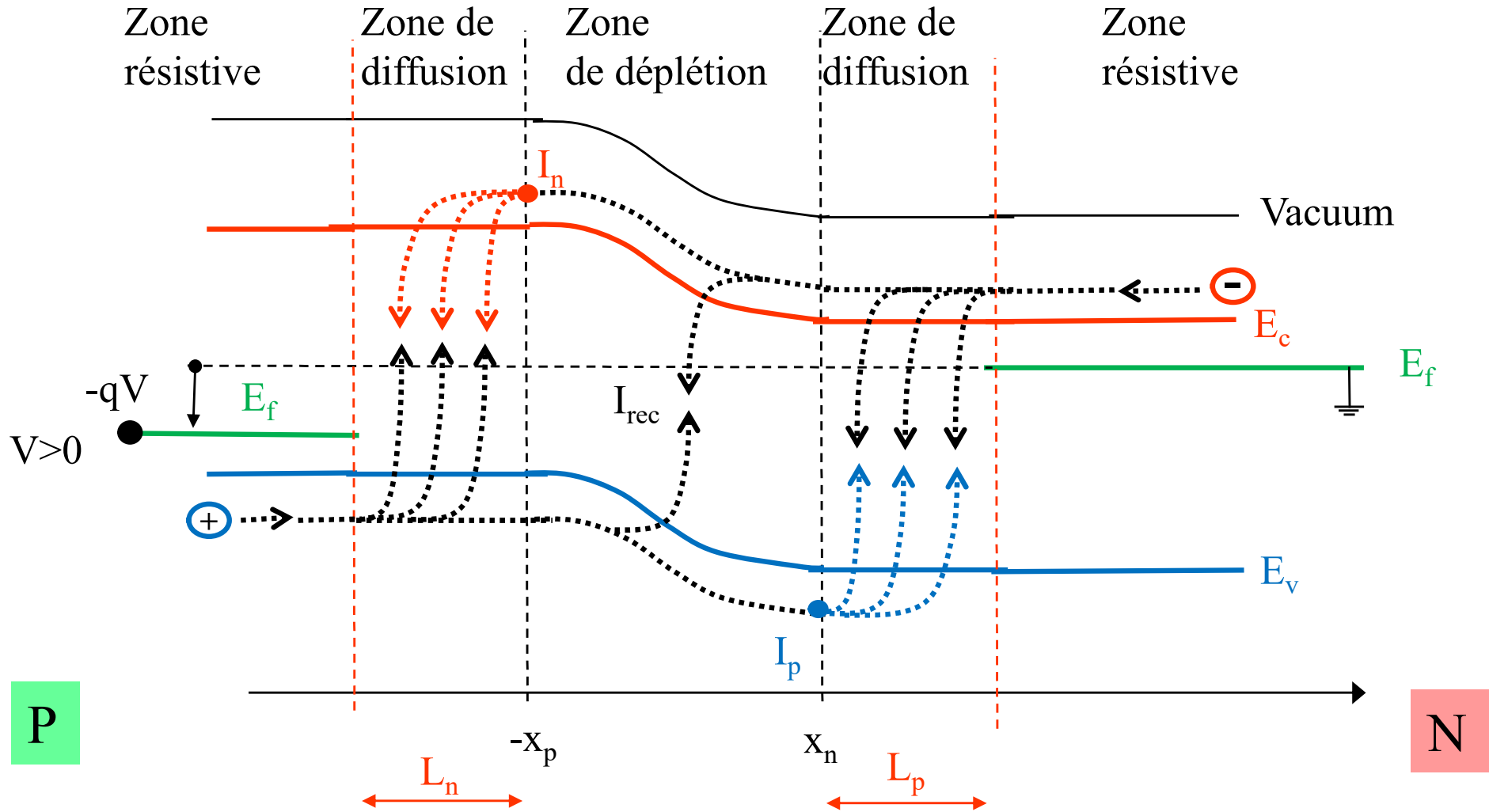


Thermo-
émission

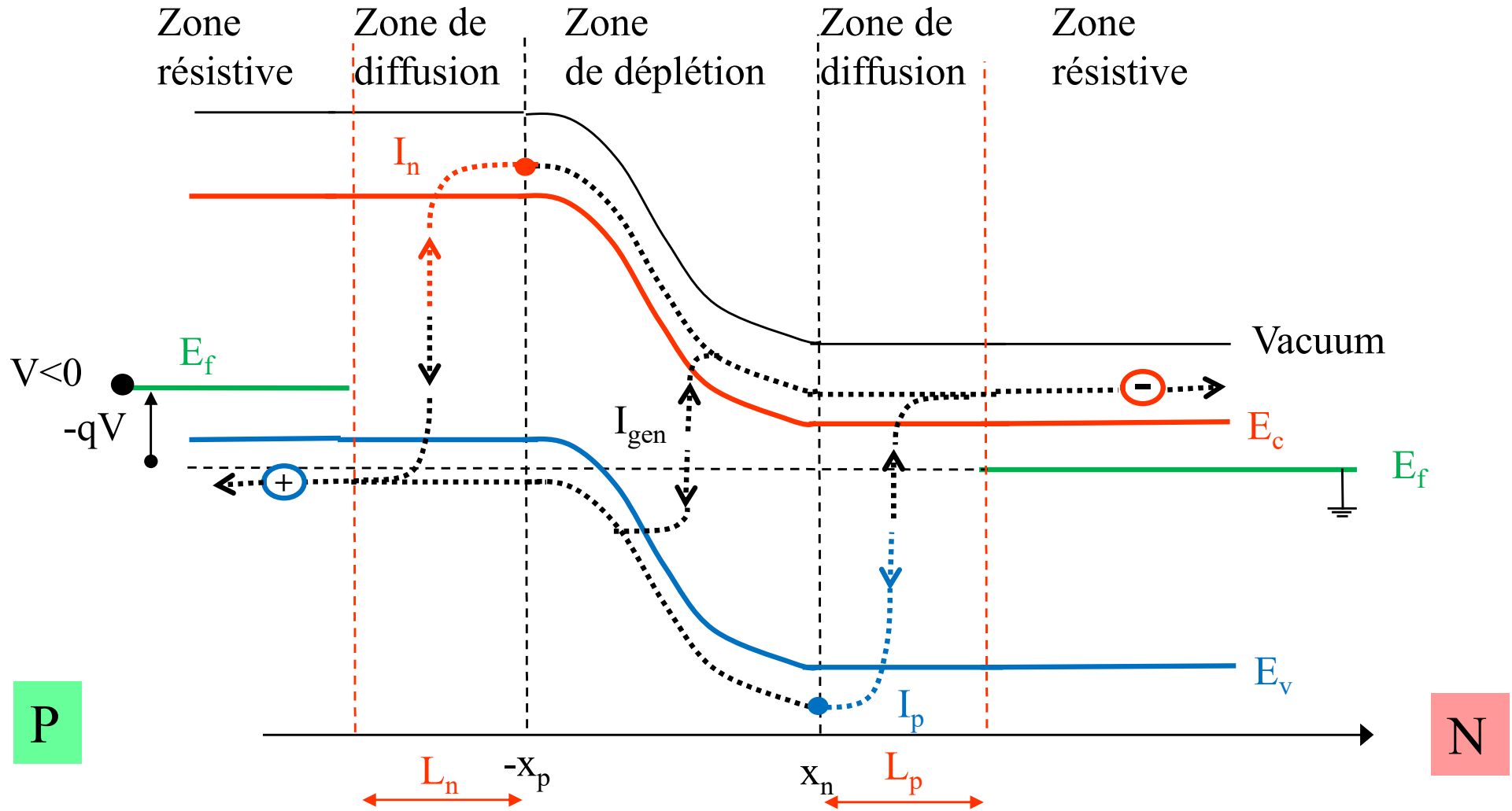


Diffusion et
recombinaison

Courants en polarisation passante



Courants en polarisation bloquante



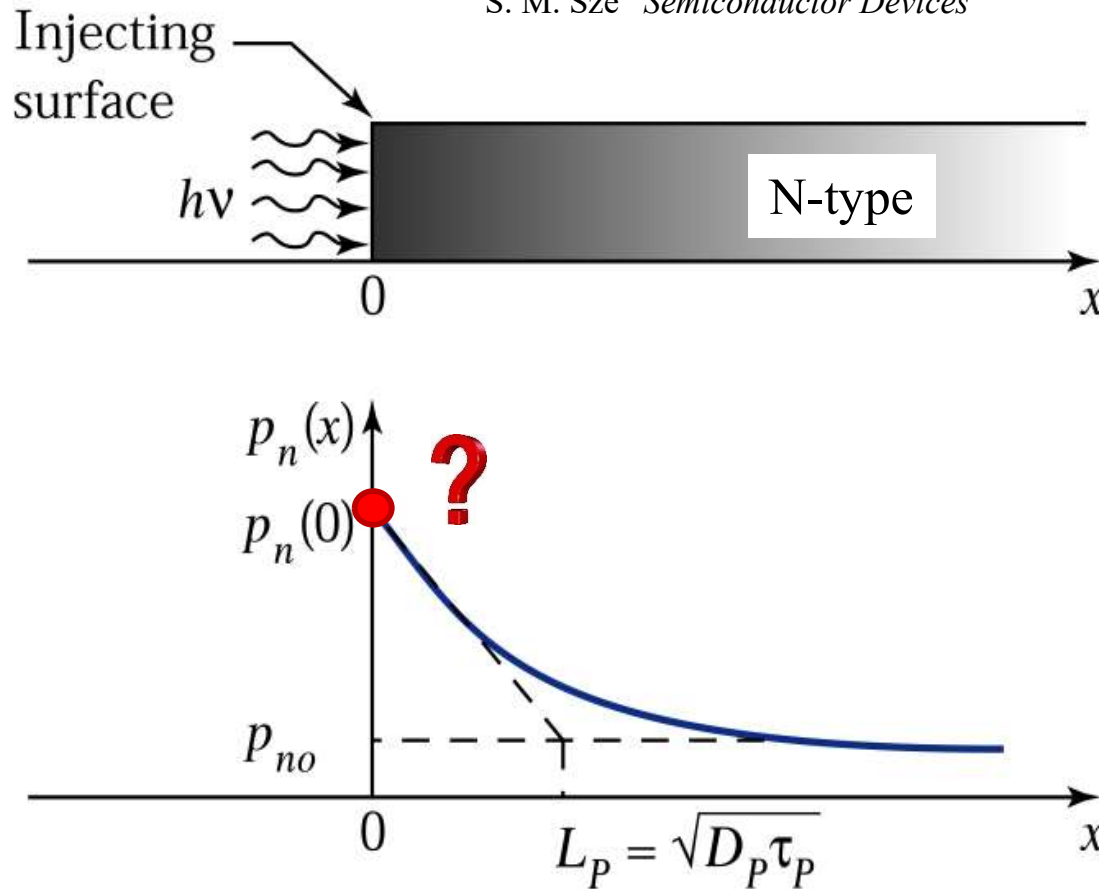
Diode idéale: la génération/recombinaison dans la zone de déplétion est négligeable
 → Il suffit de calculer l'injection de minoritaires

Etapas 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

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Typique: L [μm - mm]

Minoritaires

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

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

Solution:

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

Longueur de diffusion:

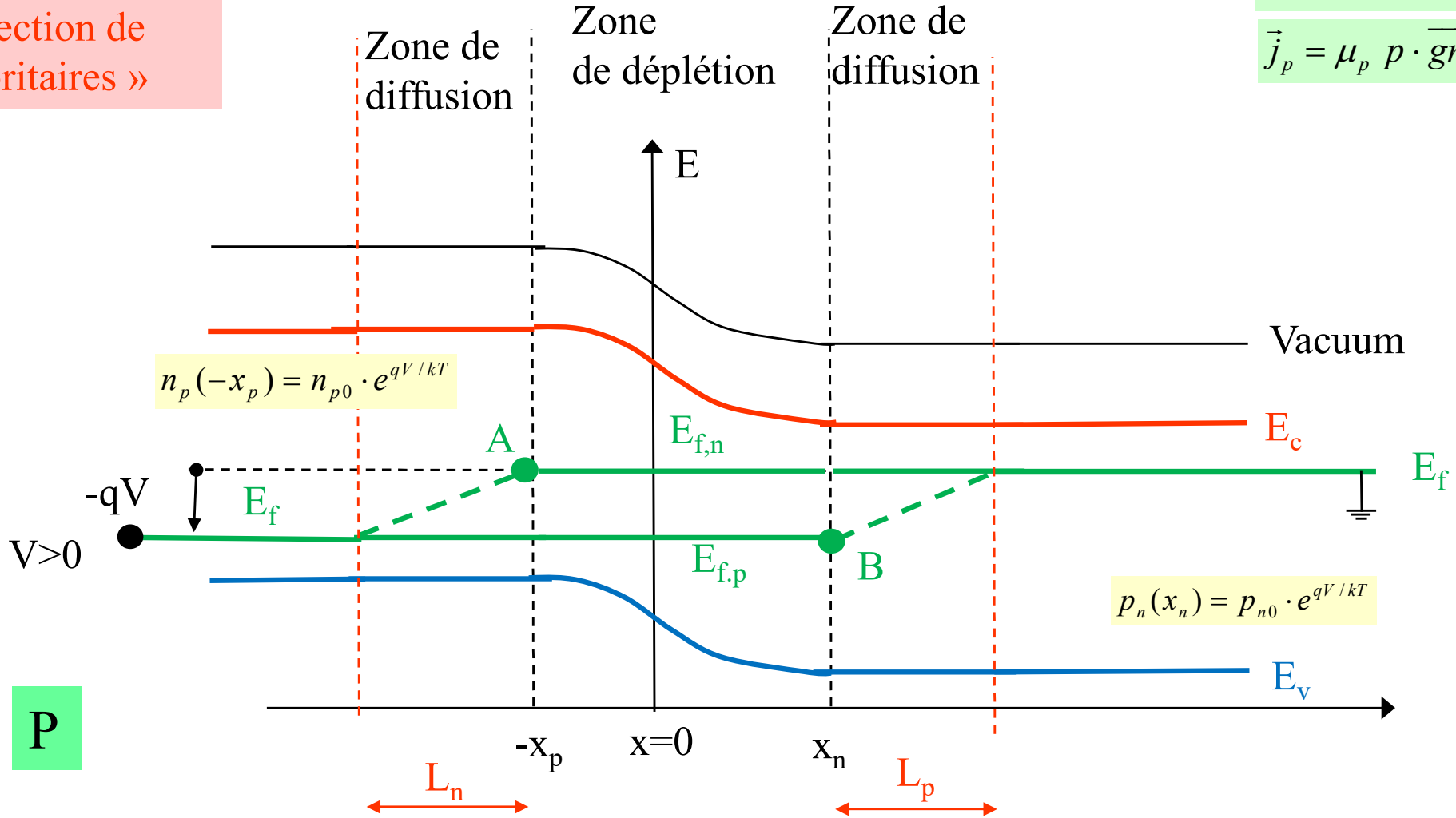
$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$$

Quasi-niveaux de Fermi: jonction passante

Jonction directe
« Injection de
minoritaires »

$$\vec{j}_n = \mu_n n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(E_{F,n})$$

$$\vec{j}_p = \mu_p p \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(E_{F,p})$$



N

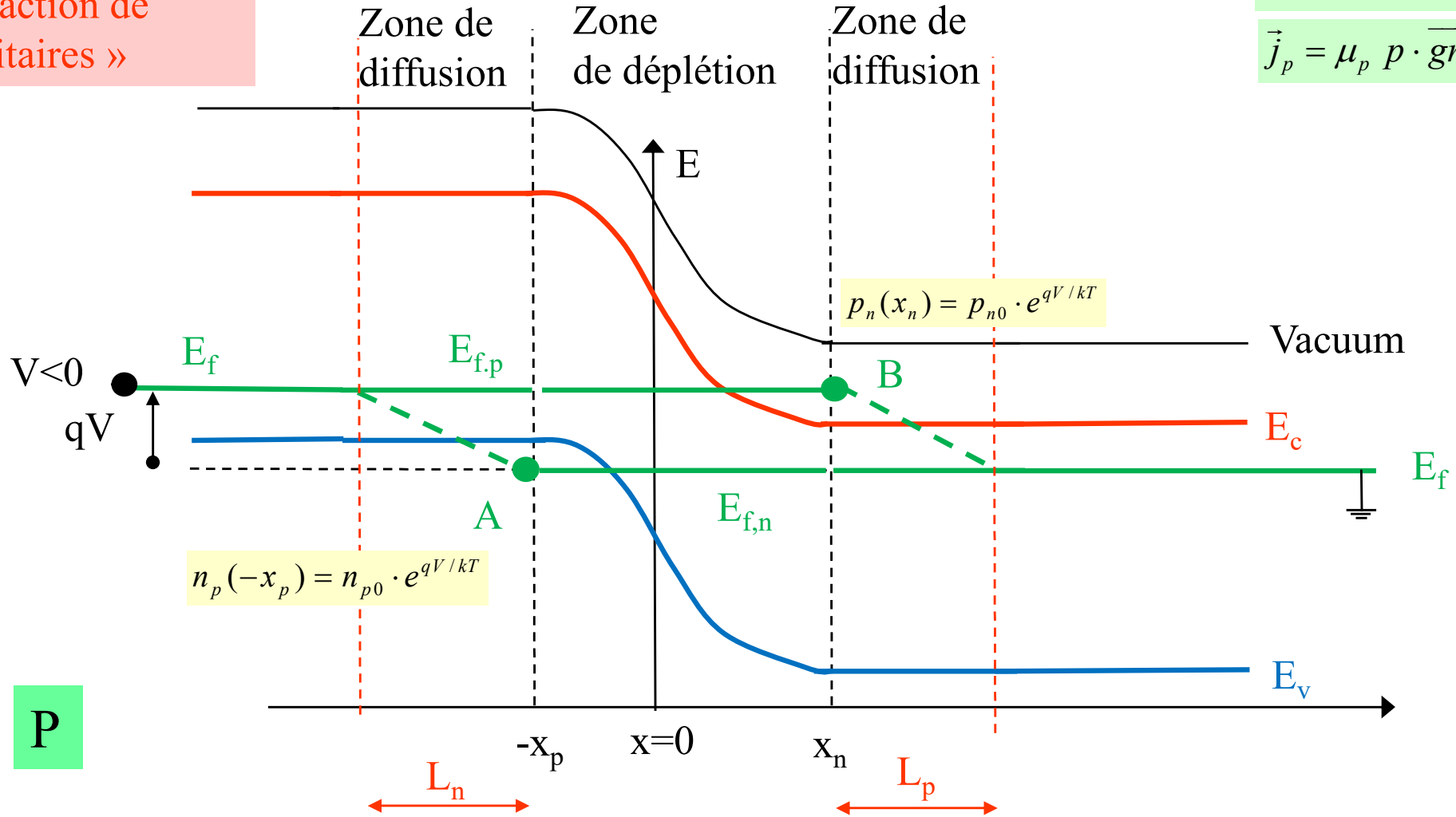
P

Quasi-niveaux de Fermi: jonction bloquante

Jonction bloquante
« Extraction de
minoritaires »

$$\vec{j}_n = \mu_n n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(E_{F,n})$$

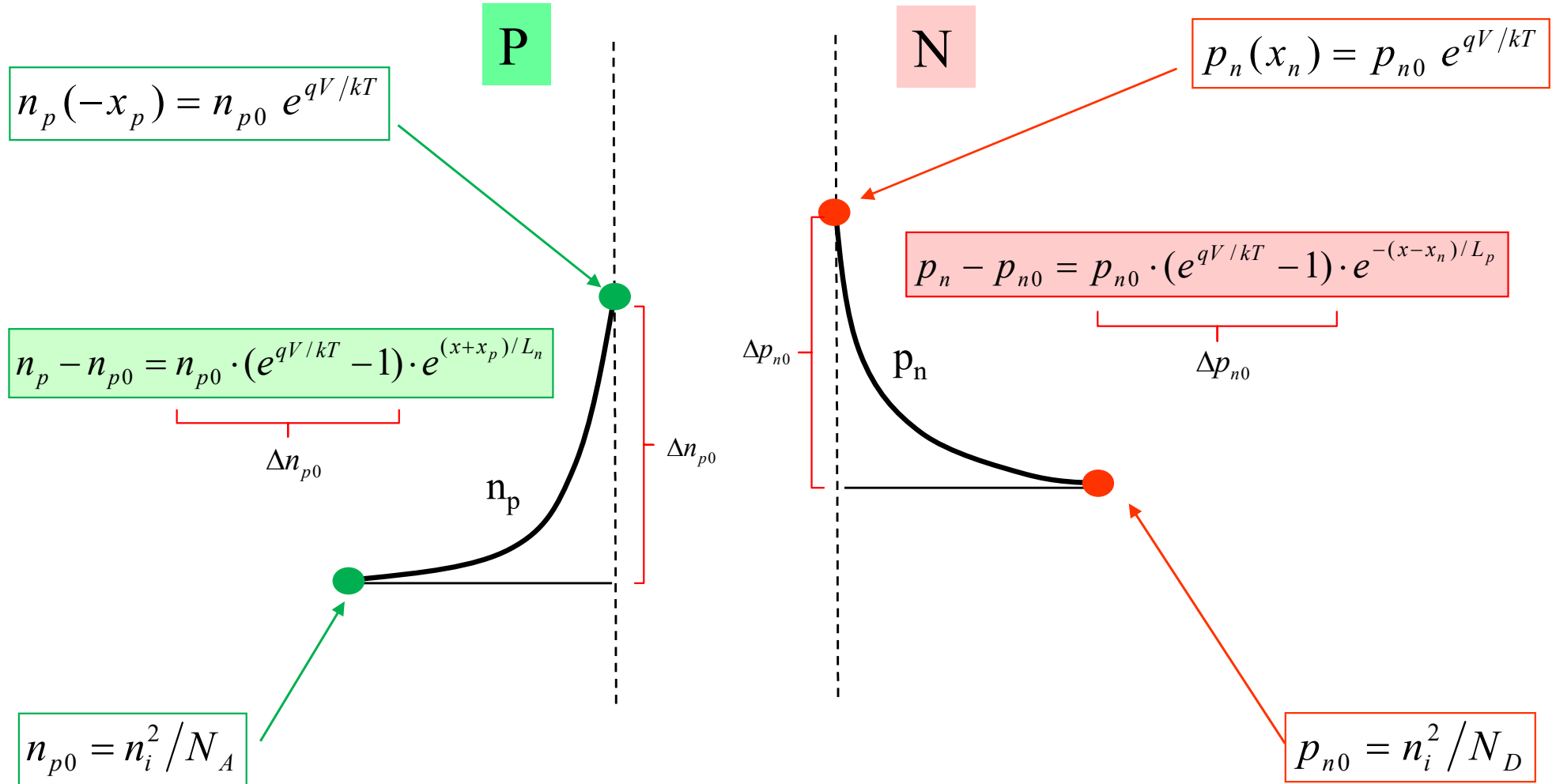
$$\vec{j}_p = \mu_p p \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(E_{F,p})$$



N

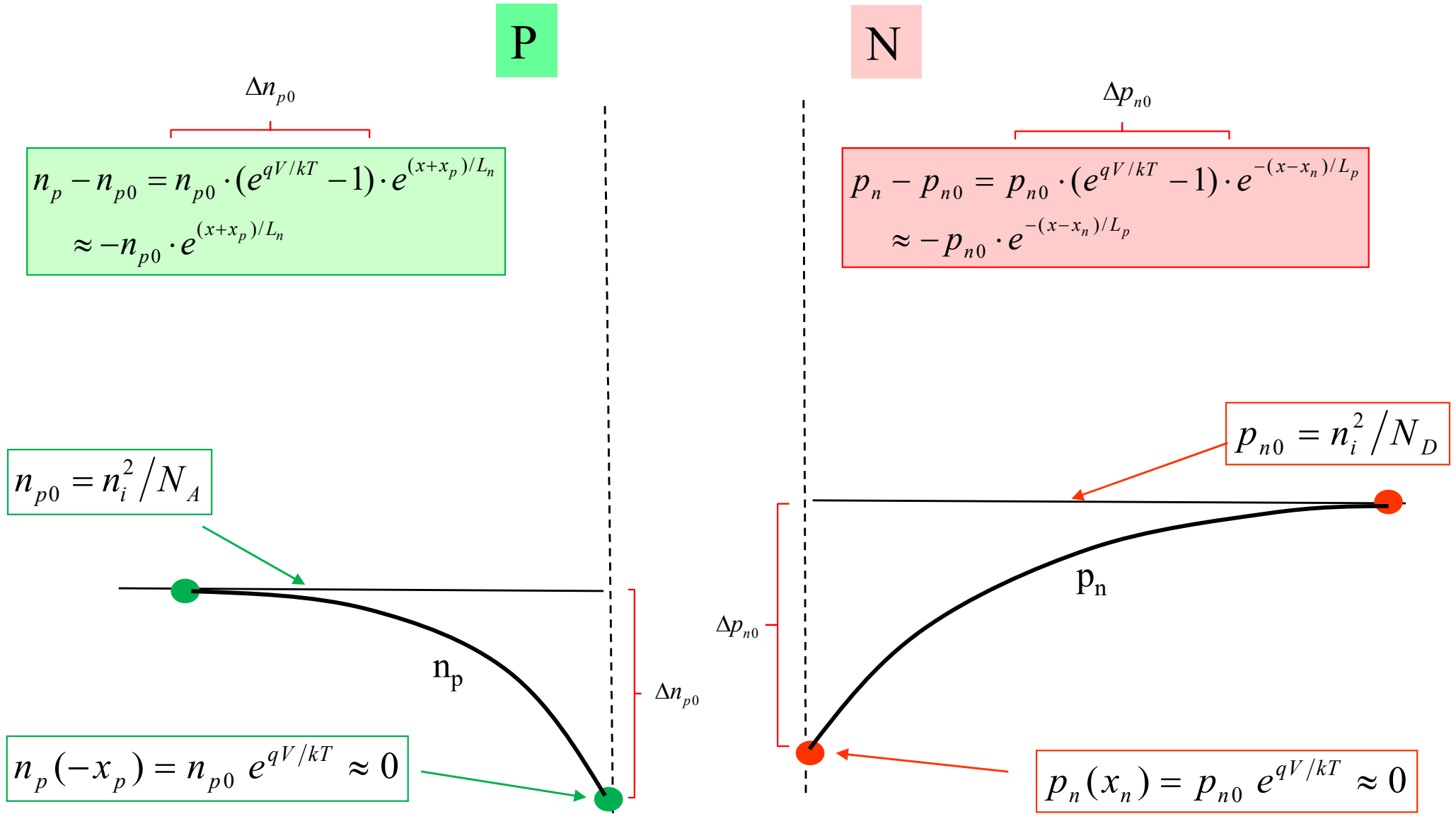
Diode p/n: densité des minoritaires

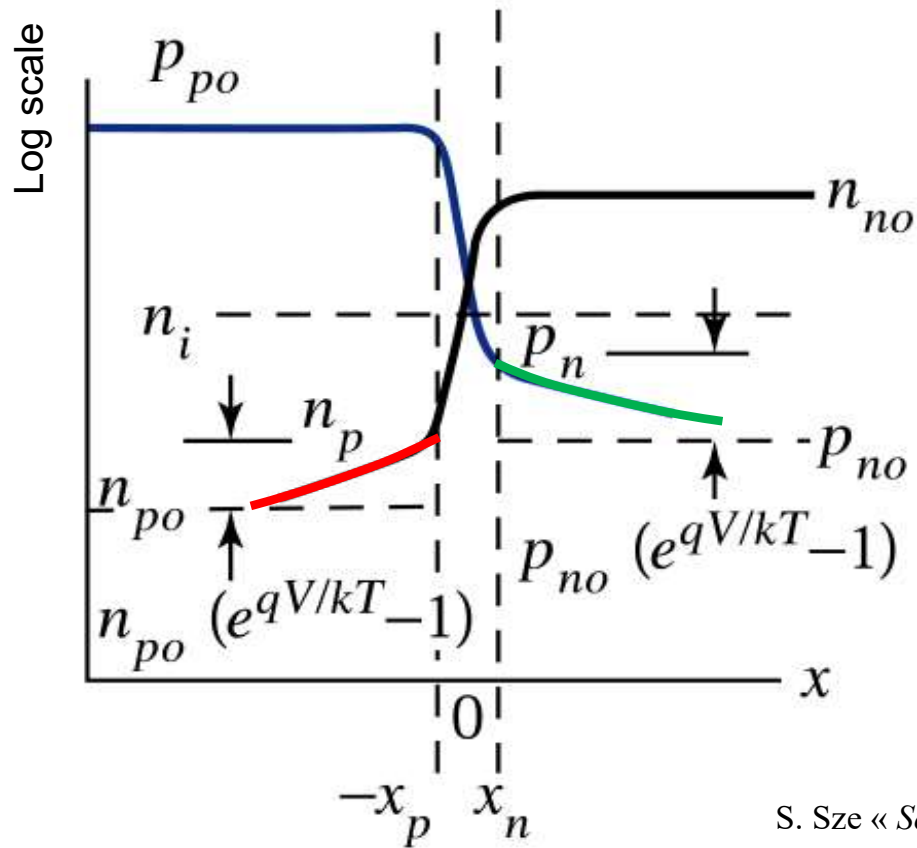
Jonction passante



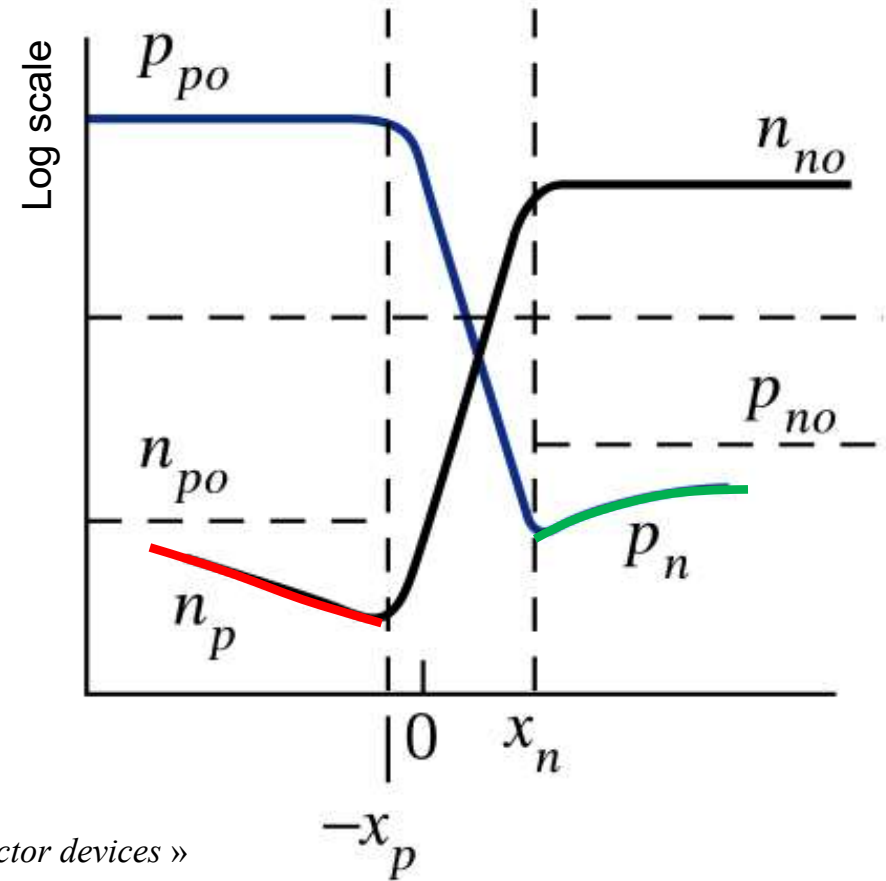
Diode p/n: densité des minoritaires

Jonction bloquante





« injection »



« extraction »

S. Sze « Semiconductor devices »

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

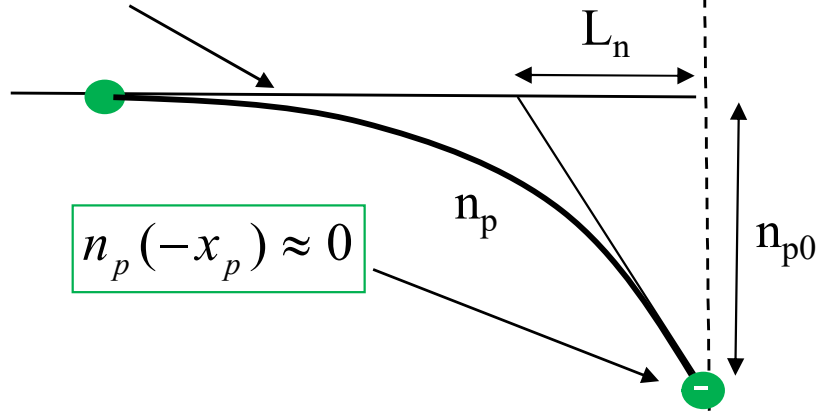
Courant de diffusion des minoritaires

P

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

$$J_{sn} = qD_n \frac{n_{p0}}{L_n} = qD_n \cdot \frac{1}{L_n} \cdot \frac{n_i^2}{N_{A,p}}$$

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



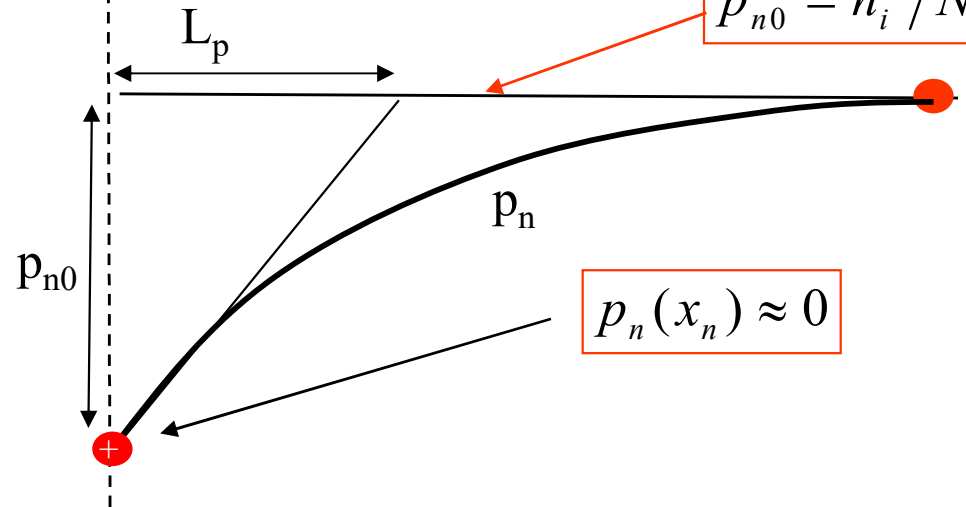
N

Courant de diffusion des minoritaires

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

$$J_{sp} = qD_p \frac{p_{n0}}{L_p} = qD_p \cdot \frac{1}{L_p} \cdot \frac{n_i^2}{N_{D,n}}$$

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



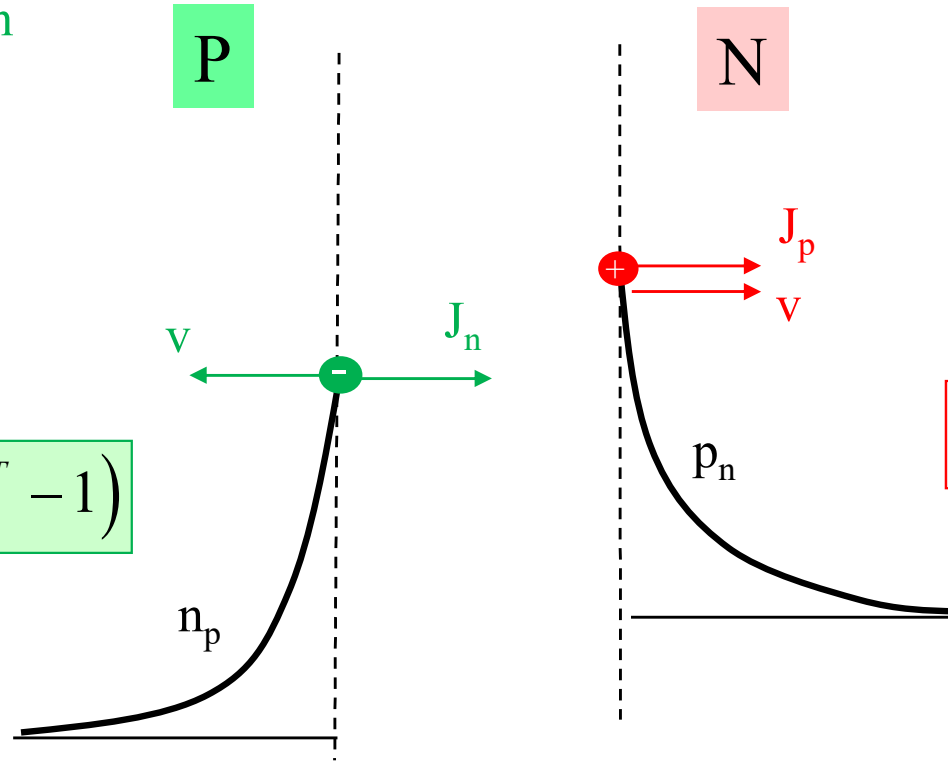
Diode p/n: **Jonction passante** courants de diffusion des minoritaires

Courant de diffusion des minoritaires

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

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

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



Courant de diffusion des minoritaires

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

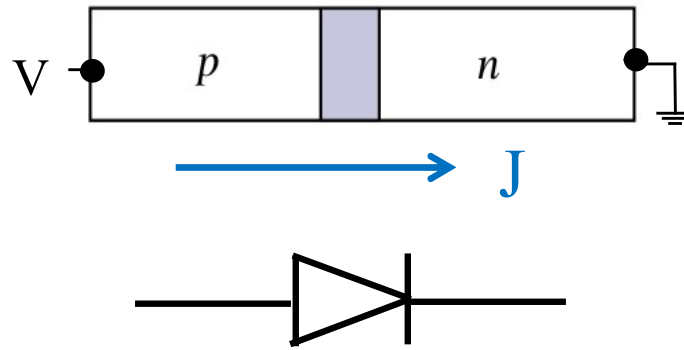
$$J_p = J_{sp} \cdot (e^{qV/kT} - 1)$$

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

Courant idéal total

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

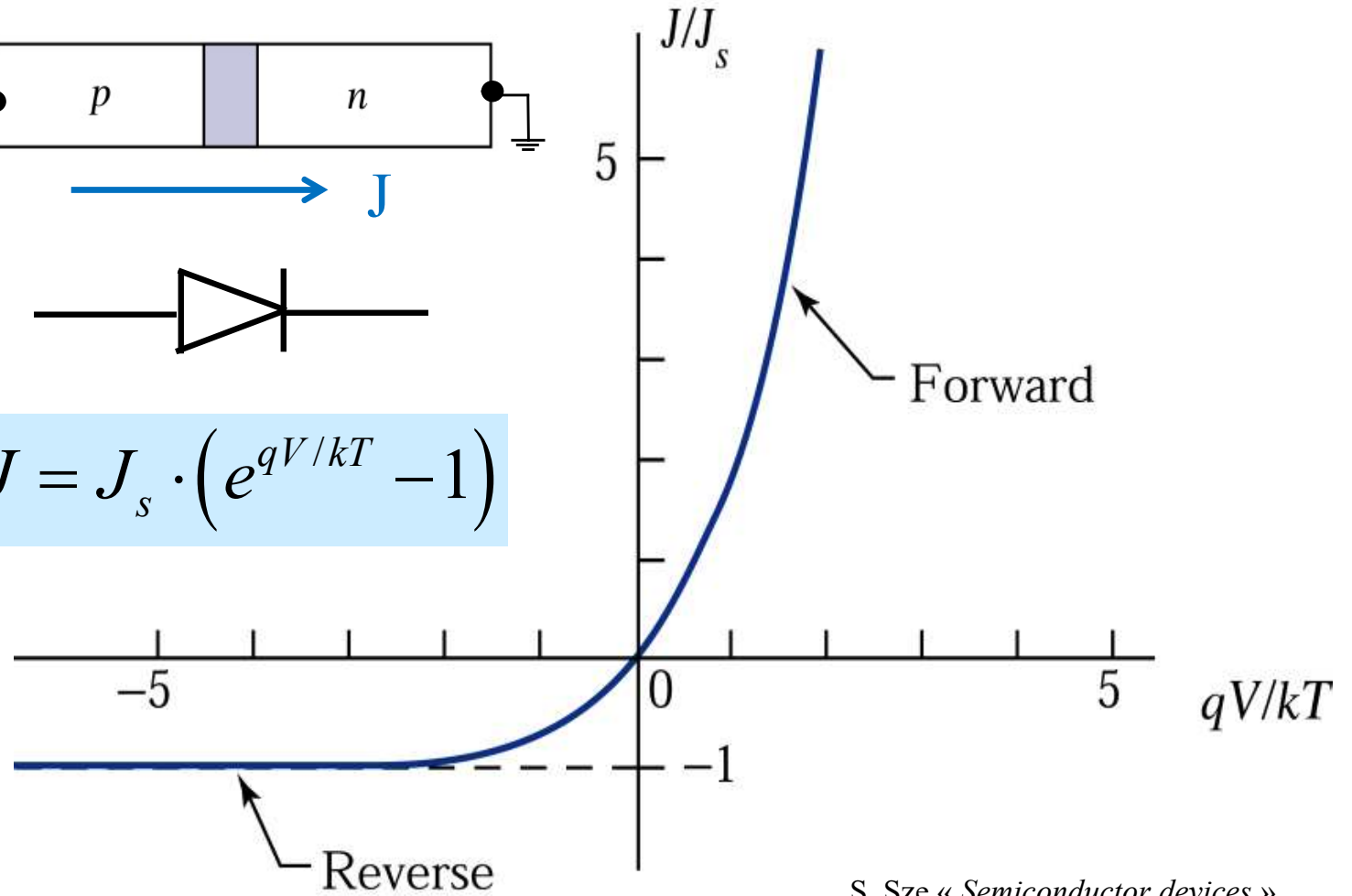
$$J_s \equiv J_{sn} + J_{sp}$$



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

$$J_s = q \cdot \left(\frac{L_n \cdot n_{p0}}{\tau_n} + \frac{L_p \cdot p_{n0}}{\tau_p} \right)$$

$$J_s = qn_i^2 \cdot \left(\frac{D_n}{L_n N_{A,p}} + \frac{D_p}{L_p N_{D,n}} \right)$$



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:

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

A=aire de la capacité

Conductance différentielle

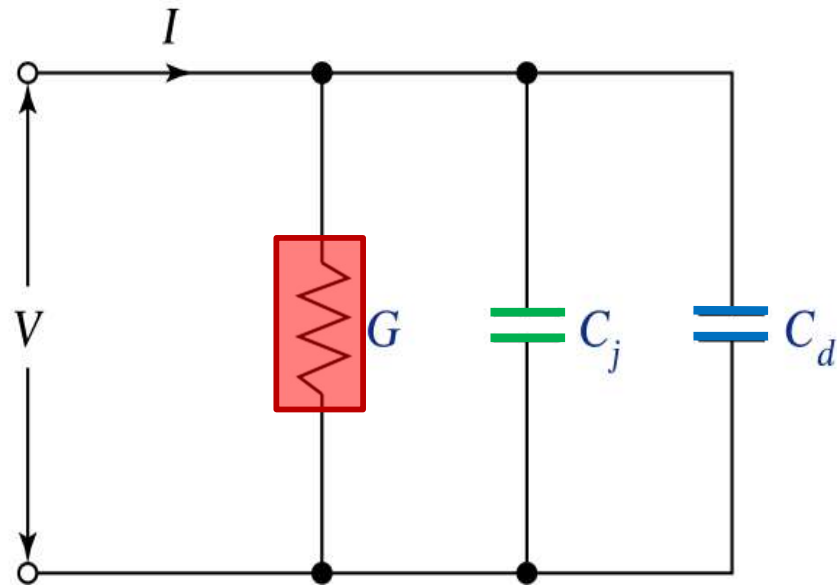
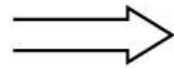
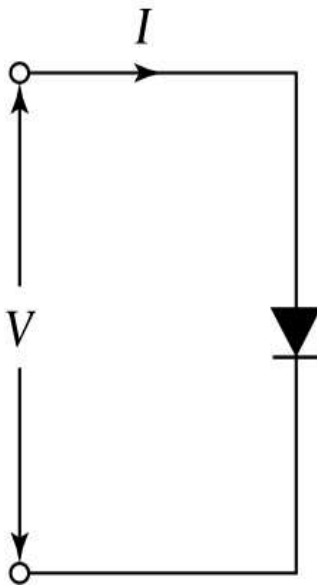
$$G \equiv \frac{d(A \cdot J)}{dV} \cong \frac{q}{kT} \cdot (I + I_s)$$

Capacité de jonction

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

Capacité de diffusion

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

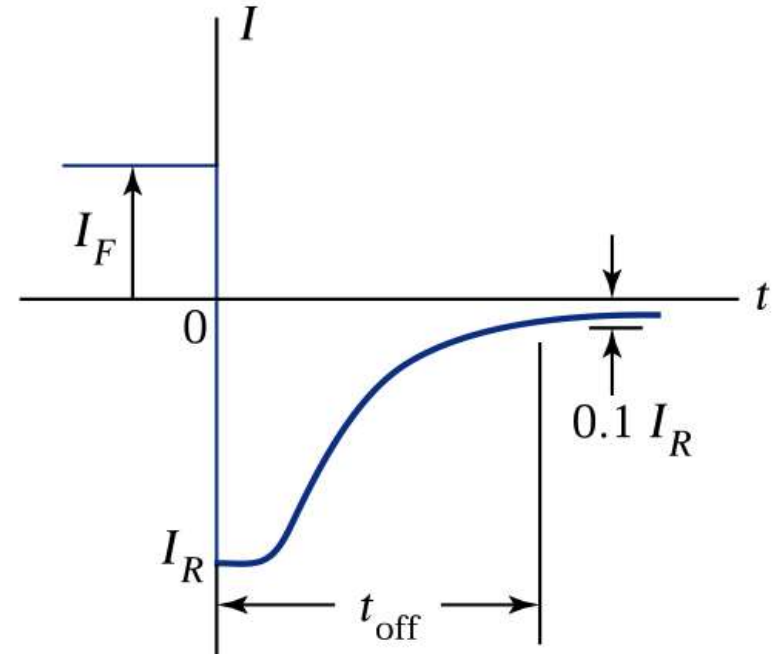
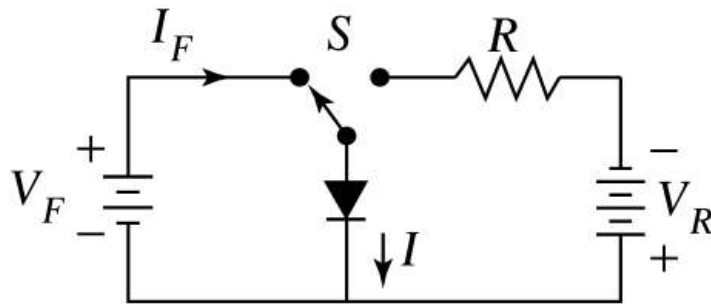


S. Sze « *Semiconductor devices* »

Diode: caractéristique de switch grand signal

Diode pn: temps de vie élevé des minoritaires

S. Sze
« Semiconductor devices »

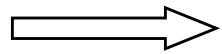


$$T_{\text{off}} (\text{p-n junction}) \approx 1\mu\text{s} \gg T_{\text{off}} (\text{Schottky diode}) \approx 1\text{ns}$$

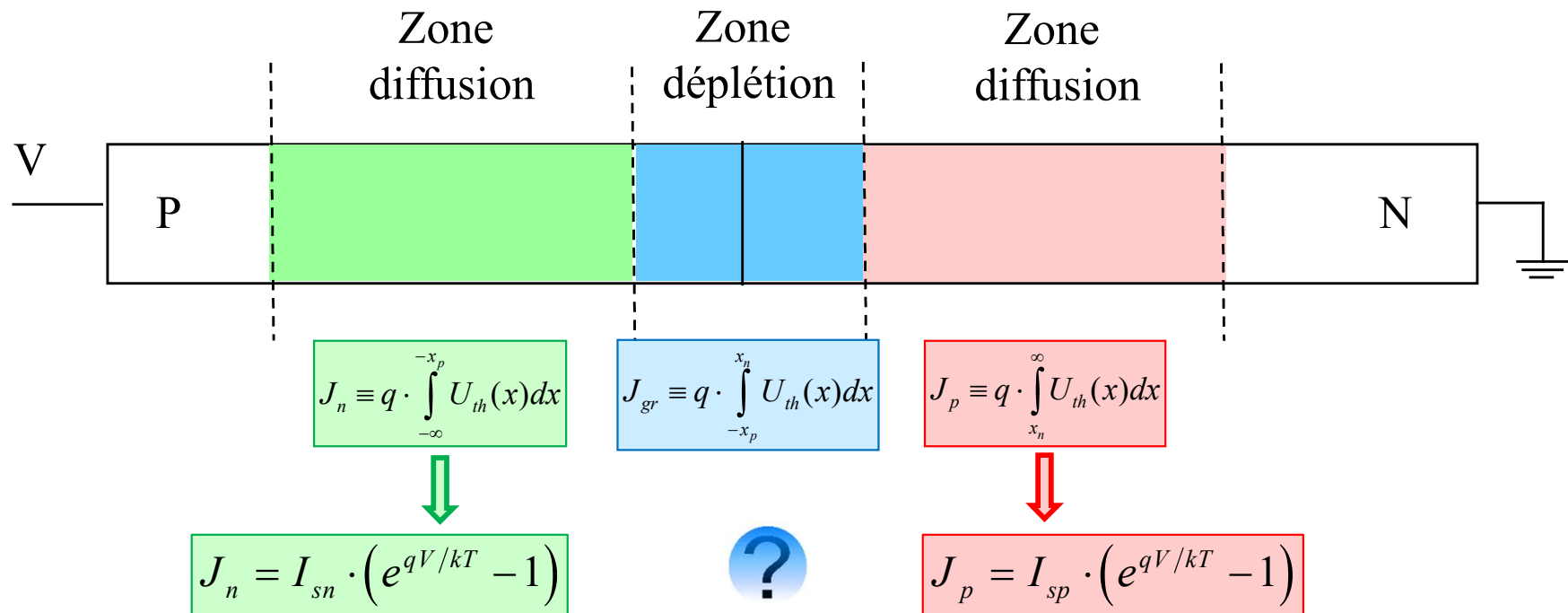
Diode pn réelle: courants de génération/recombinaison

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

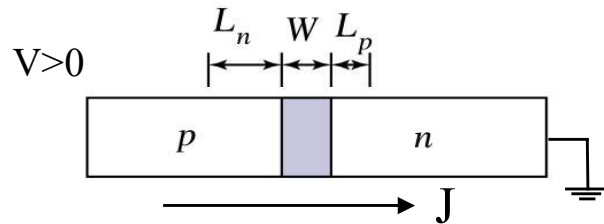
La génération/recombinaison dans la zone de déplétion n'est pas négligeable.



Nouveau modèle: intégration du taux net de recombinaison.



Courant de génération/recombinaison dans la zone de déplétion



S. Sze « Semiconductor devices »

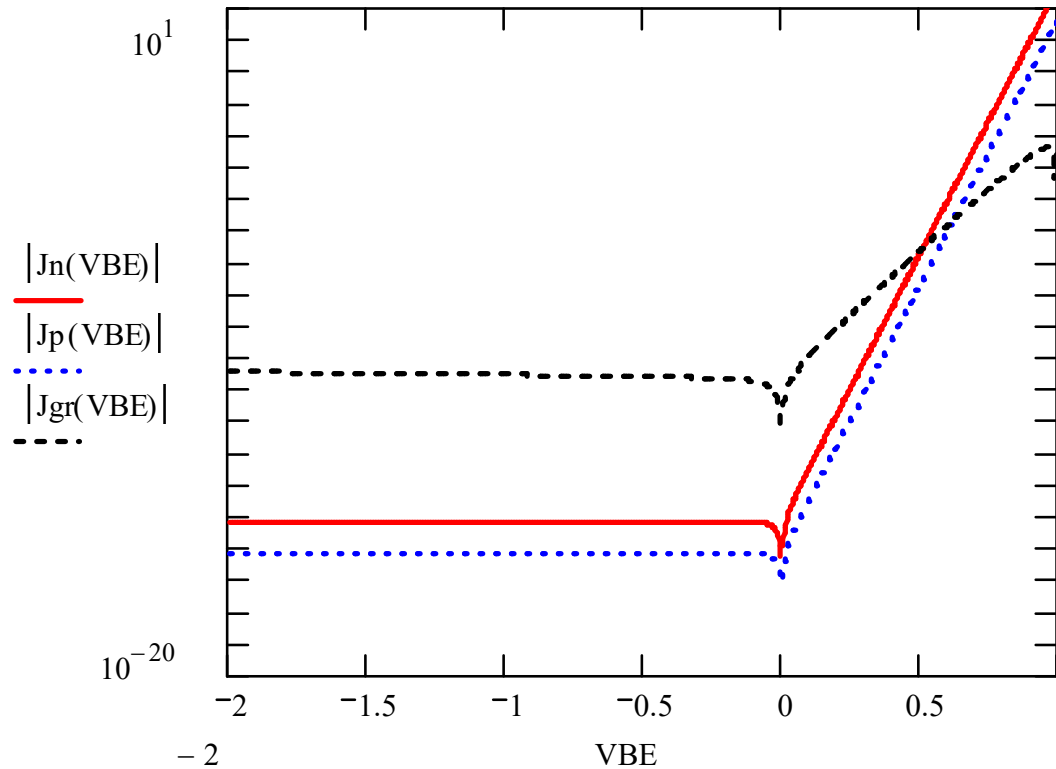
$$J_{gr} = q \cdot \int_{-x_p}^{x_n} U_{th}(x) dx \cong q \cdot U_{th}(0) \cdot W$$

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

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

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

Exemple: diode p/n silicium



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

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

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

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

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

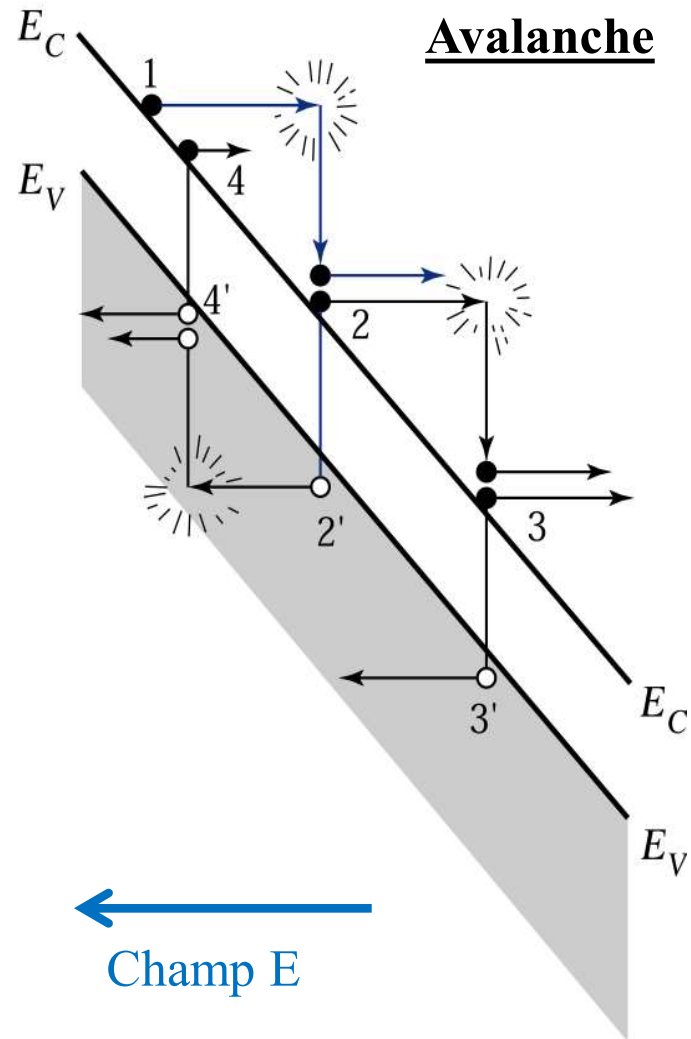
$$L_p = 2 \text{ } \mu\text{m}$$

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

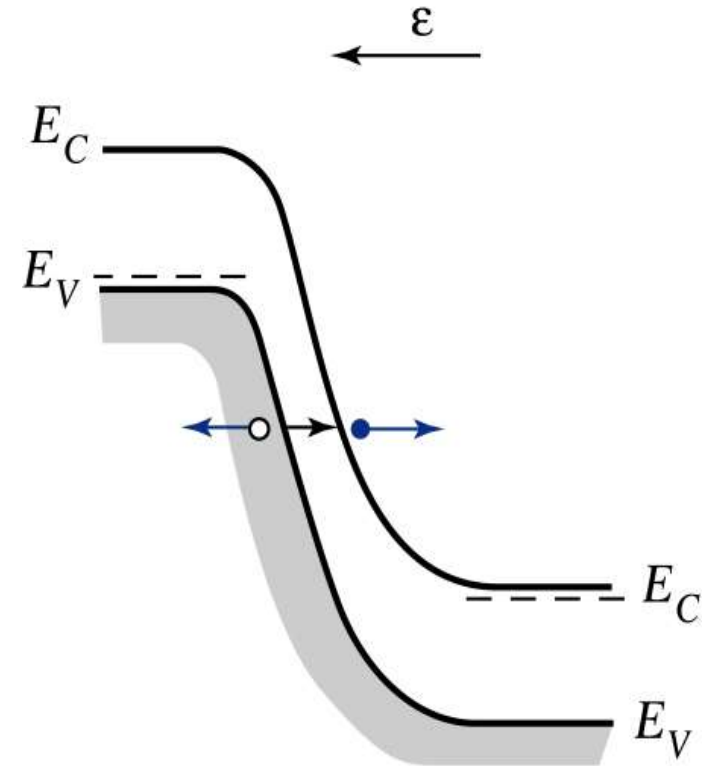
Le courant de diffusion des minoritaires domine pour $V > 0.7\text{V}$

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



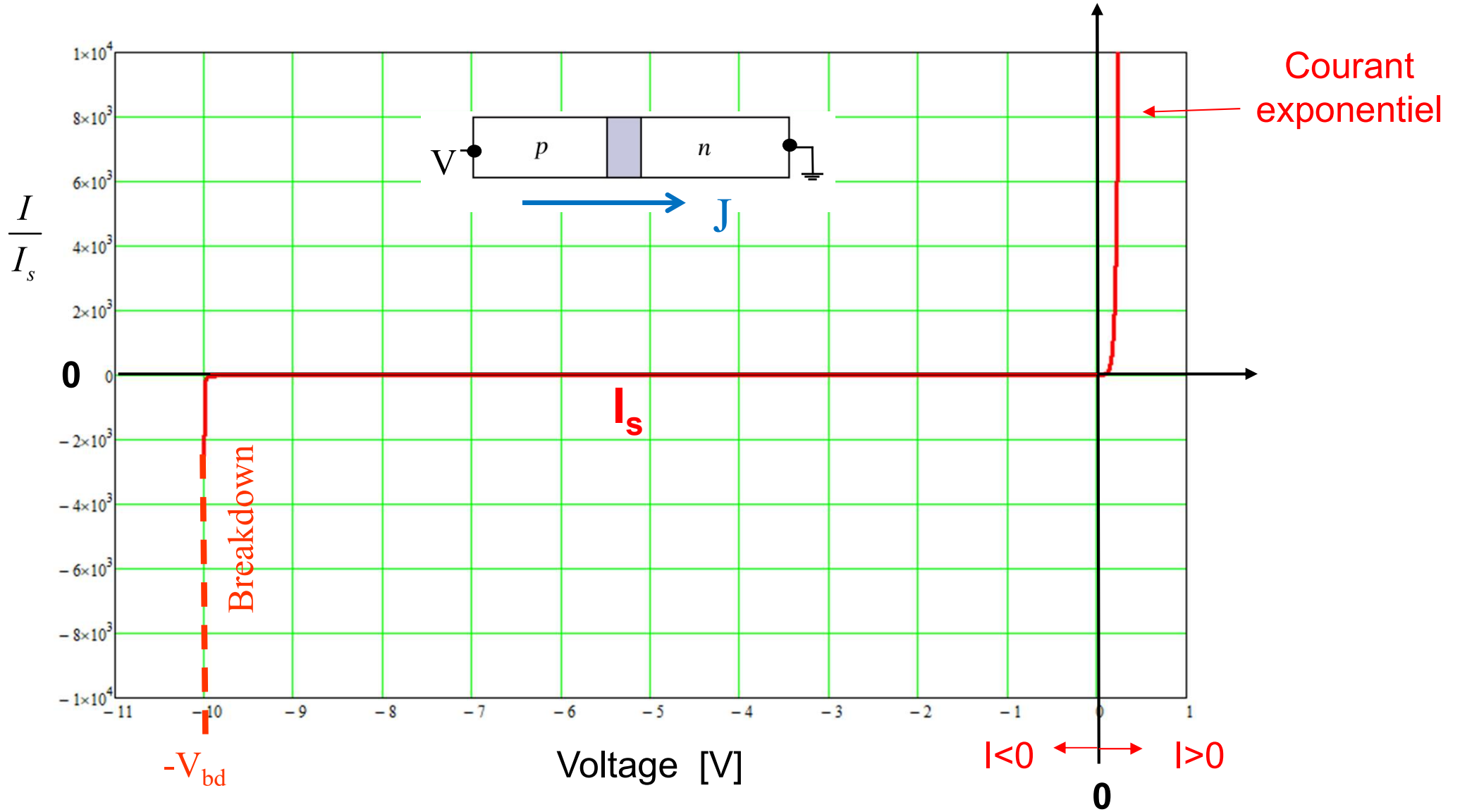


S. Sze « Semiconductor devices »



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

Caractéristique courant/tension

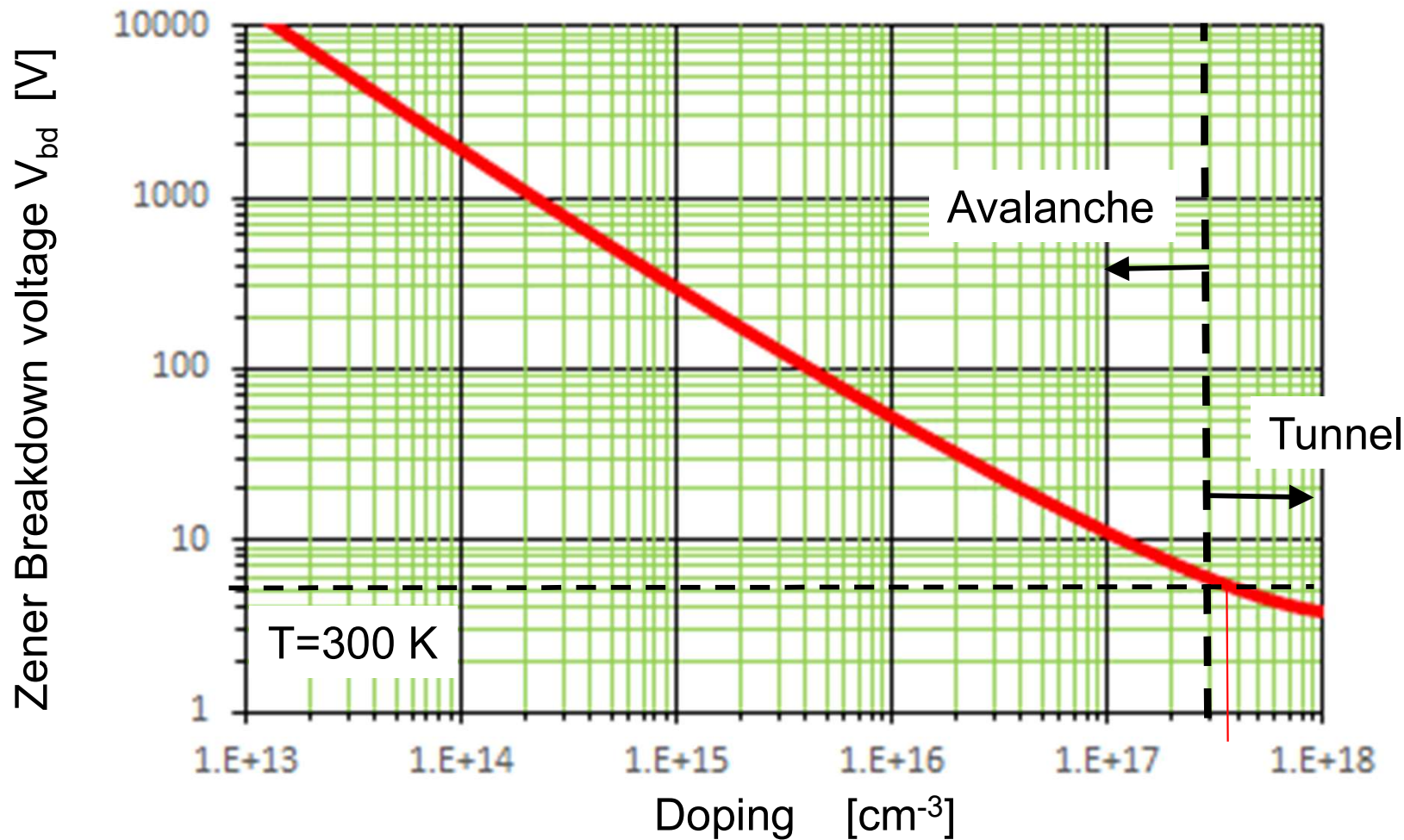


Breakdown: diode Zener

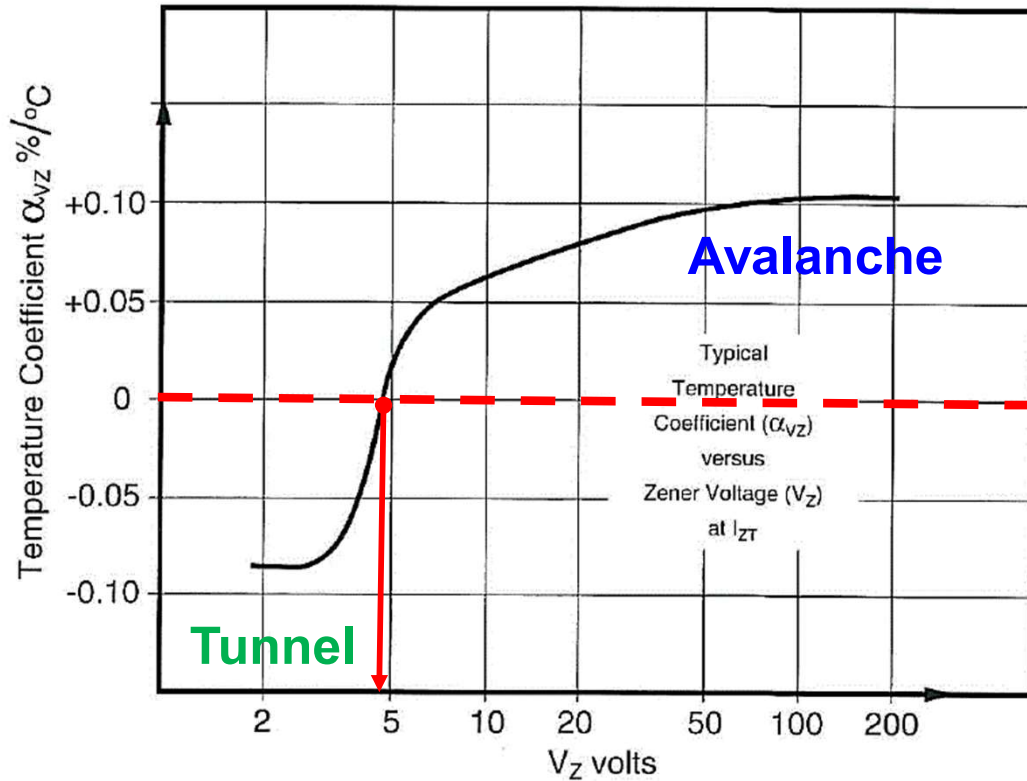
One-sided abrupt silicon PN diode

Inspiré de:

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

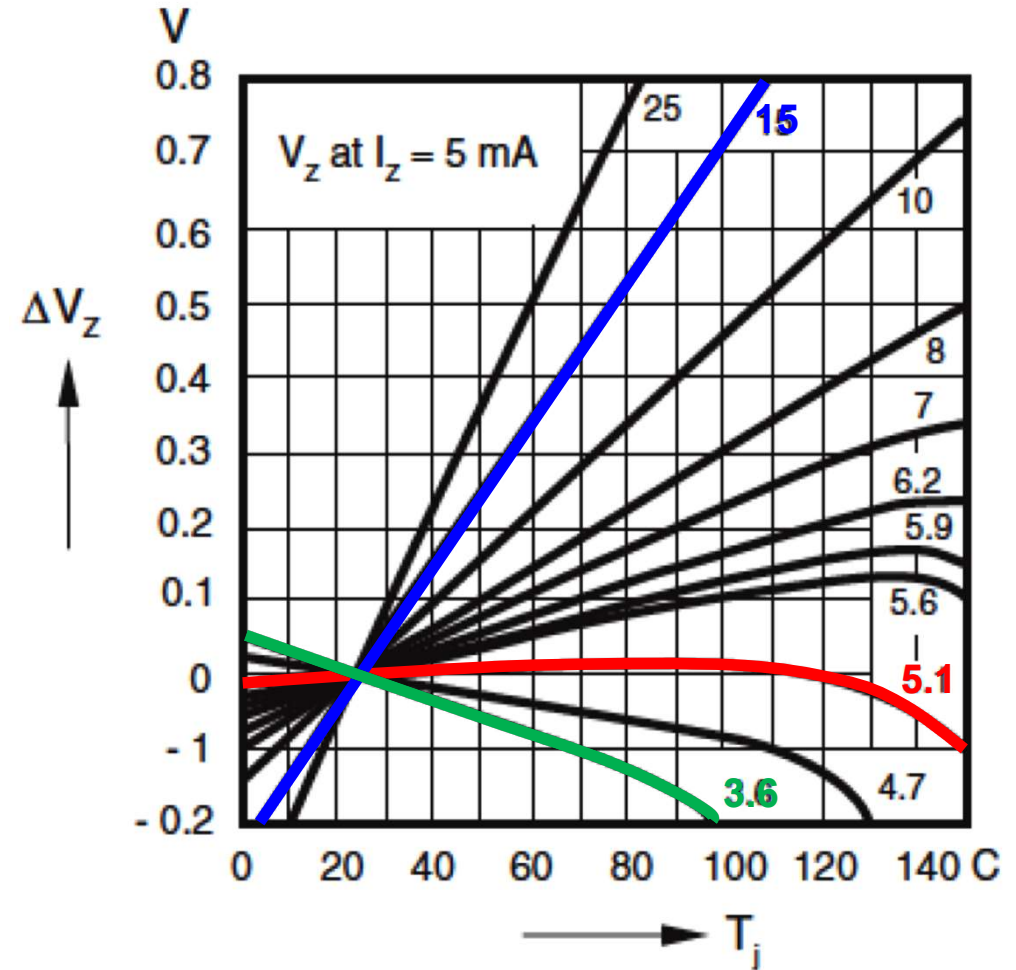


L'effet tunnel demande des dopages très élevés



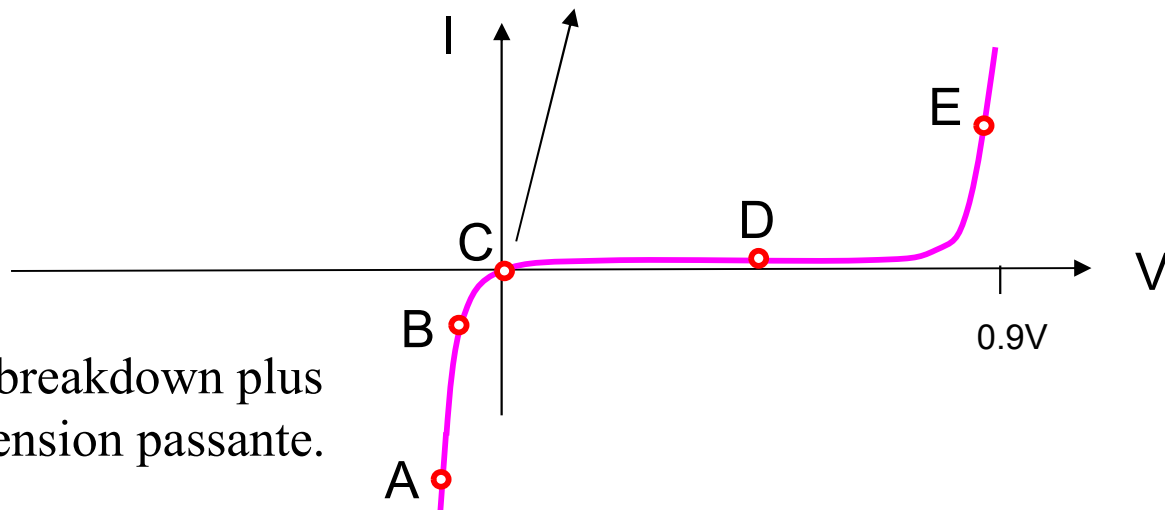
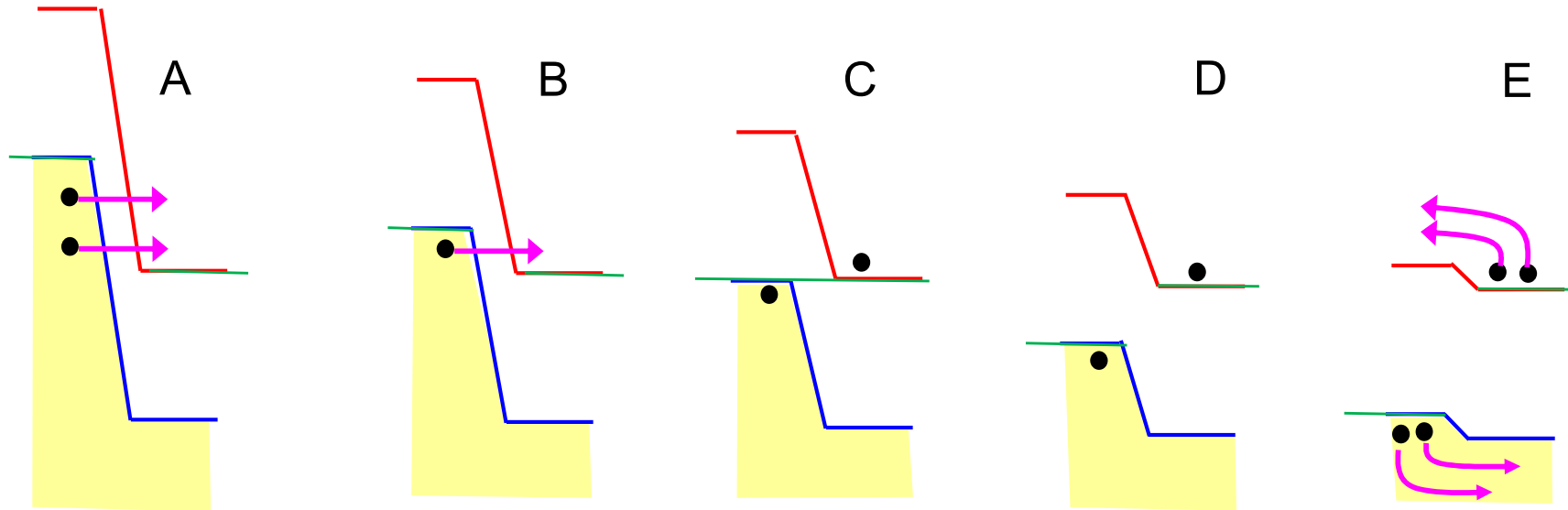
$$\Delta V_Z = \alpha_{VZ} \cdot V_Z \cdot \Delta T$$

K. Walters, M. Clark, «Zener voltage regulation with temperature» Micro-notes N°.203

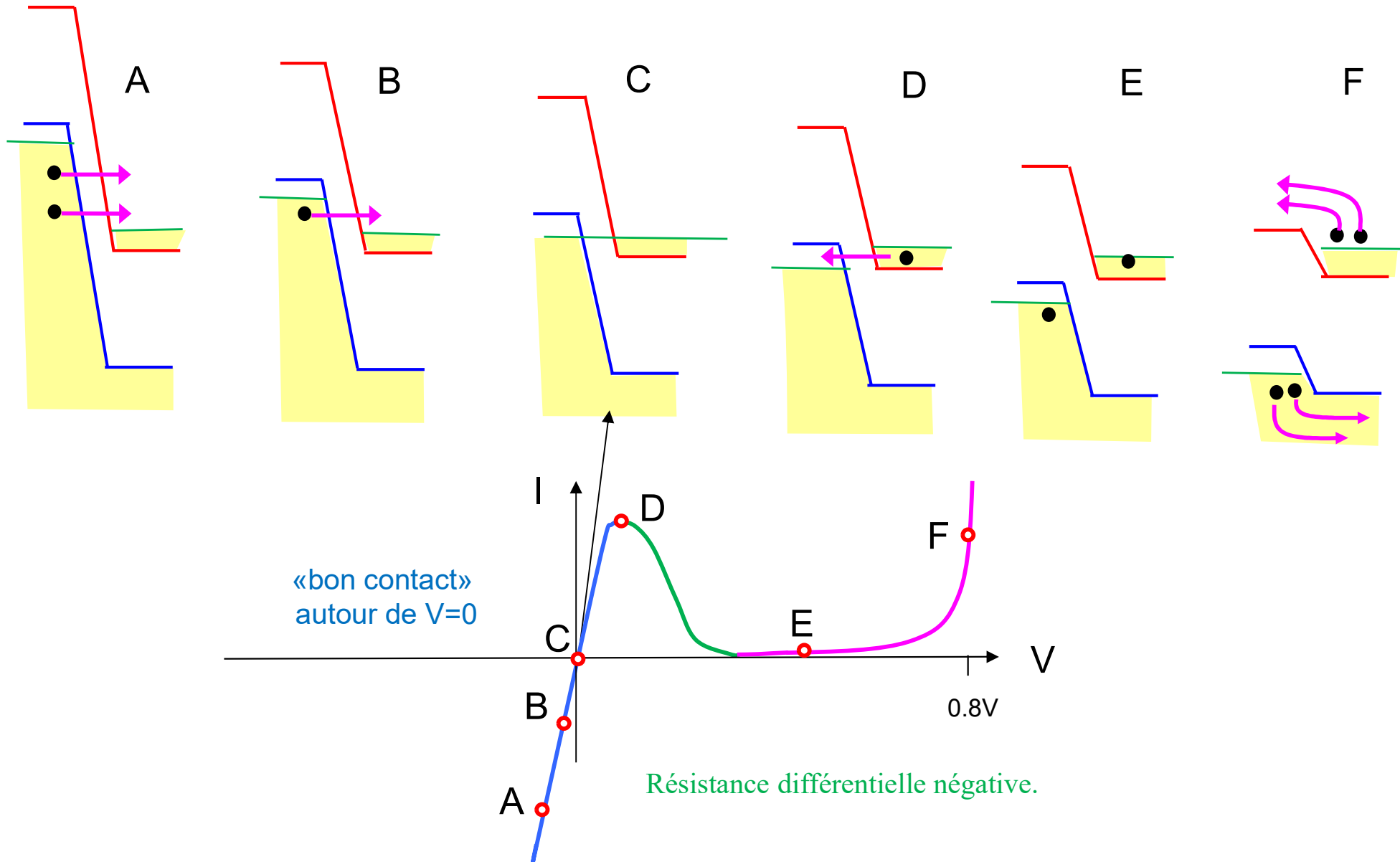


<http://www.farnell.com/datasheets/2311149.pdf>

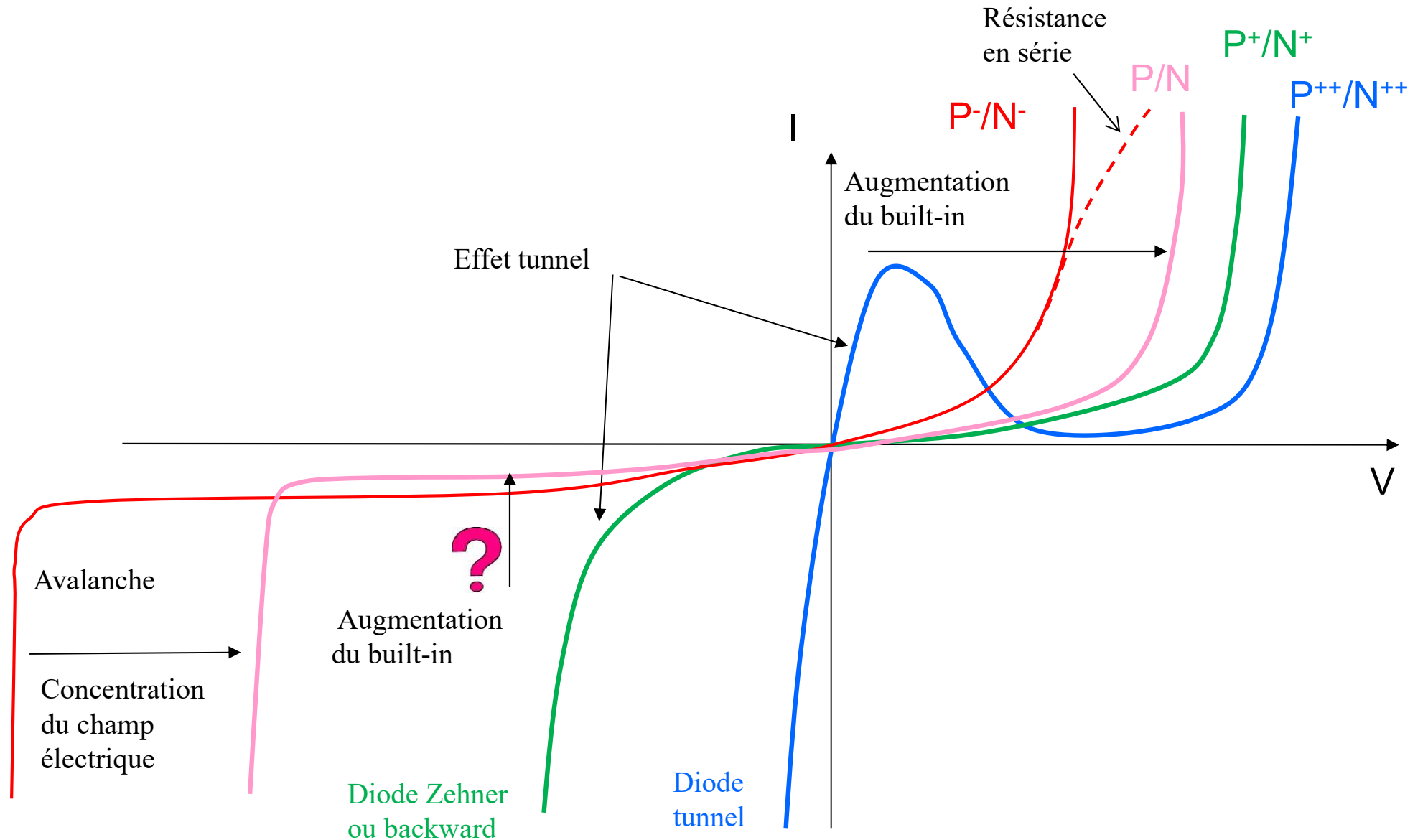
Diode Backward



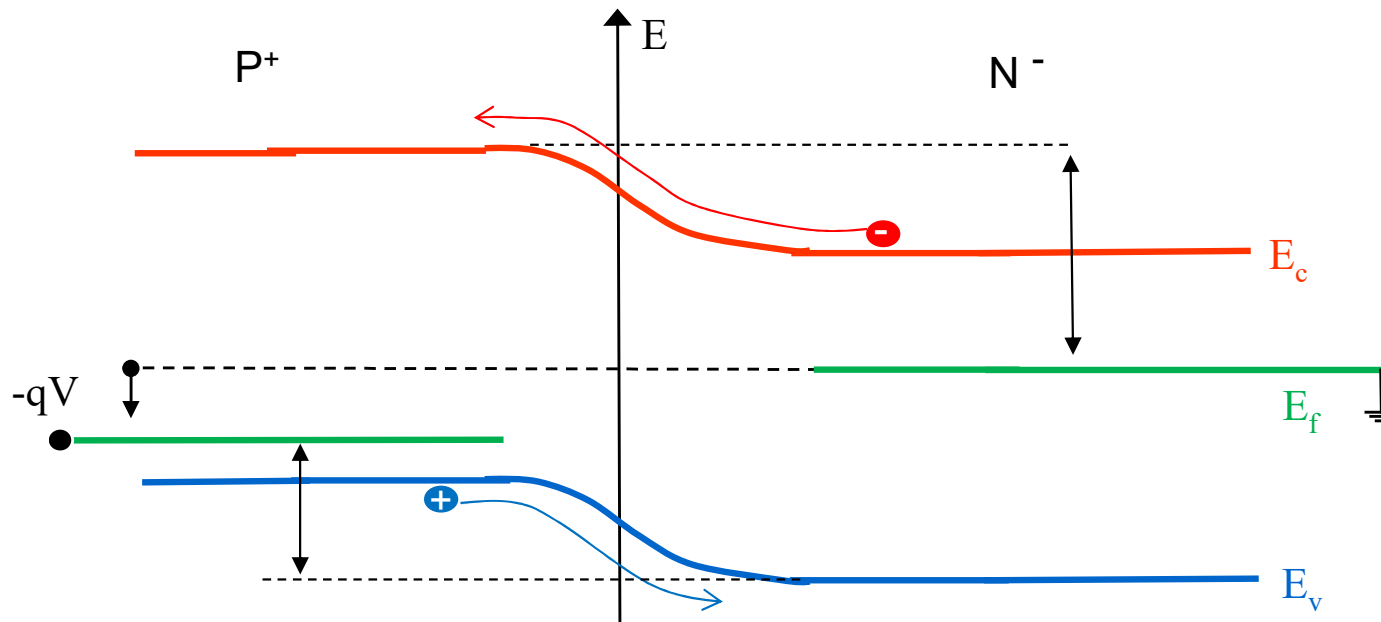
Tension de breakdown plus faible que tension passante.



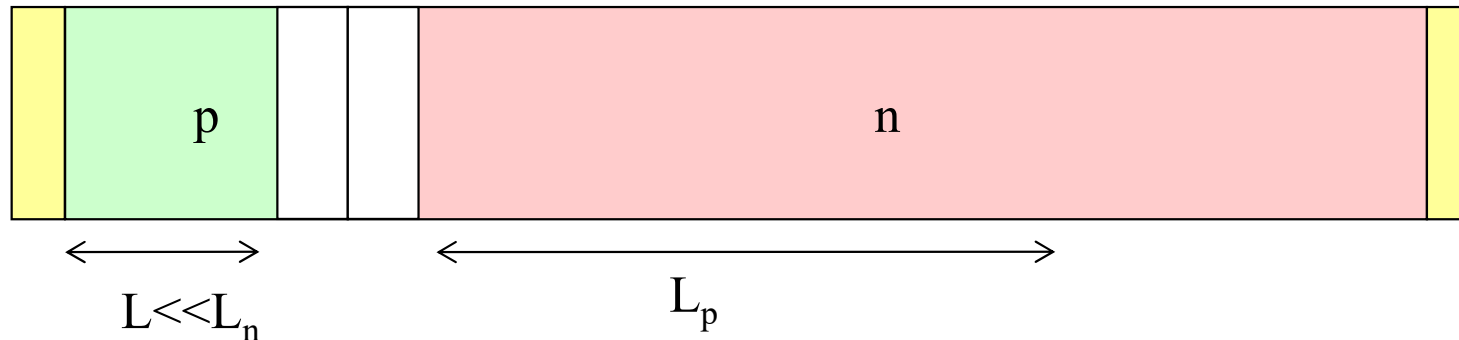
Courbe I(V) et dopage



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 ?

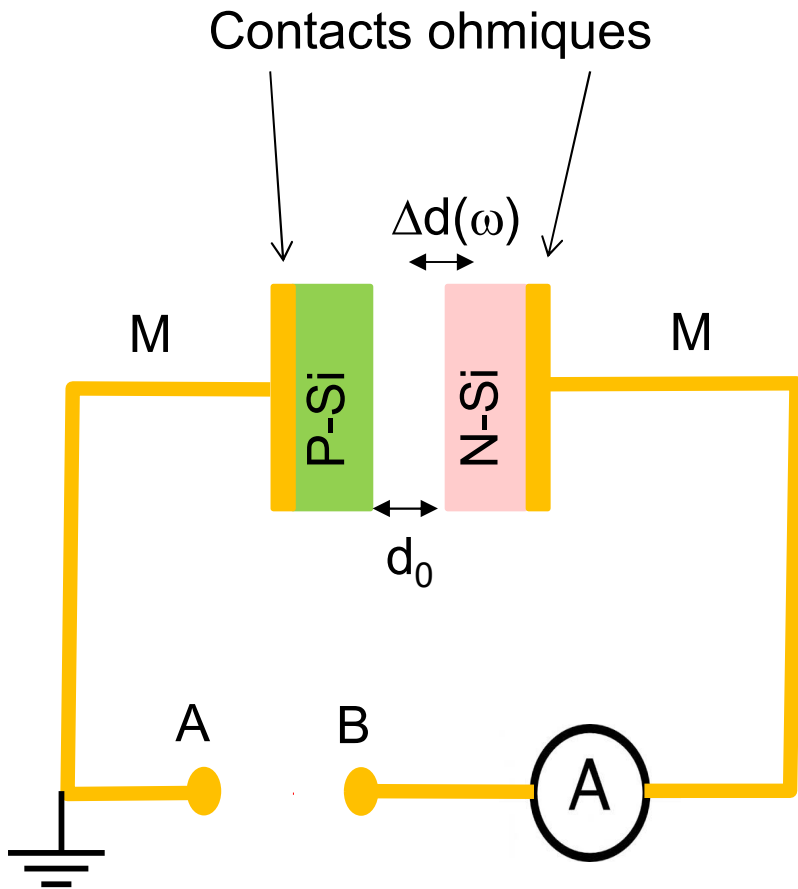


Les courants de diffusion des minoritaires sont obtenus en calculant le gradient des concentrations de minoritaires.

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.