

COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

V) Jonction Métal / Semi-conducteur (MS)

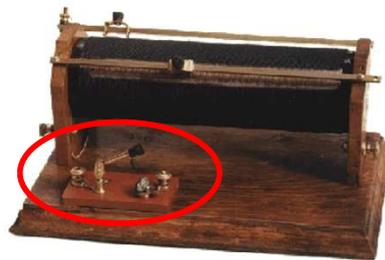
P.A. Besse

EPFL

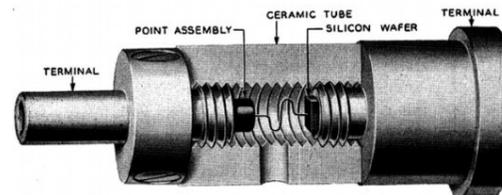
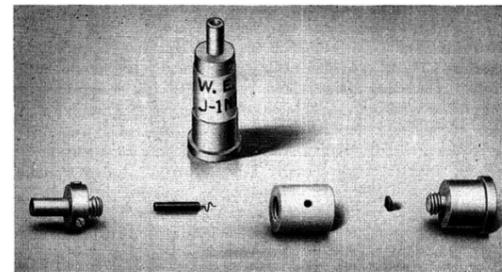
- **1873 - Jonction métal – galène (PbS)**
Ferdinand Braun (prix Nobel 1909)
- **1901 - Application au redressement**
Jagadis Chandra Bose
- **1906 - Diode metal - silicium**
Greenleaf Whittier Pickard



Krows-Electric Company
crystal detector



Poste à galène à Bobine Oudin
Vers 1925 <http://dspt.club.fr>



Point contact diode
1941



Point-contact diode

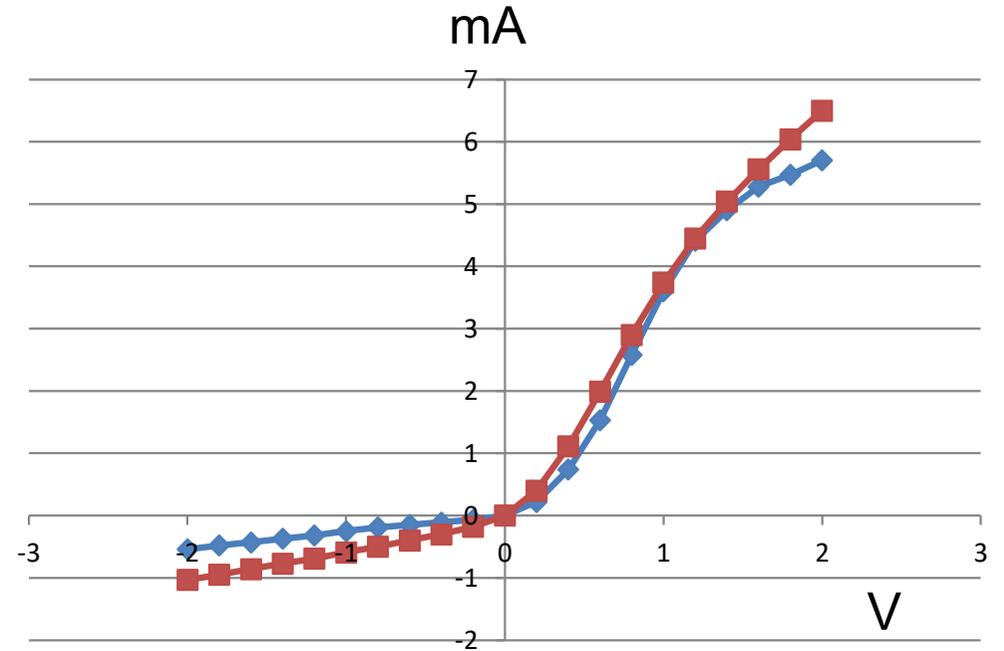
Point contact diode: diode à galène

Redresseur à cristal



Don de N. Uffer
étudiant microtechnique
2010

Courbes I/V: pôle + sur le cristal



Mesures en 2 points différents



Le Petit constructeur Radio
Production Directa-Radio vers 1950

INSTRUCTIONS

Monter sur la plaquette, le détecteur, la cuvette à galène, et dessous le bobinage et le condensateur variable, relier entre elles les cosses de connexion avec le fil nu, et mieux, les souder avec la soudure décapante, en respectant le schéma, vu de dessous, ci-contre, le reste du fil servant à l'antenne et ligne de terre.

Connecter l'écouteur avec le fil à deux conducteurs et y relier deux fiches bananes, les trois autres fiches servant pour la prise antenne du secteur, l'antenne et la terre du poste.

Terre. — Une bonne ligne de terre est indispensable, utiliser à cet effet un tuyau d'eau ou de gaz ou chauffage central; à la campagne, un mètre carré de grillage enterré dans le sol humide, les connexions doivent être parfaites et les métaux bien grattés, le fil serré fortement dessus.

Antenne. — En ville, utiliser le secteur, ce qui est plus facile, en se servant d'un pôle seulement, d'une prise de courant, en n'oubliant pas d'intercaler en série dans le circuit un condensateur de 1.000 cm. antenne du poste » un condensateur de 1.000 cm. fourni avec l'appareil, ne pas connecter directement le secteur, ce qui détruirait immédiatement le bobinage du poste. Dans le cas d'une antenne ordinaire, se servir d'un fil très long, en cuivre de préférence (20 à 50 mètres), placé dehors dans un endroit bien dégagé.

Ecoute. — Connecter la terre et l'antenne sur l'appareil, soit à l'une ou l'autre position, choisir un point sensible en appuyant très légèrement la pointe sur le cristal que l'on a fixé dans sa cuvette, agir sur la manette à deux positions et sur le condensateur variable pour obtenir le maximum d'audition.

IMPORTANT. — Un bon fonctionnement n'est possible que si les contacts de connexion, d'écouteur, de lignes terre et antenne sont bons, les soudures doivent être impeccables.

Ant. secteur

Ant. extérieure

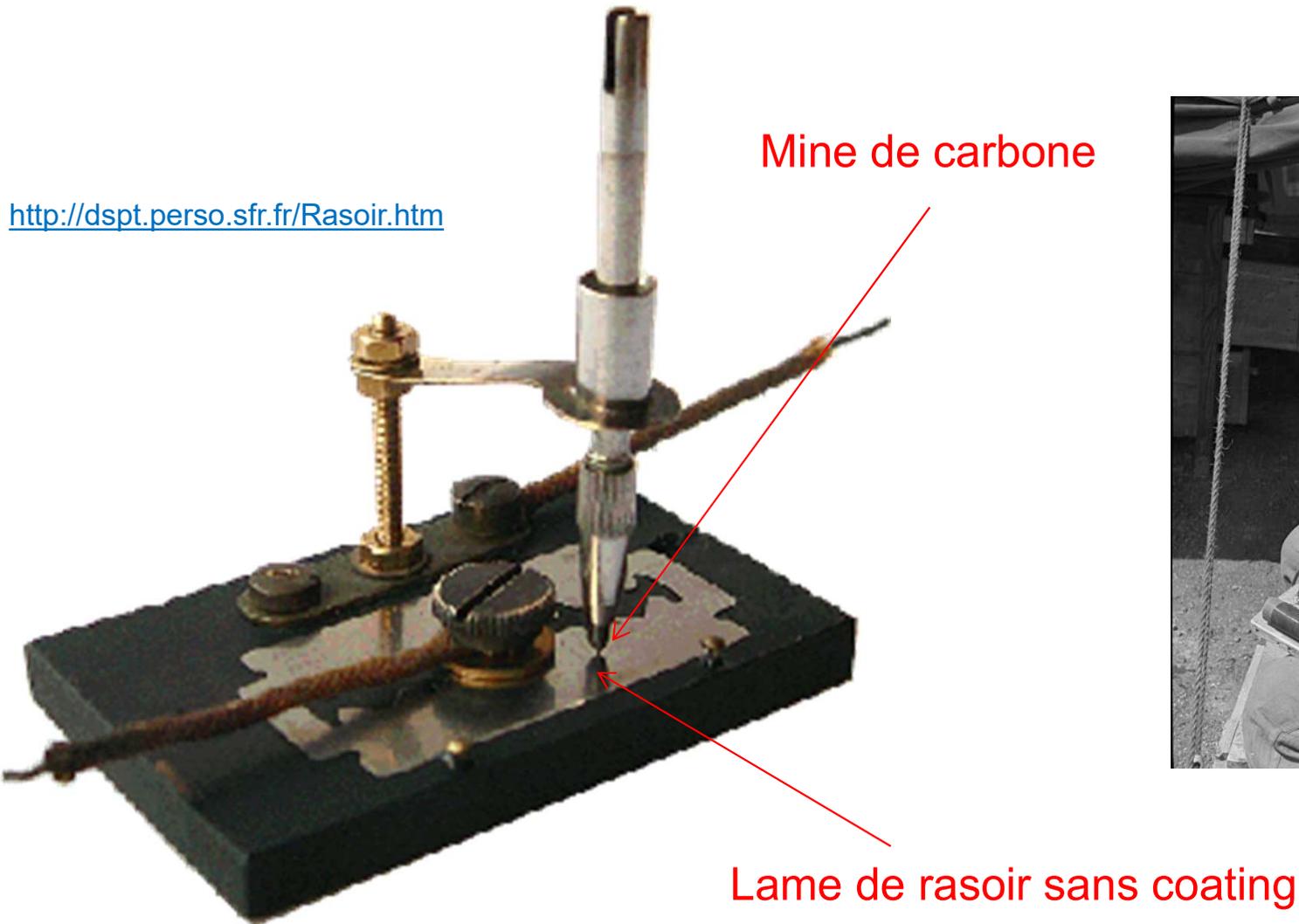
Vue en dessous

Connexions à établir
bons contacts indispensables

SCHEMA DE PRINCIPE
Antenne position sélective

Antenne directe

La notice du jeu de construction du poste à galène
Boîte de gauche sur l'image précédente

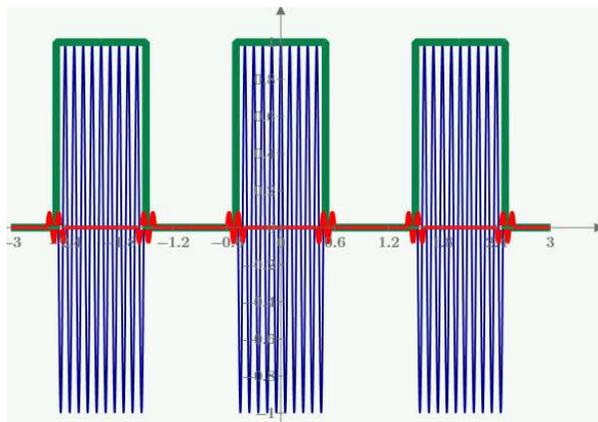
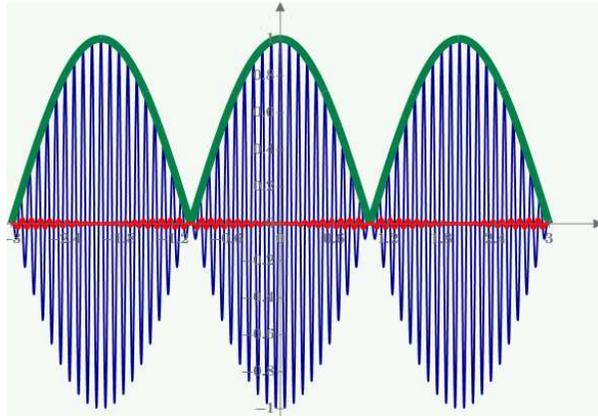


Foxhole radio 1944



Redresseur radio: exemple d'utilisation d'une diode

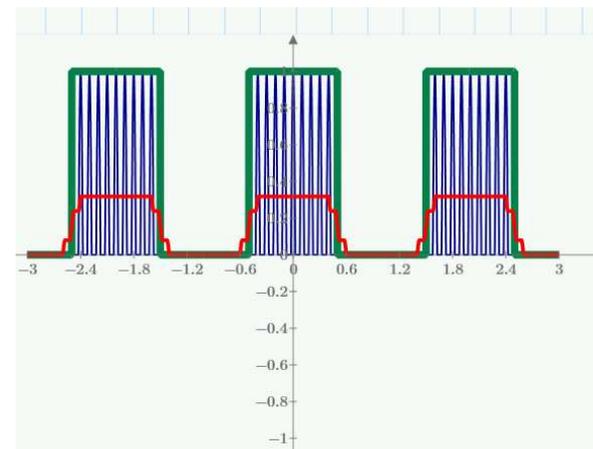
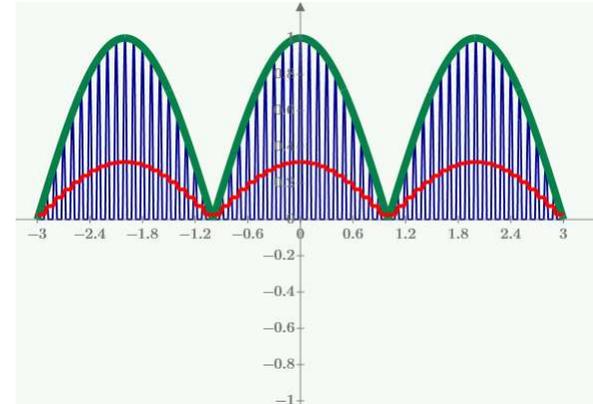
Sans redresseur



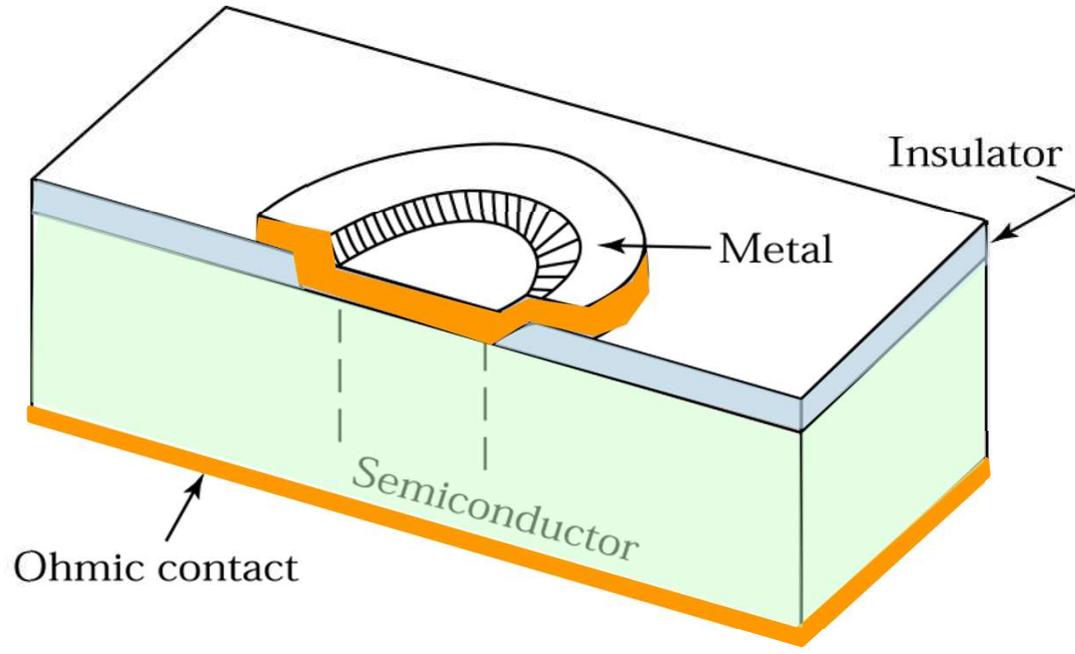
- Porteuse
- Signal (Enveloppe)
- Moyenne

La moyenne est nulle

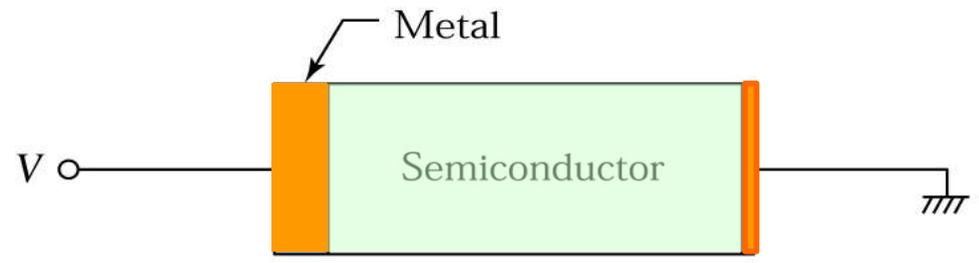
Avec redresseur



La moyenne correspond à l'enveloppe



(a)



(b)

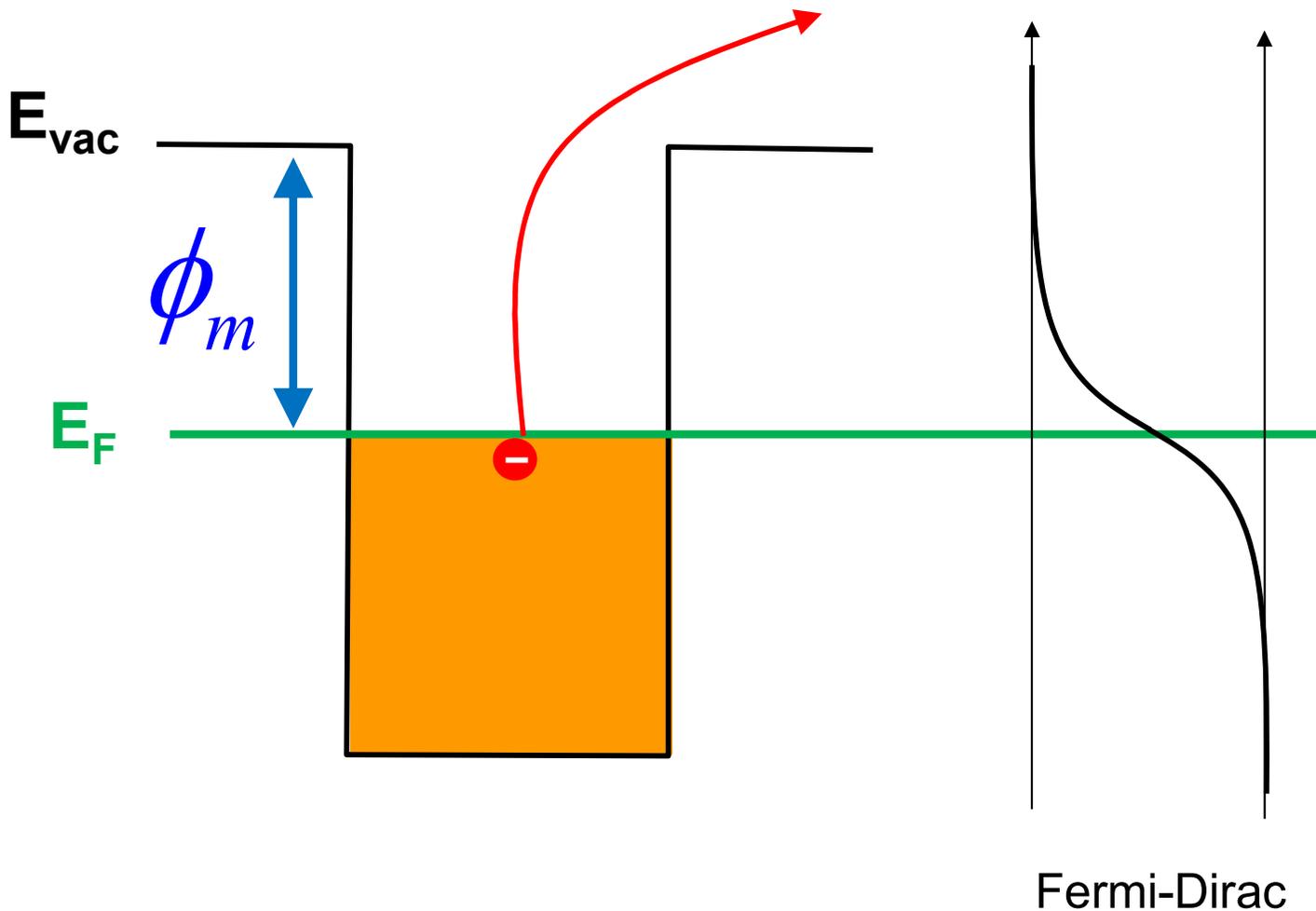
S. Sze « *Semiconductor devices* »

Thermoemission

et

équilibre thermodynamique

Thermo-émission depuis le métal



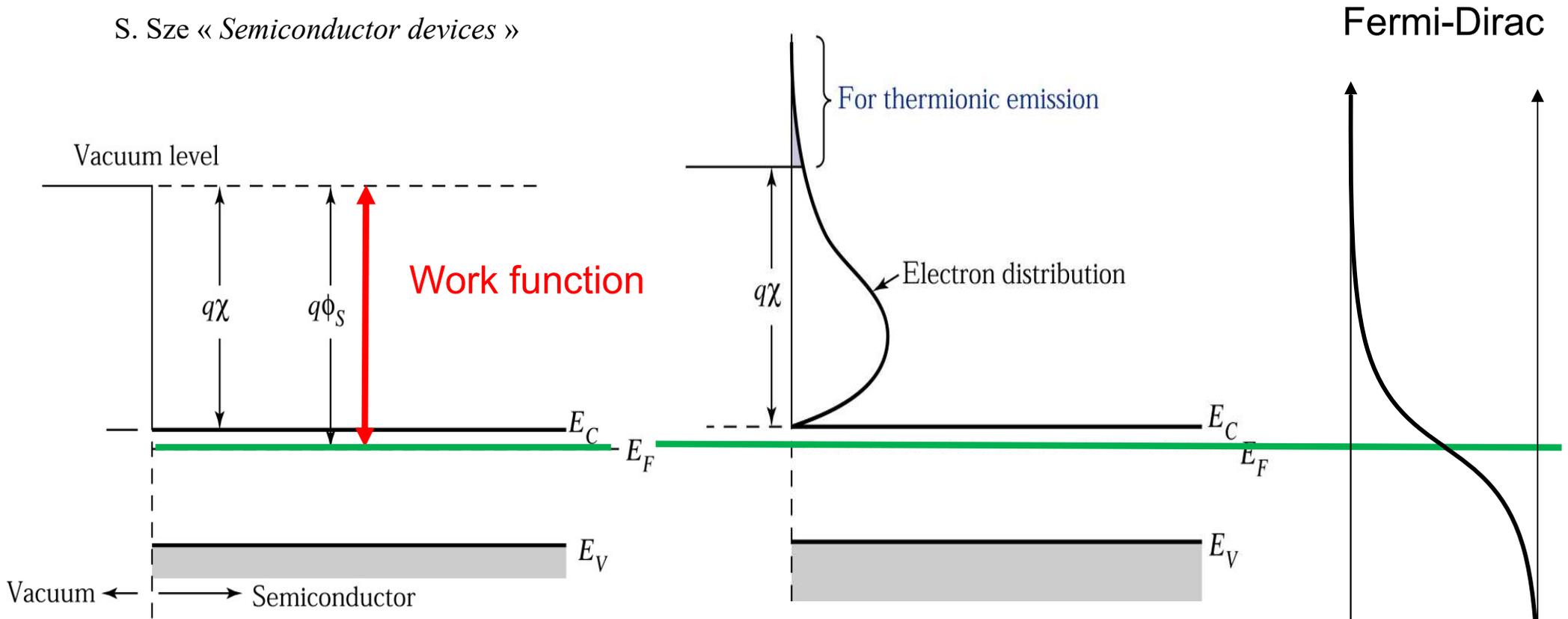
Dépend du choix du métal

Work-function ϕ_m

$$J_x \cong T^2 \cdot e^{-\frac{q\phi_m}{kT}}$$

Thermo-émission depuis le semi-conducteur

S. Sze « *Semiconductor devices* »



$$J_x \cong T^2 \cdot e^{-\frac{q\phi_s}{kT}}$$

Work-function ϕ_s

Dépend du semi-conducteur
et aussi du dopage !!



Densité du courant d'émission:

Popovic, base de cours EPFL

$$J_x = q \cdot \int_{v_0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v_x \cdot n \cdot dv_x dv_y dv_z$$

...

$$= A_0 \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_m}{kT}} \quad \text{avec}$$

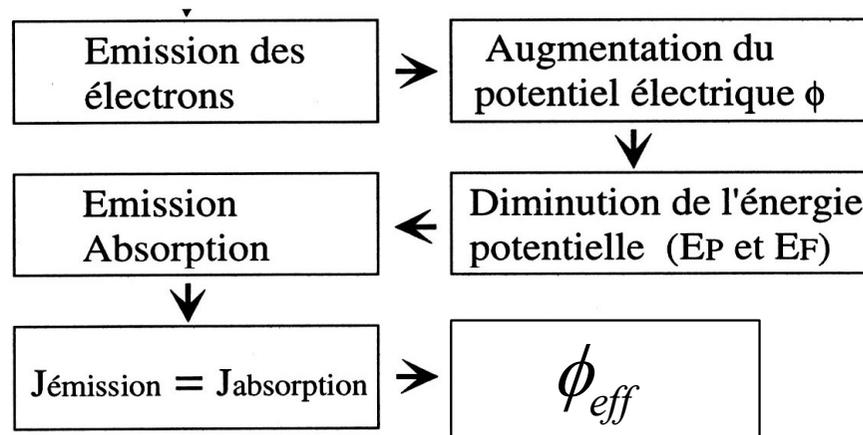
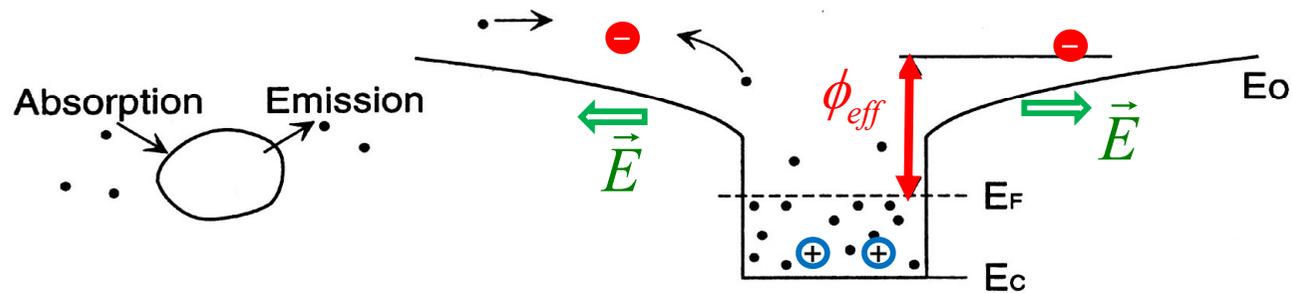
$$A_0 = \frac{q \cdot m \cdot k^2}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cong 120 \frac{A}{cm^2 \cdot K^2}$$



Constante de
Richardson

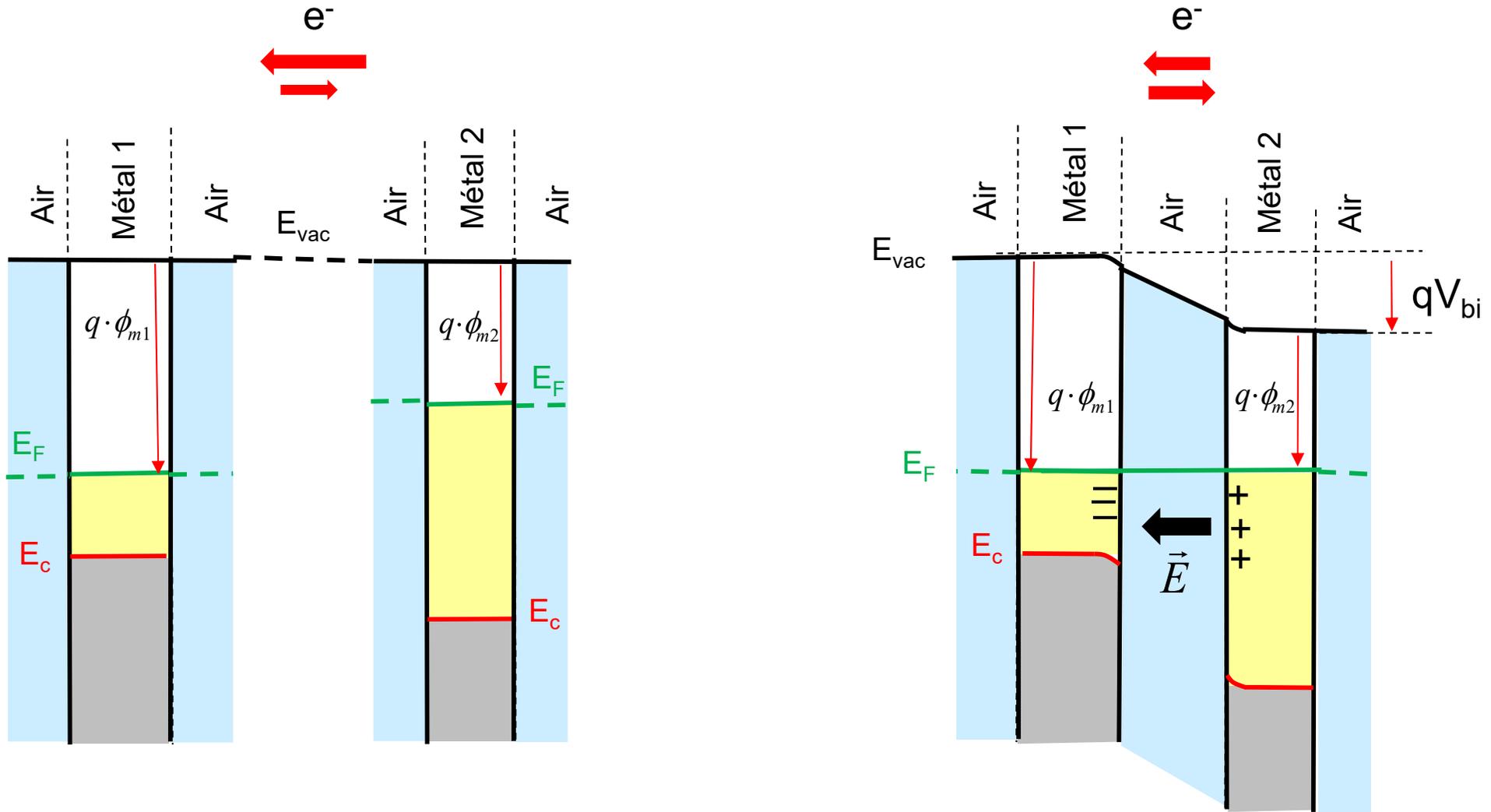
O.W. Richardson, Prix Nobel de physique 1928

Corps en équilibre avec le milieu environnant : $J_{\text{émission}} = J_{\text{absorption}}$



Popovic, base de cours EPFL

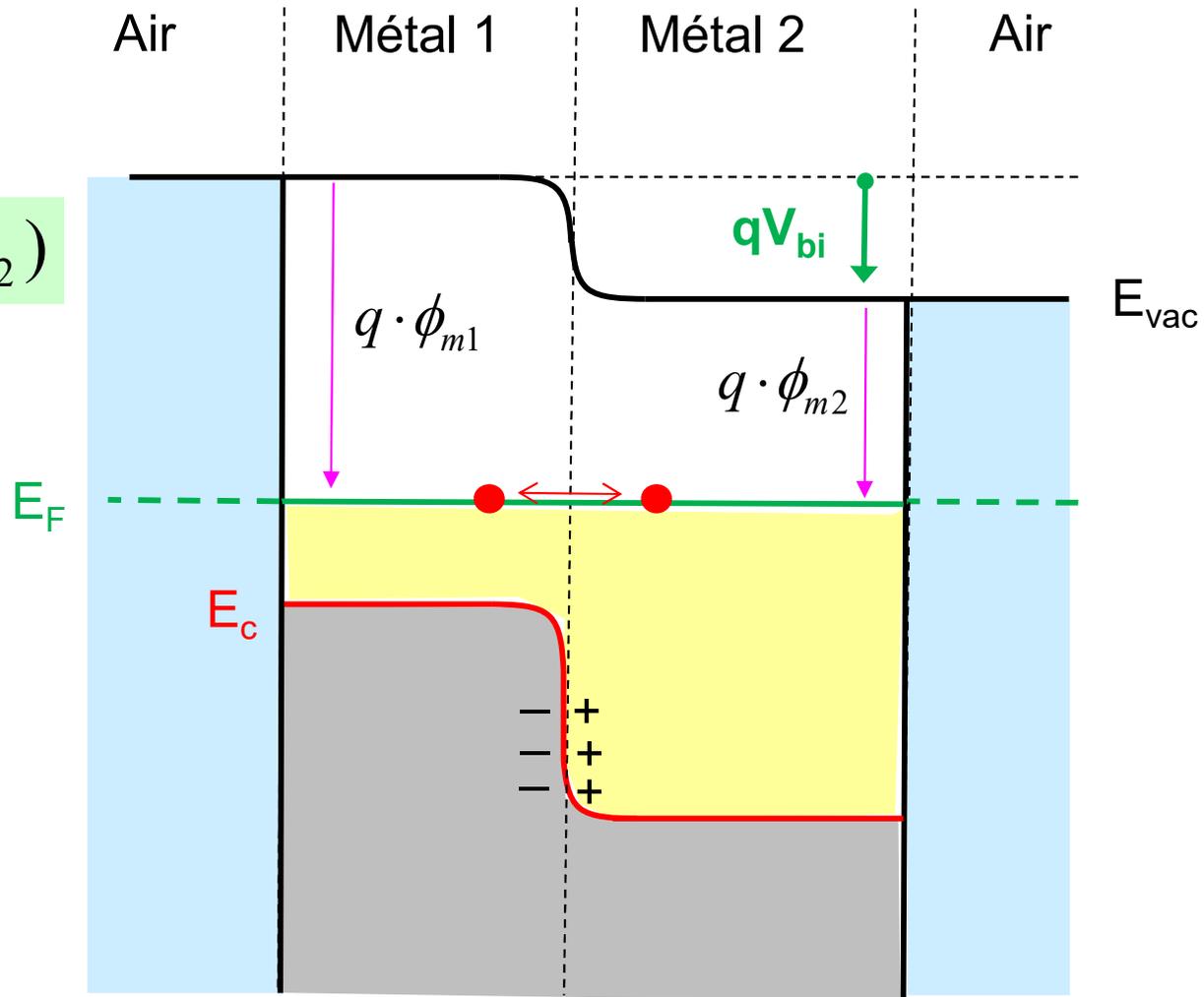
Équilibre thermodynamique entre deux puits d'énergie



Echange d'électrons par thermo-émission

Jonctions entre deux métaux

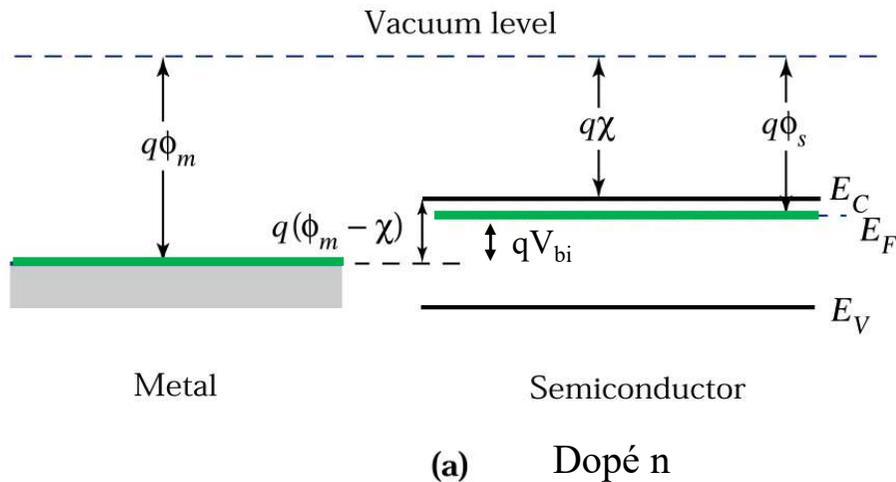
$$qV_{bi} = q(\phi_{m1} - \phi_{m2})$$



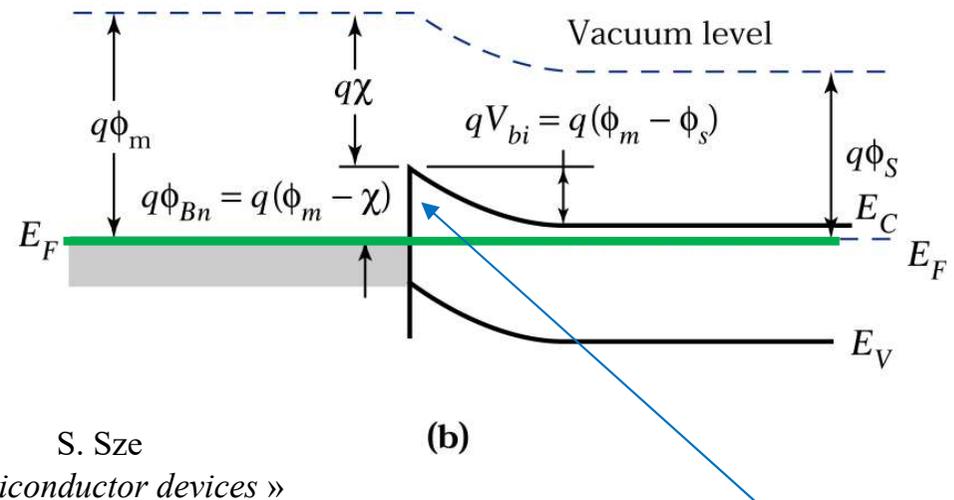
Courant possible, pas d'effet «diode»

Jonction métal / semi-conducteur (M-S): mise en contact et équilibre thermique

Séparés



En contact



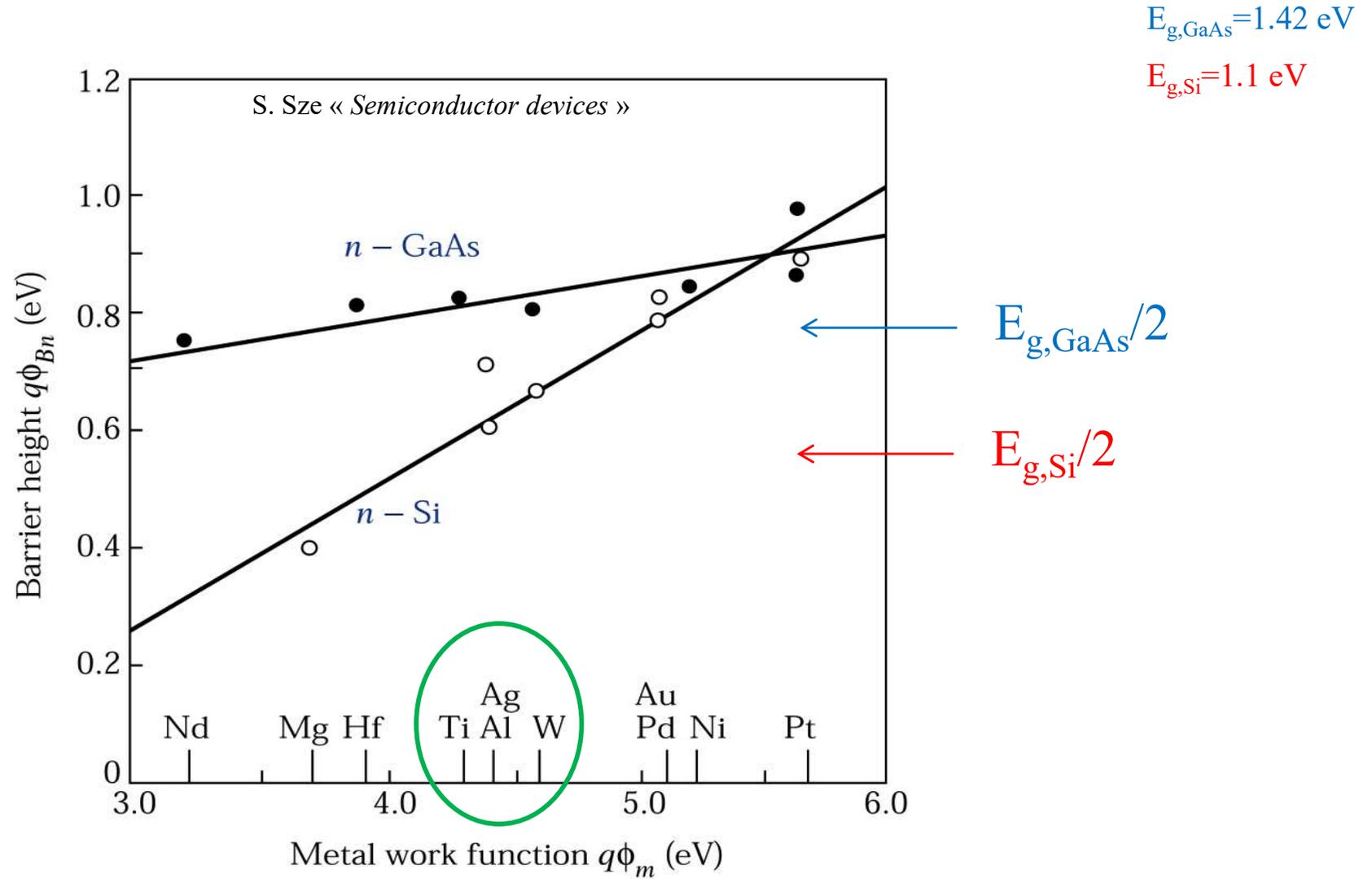
Barrière de potentiel:

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi)$$

(Optimal = $E_g/2$)

Potentiel de built-in:

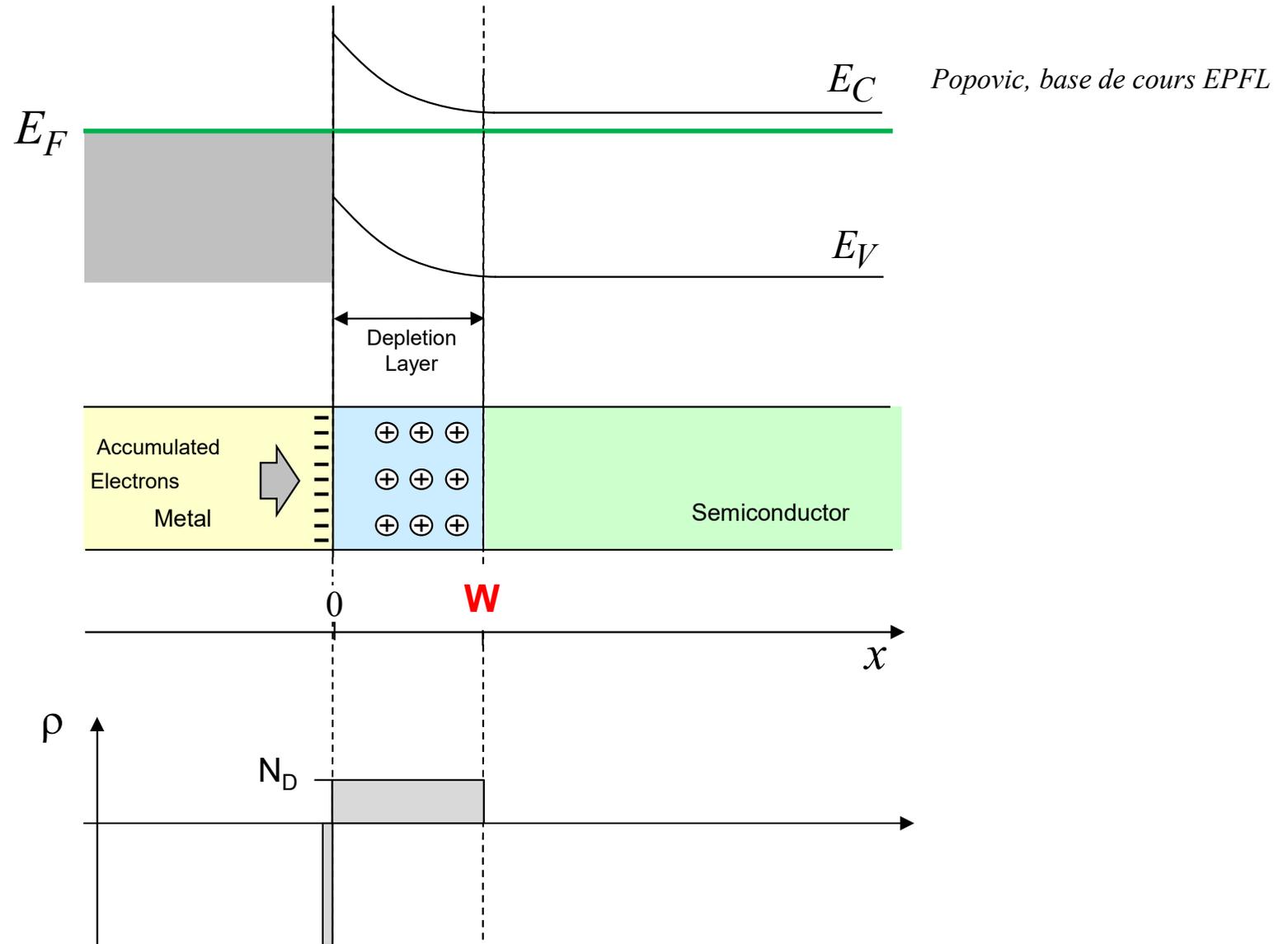
$$qV_{bi} = q(\phi_m - \phi_s)$$



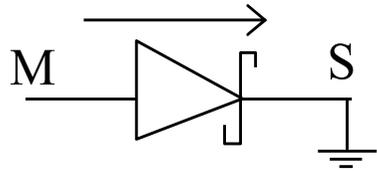
Calcul des bandes

Approximation par
déplétion totale

Approximation “Déplétion totale”



Équilibre



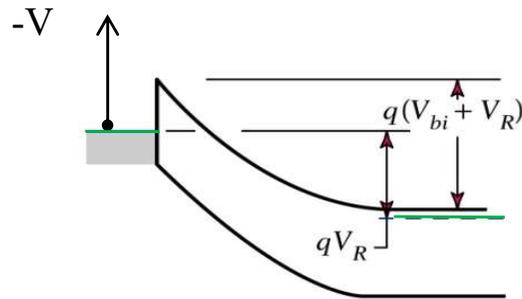
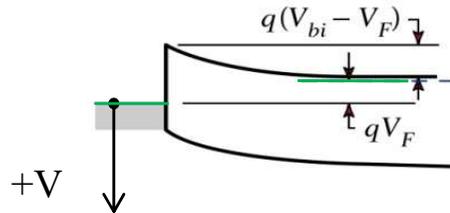
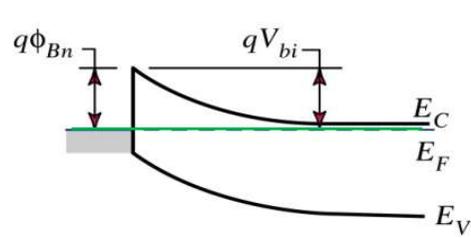
Forward



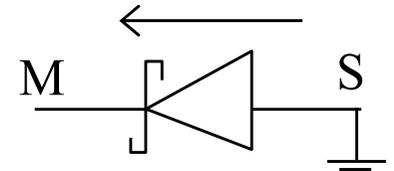
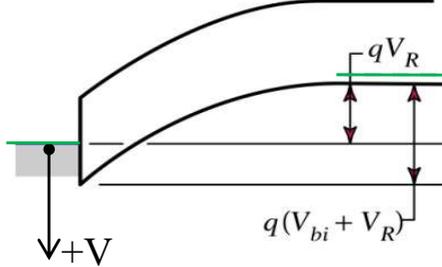
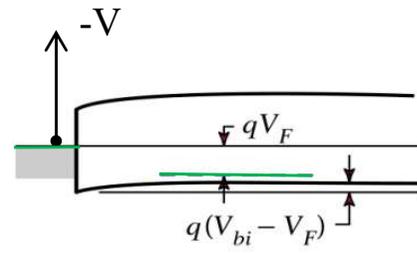
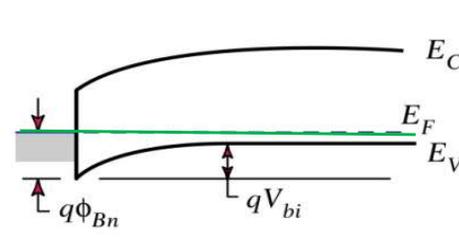
Backward



N-semicond.

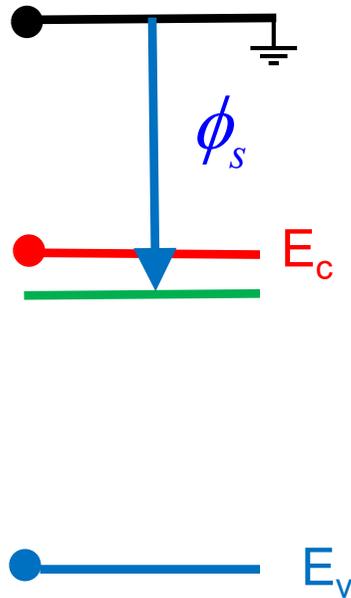


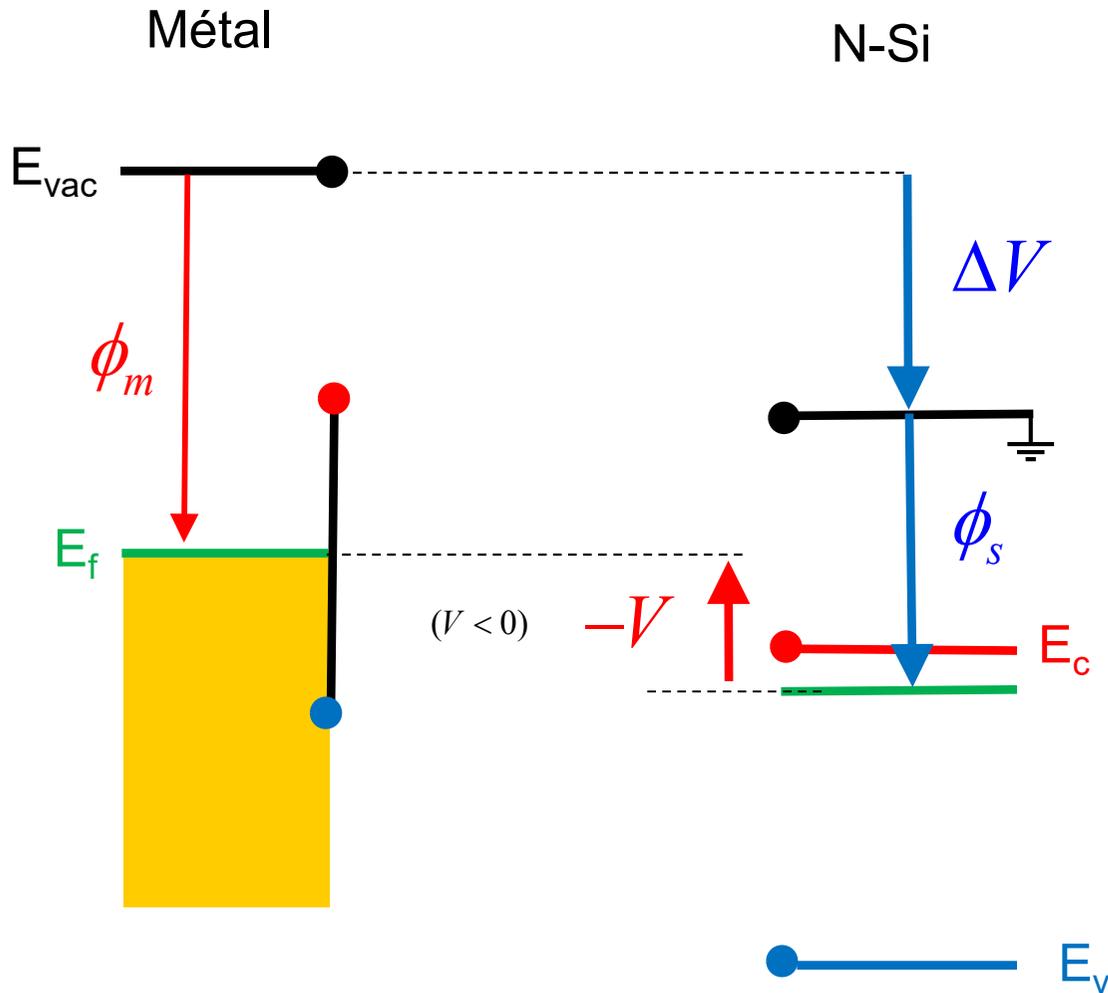
P-semicond.



S. Sze
« Semiconductor devices »

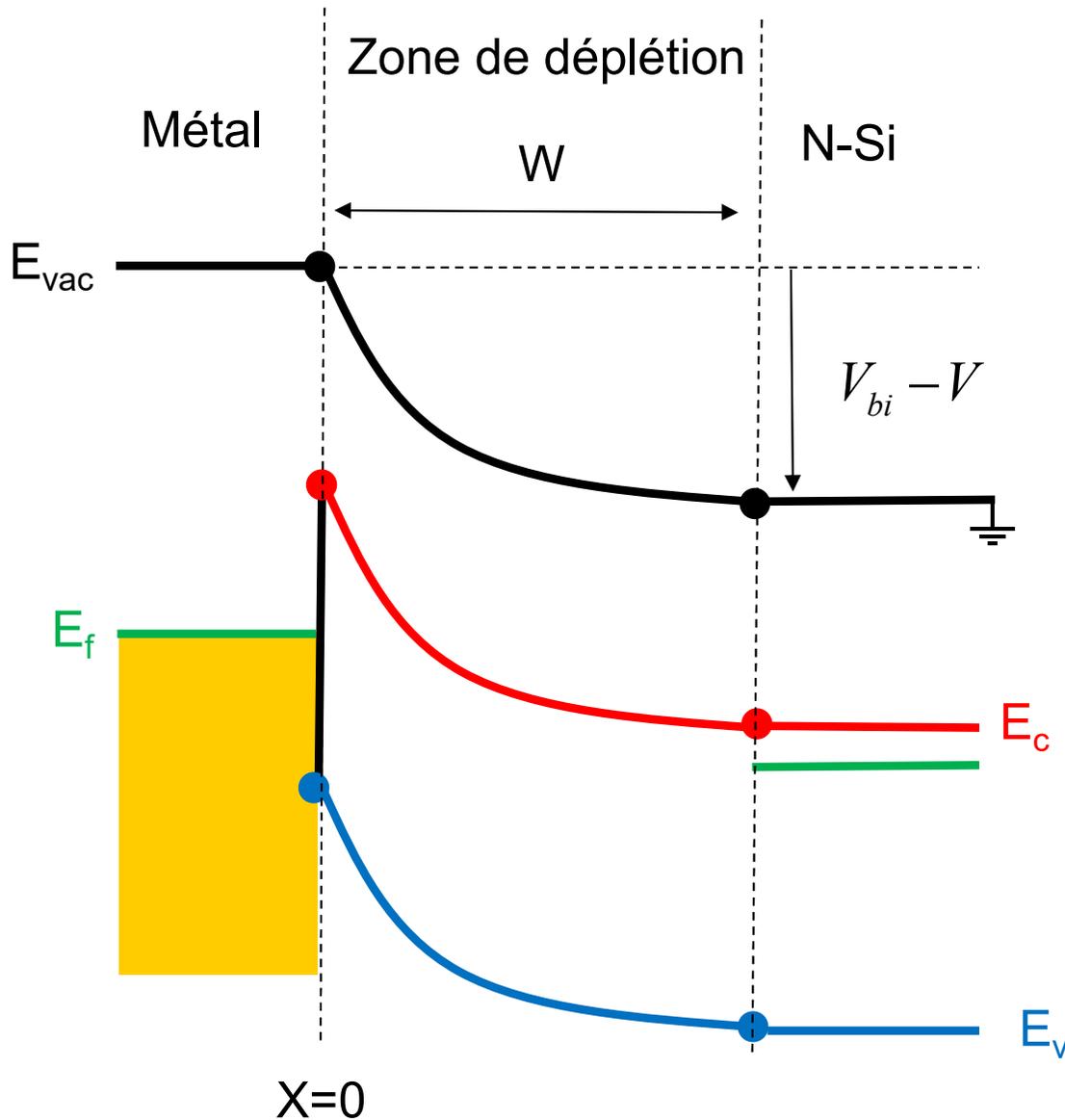
N-Si





$$\Delta V + \phi_s = (\phi_m - V)$$

$$\Delta V = V_{bi} - V$$



Champ électrique:

$$E(x) \approx \int_0^x \rho \cdot dx \approx -N_D \cdot (W - x)$$

Tension interne:

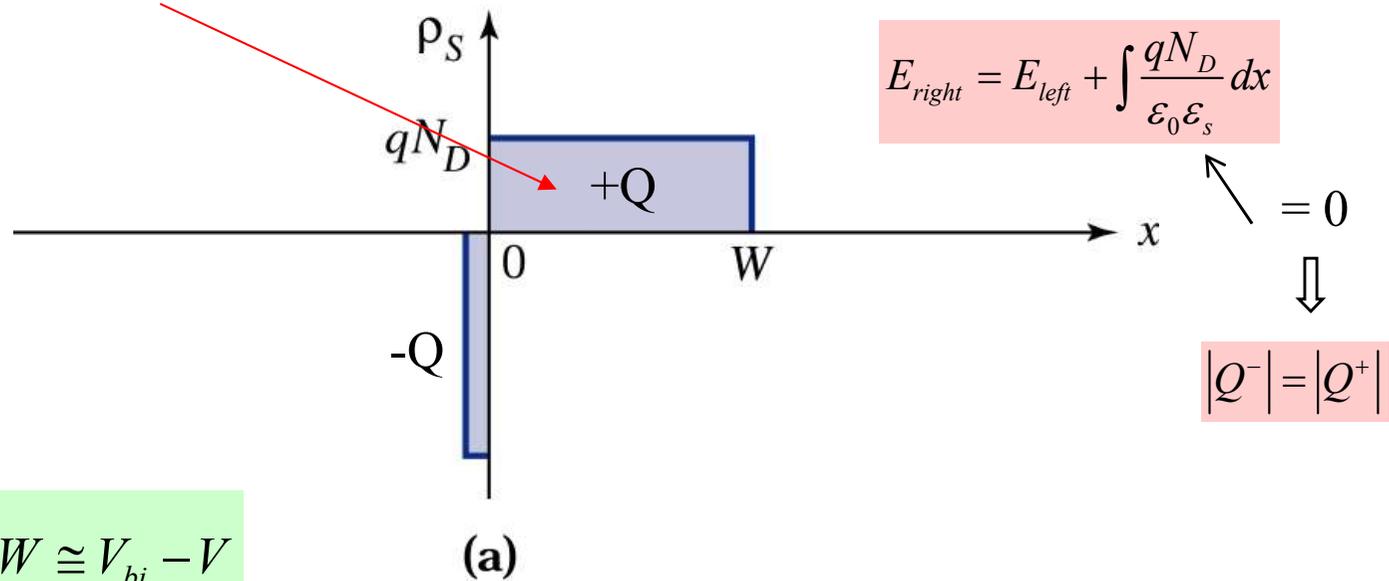
$$V_{bi} - V \approx \int_0^W E \cdot dx \approx \frac{1}{2} N_D \cdot W^2$$

$$W \approx \sqrt{\frac{2(V_{bi} - V)}{N_D}}$$

Charges et champ électrique à l'interface

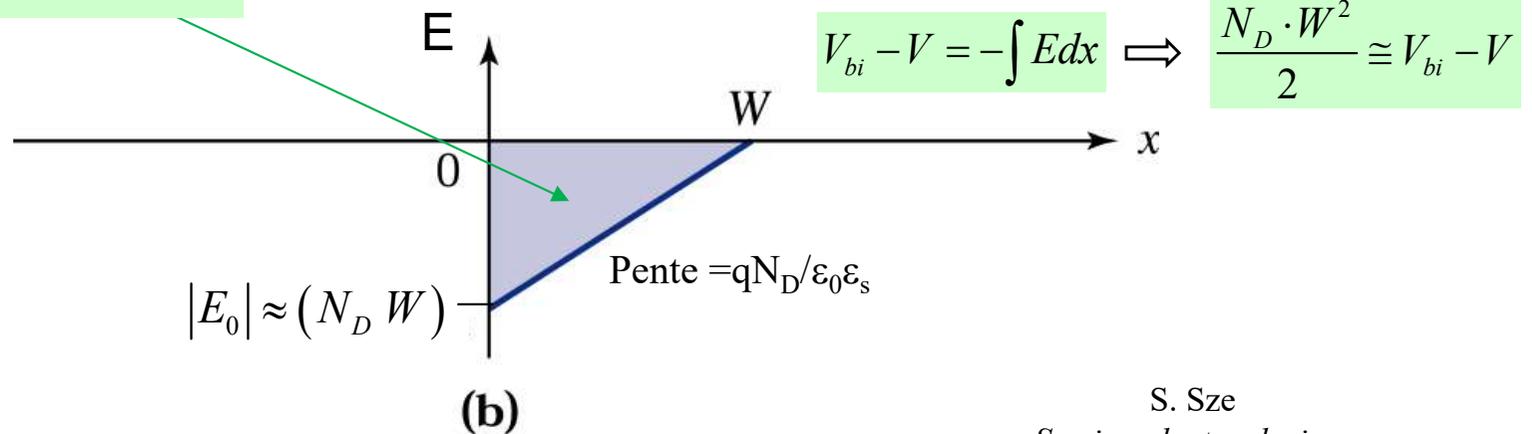
Surface $\cong N_D \cdot W \cong E_0$

Charges



Surface $\cong \frac{1}{2} \cdot (N_D W) \cdot W \cong V_{bi} - V$

Champ électrique



S. Sze
« Semiconductor devices »



Équation de Poisson:
$$\left(-\frac{d^2\phi}{dx^2} \right) = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} (p + N_D^+ - n - N_A^-) = \frac{dE}{dx}$$

Champ électrique:
$$E(x) = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} \cdot \int_W^x N_D dx = -\frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} \cdot N_D(W - x); \quad E_0 = E(x=0) = -\frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} \cdot N_D W$$

Potentiel:
$$\psi(x) = -\int_0^x E(x) dx = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} N_D \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right)$$

Potentiel de built-in:
$$V_{bi} - V = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{\epsilon_0\epsilon_s} \cdot N_D W^2 \quad \text{avec} \quad qV_{bi} = q(\phi_m - \phi_s)$$

Largeur de la zone de déplétion:

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

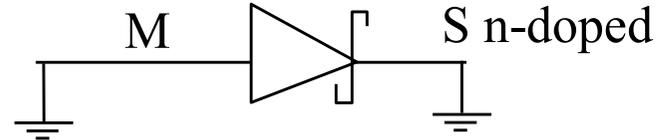
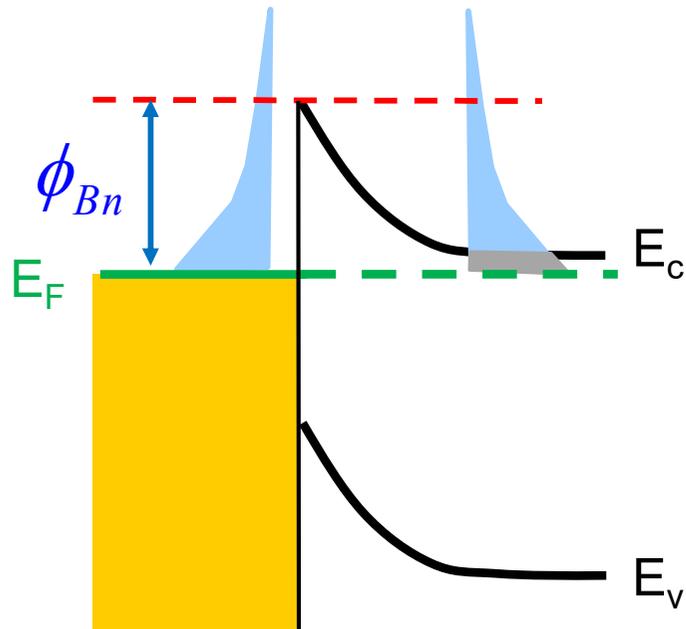
Capacité de la jonction:

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_s}{W} \quad [F / m^2]$$

Calcul des Courants

Thermo-émission

Équilibre



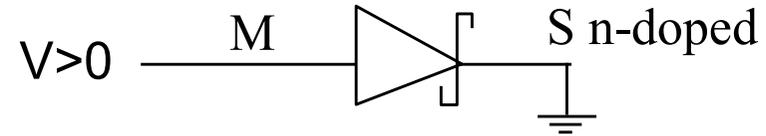
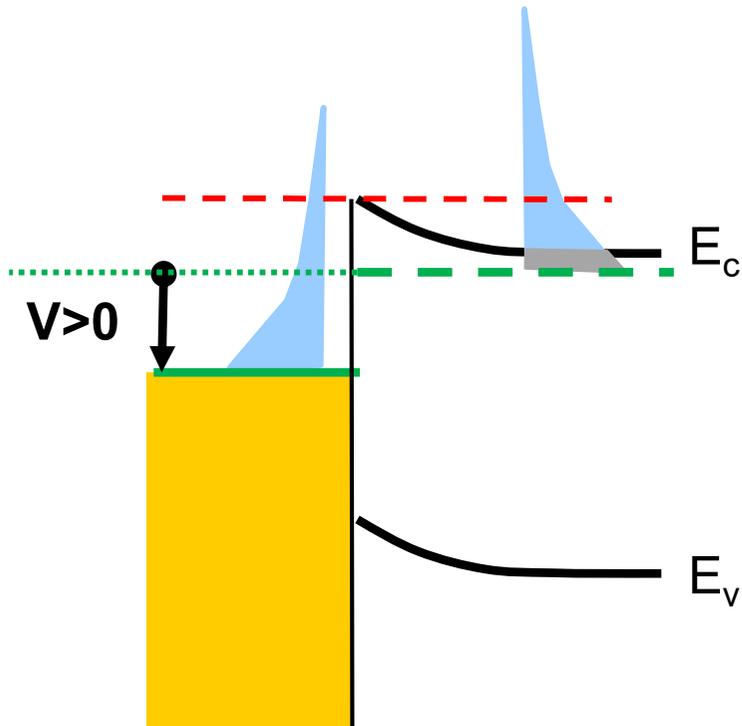
$$J_S \equiv |J_{M \rightarrow S}| = A_0 \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_{Bn}}{kT}}$$

Barrière de potentiel:

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi)$$

$$J_{S \rightarrow M} (V = 0) = -J_{M \rightarrow S}$$

Passante

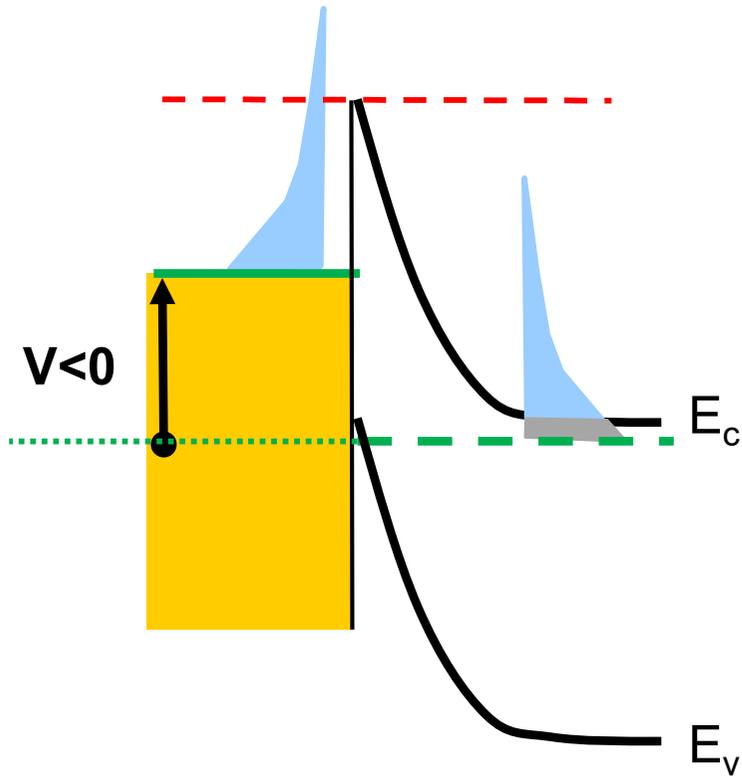


$$J_{M \rightarrow S} = \text{const} = -J_S$$

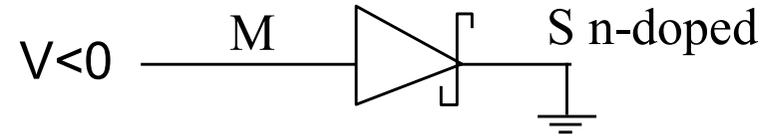
$$J_{S \rightarrow M} = J_S \cdot e^{\frac{qV}{kT}}$$

$$J(V) = J_S \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

V > 0



Bloquante



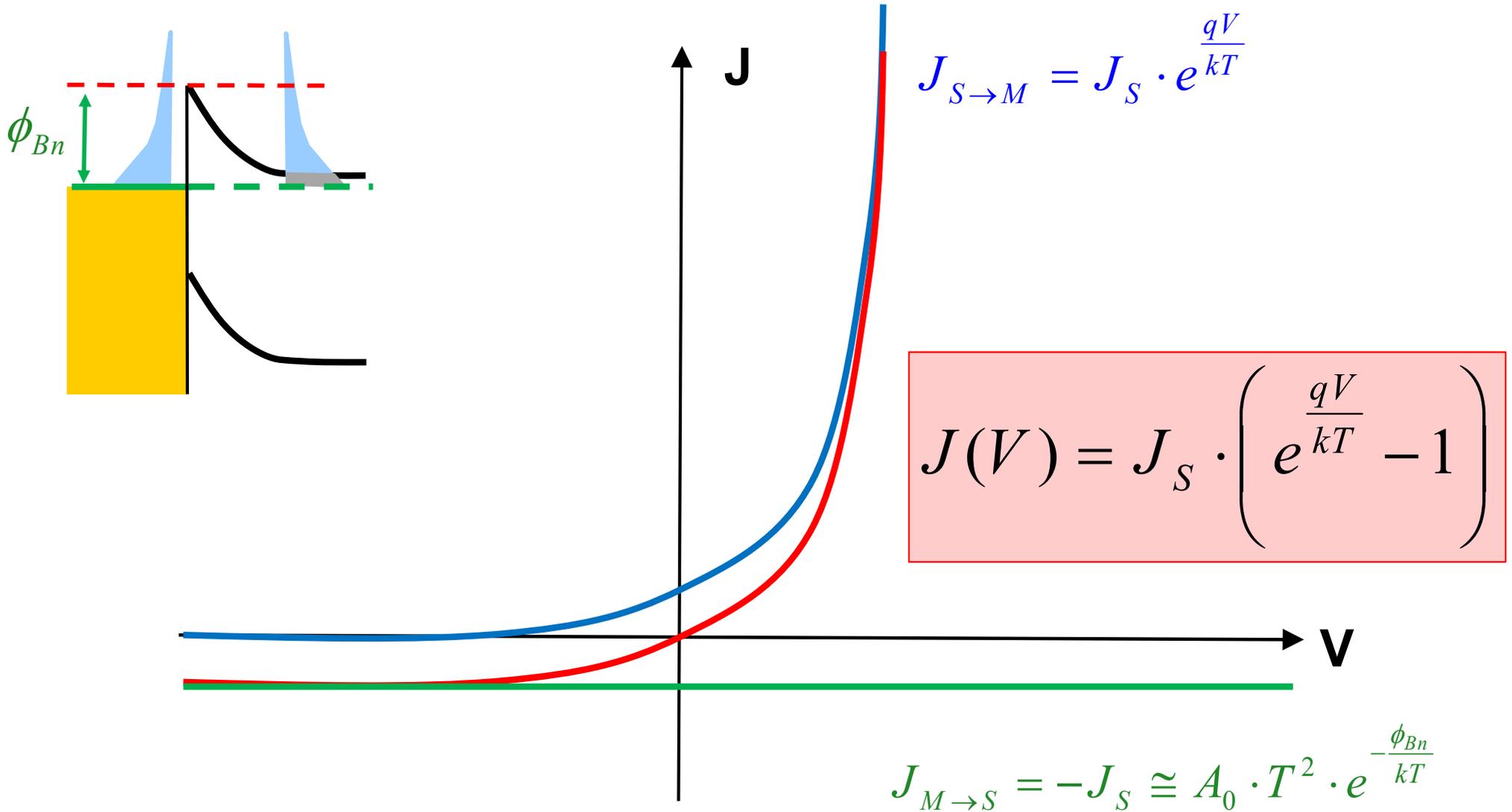
$$J_{M \rightarrow S} = \text{const} = -J_S$$

$$J_{S \rightarrow M} = J_S \cdot e^{\frac{qV}{kT}} \cong 0$$

$$J(V) = J_S \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

V < 0

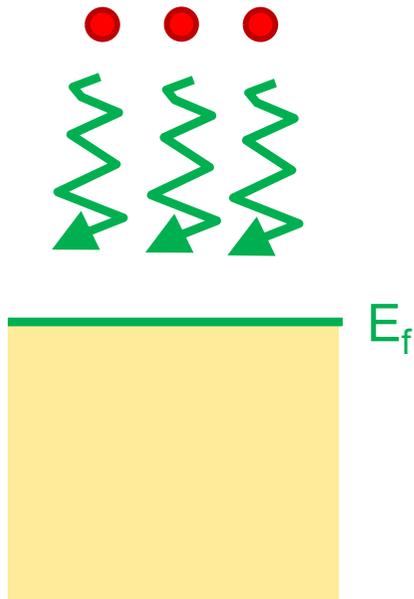
Courants idéaux: diode MS



Retour à l'équilibre: Thermalisation et/ou recombinaison

Métal

Injection de porteurs

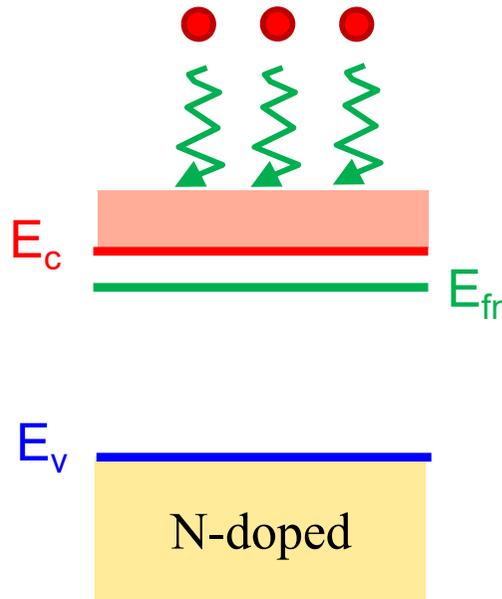


- Temps de thermalisation
- Retour à l'équilibre

➔ Processus rapide

Semiconducteurs

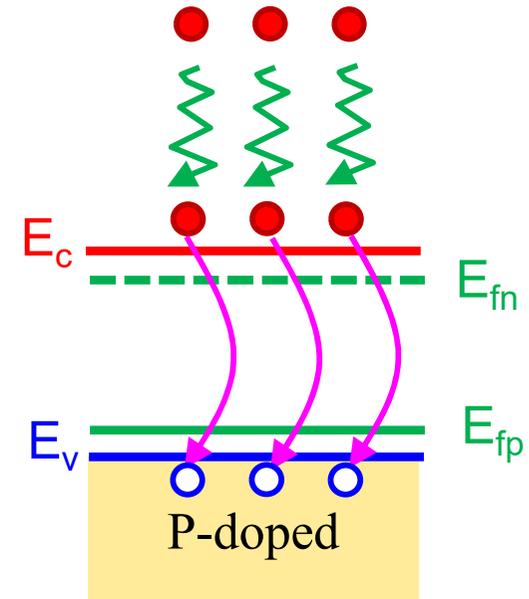
Injection de majoritaires



- 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

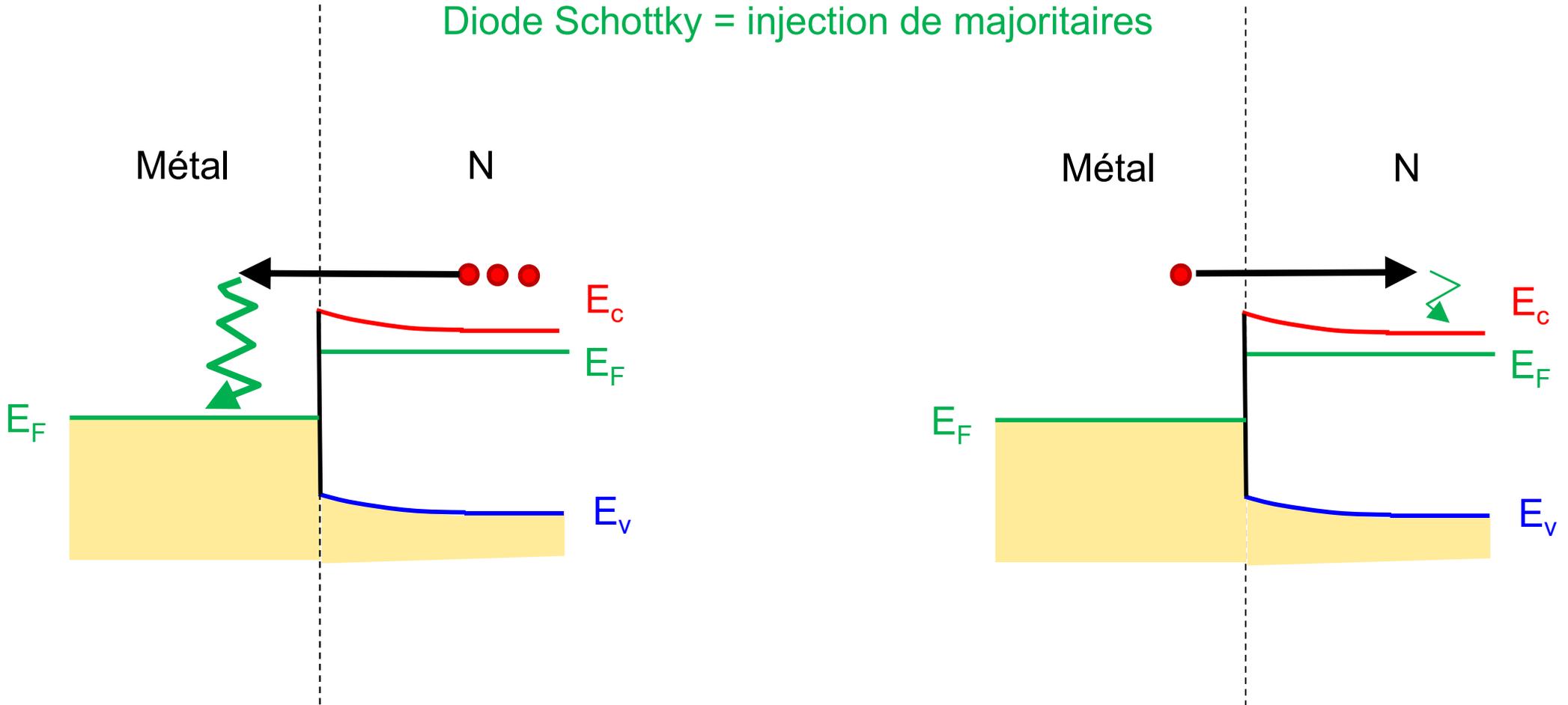
➔ **Processus lent**

Thermalisation



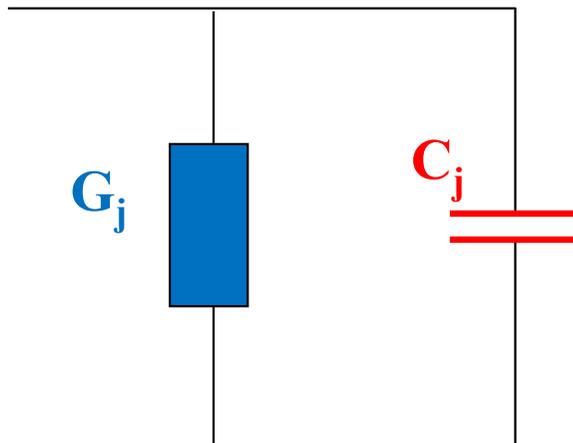
Recombinaison
(temps de vie
des minoritaires)

Diode Schottky = injection de majoritaires



La thermalisation est quasi «instantanée»

Diode Schottky:
Schéma petits signaux



Conductance de la jonction

$$G_j \cong \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{q}{kT} (I + I_s)$$

Capacité de jonction

$$C_j \equiv \frac{\partial |Q|}{\partial V} = A \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W}$$

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

$$|Q| = qN_D \cdot W$$

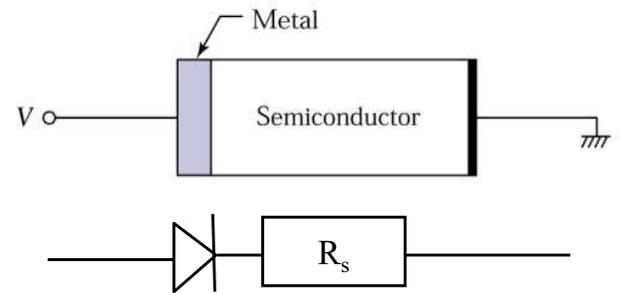
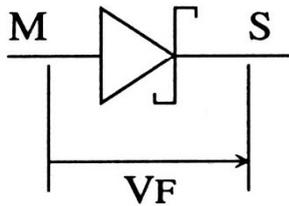
Courants parasites

et

contacts ohmiques

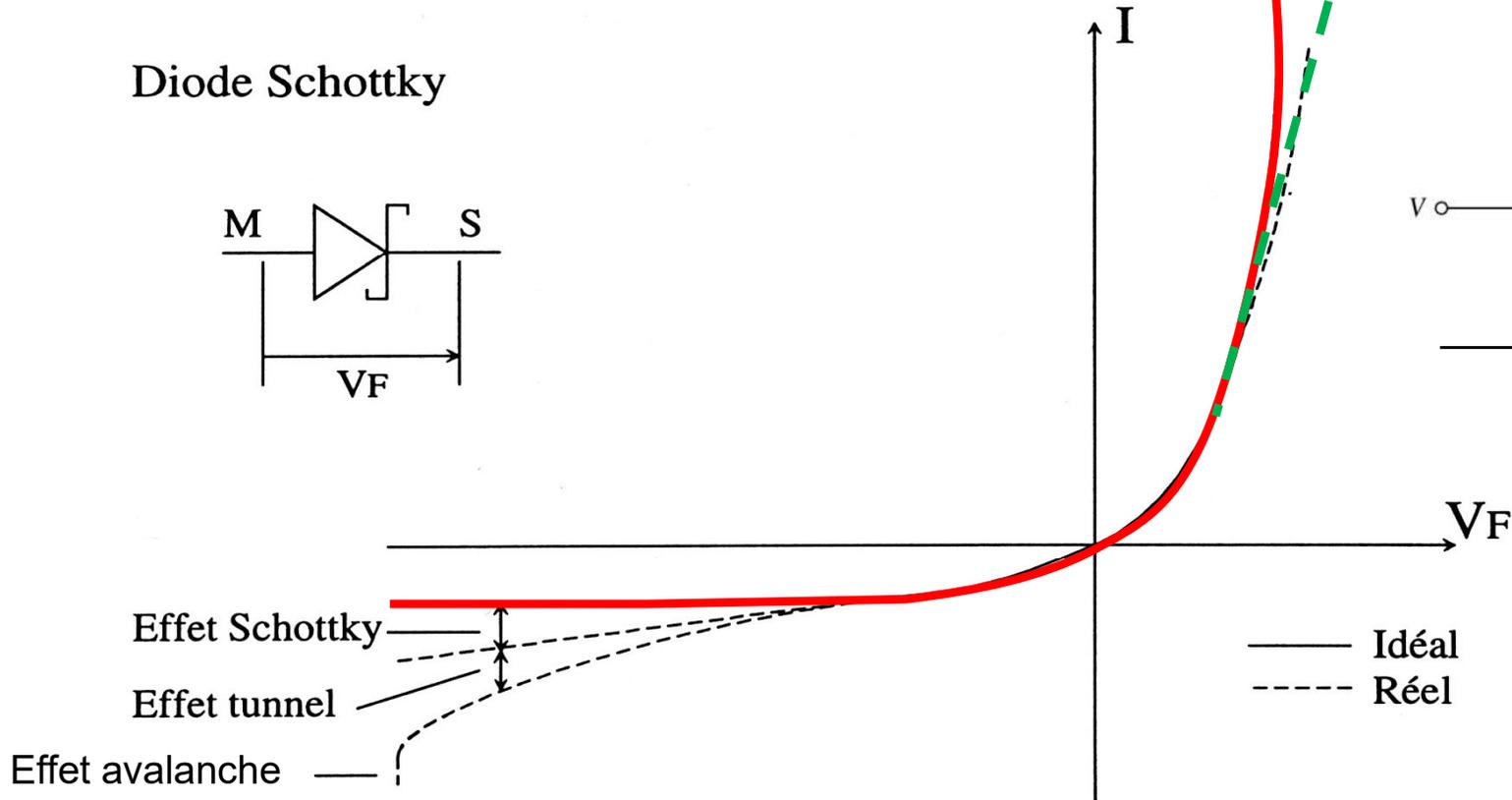
$$J = J_s \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Diode Schottky



Idéale

Résistance en série



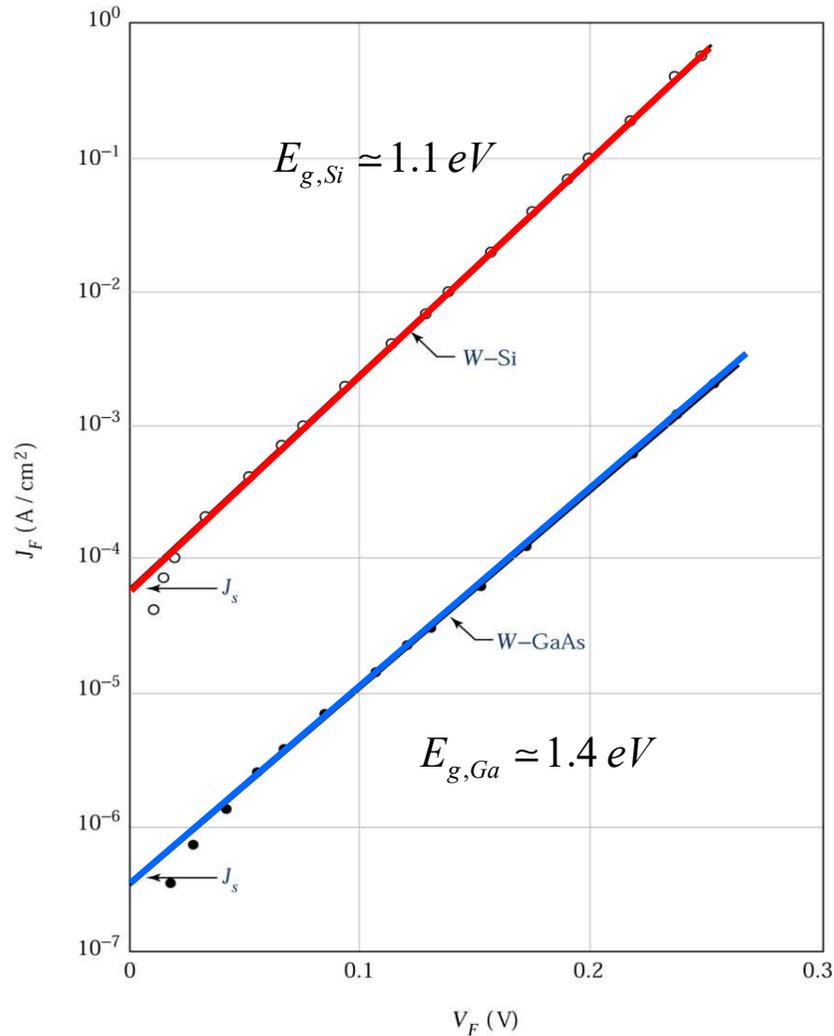
Popovic, base de cours EPFL

Jonction:
Wolfram – silicium

$$J_s = A_0 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

$$\phi_{Bn} \simeq \frac{E_g}{2}$$

S. Sze
« Semiconductor devices »



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

Jonction:
Wolfram – GaAs

Exemple de courant idéal

Jonction: Wolfram – silicium

$$E_g = 1.1 [eV]$$

$$J_s = 7 \cdot 10^{-7} [uA / um^2]$$

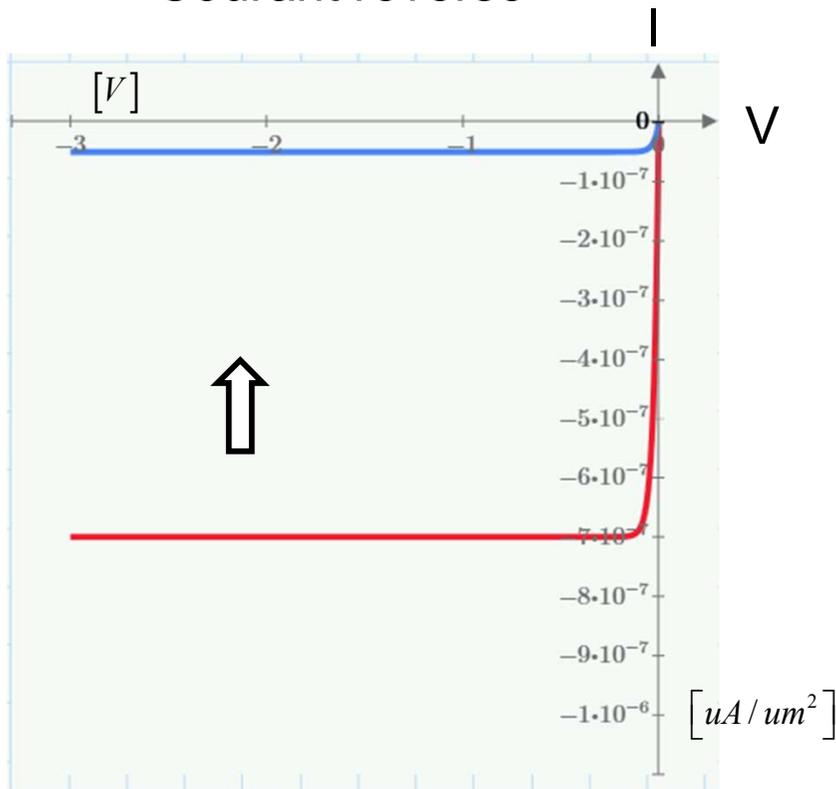
T=300K

Jonction: Wolfram – GaAs

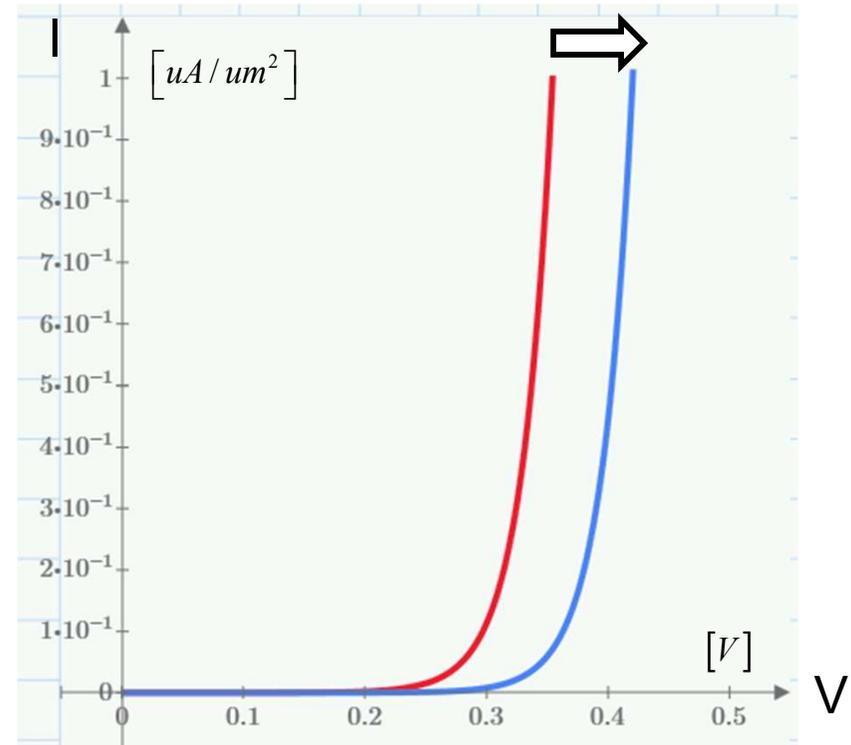
$$E_g = 1.4 [eV]$$

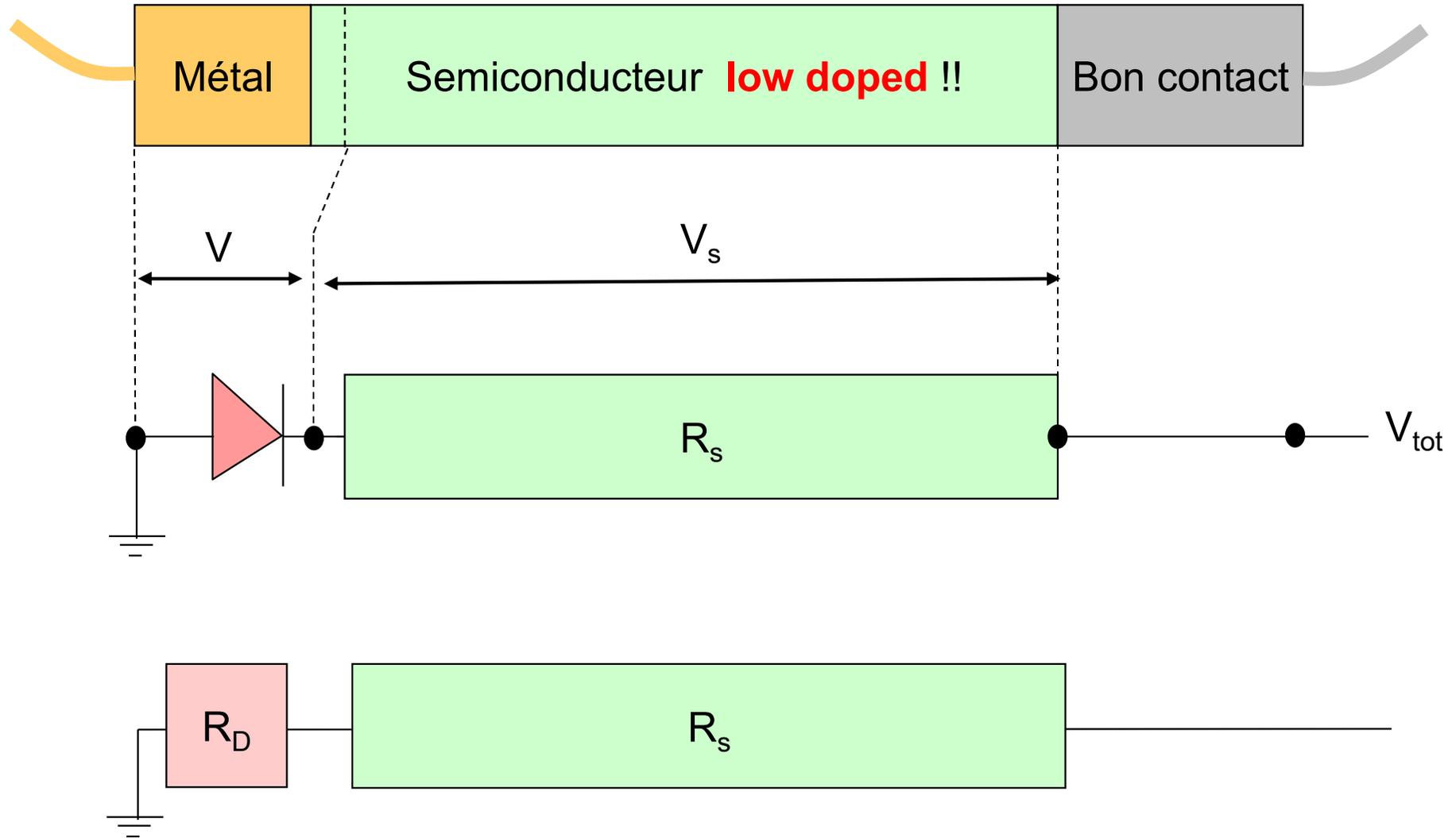
$$J_s = 5 \cdot 10^{-8} [uA / um^2]$$

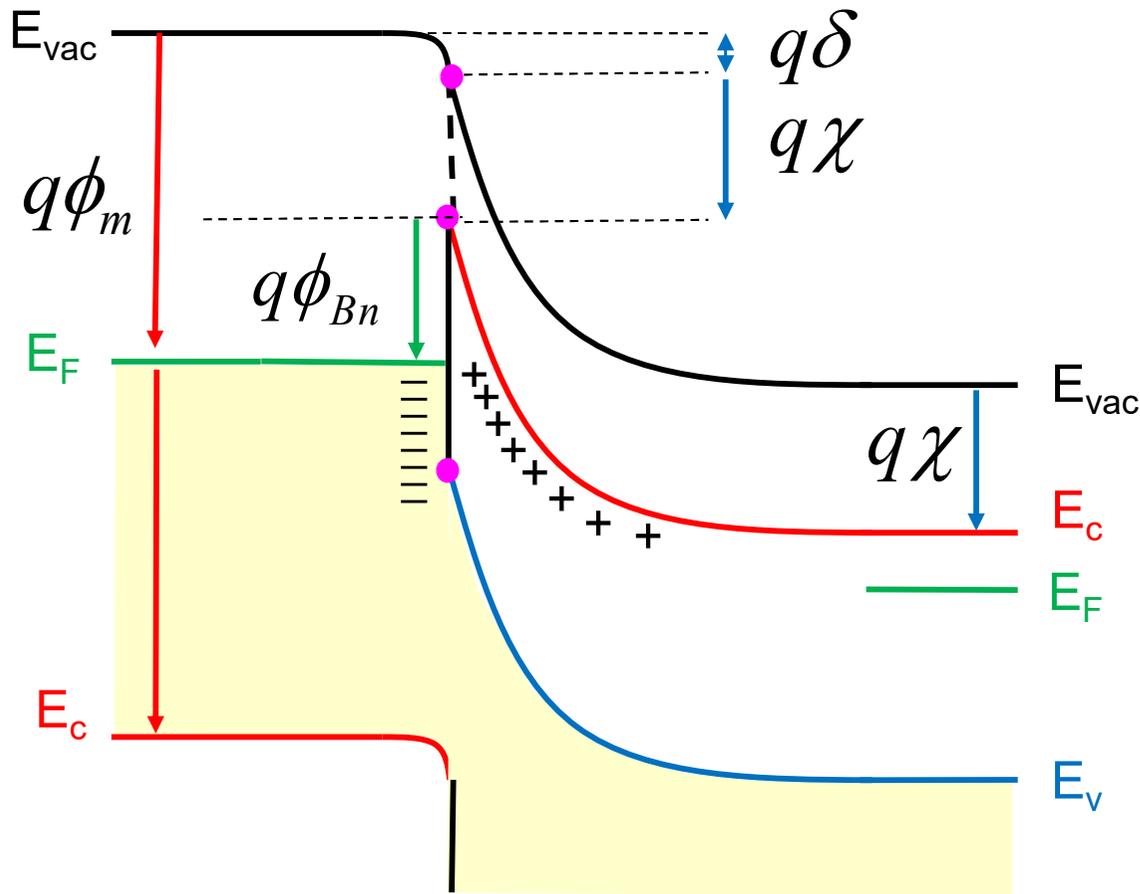
Courant reverse



Courant forward



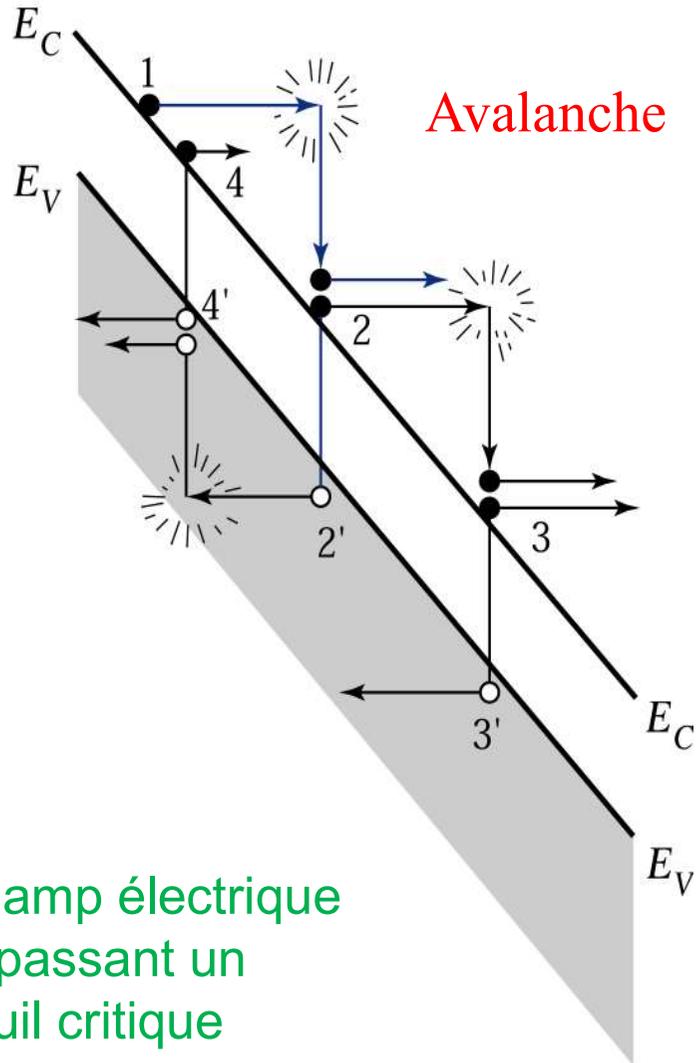




Effet Schottky

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi - \delta)$$

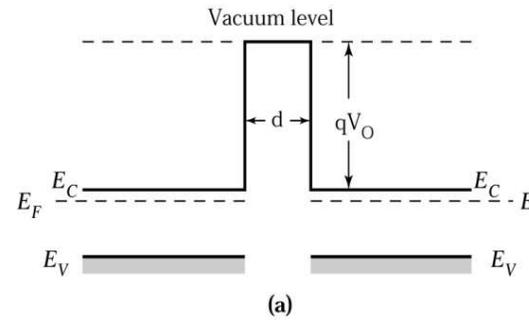
$$J_s = A_0 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)$$



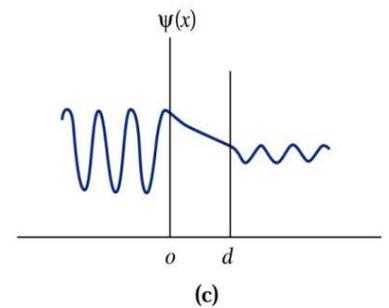
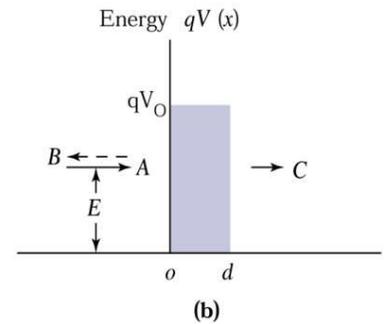
Champ électrique dépassant un seuil critique

Avalanche

S. Sze « Semiconductor devices »

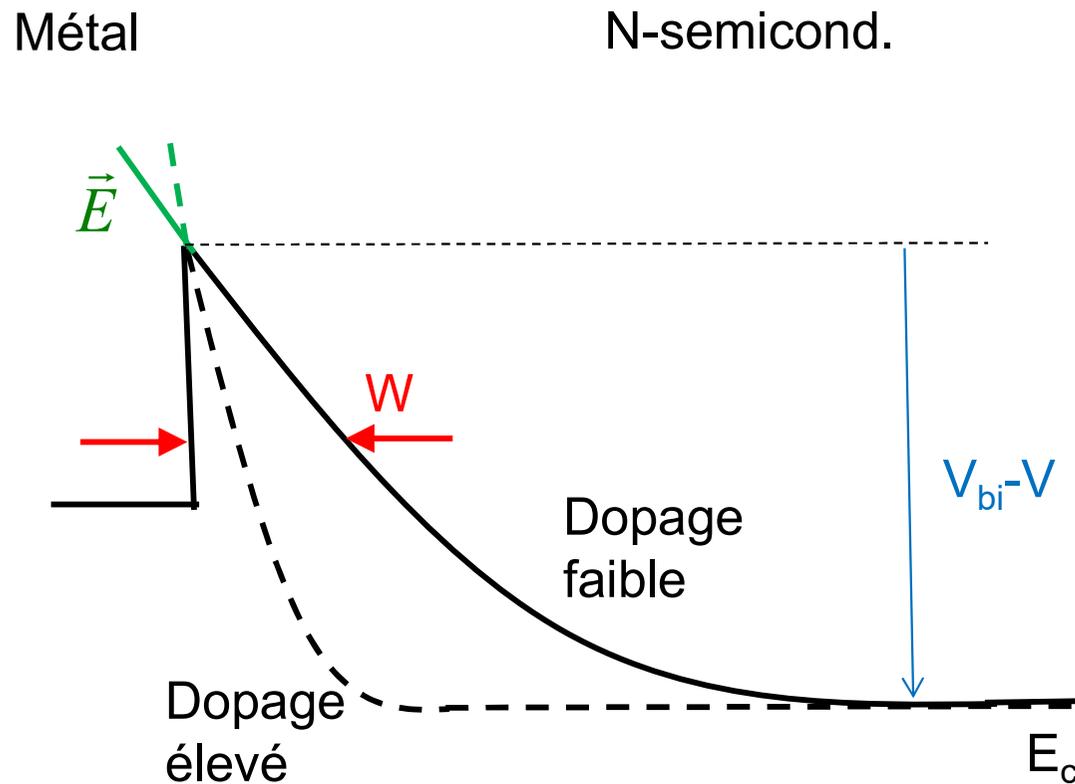


Zone de déplétion ultra-fine (quelques nanomètres)



Tunnel

Effet avalanche et tunnel: dépendance du dopage.



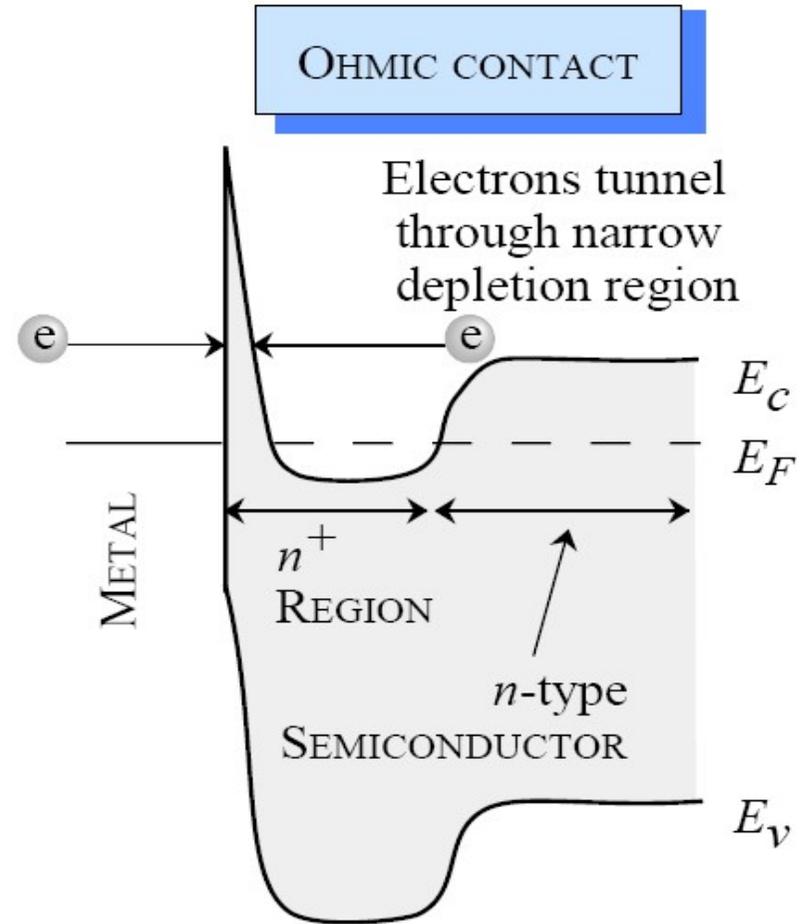
Augmentation du dopage →

- 1) Augmentation du champ électrique E
- 2) Diminution de la largeur W de la zone de déplétion



- 1) Diminution de la tension de breakdown par effet avalanche
- 2) Apparition de l'effet tunnel

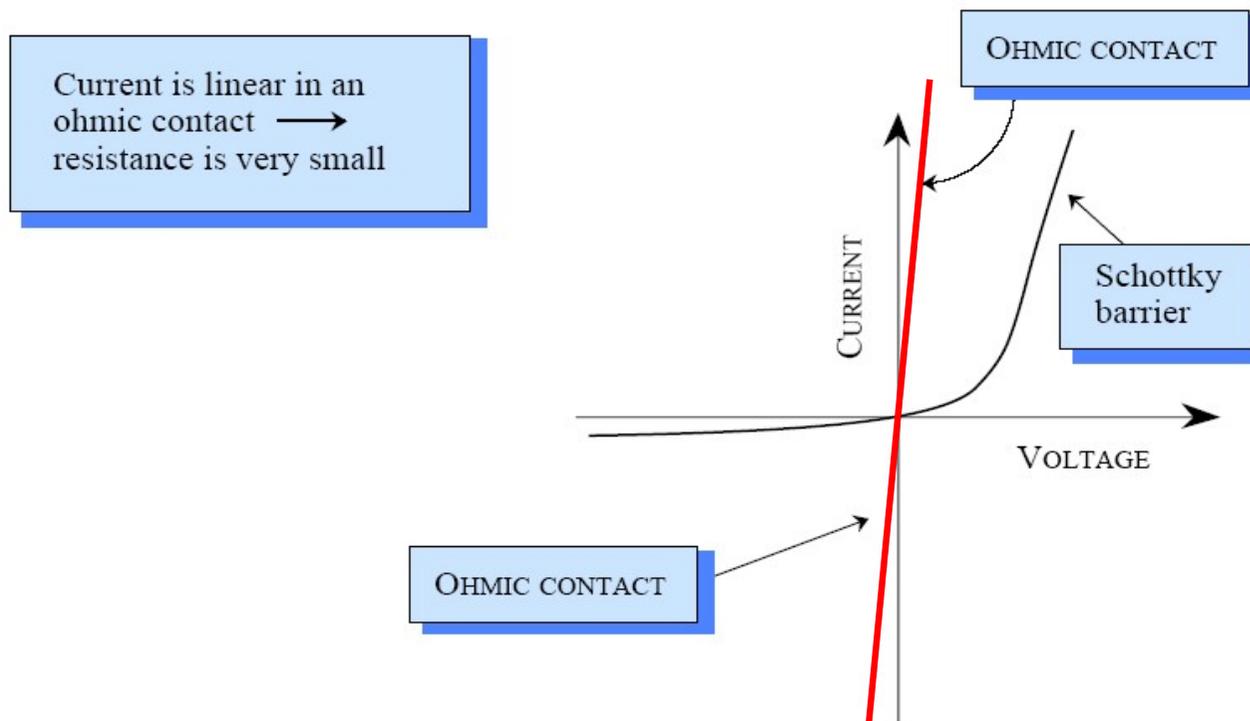
Heavy doping in the semiconductor causes a very thin depletion width and electrons can tunnel across this barrier leading to ohmic behavior

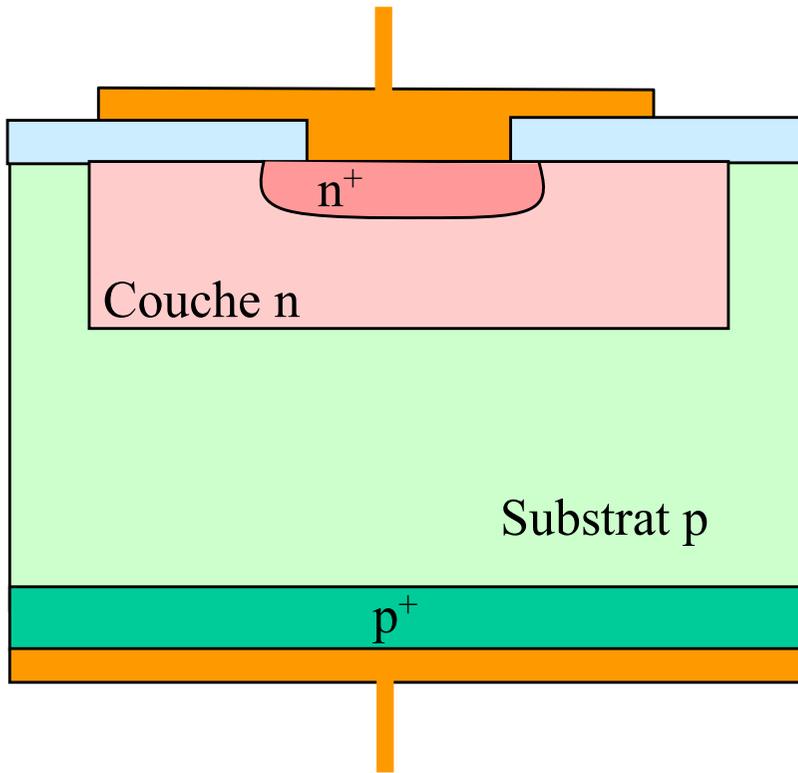


J. Singh « *Semiconductor devices* »

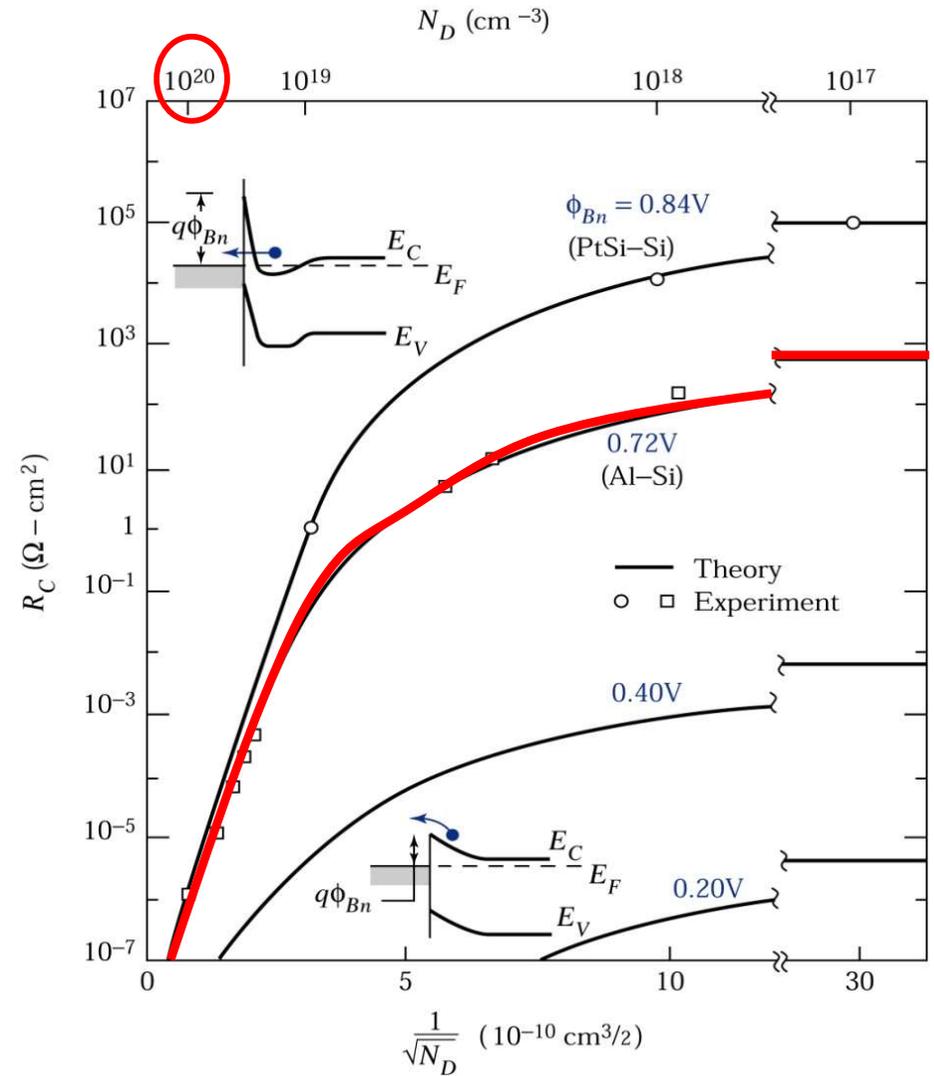
METAL-SEMICONDUCTOR JUNCTIONS: OHMIC CONTACT AND SCHOTTKY JUNCTION

J. Singh « *Semiconductor devices* »



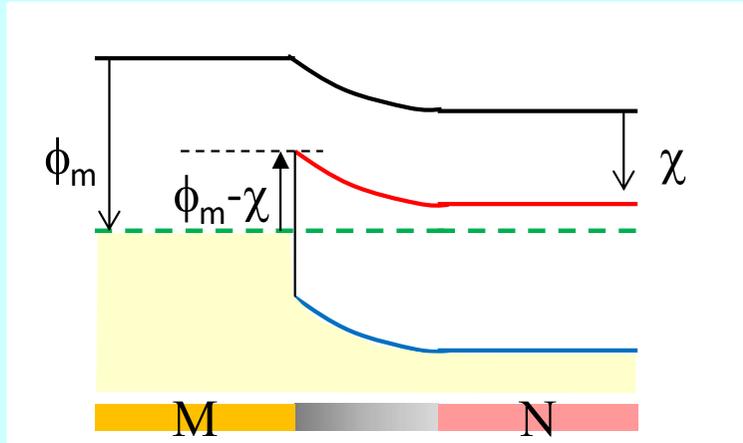


S. Sze
« Semiconductor devices »

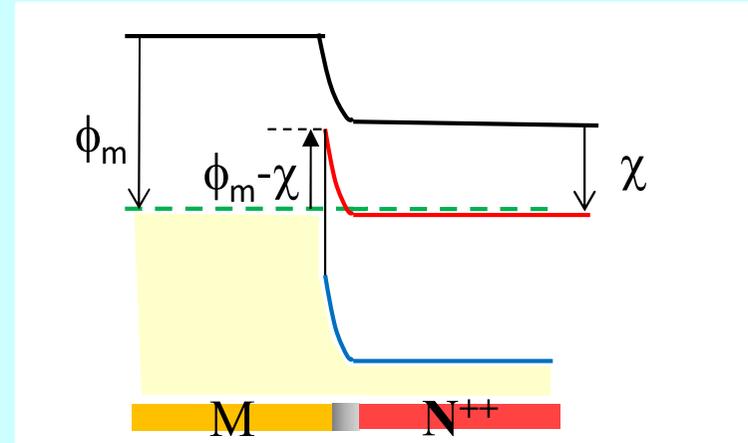


Diode Schottky et contact ohmique: schémas de bande

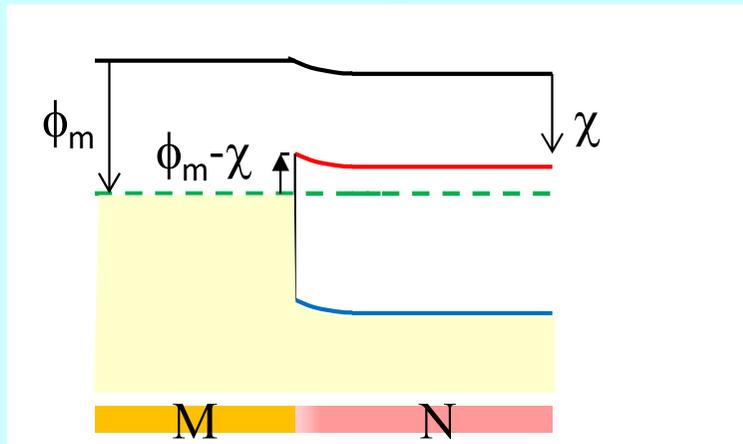
Diode Schottky



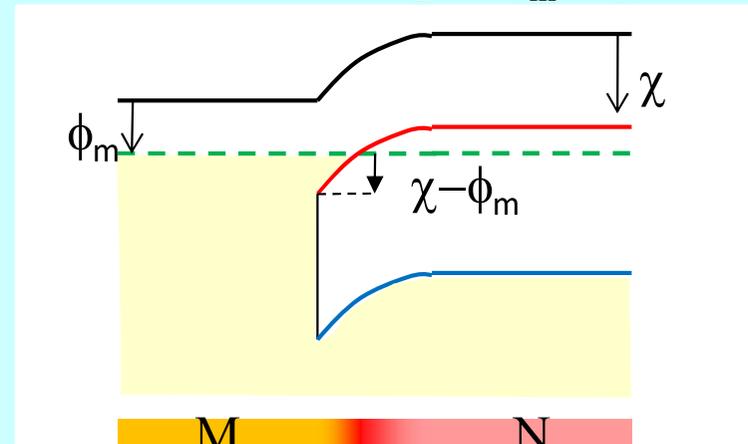
Contact Ohmique: doping N^{++}



Contact Ohmique: low barrier

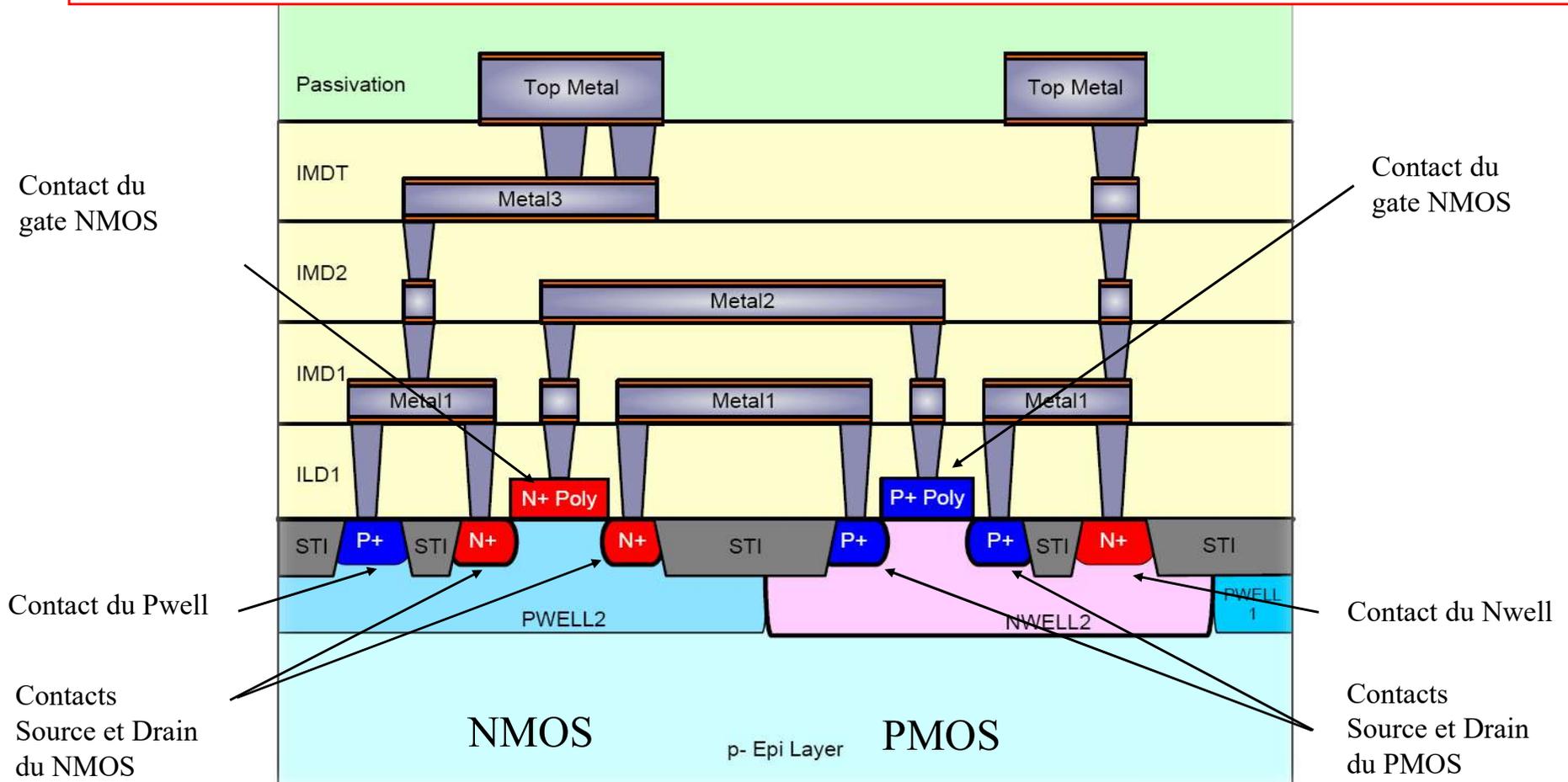


Contact Ohmique: $\phi_m < \chi$



Contacts ohmiques dans l'inverseur CMOS

Toutes les jonctions métal/semiconducteur sont fortement dopées (ohmiques)



A) Contacts ohmiques:

Un dopage très élevé du semi-conducteur est nécessaire pour éviter un effet diode parasite dans les contacts M-S.

B) Diode Schottky:

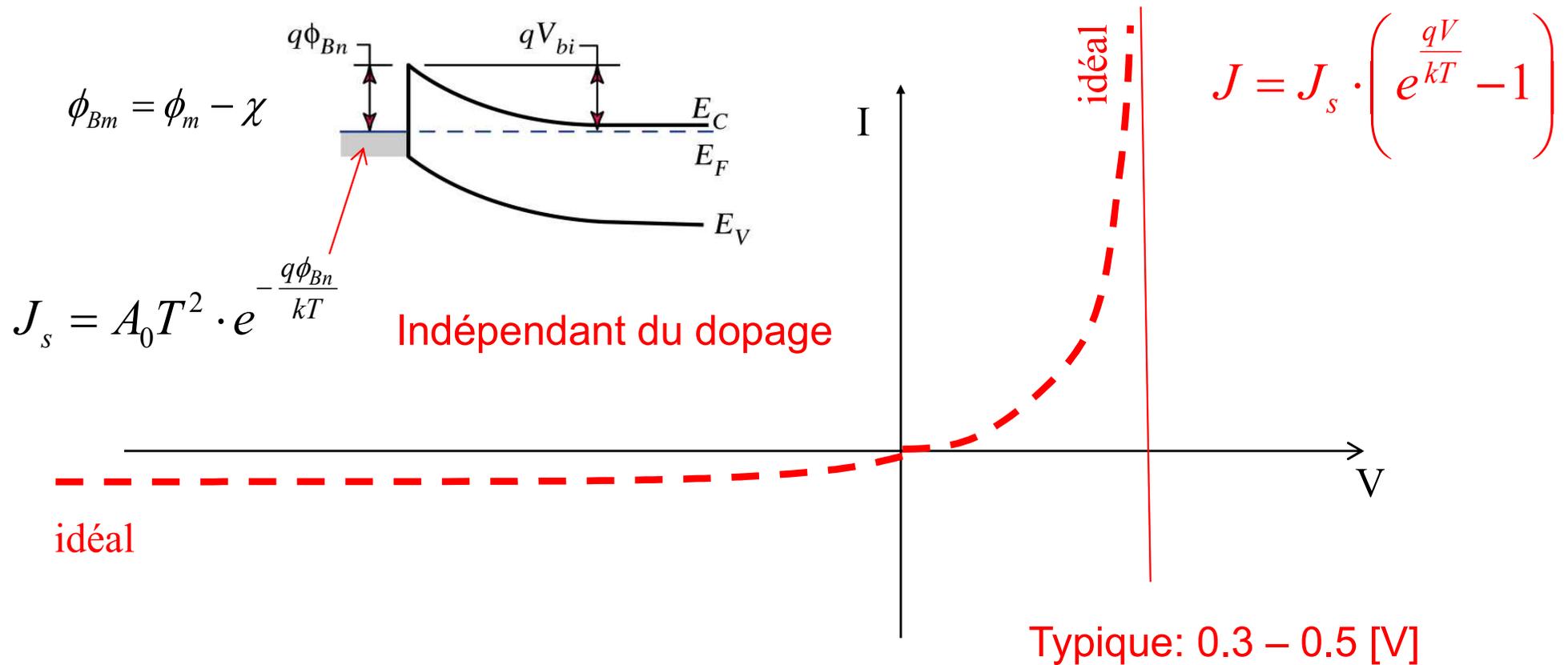
- semi-conducteur peu dopé → résistance en série non négligeable

- faible barrière ($\sim E_g/2$) → fort courant noir (I_s élevé)
faible tension de seuil ($\sim 0.3V$)

- courant de majoritaires → Thermalisation / pas de recombinaison
pas d'accumulation de minoritaires
rapides

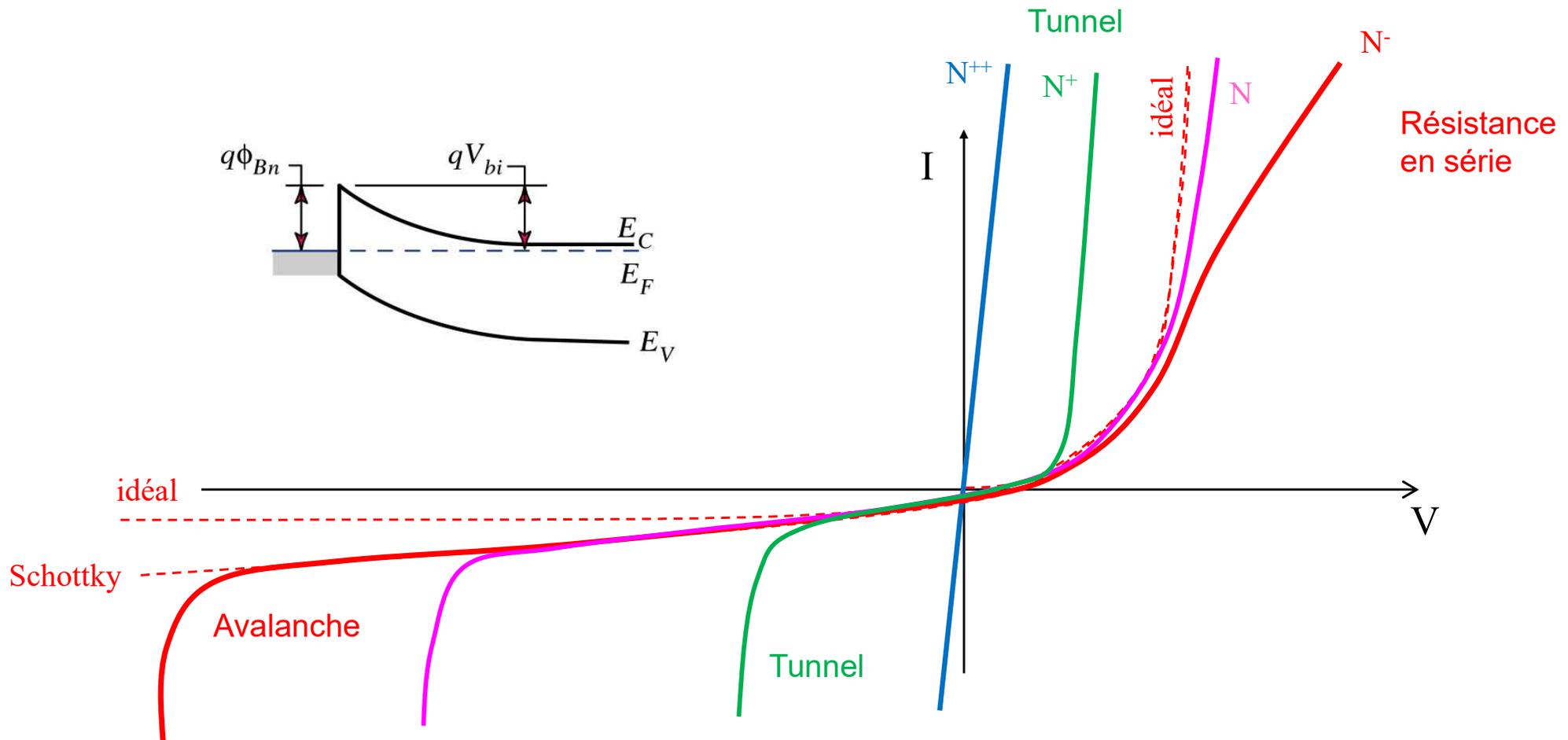


Quels sont les effets du dopage N du semiconducteur sur la courbe I(V) de la jonction M-S ?





Quels sont les effets du dopage N du semiconducteur sur la courbe I(V) de la jonction M-S ?





Popovic, base de cours EPFL

