

# COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

## V) Jonction Métal / Semi-conducteur (MS)

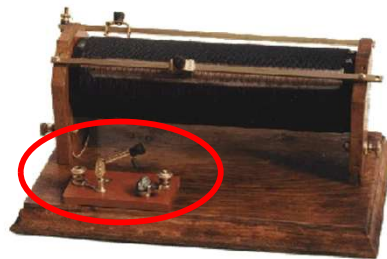
P.A. Besse

EPFL

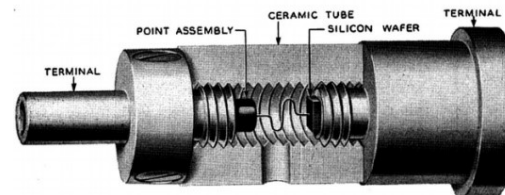
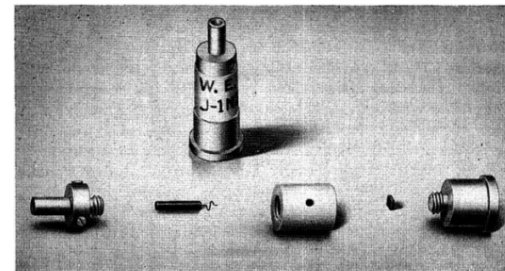
- **1873 - Jonction métal – galène (PbS)**  
Ferdinand Braun (prix Nobel 1909)
- **1901 - Application au redressement**  
Jagadis Chandra Bose
- **1906 - Diode metal - silicium**  
Greenleaf Whittier Pickard



Krows-Electric Company  
crystal detector



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



Point contact diode  
1941



Point-contact diode

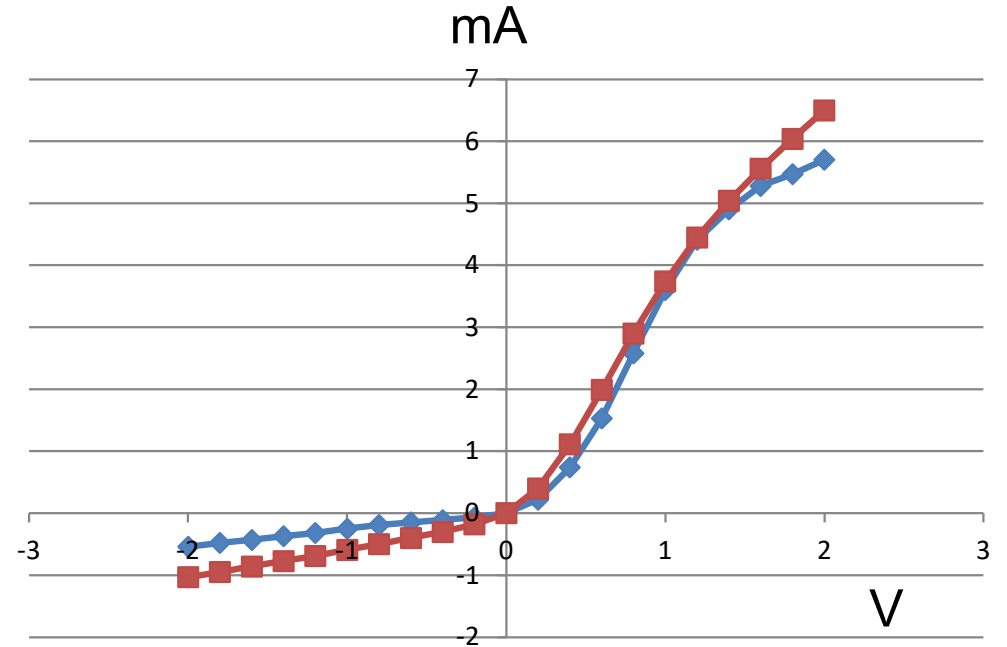
# Point contact diode: diode à galène

## 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**

cm 1000

Dessus

Ant. extérieure

Ecouteur

**Vue en dessous**

Connexions à établir bons contacts indispensables

**SCHEMA DE PRINCIPE**

Antenne position sélective

Détecteur

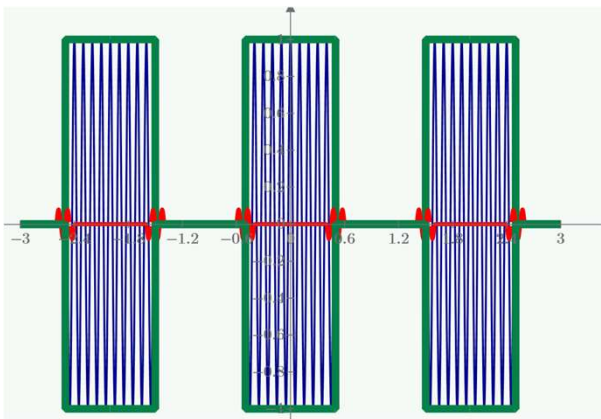
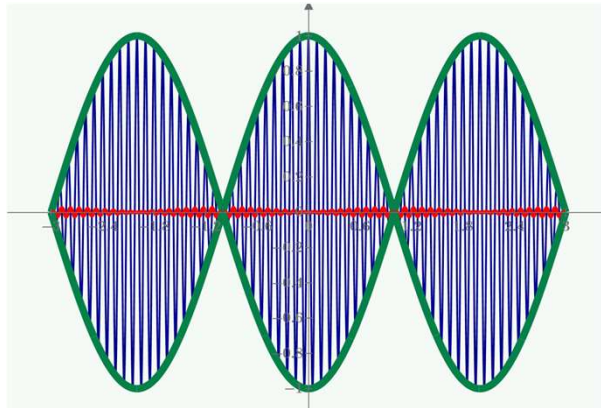
Ecouteur

Antenne directe

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

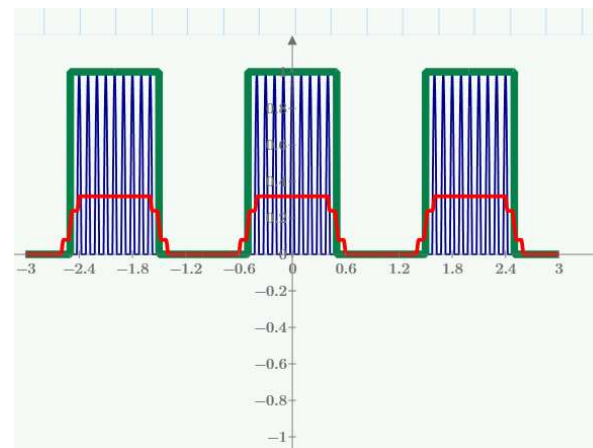
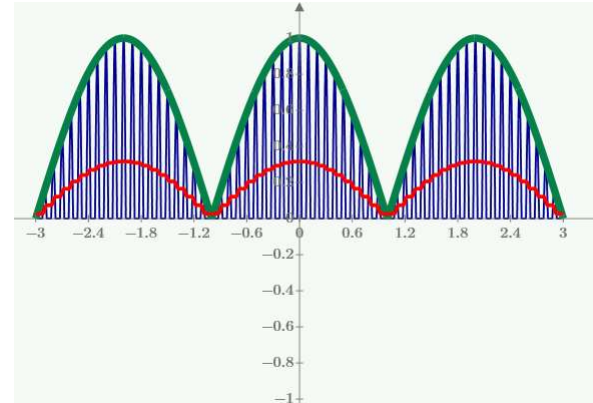
# Redresseur radio: exemple d'utilisation d'une diode

Sans redresseur



La moyenne est nulle

Avec redresseur



La moyenne correspond à l'enveloppe

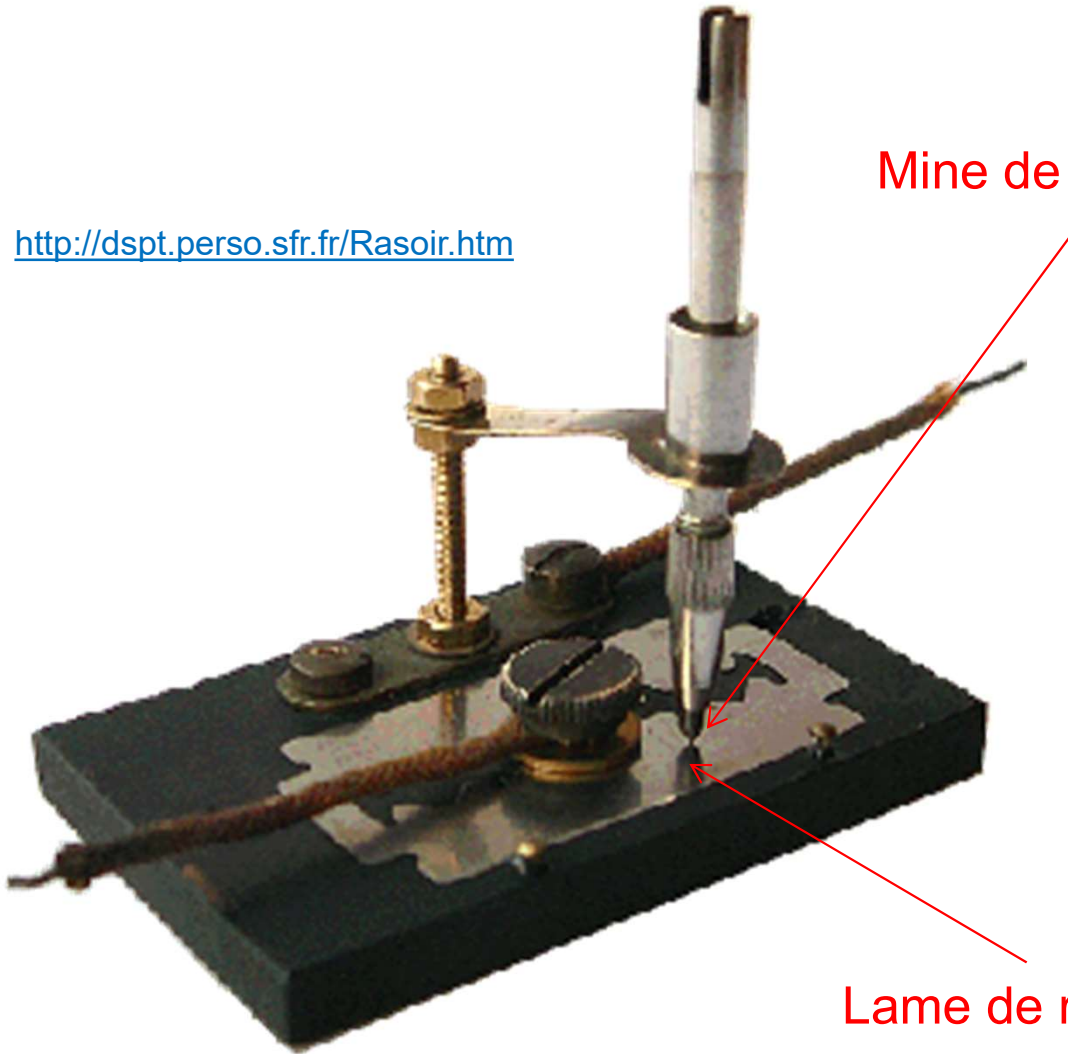
Ouïe humaine 20 Hz-20 KHz

- Porteuse  
 $\approx 100MHz$
- Signal  
(Enveloppe)
- Moyenne

<http://dspt.perso.sfr.fr/Rasoir.htm>

Mine de carbone

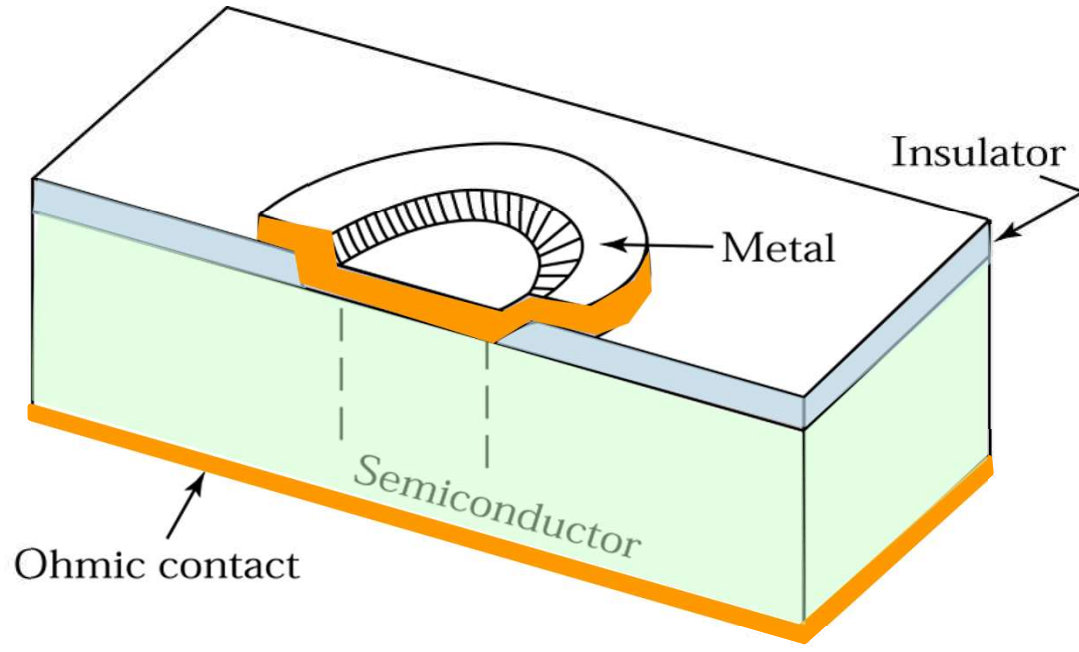
Lame de rasoir sans coating



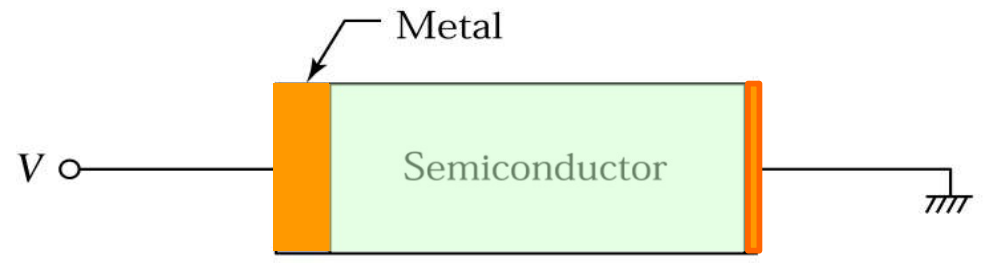
Foxhole radio 1944



# Jonction métal / semi-conducteur: technologie



(a)



(b)

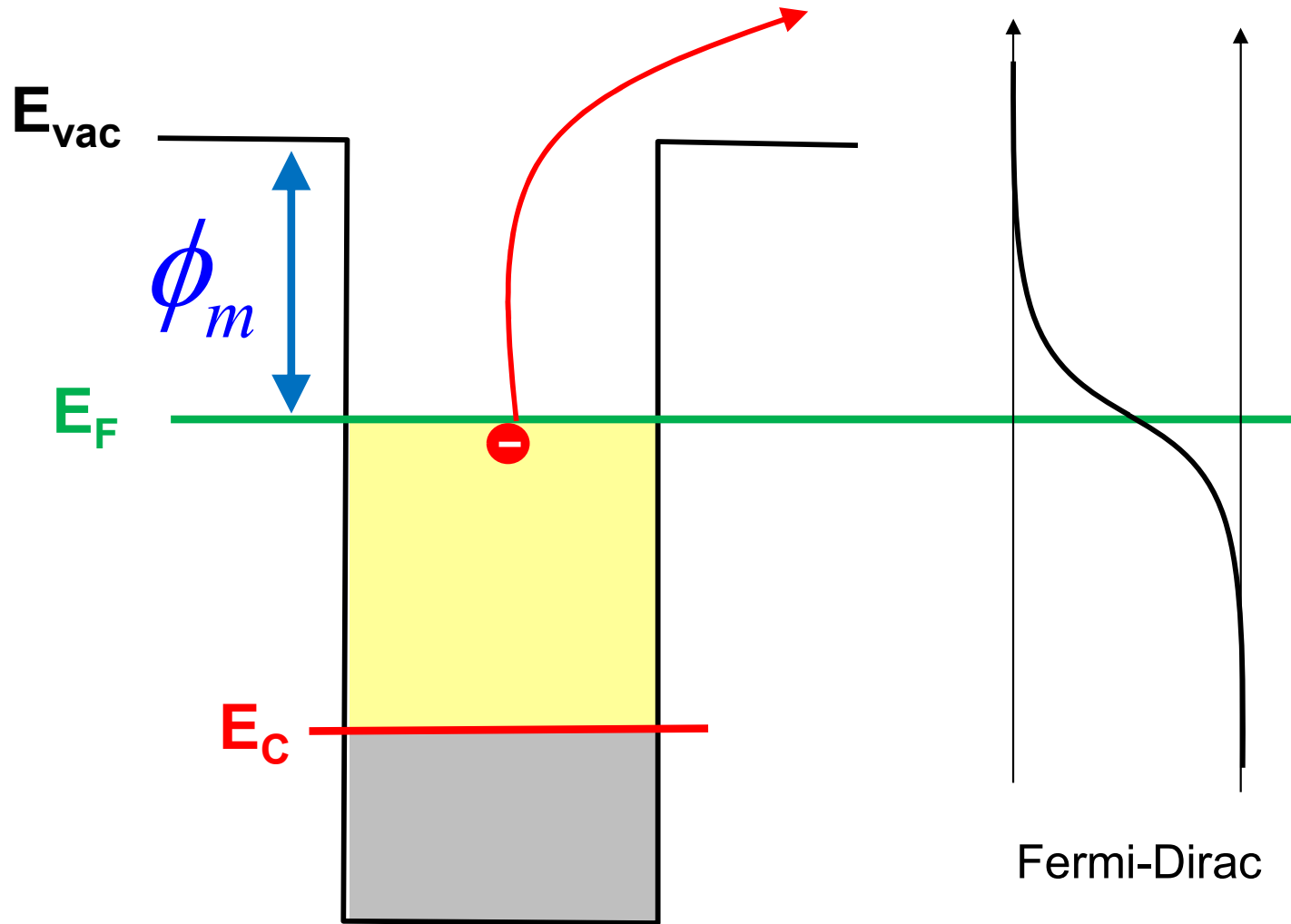
S. Sze « *Semiconductor devices* »

Thermoemission

et

équilibre thermodynamique

# Thermo-émission depuis le métal



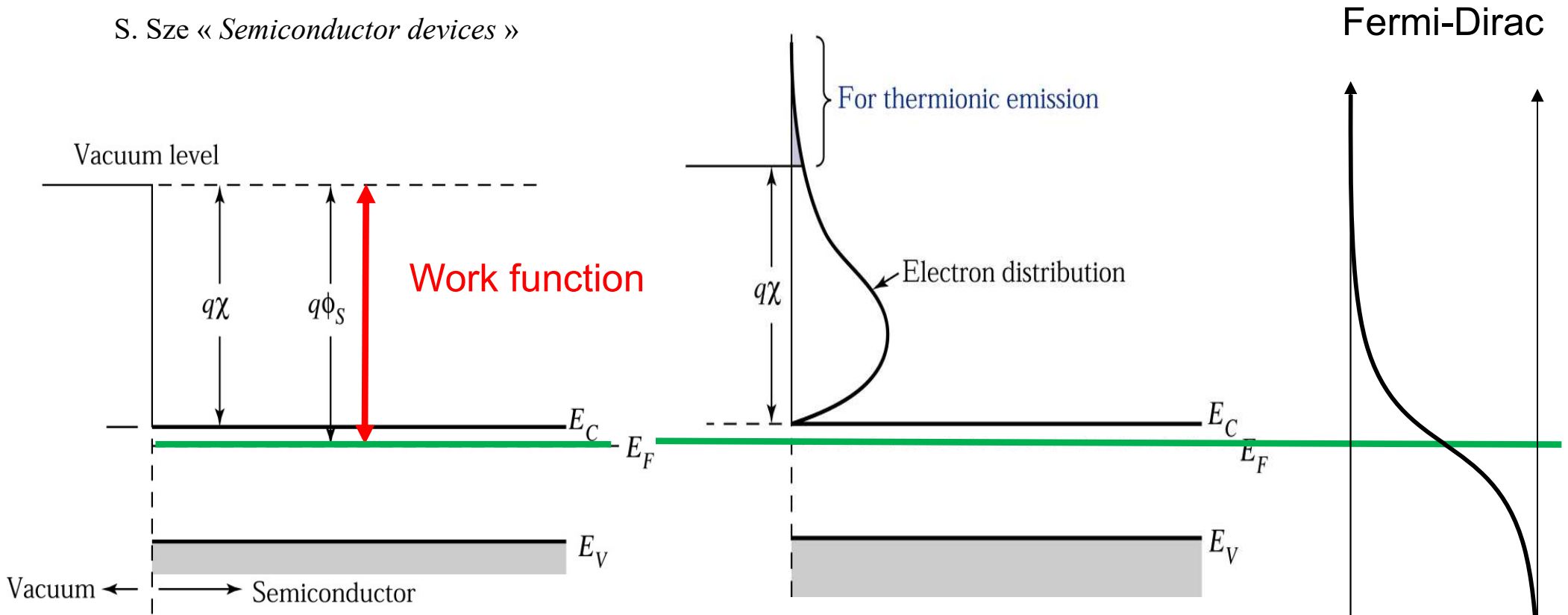
Dépend du choix du métal

Work-function  $\phi_m$

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

# Thermo-émission depuis le semi-conducteur

S. Sze « Semiconductor devices »



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

**Work-function**  $\phi_S = \chi + \frac{(E_C - E_F)}{q}$

Dépend du semi-conducteur  
**et aussi du dopage !!**



Densité du courant d'émission:

*Popovic, base de cours EPFL*

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

...

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

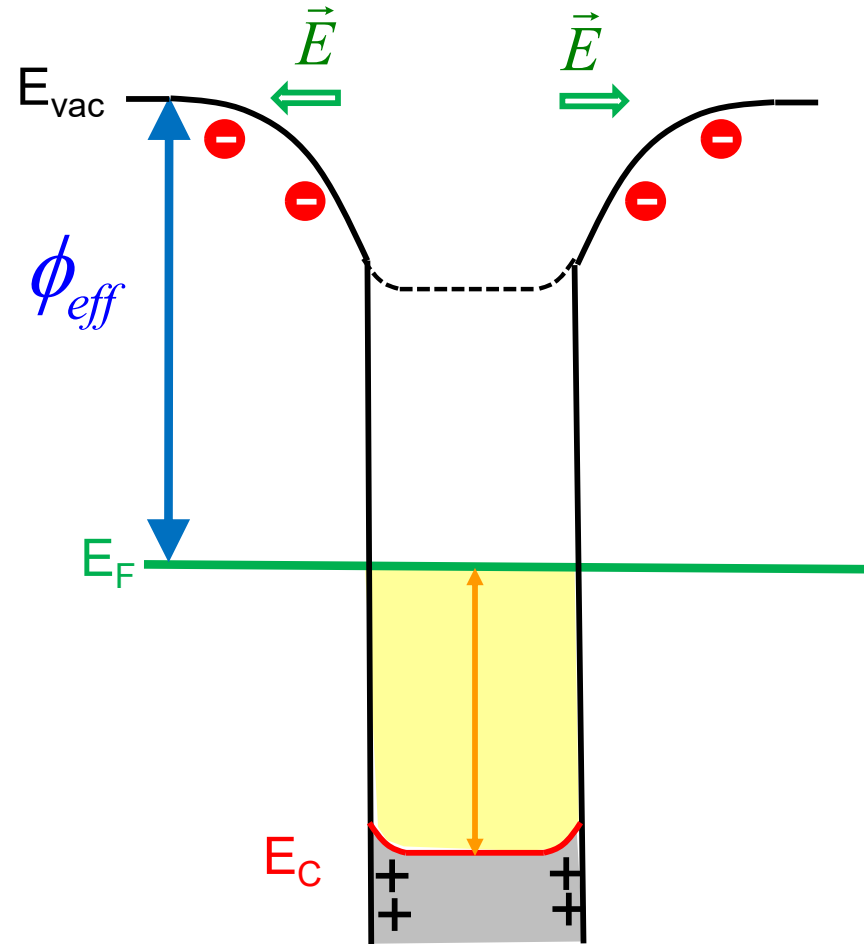
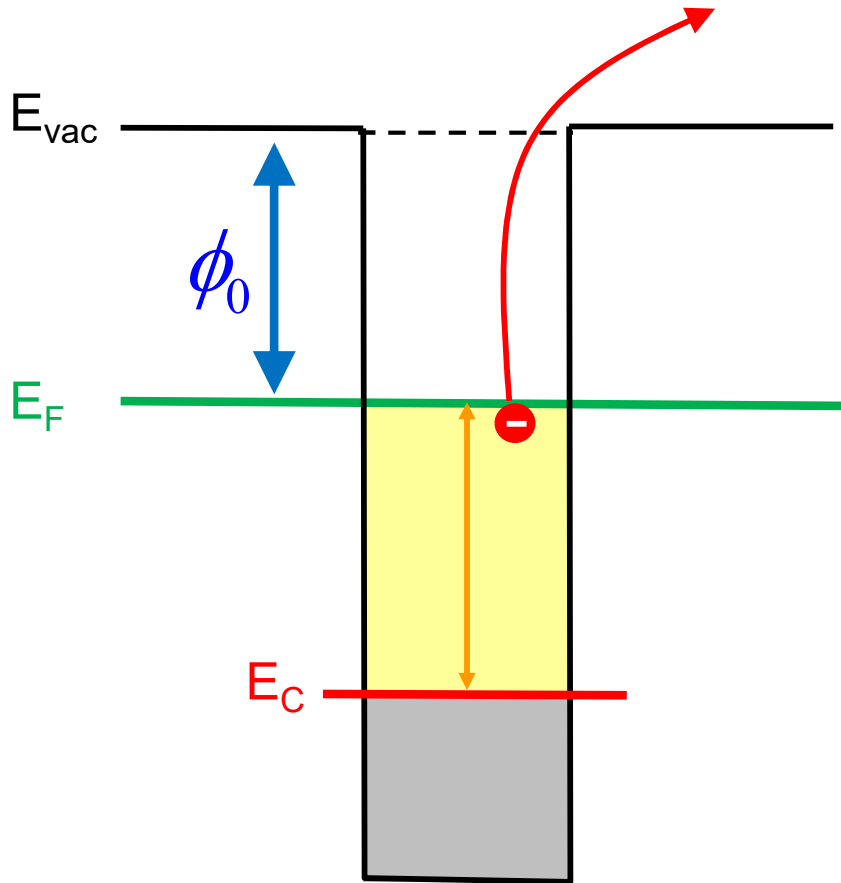
$$A_0 = \frac{q \cdot m \cdot k^2}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cong 120 \frac{A}{cm^2 \cdot K^2}$$



Constante de Richardson

O.W. Richardson, Prix Nobel de physique 1928

# Q: pourquoi tous les électrons ne sortent-ils pas ?

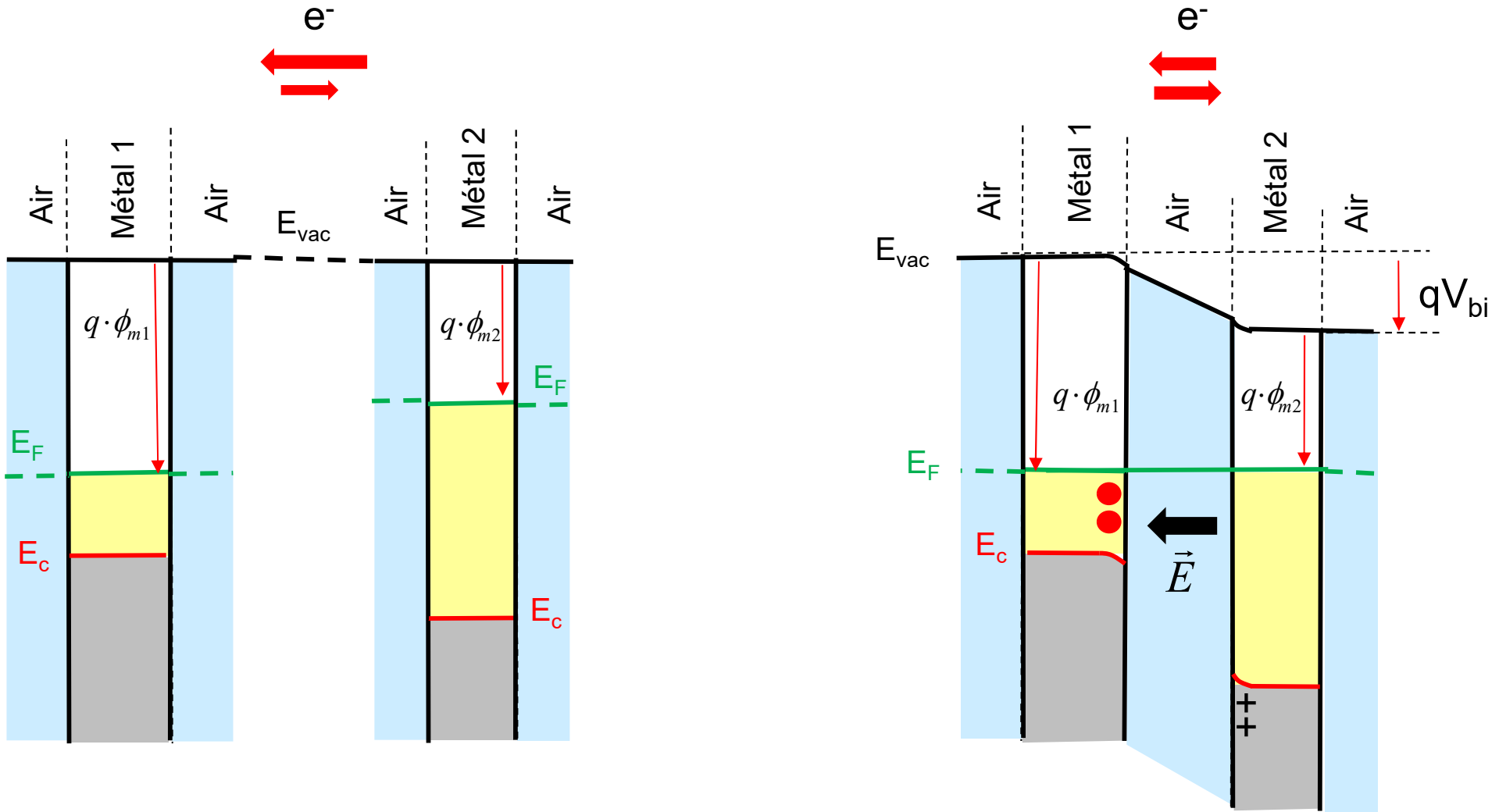


Equilibre thermodynamique → work function effective  $\phi_{eff} > \phi_0$

# Contact

## Métal - Métal

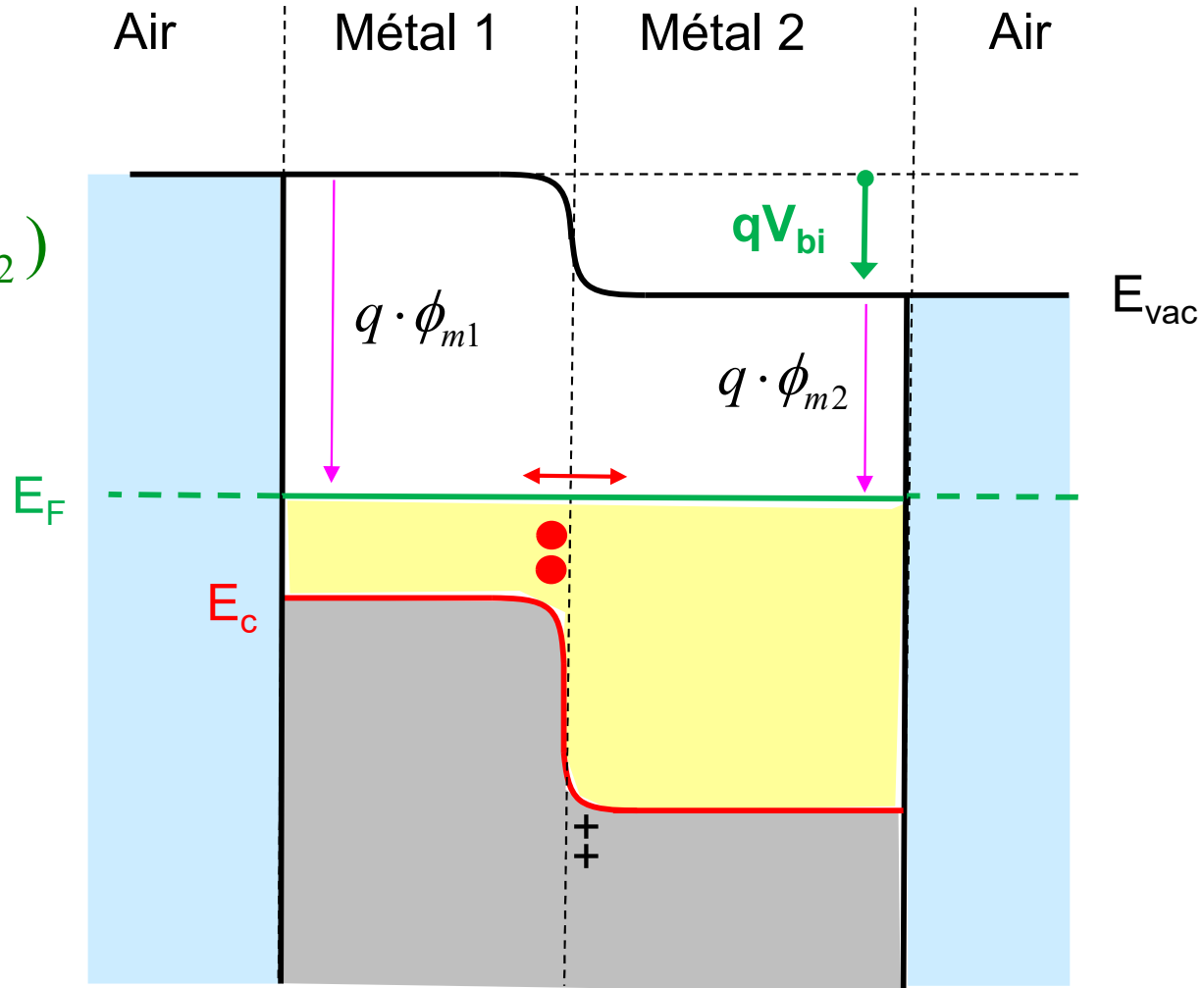
# Équilibre thermodynamique entre deux puits d'énergie



**Echange d'électrons par thermo-émission**

# Jonctions entre deux métaux

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

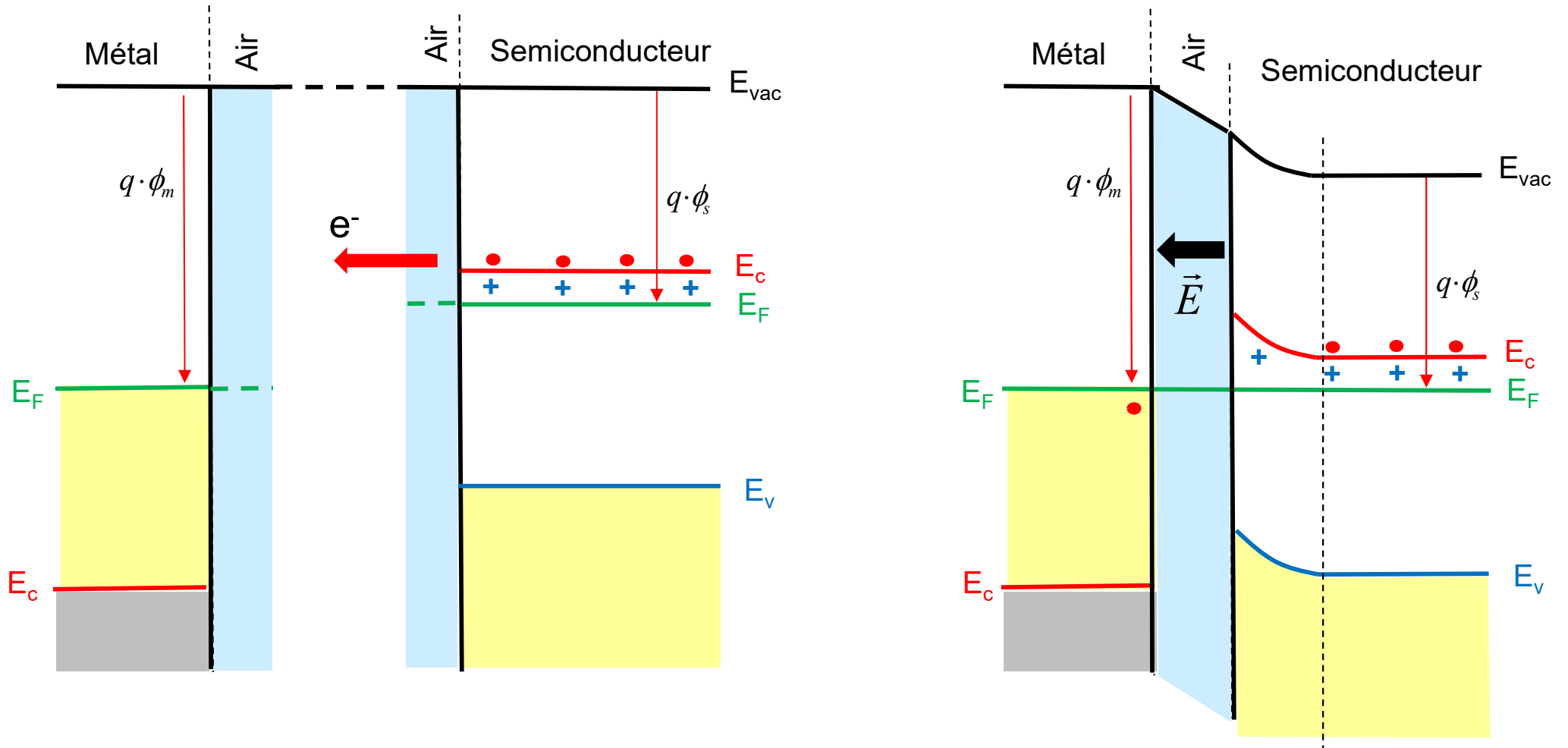


**Courant possible, pas d'effet «diode»**

# Contact

## Métal – Semiconducteur (MS-diode)

# Équilibre thermodynamique entre un metal et un semiconducteur



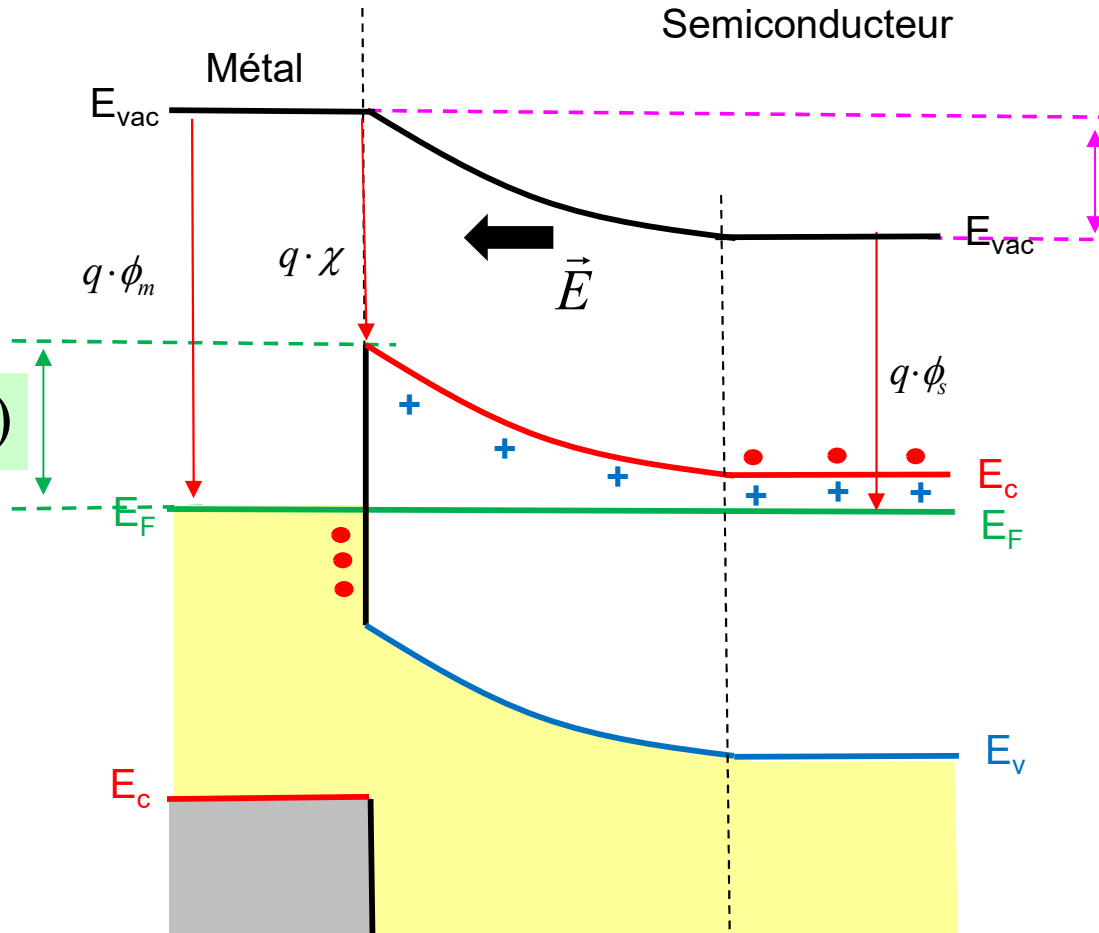
## Echange d'électrons par thermo-émission

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

Barrière  
de potentiel:

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

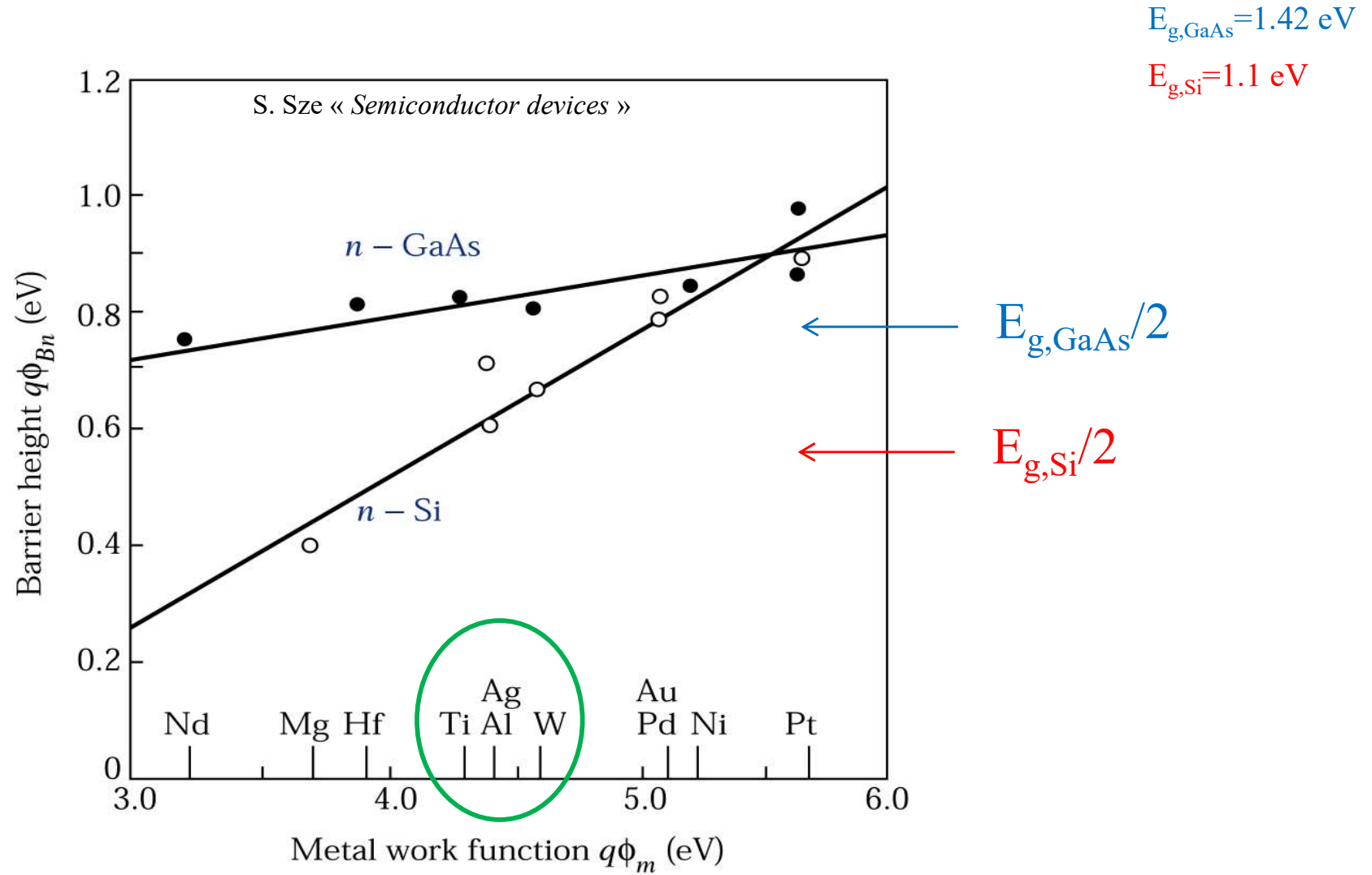
(Optimal =  $E_g/2$ )



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

Potentiel  
de built-in:

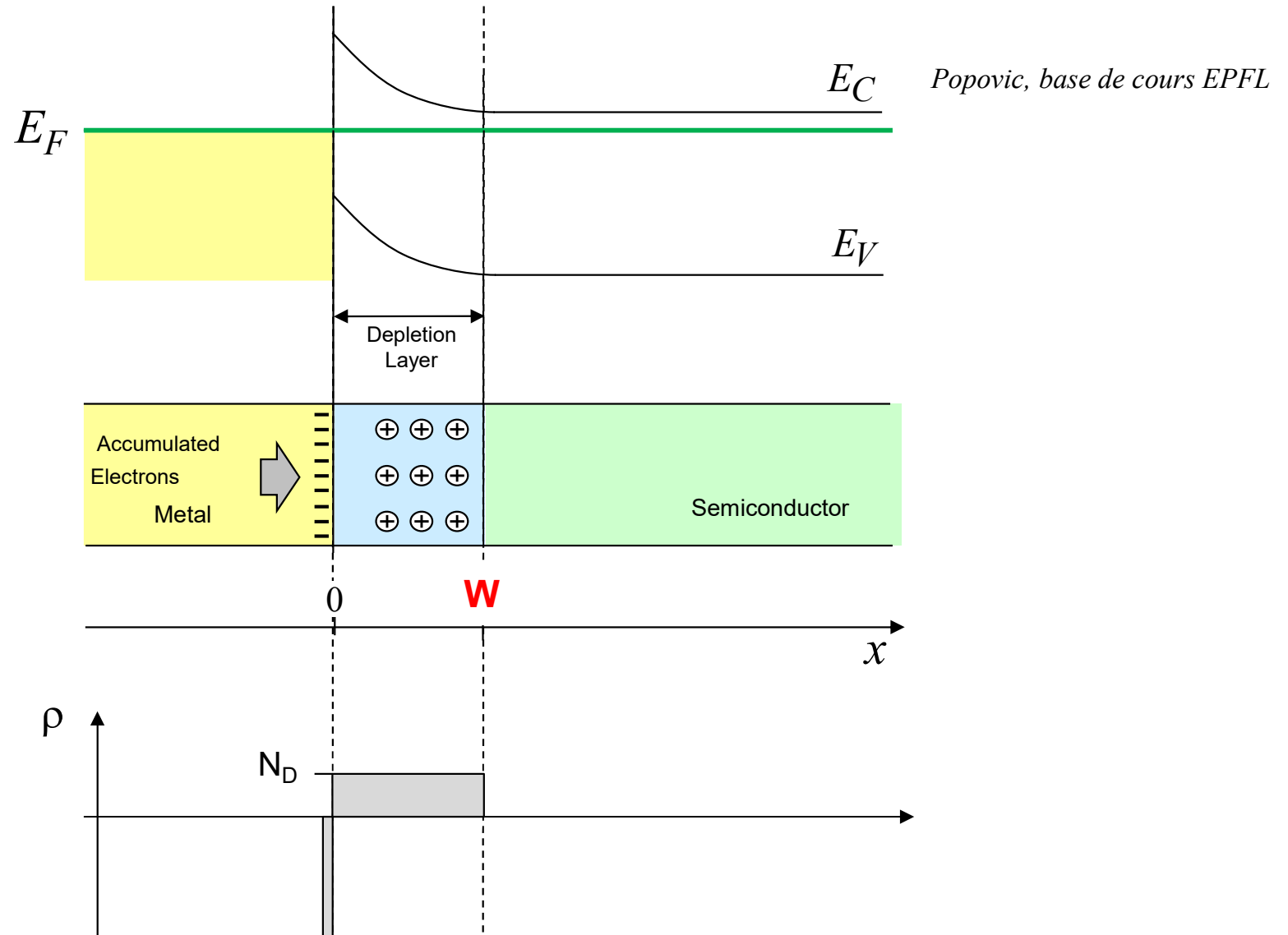
**Barrière d'énergie, → effet «diode»**



Calcul des bandes

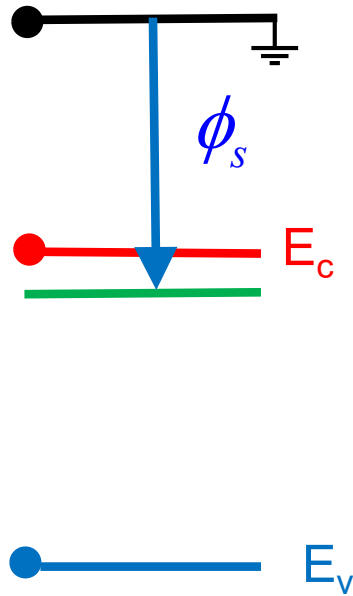
Approximation par  
déplétion totale

# Approximation “Déplétion totale”

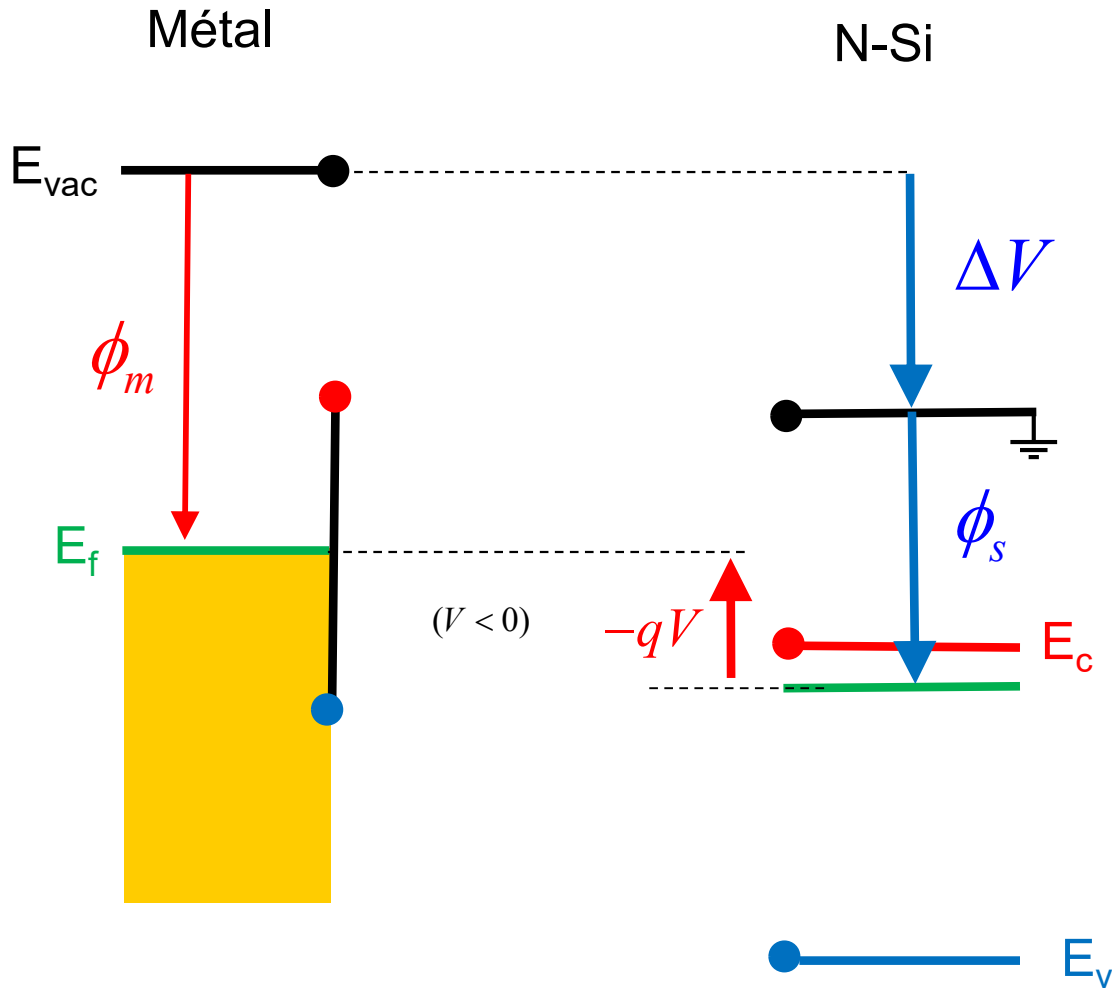


# Construction du schéma de bande hors équilibre

N-Si



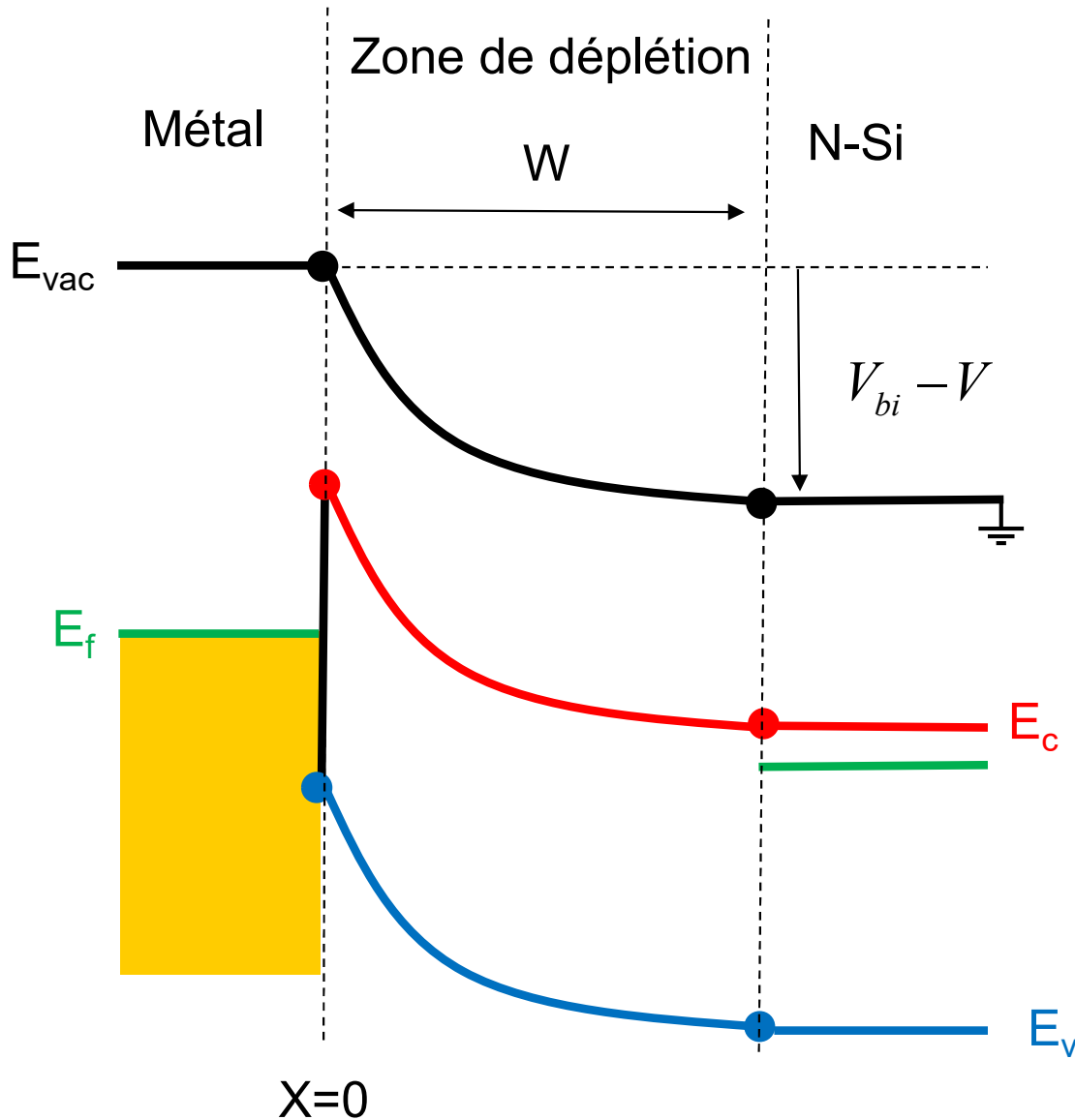
# Construction du schéma de bande: hors équilibre



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

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

# Construction du schéma de bande hors équilibre



## Champ électrique:

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

## Tension interne:

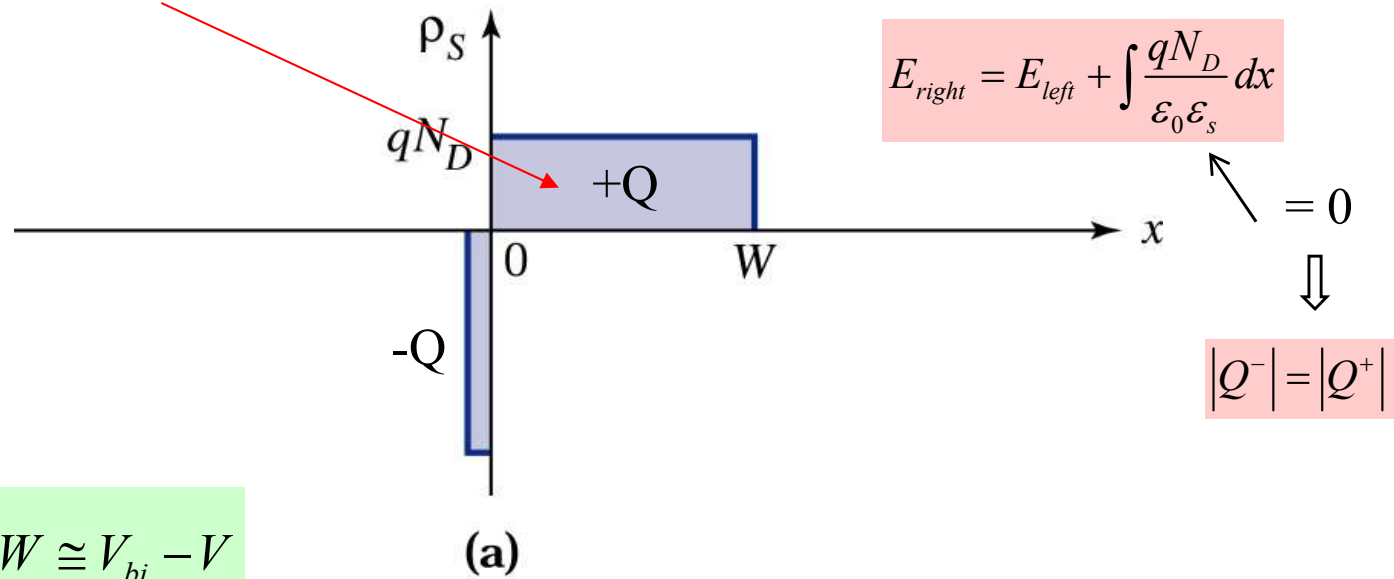
$$V_{bi} - V \approx \int_0^W E \cdot dx \approx \frac{1}{2} N_D \cdot W^2$$

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

# Charges et champ électrique à l'interface

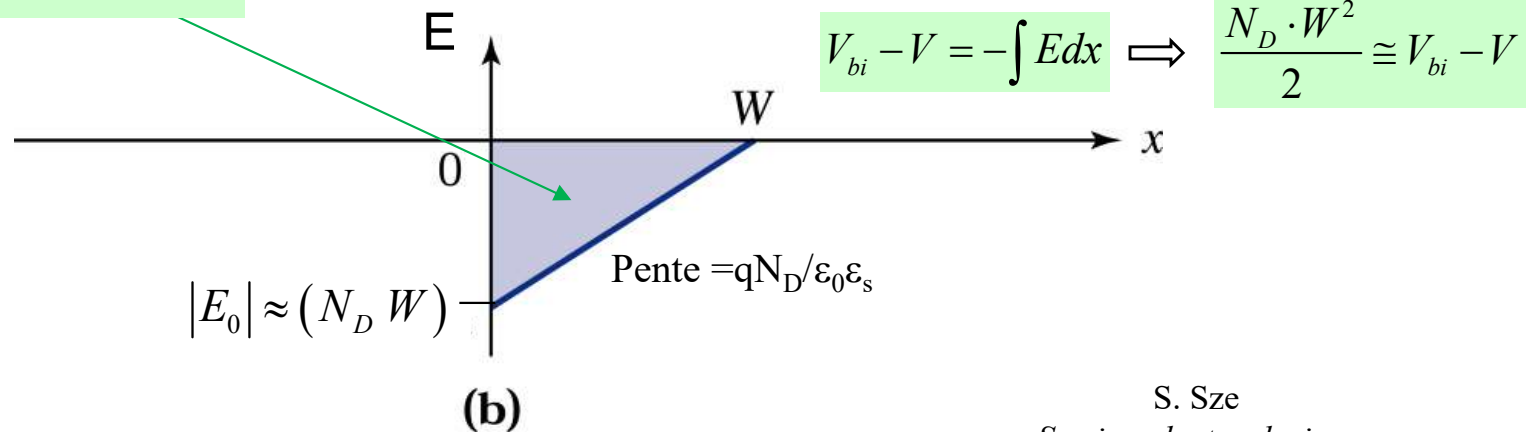
Surface  $\cong N_D \cdot W \cong E_0$

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

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

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

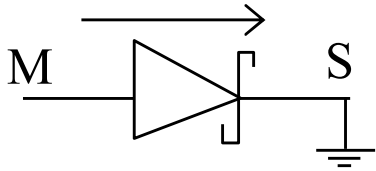
Largeur de la zone de déplétion:

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

Capacité de la jonction:

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

Équilibre



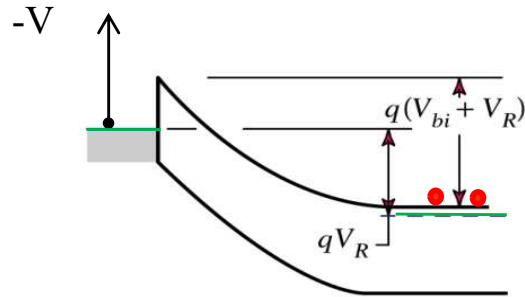
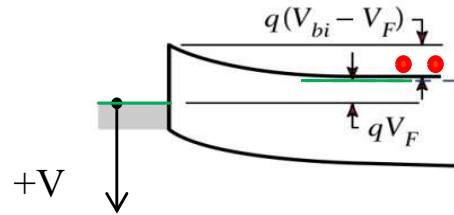
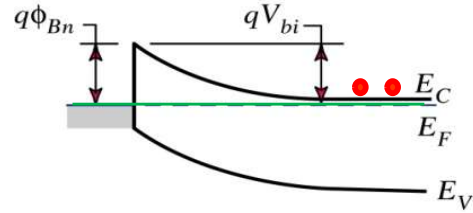
Forward



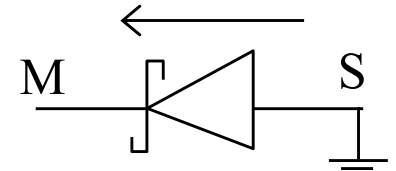
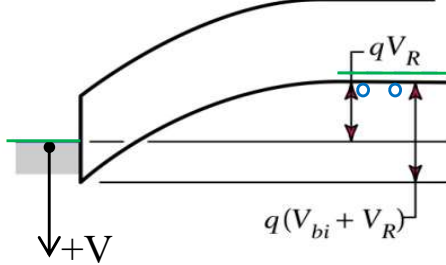
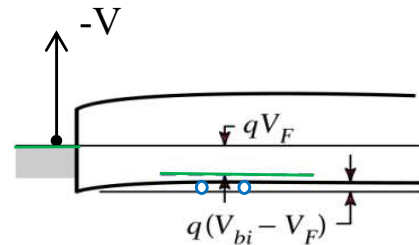
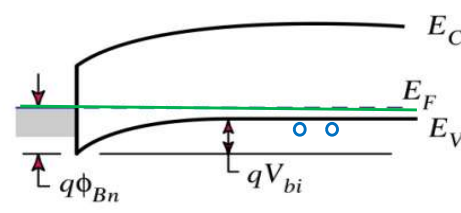
Backward



N-semicond.



P-semicond.

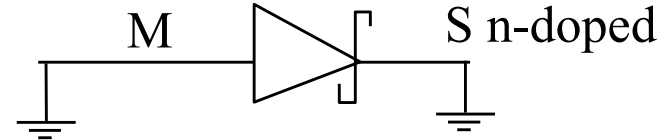
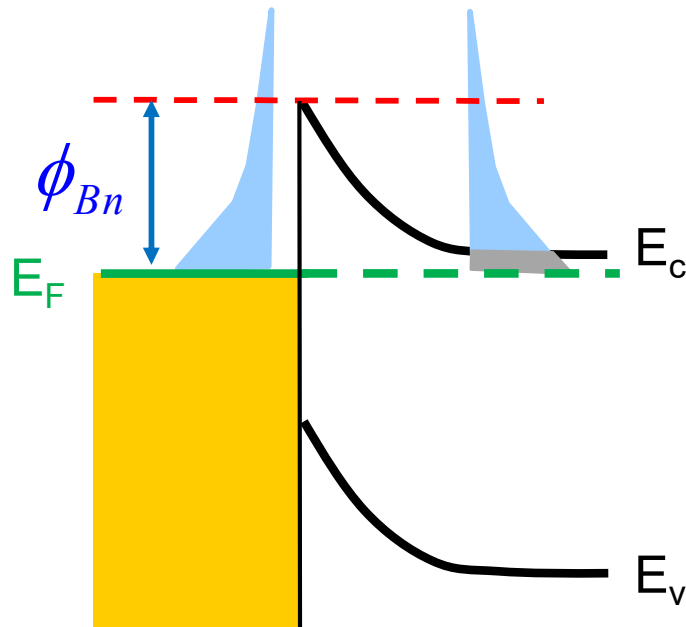


S. Sze  
« Semiconductor devices »

# Calcul des Courants dans une diode MS

## Thermo-émission

Équilibre



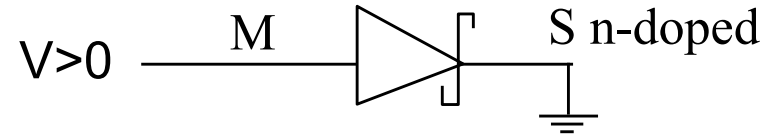
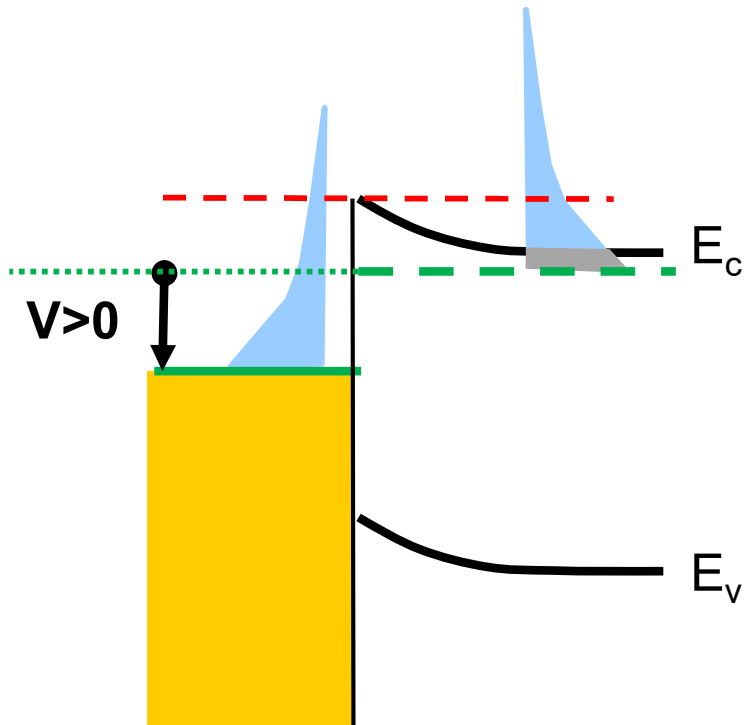
$$J_S \equiv |J_{M \rightarrow S}| = A_0 \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_{Bn}}{kT}}$$

Barrière de potentiel:

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

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

Passante

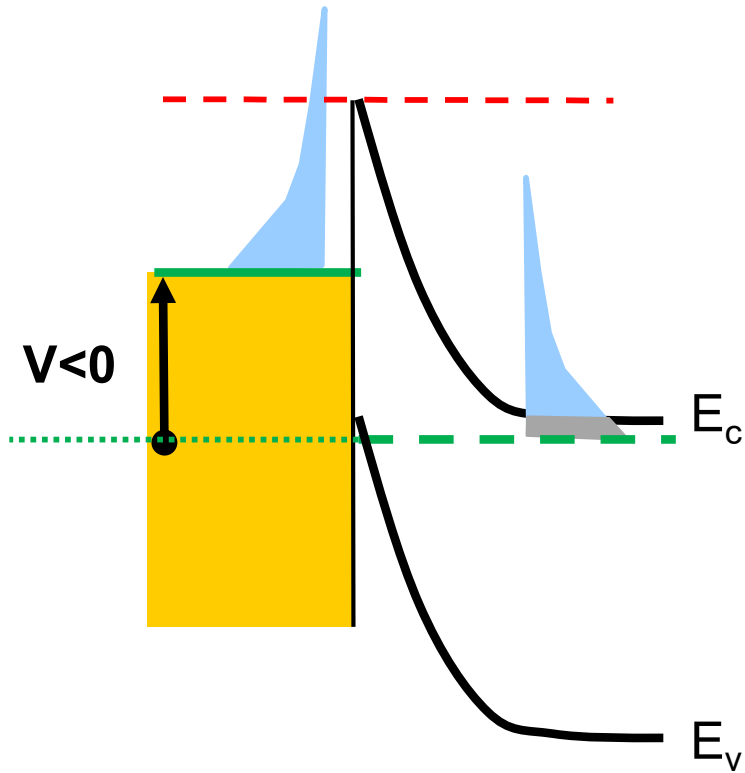


$$J_{M \rightarrow S} = \text{const} = -J_S$$

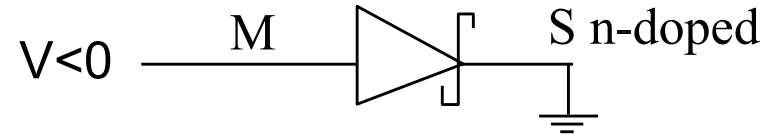
$$J_{S \rightarrow M} = J_S \cdot e^{\frac{qV}{kT}}$$

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

V > 0



Bloquante



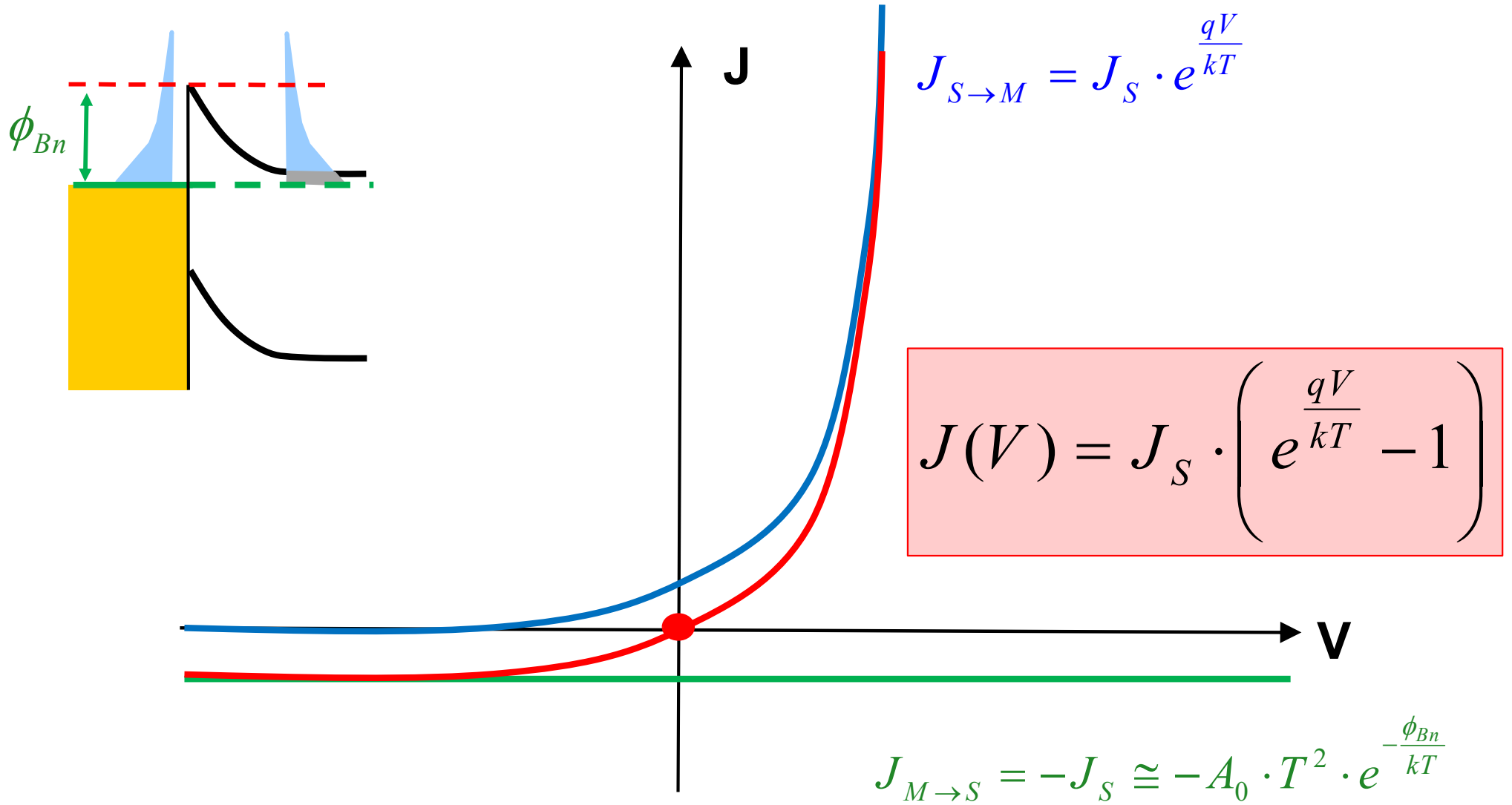
$$J_{M \rightarrow S} = \text{const} = -J_S$$

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

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

V < 0

# Courants idéaux: diode MS



# Retour à l'équilibre et Schéma petits signaux

Thermalisation

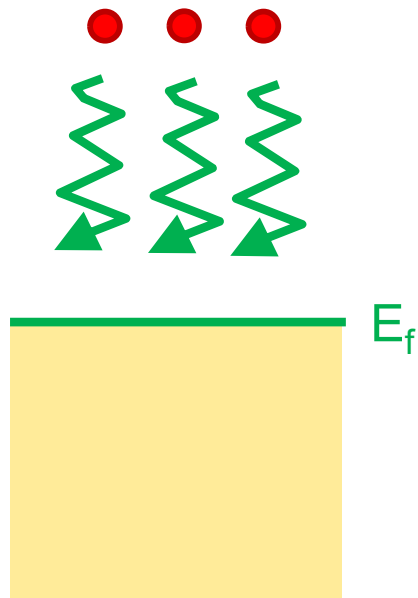


Recombinaison  
(temps de vie  
des minoritaires)

# Retour à l'équilibre: Thermalisation et/ou recombinaison

## Métal

Injection de porteurs

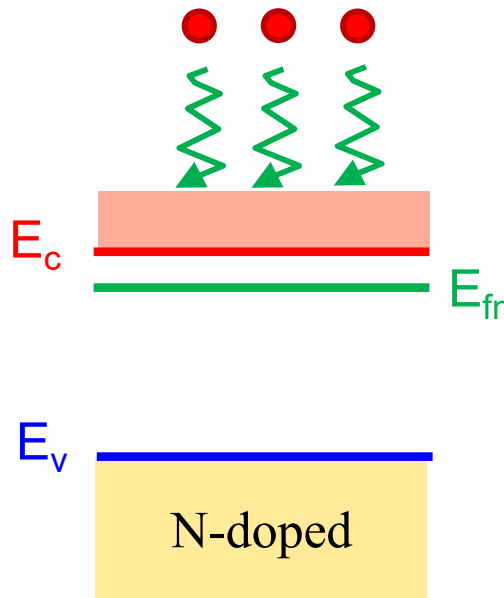


- Temps de thermalisation
- Retour à l'équilibre

➔ Processus rapide

## Semiconducteurs

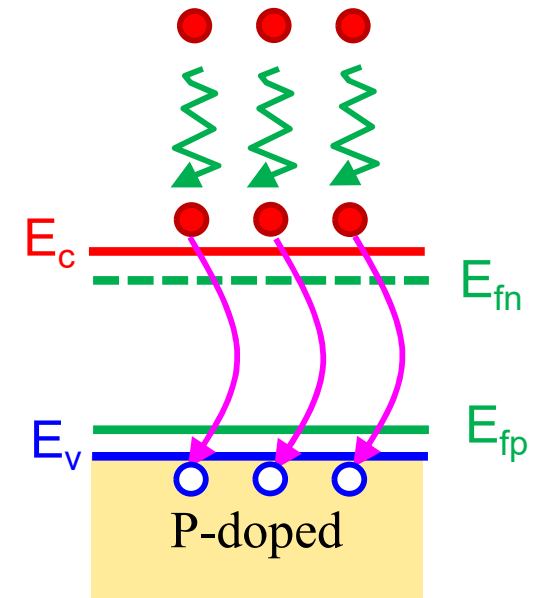
Injection de majoritaires



- Temps de thermalisation
- Retour à l'équilibre

➔ Processus rapide

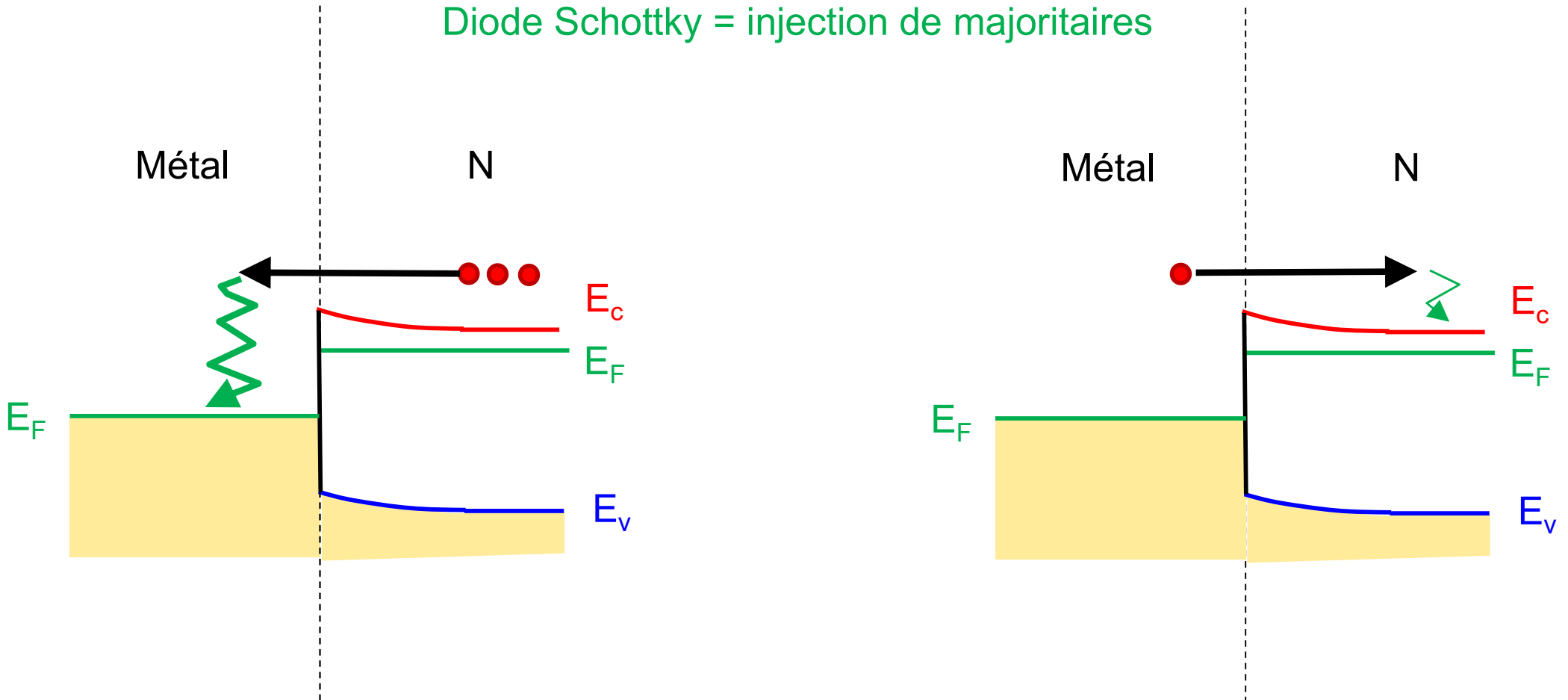
Injection de minoritaires



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

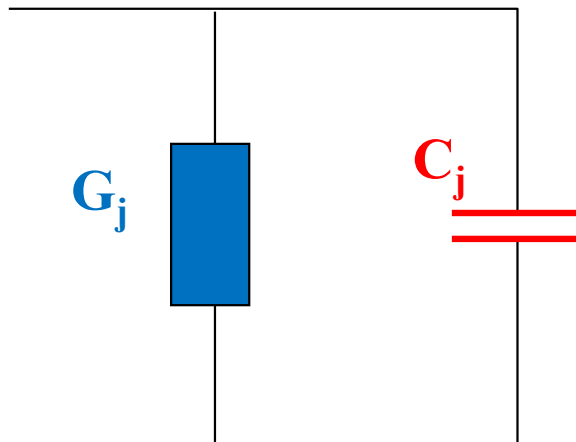
➔ **Processus lent**

Diode Schottky = injection de majoritaires



La thermalisation est quasi «instantanée» (env. ps)

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

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

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

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

Courants parasites

et

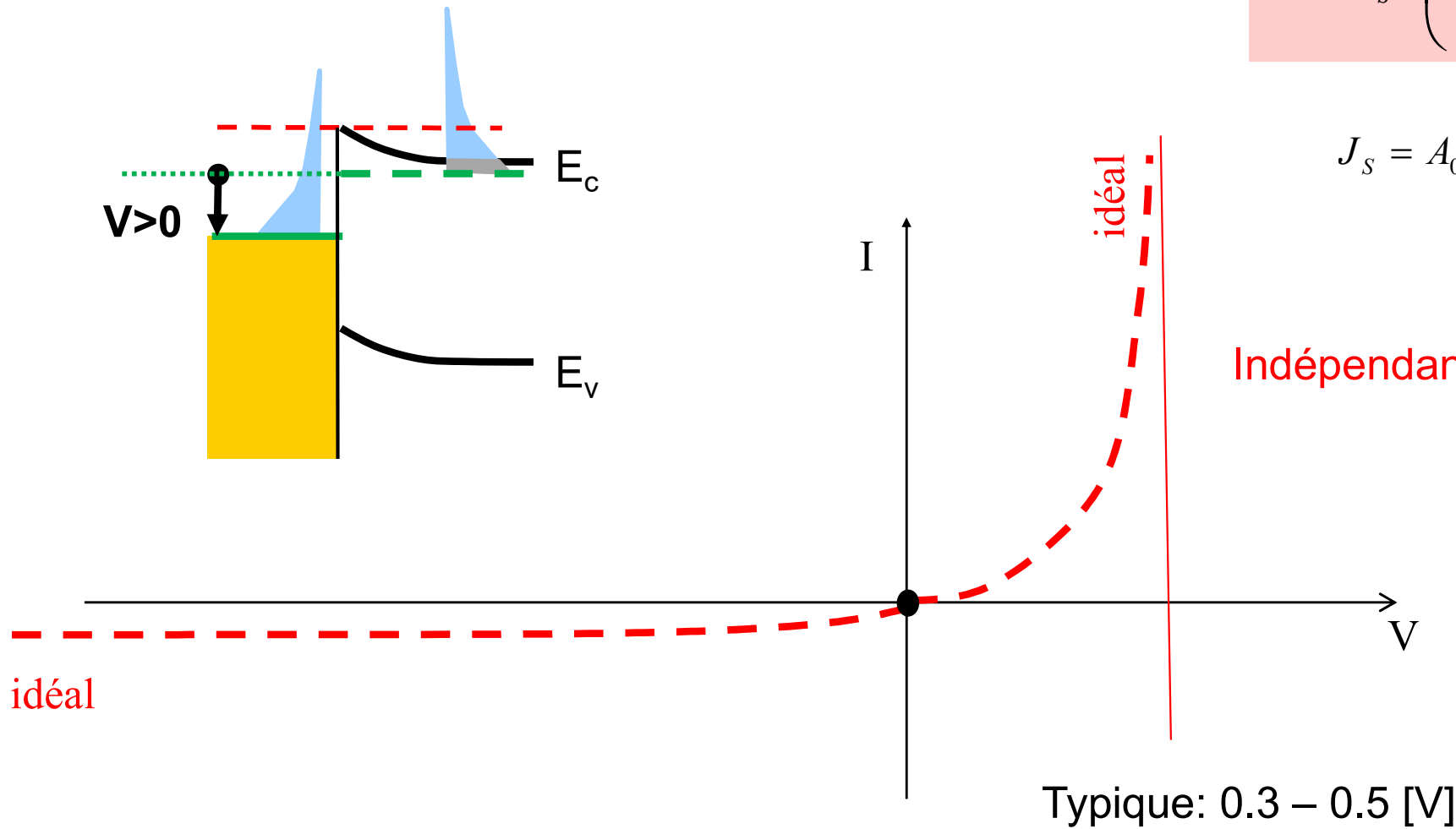
contacts ohmiques

# 1) Courant idéal: thermo-émission

## Thermo-émission

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

$$J_s = A_0 \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_{Bn}}{kT}}$$



Indépendant du dopage

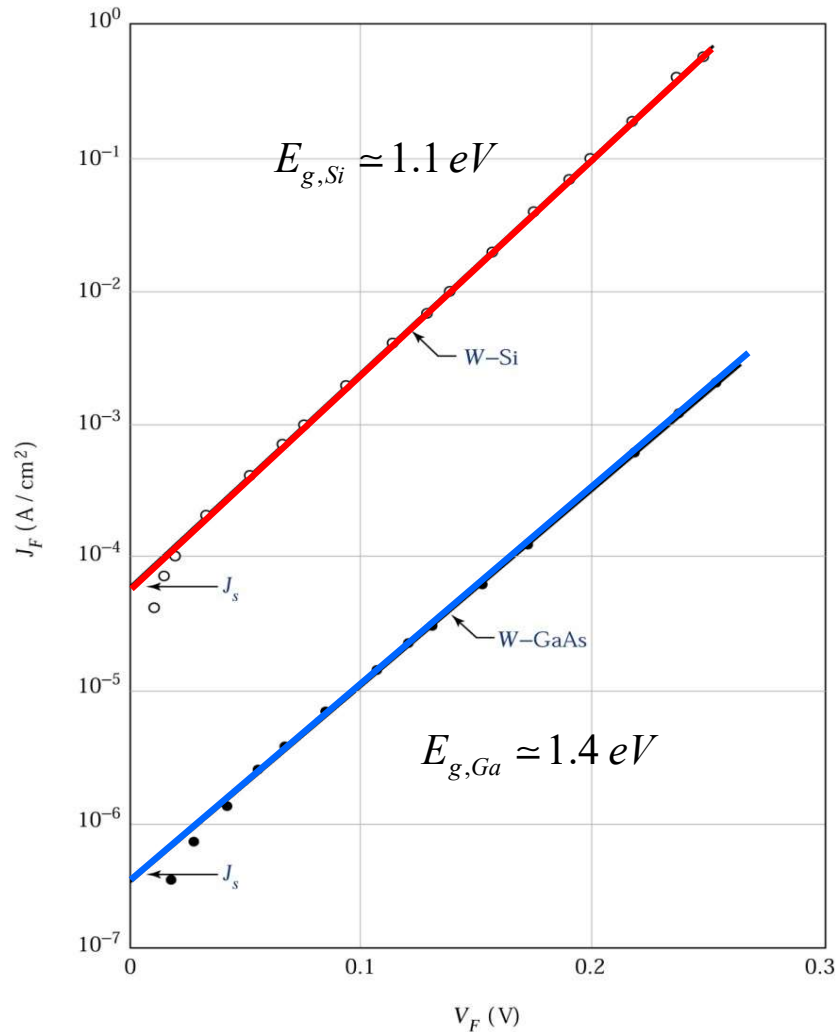
Typique: 0.3 – 0.5 [V]

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

# Courant ideal: Augmentation du gap $E_g$

Jonction: Wolfram – silicium

Jonction: Wolfram – GaAs

$$E_g = 1.1 [eV]$$

$$E_g = 1.4 [eV]$$

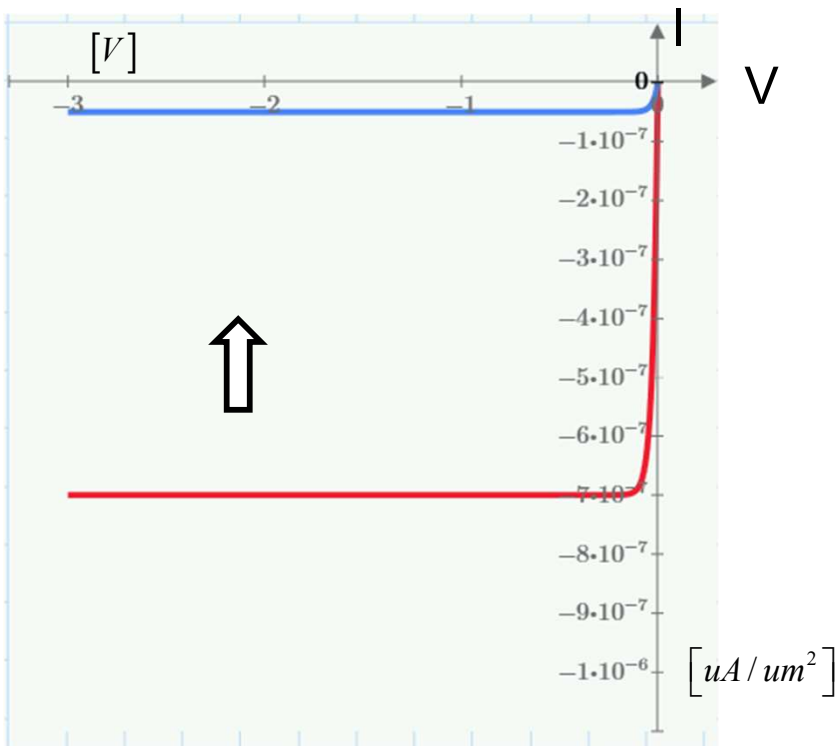
$$J_s = 7 \cdot 10^{-7} [uA/um^2]$$

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

T=300K

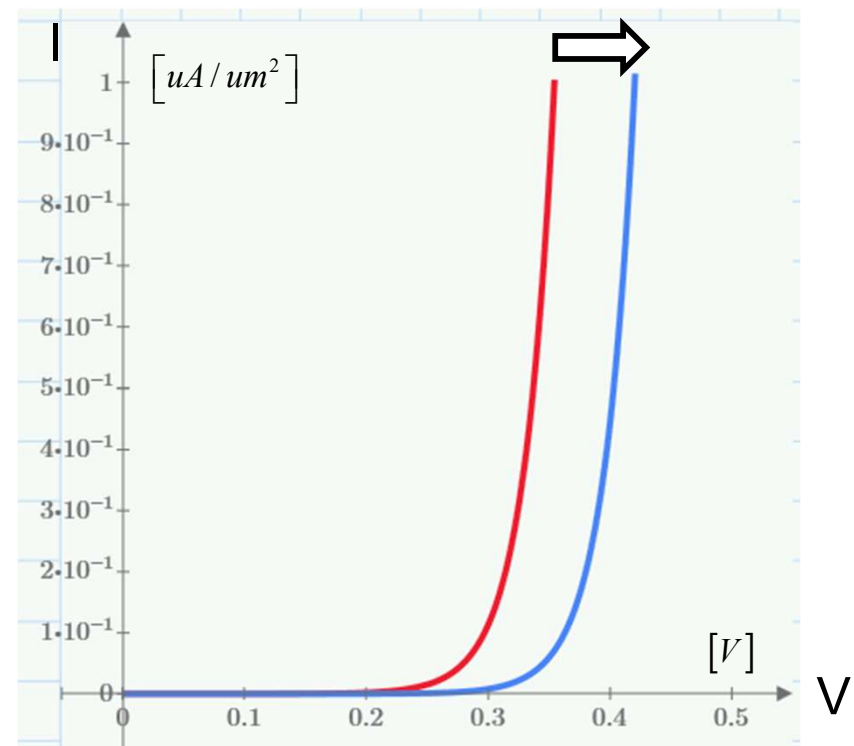
Courant reverse

Diminution du courant noir  $I_s$

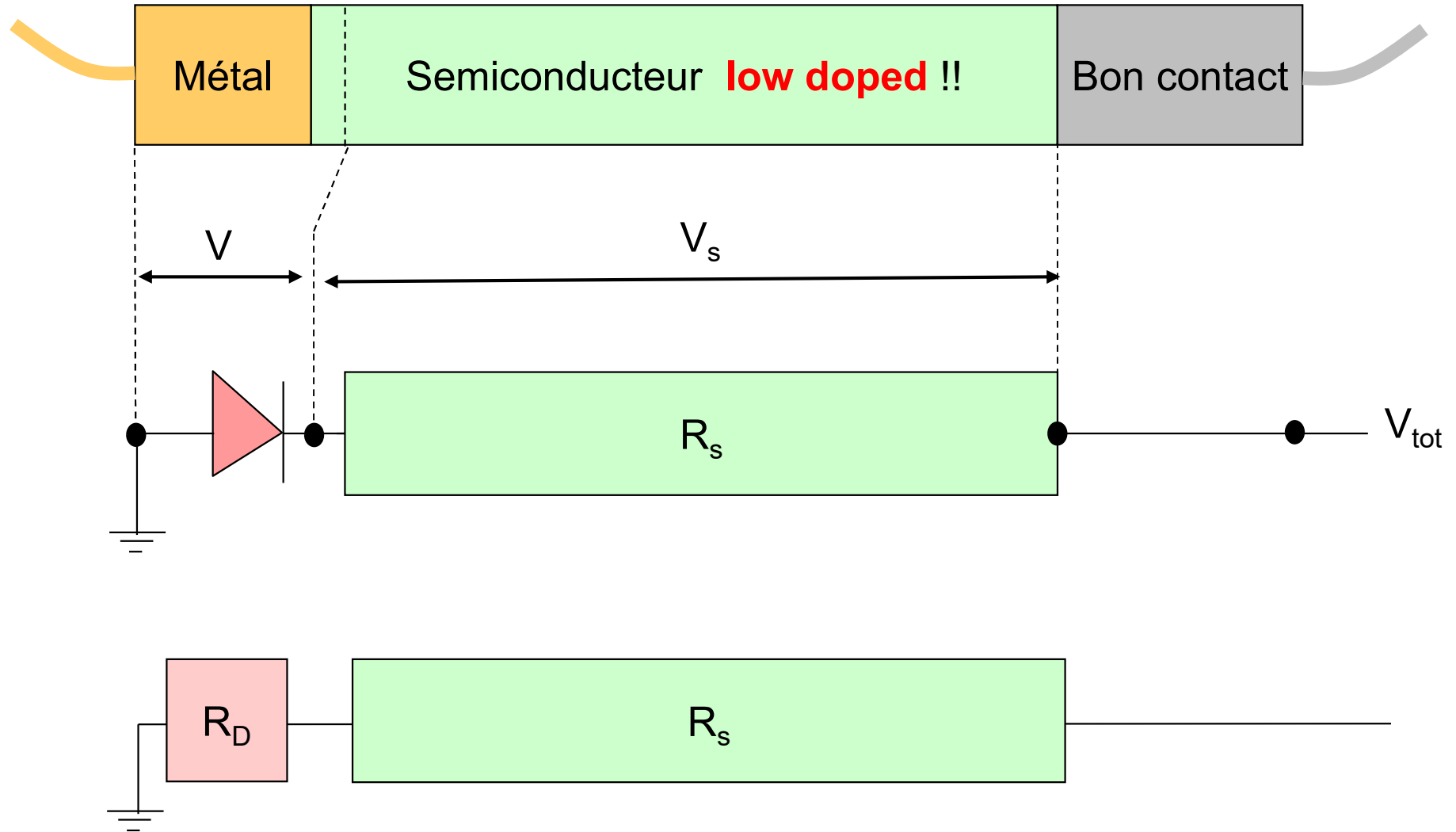


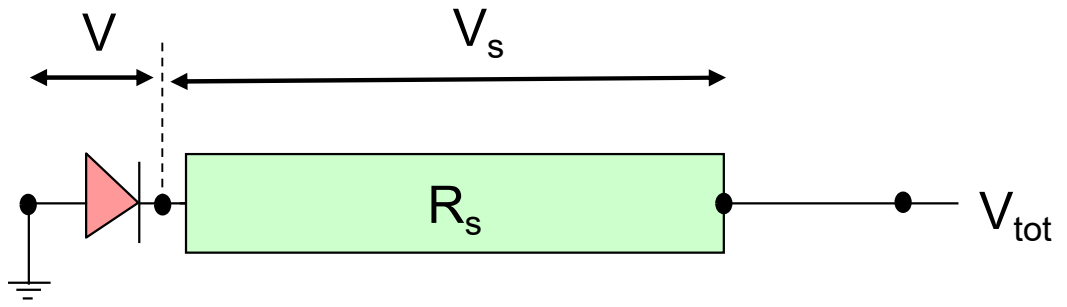
Courant forward

Augmentation de la tension de seuil



## 2) Résistance en série

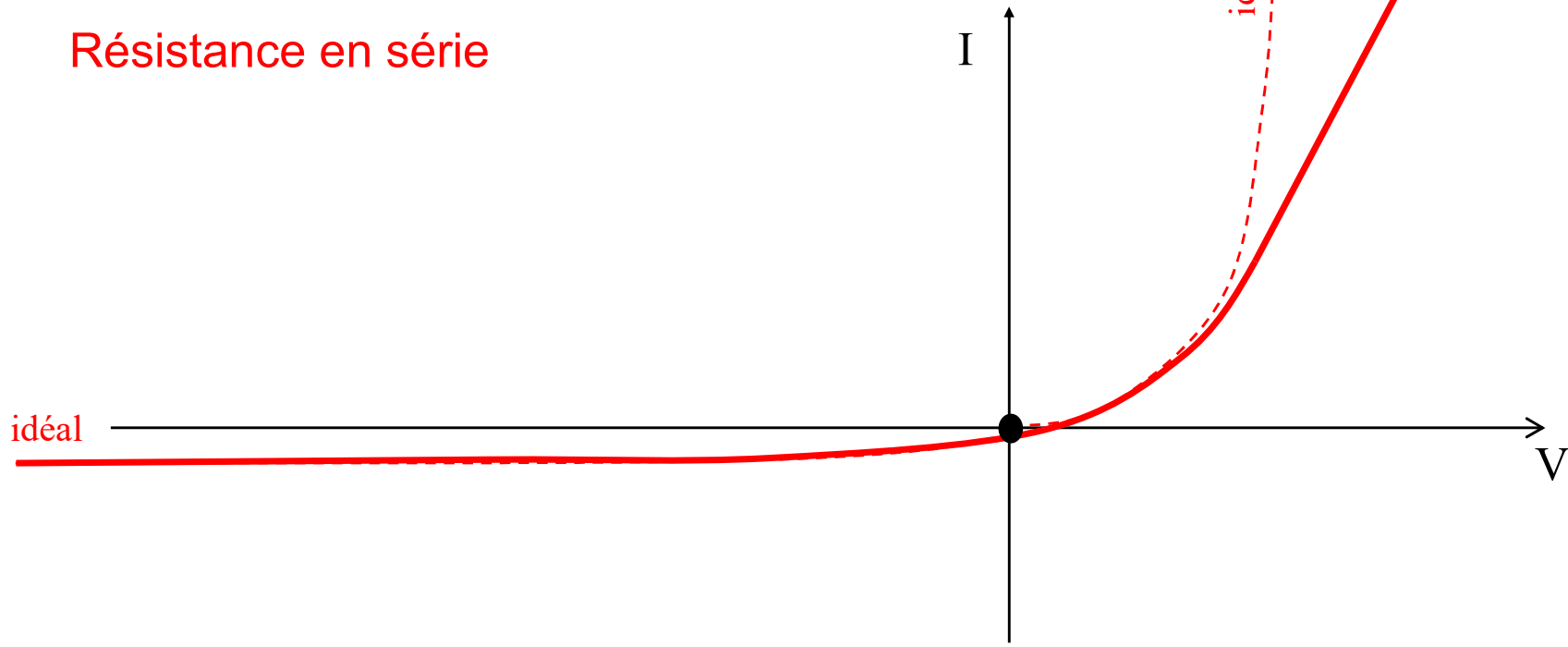




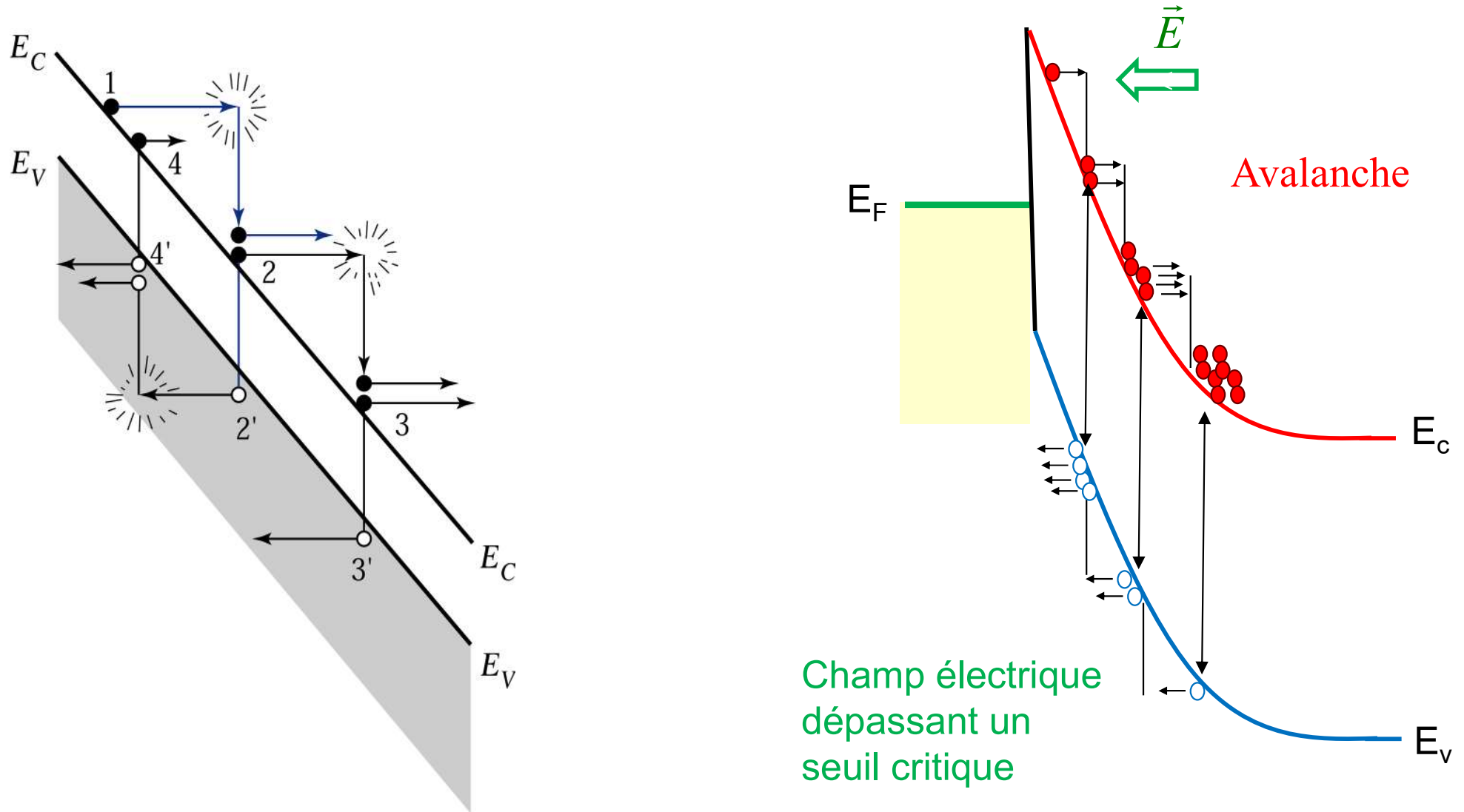
Résistance en série

Pente  $1/R_s$

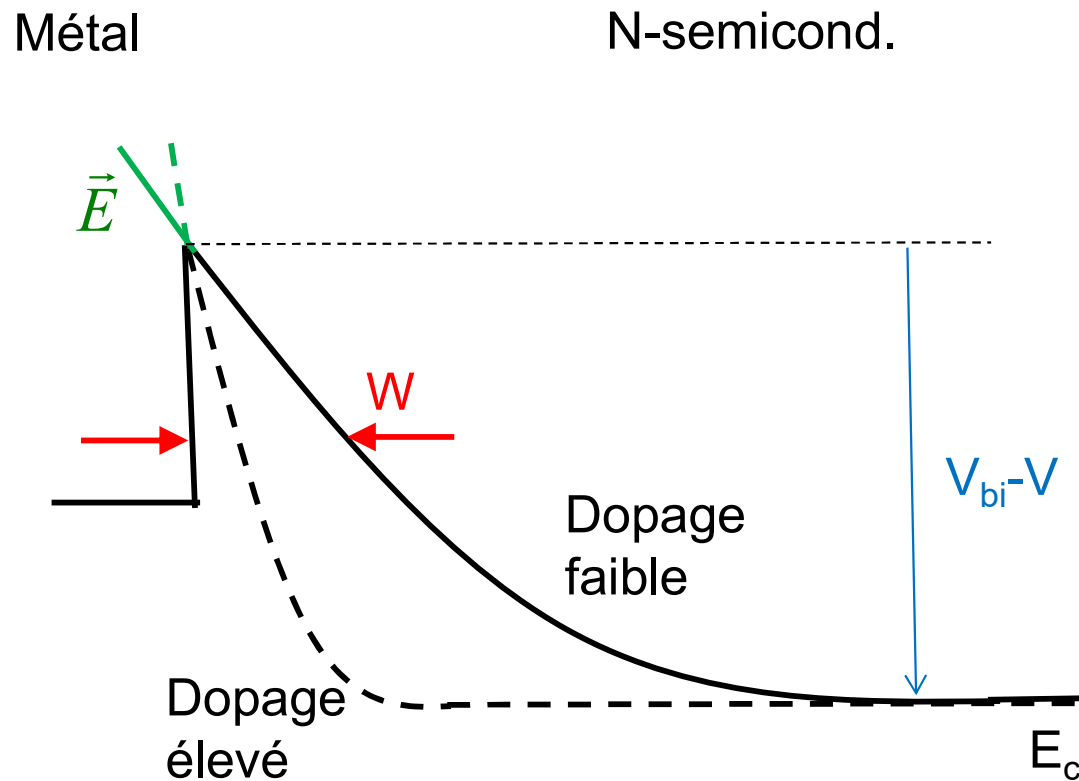
$N^-$



### 3) Effet avalanche



# Effet avalanche: dépendance du dopage.

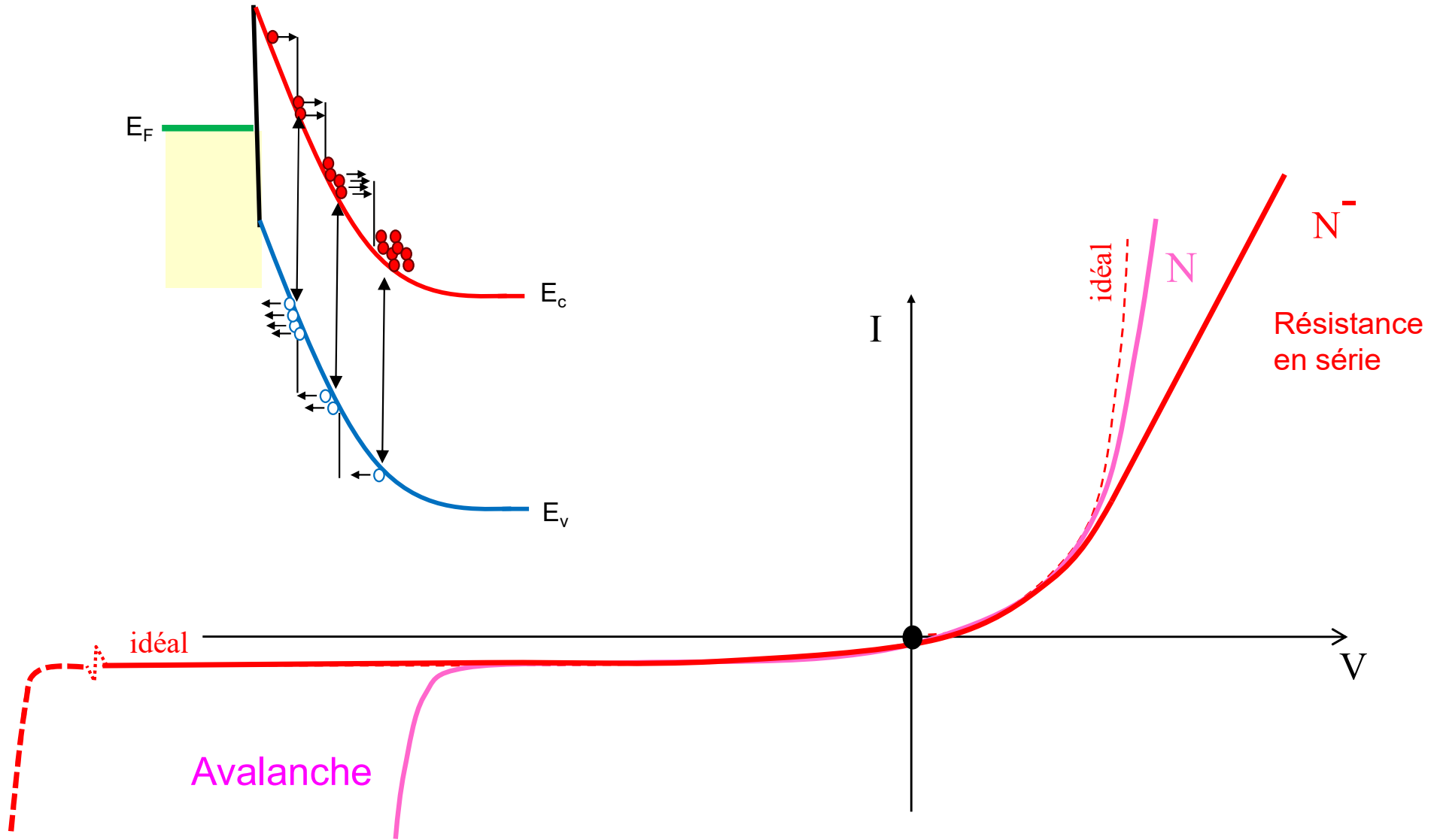


## Augmentation du dopage →

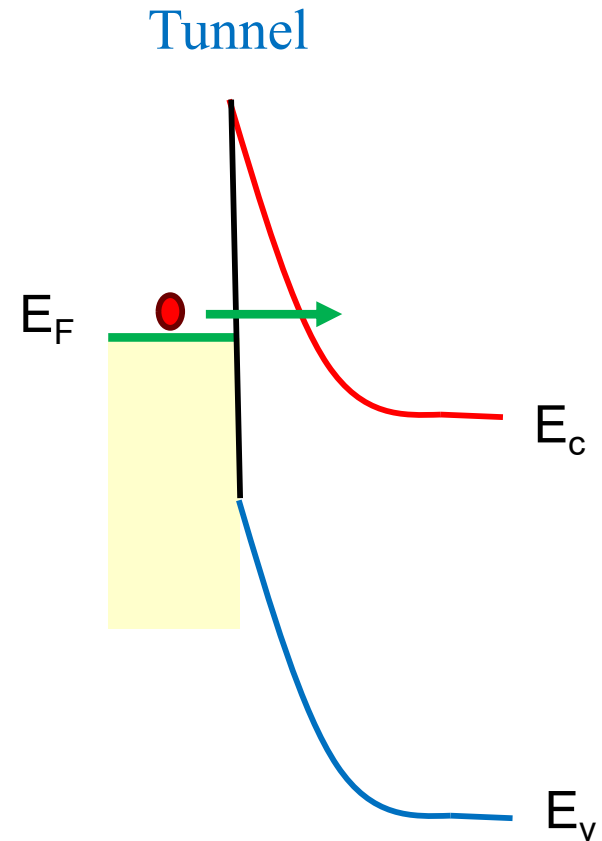
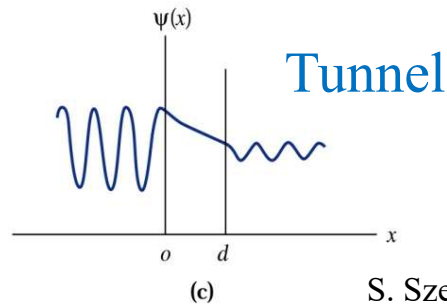
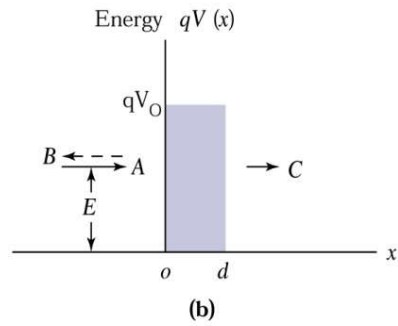
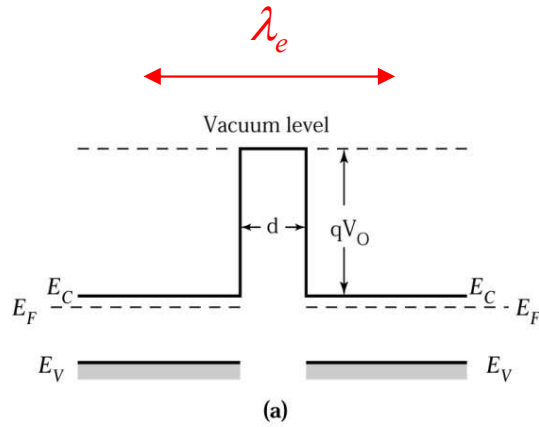
- 1) Augmentation du champ électrique  $E$
- 2) Diminution de la largeur  $W$  de la zone de déplétion



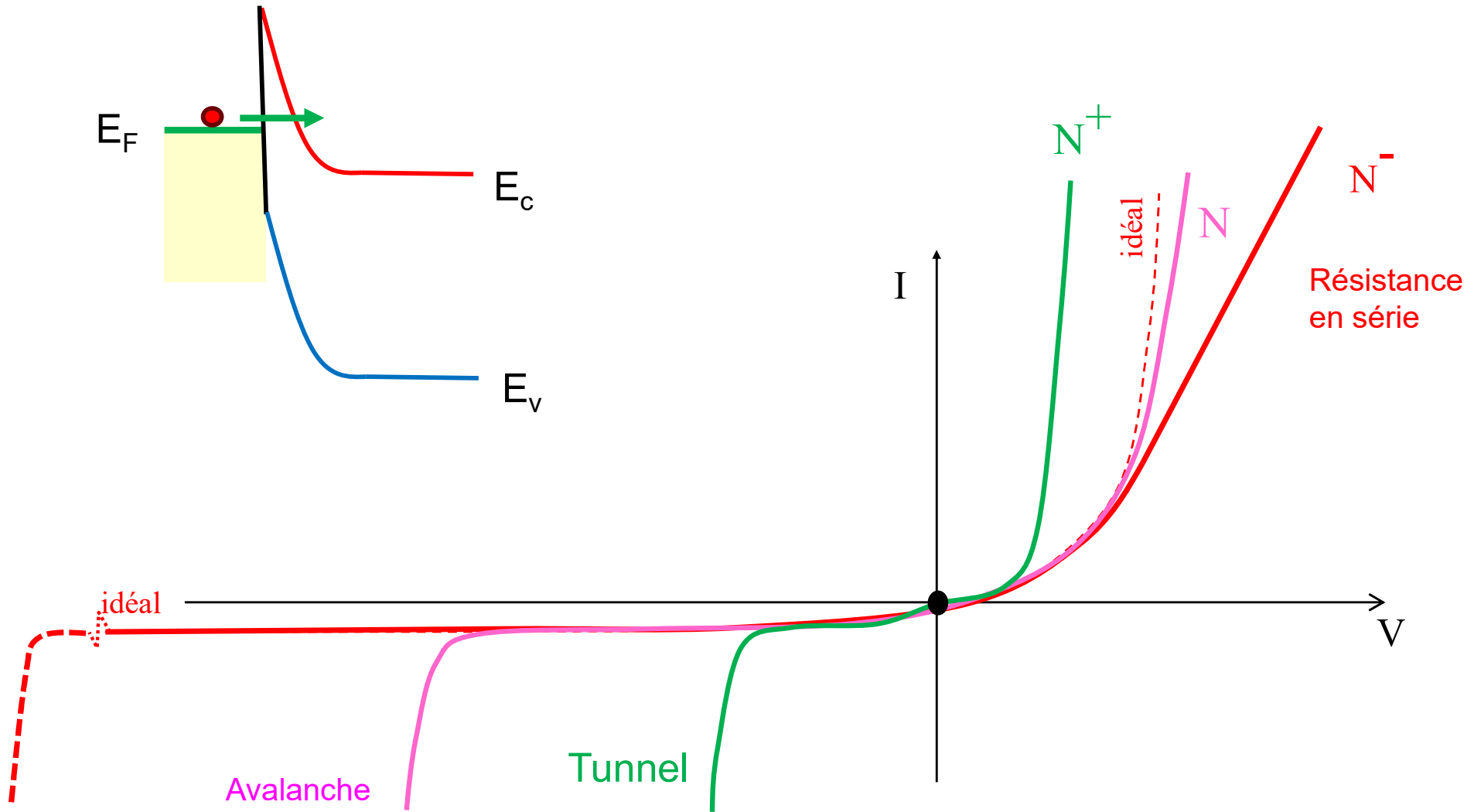
- 1) **Diminution de la tension de breakdown** par effet avalanche
- 2) Apparition de **l'effet tunnel**



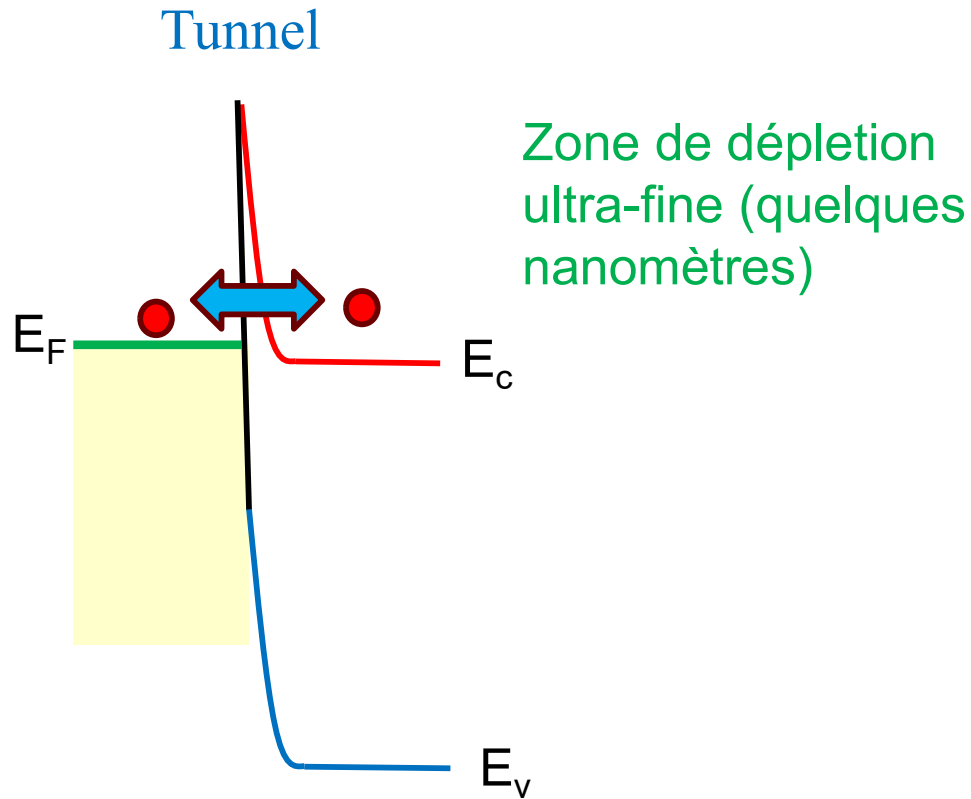
# 4) Effet tunnel



S. Sze « Semiconductor devices »

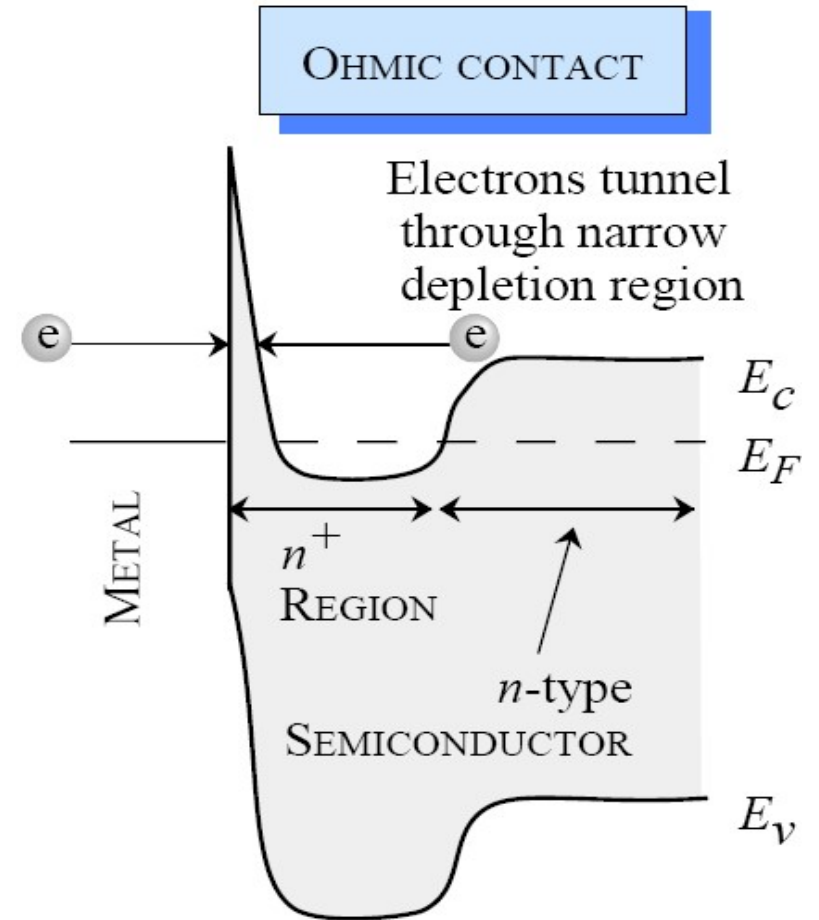


# 5) Effet tunnel et contact ohmique

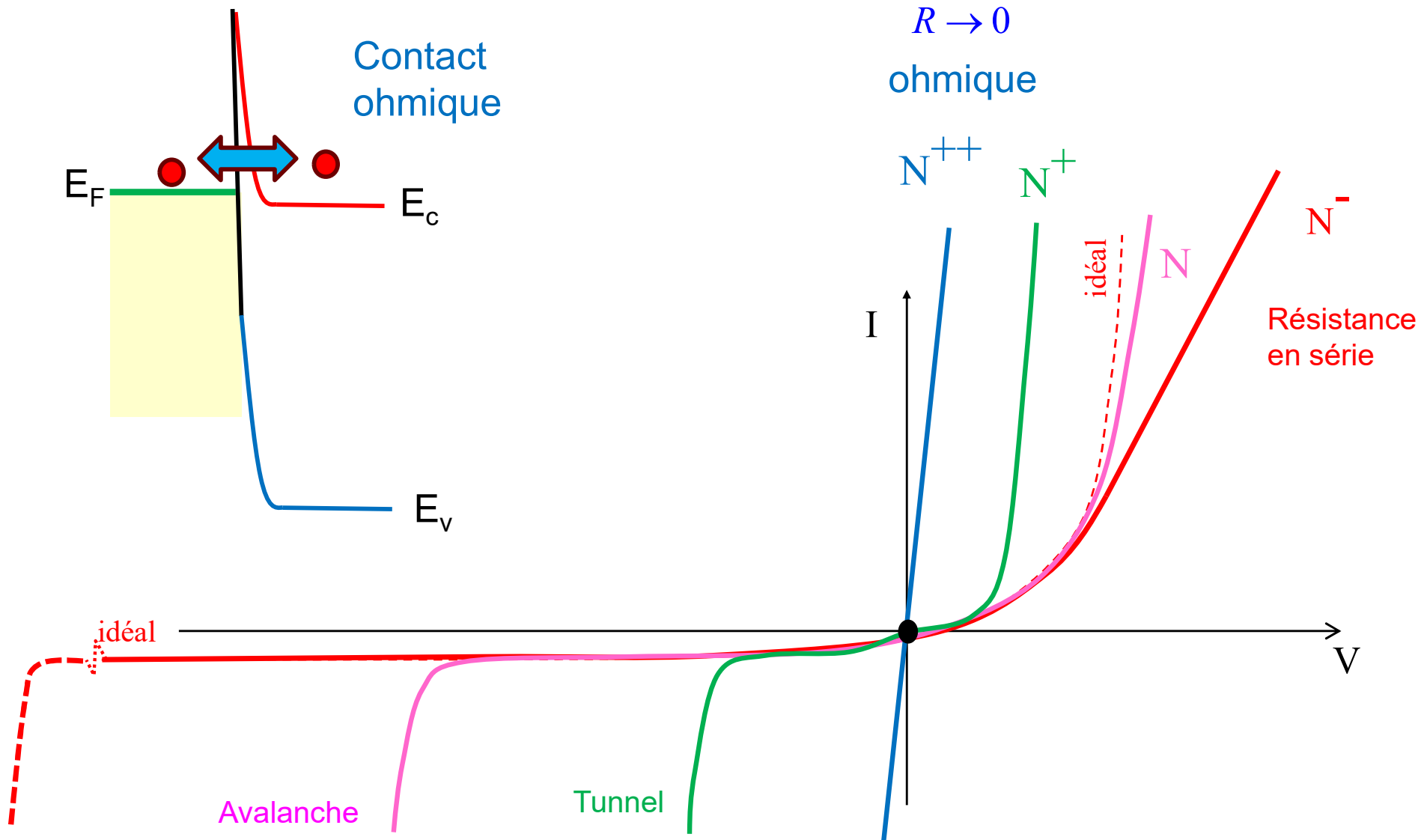


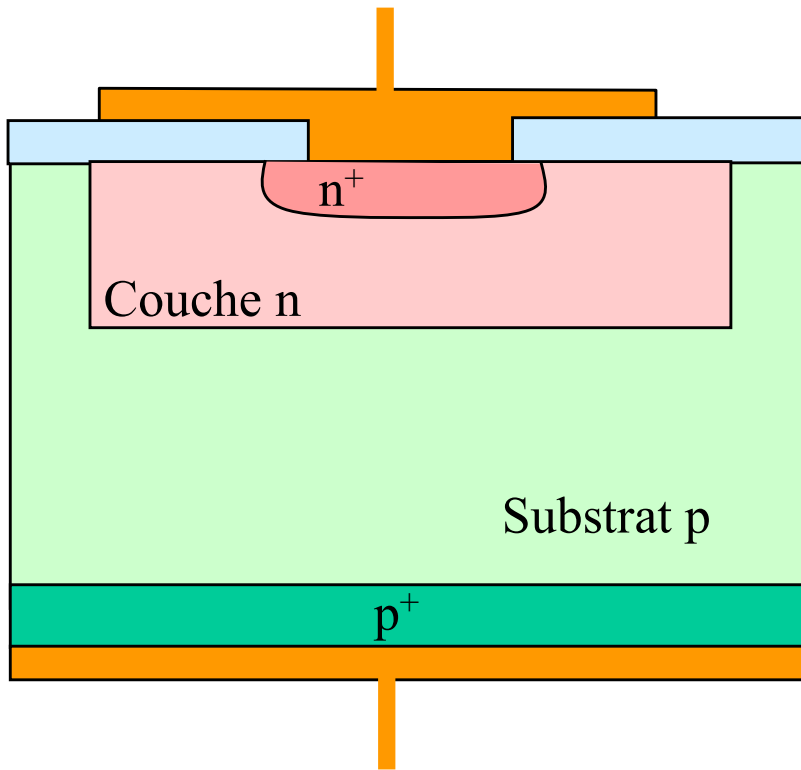
## Contact ohmique

«bon» contact

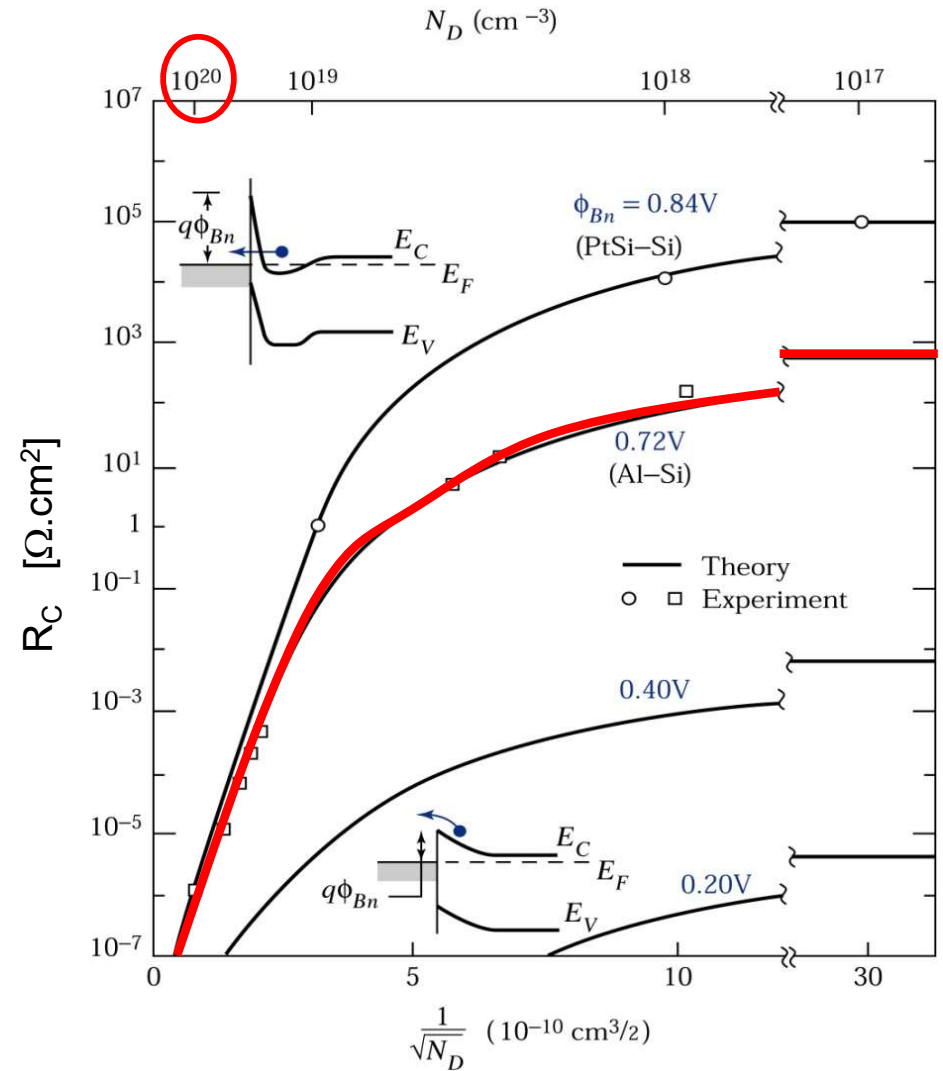


J. Singh « Semiconductor devices »



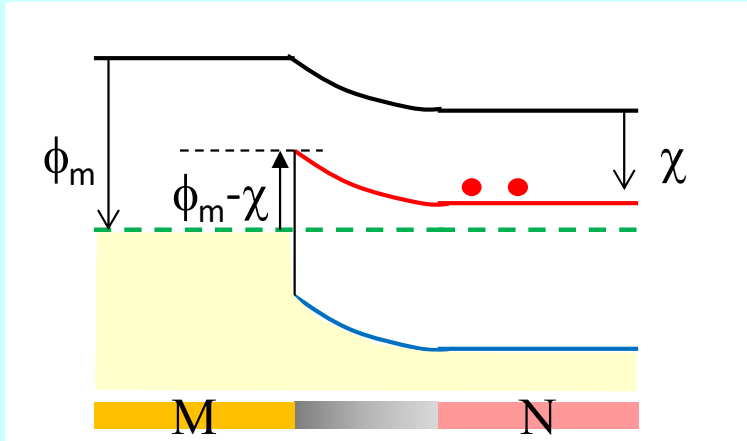


S. Sze  
« Semiconductor devices »

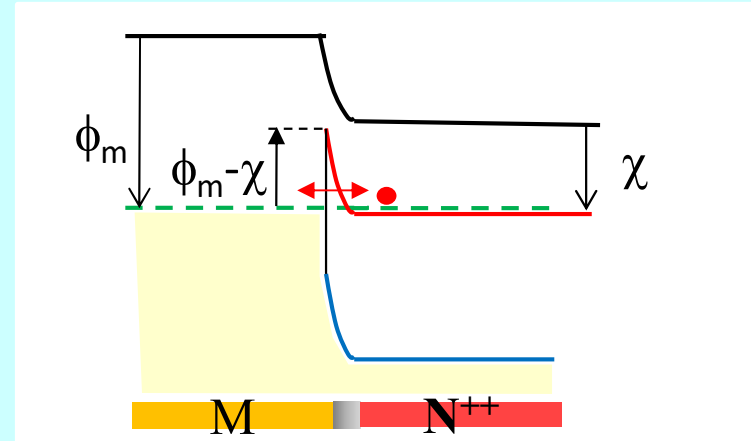


# Diode Schottky et contact ohmique: schémas de bande

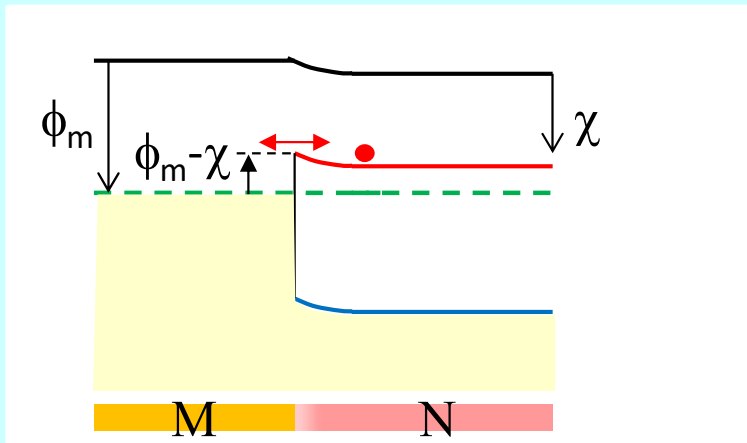
Diode Schottky



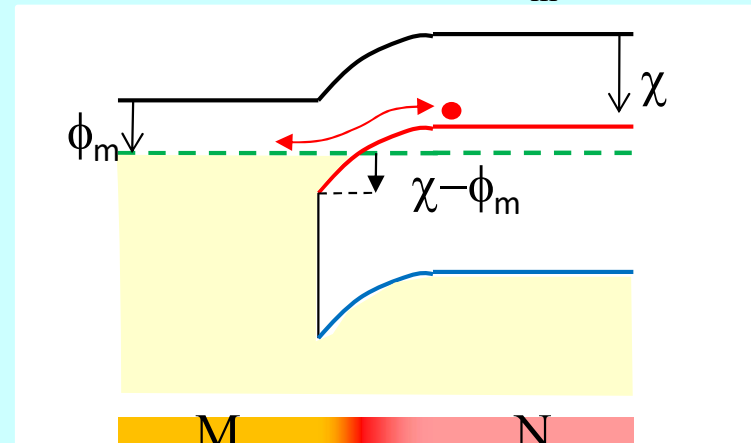
Contact Ohmique: doping  $N^{++}$



Contact Ohmique: low barrier

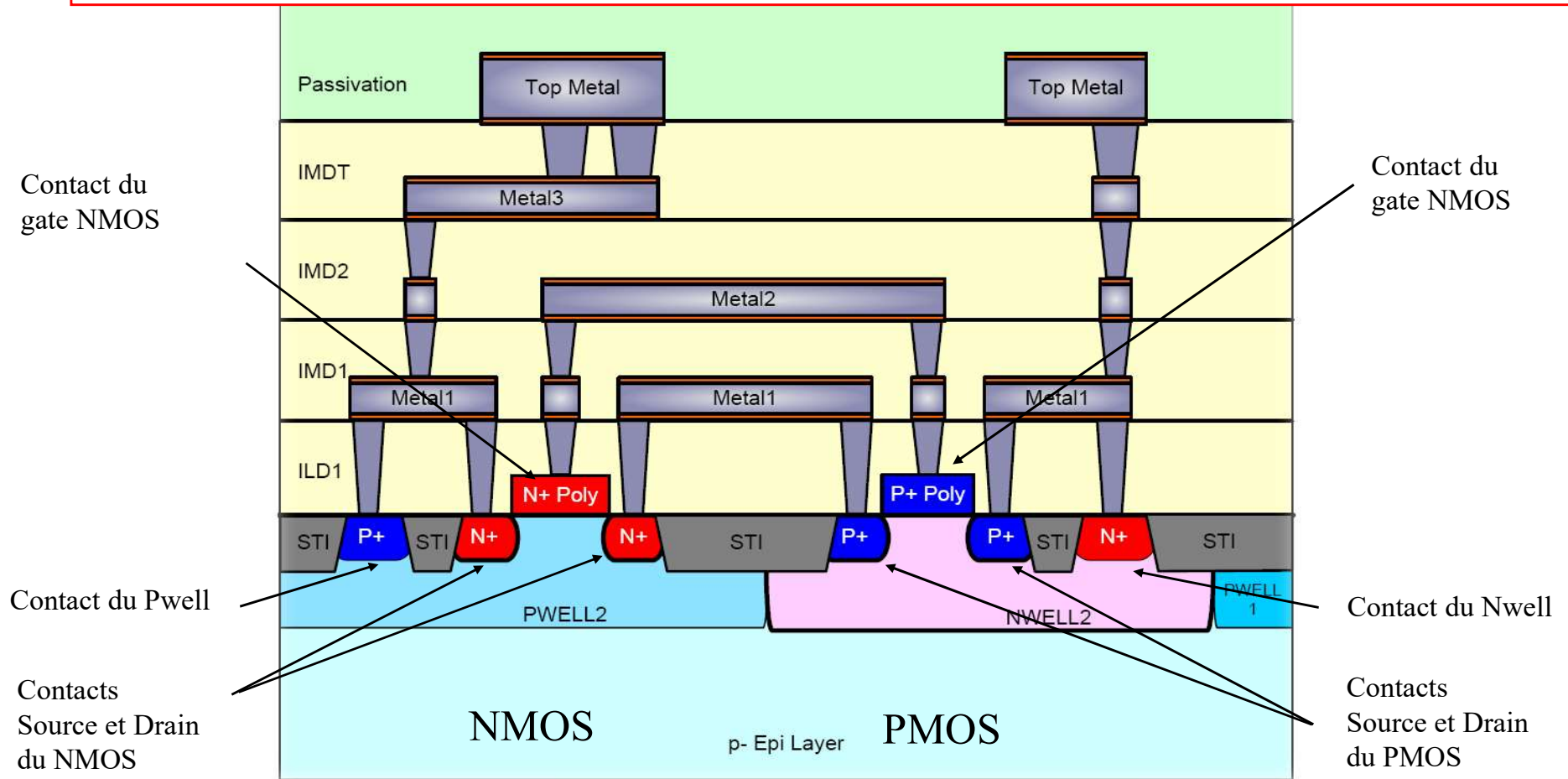


Contact Ohmique:  $\phi_m < \chi$



# 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



Popovic, base de cours EPFL

