

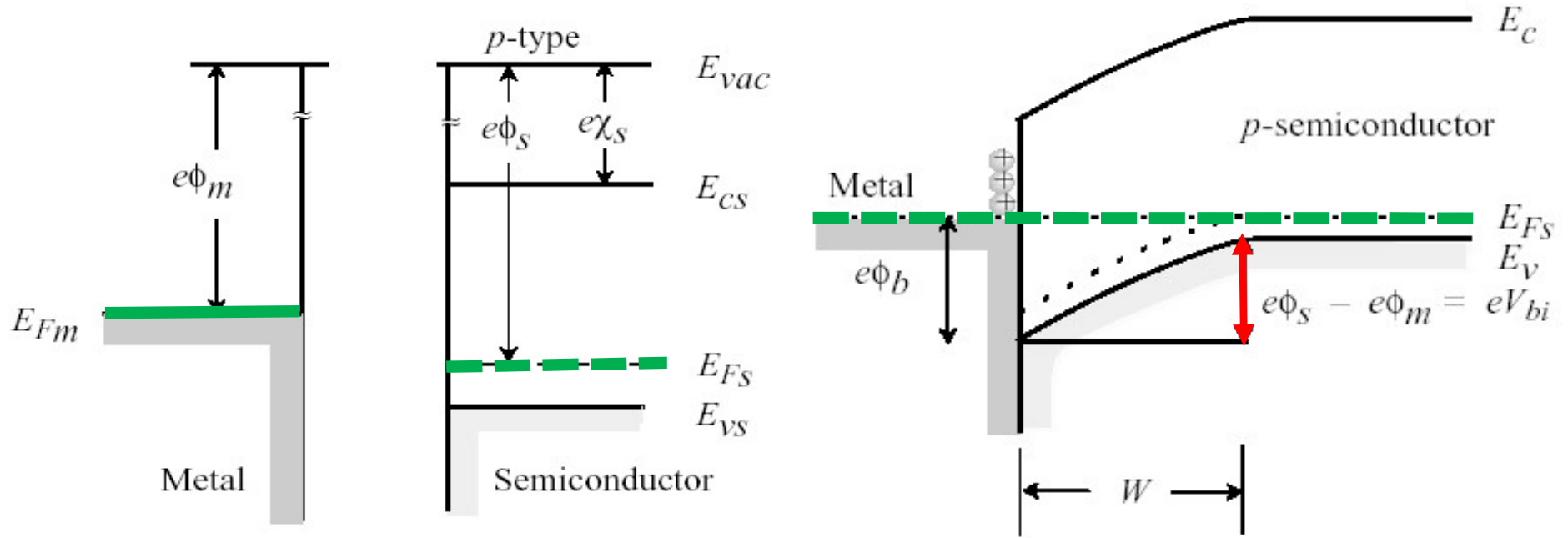
# PHYSIQUE DES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

## IX) Jonction MOS et structure CCD

P.A. Besse

EPFL

# Formation d'une jonction Schottky sur substrat p



Sans contact

En contact: potentiel de built-in

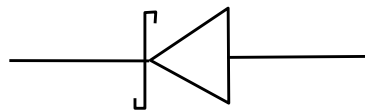
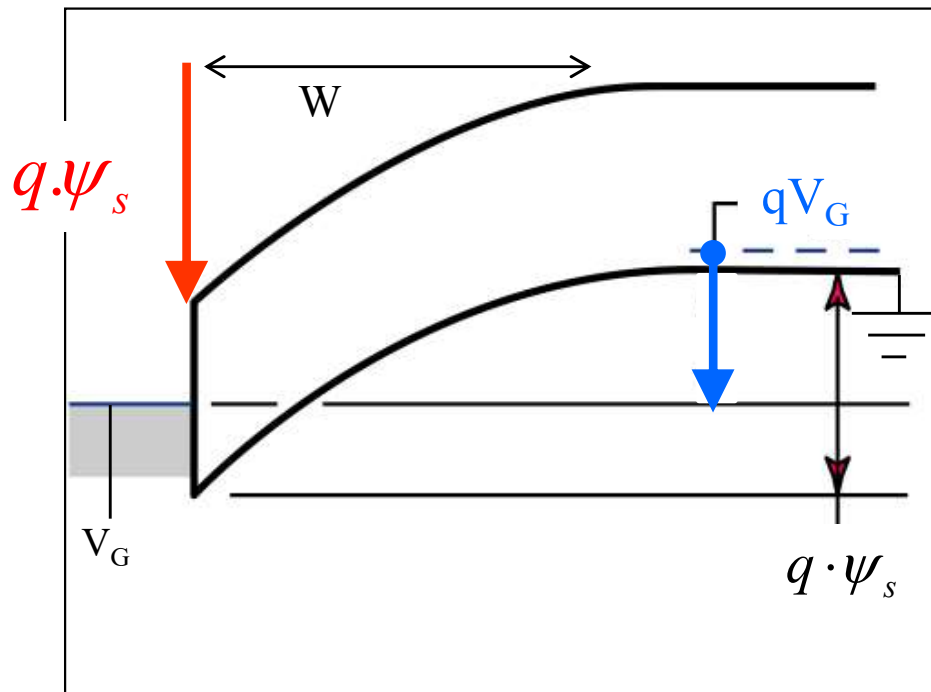
$$V_{bi} = \phi_s - \phi_m$$

J. Singh « *Semiconductor devices* »

# Jonction Schottky sur substrat p: hors équilibre

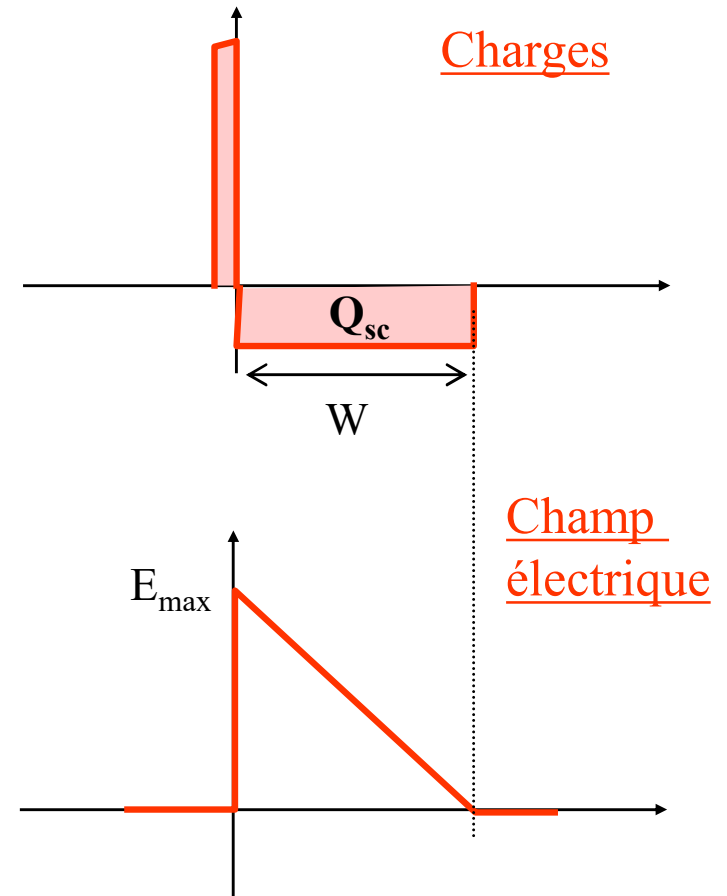
$$\psi_s = V_{bi} + V_G$$

Avec tension de bias  $V_G > 0$  sur le métal



S. Sze  
« Semiconductor  
devices »

## Déplétion



# Jonction Schottky sur substrat p: Rappel des formules

Largeur de la zone de déplétion:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s}{qN_A}} \cdot \sqrt{\psi_s}$$

$$\psi_s = V_{bi} + V_G$$

Capacité surfacique de jonction:

$$C_B = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{qN_A \cdot \varepsilon_0\varepsilon_s}{2}} \frac{1}{\sqrt{\psi_s}} \quad [F / m^2]$$

Charges d'espace:

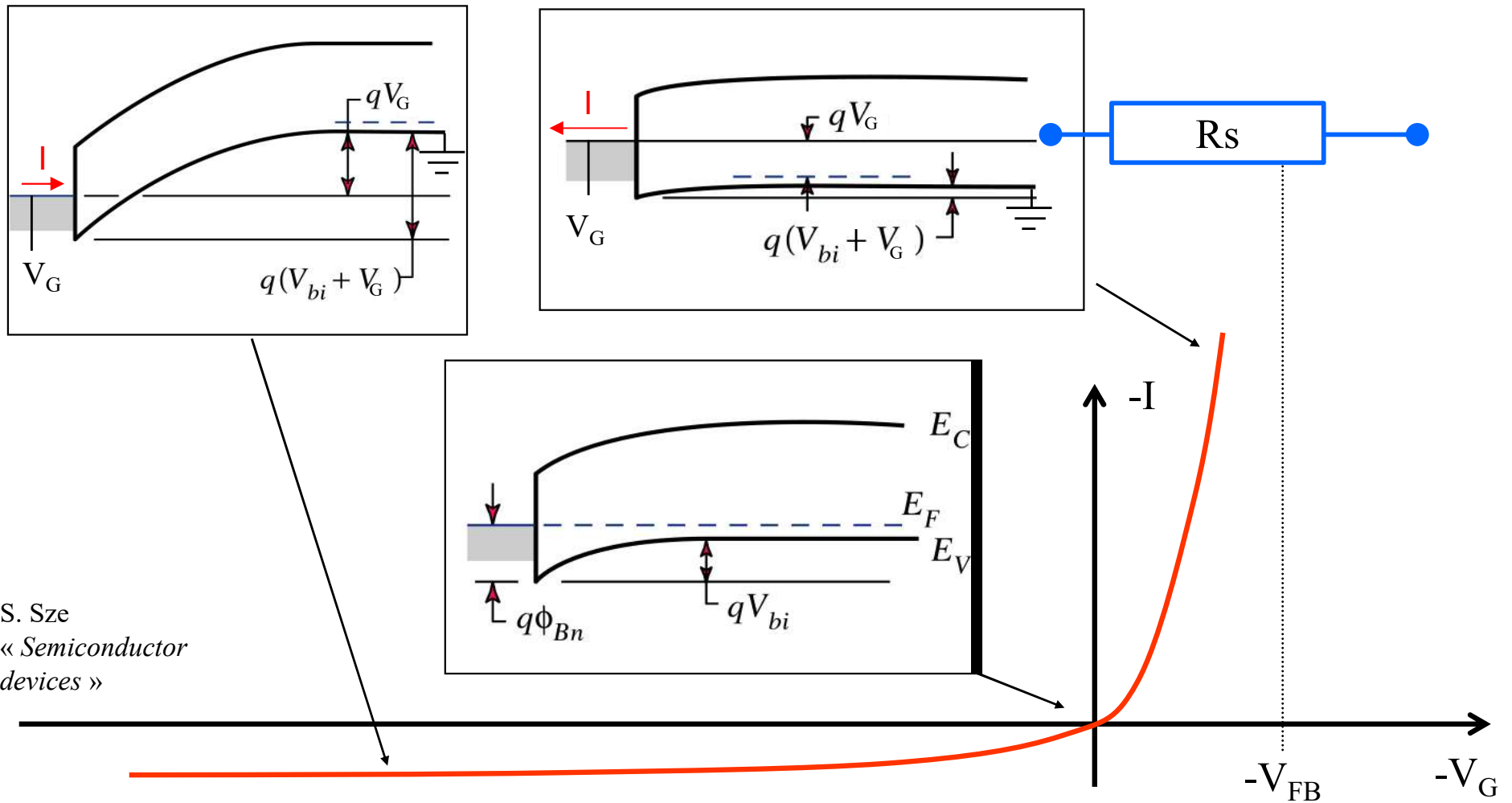
$$Q_{sc} = -qN_A \cdot W = -\sqrt{2qN_A \cdot \varepsilon_0\varepsilon_s} \cdot \sqrt{\psi_s}$$

$$= -2 \cdot C_{B,0} \cdot \sqrt{\psi_{s,0}} \cdot \sqrt{\psi_s}$$

Champ électrique maximal:

$$E_{\max} = \frac{qN_A W}{\varepsilon_0\varepsilon_s} = \frac{qN_A}{C_B} = \sqrt{\frac{2qN_A}{\varepsilon_0\varepsilon_s}} \cdot \sqrt{\psi_s}$$

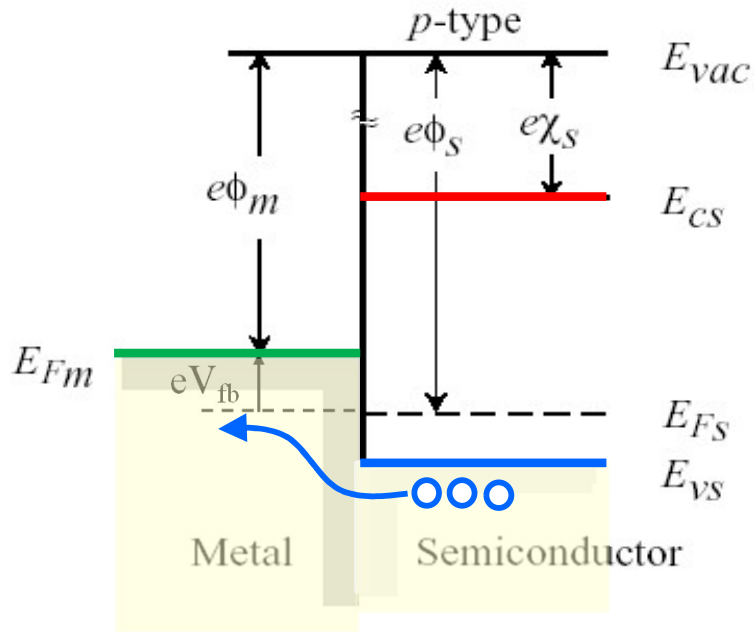
# Jonction Schottky sur substrat p: courbe I(V)



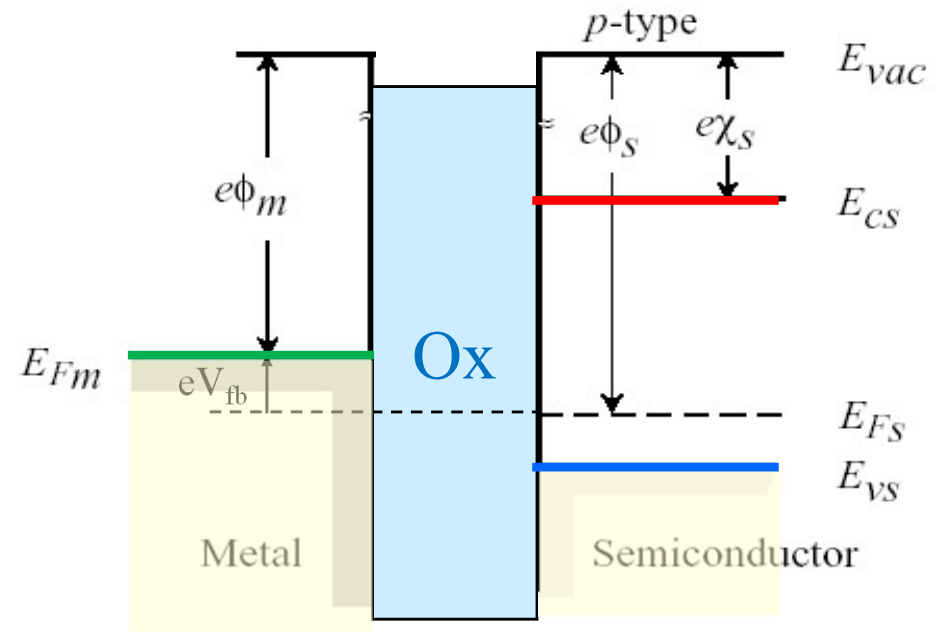
S. Sze  
« Semiconductor  
devices »

# Jonction Schottky et MOS: « Flat Band »

J. Singh « *Semiconductor devices* »



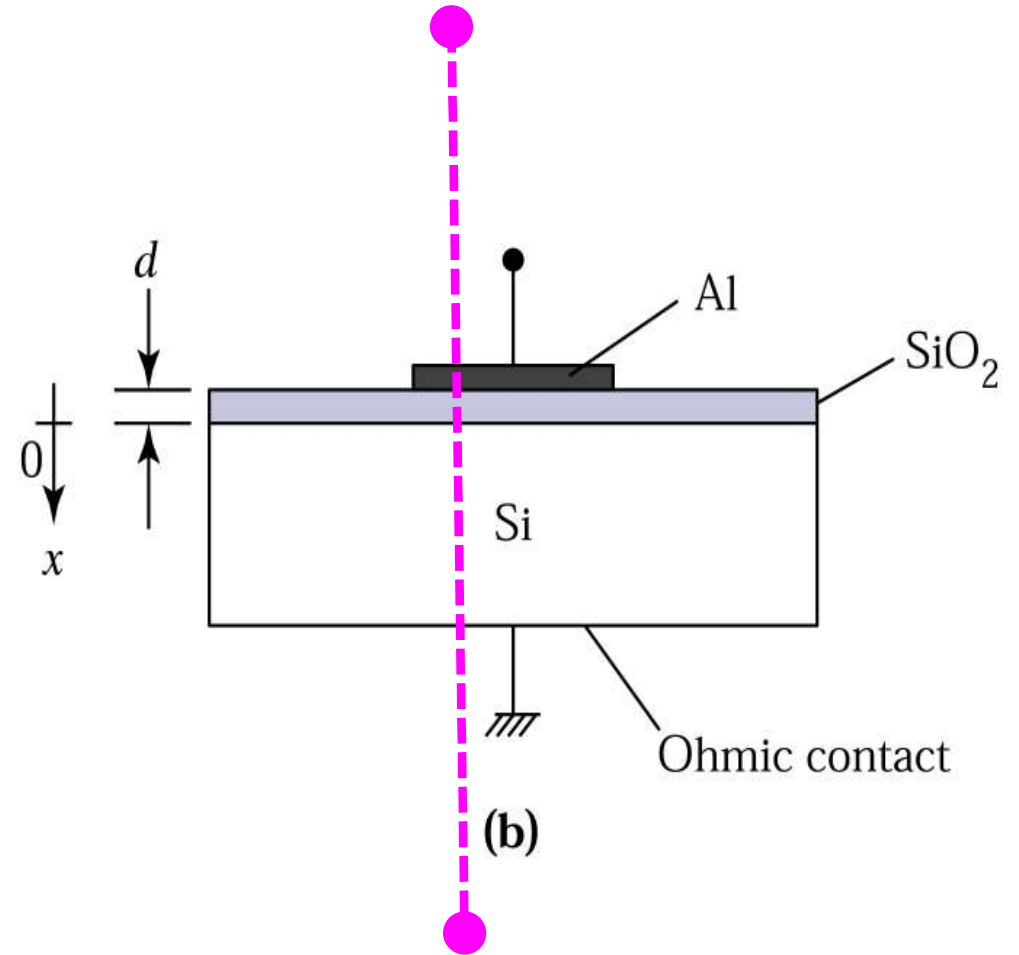
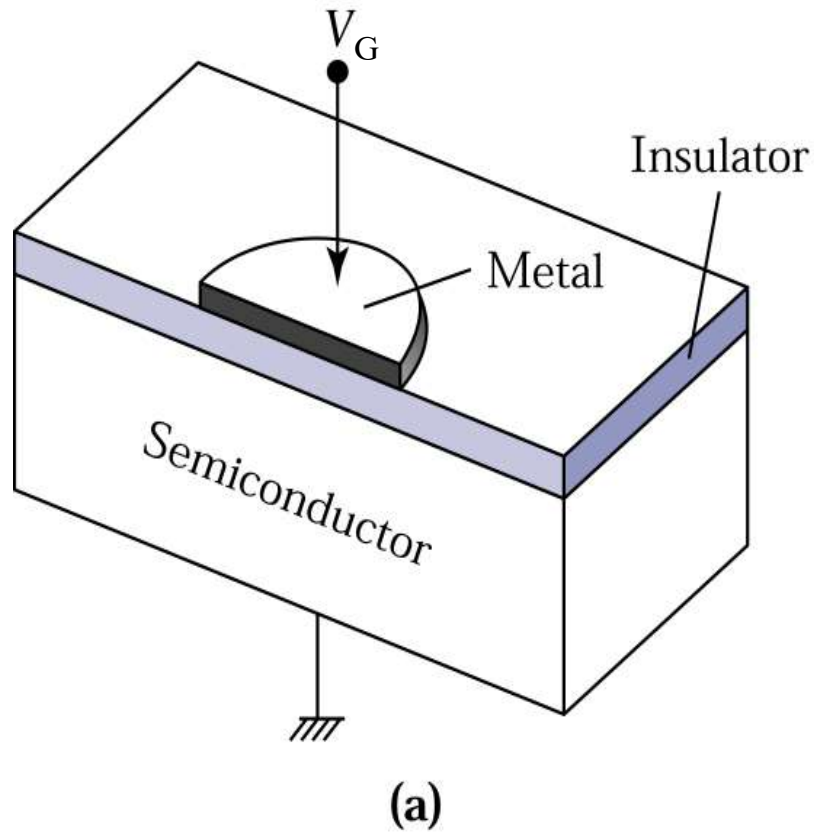
Jonction Schottky:  
Impossible car courant diverge



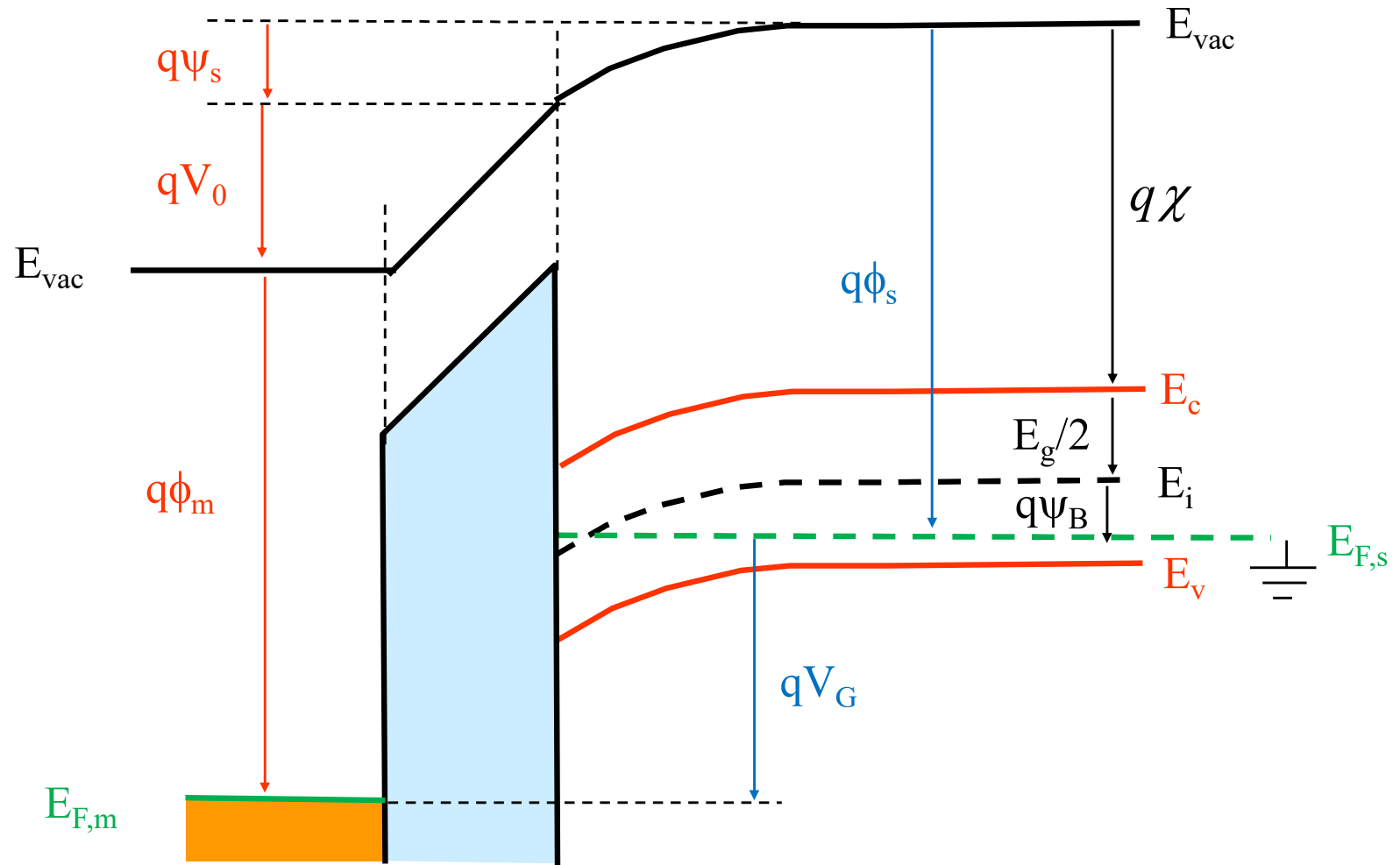
Jonction Métal/Oxyde/Semi-conducteur:  
→ Pas de courant

Condition de « Flat Band »:

$$V_G = V_{fb} = -V_{bi} = \phi_m - \phi_s$$



S. Sze « *Semiconductor devices* »



Work functions du métal

$$\phi_m$$

et du semi-conducteur:

$$\phi_s$$

Potentiel dû au dopage:

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Dépendant du matériel uniquement

Potentiel de surface dû à la charge d'espace dans la zone de déplétion:

$$\psi_s$$

Variables en fct du bias  $V_G$

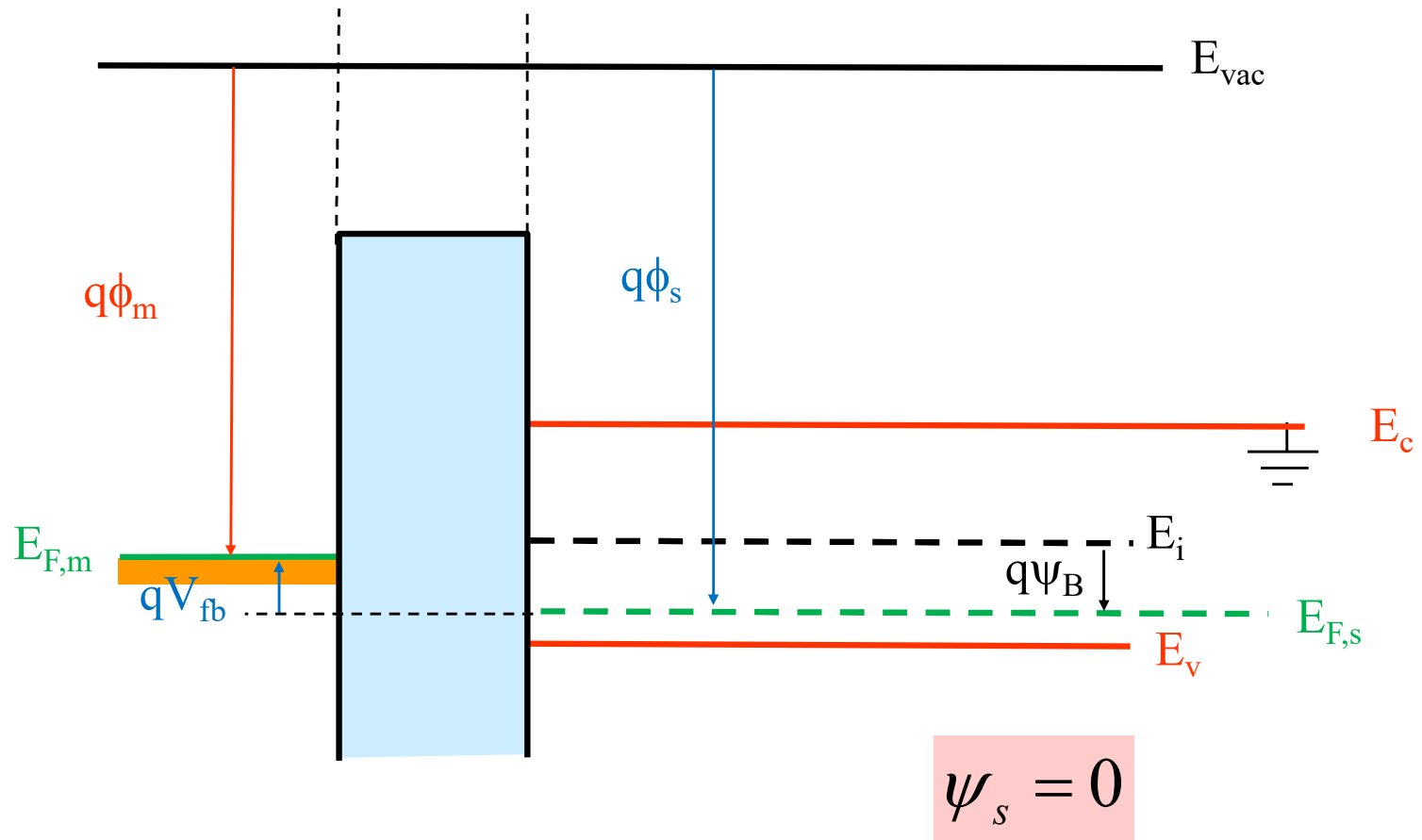
Saut de potentiel sur l'oxyde:

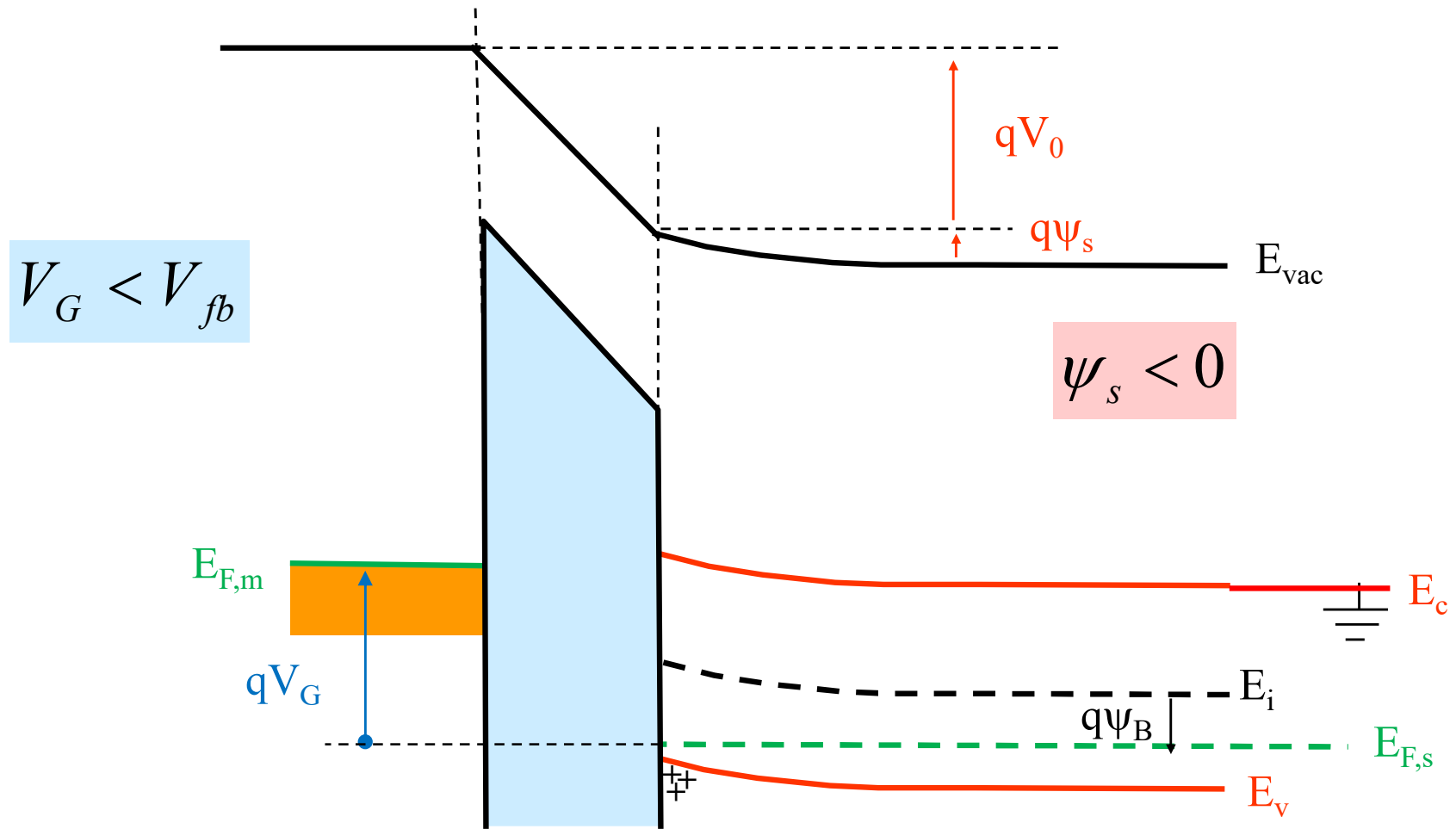
$$V_0$$

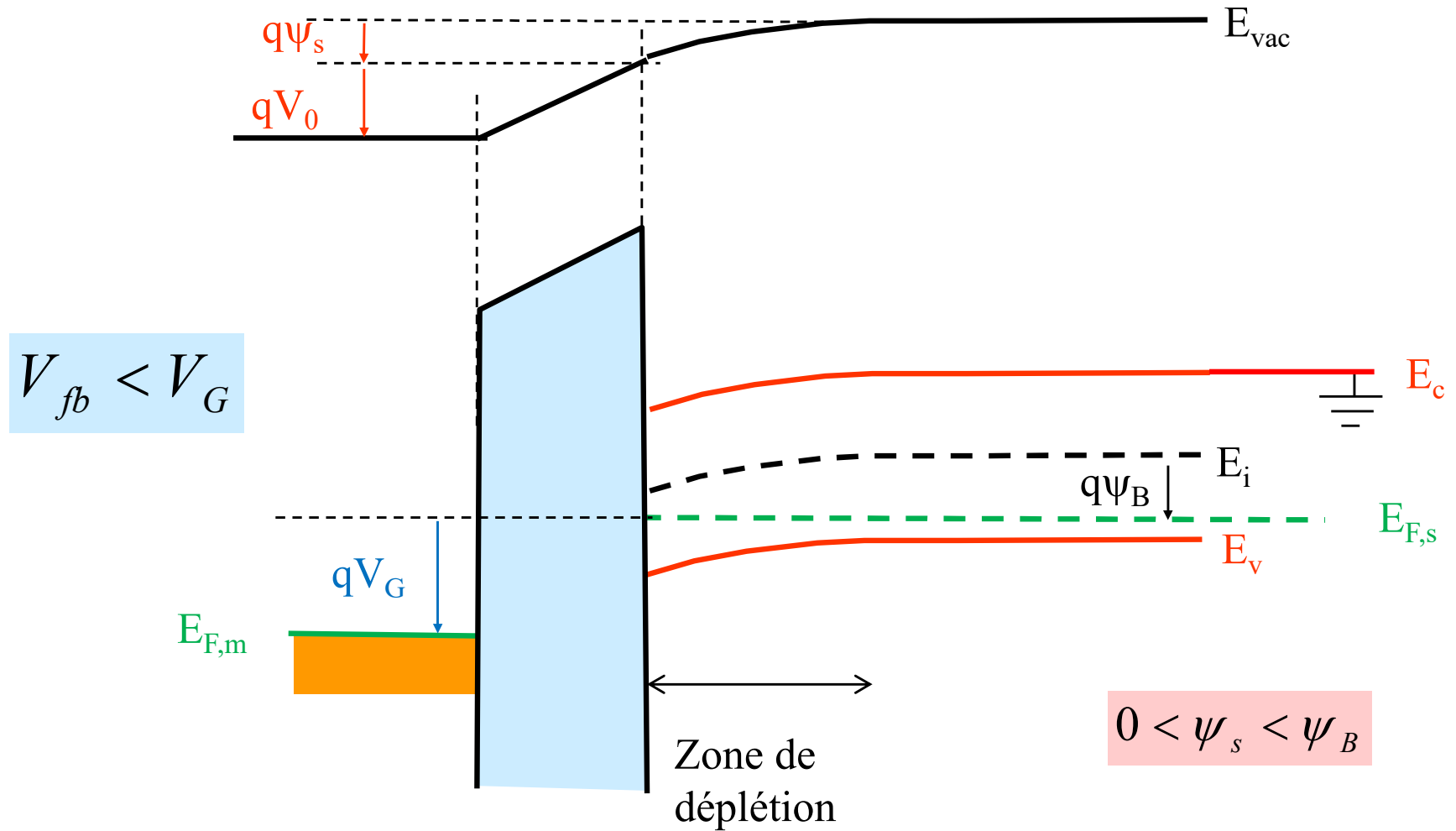
Tension de bias sur le métal:

$$V_G$$

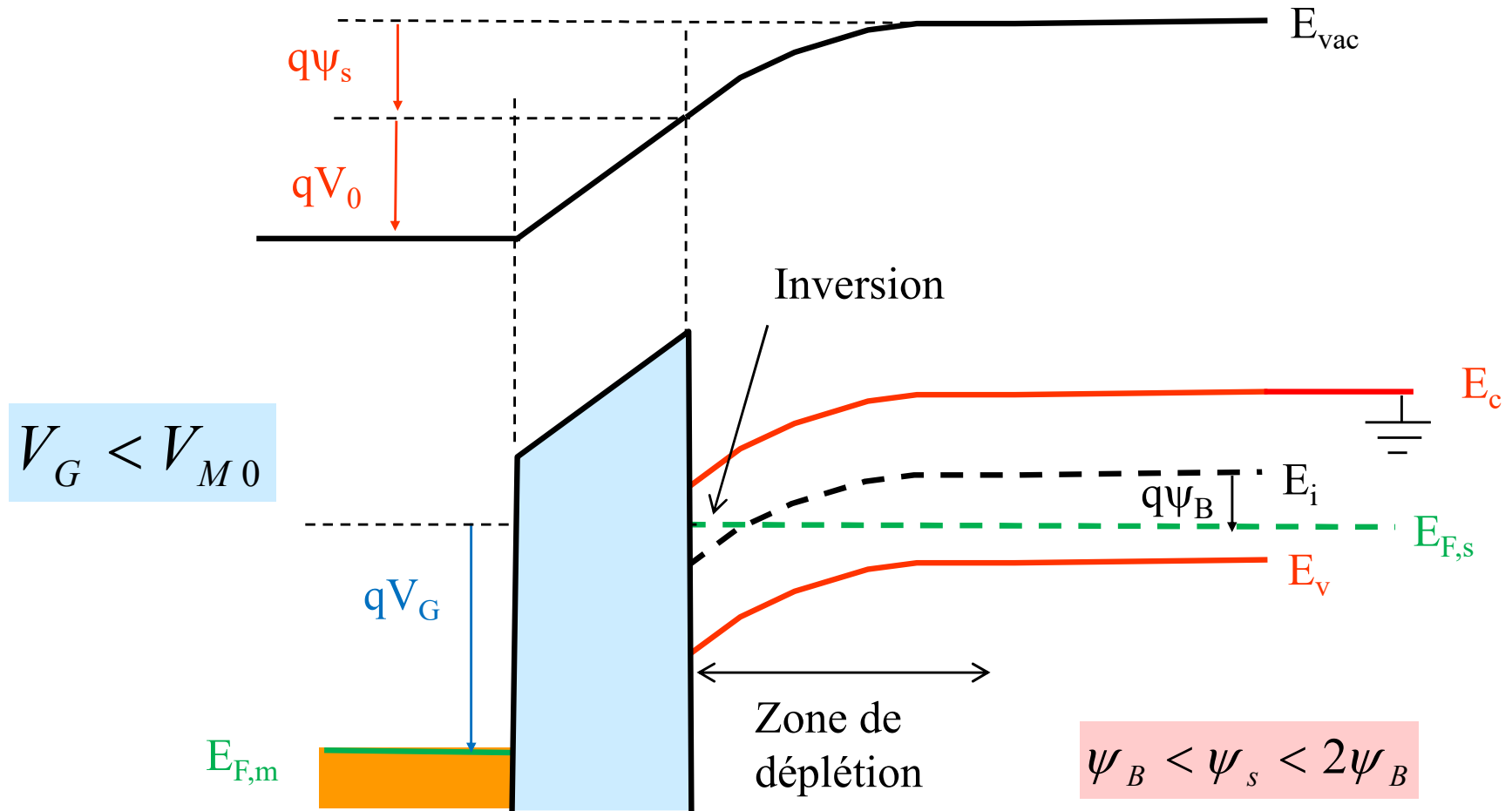
$$V_G = V_{fb} = \phi_m - \phi_s$$



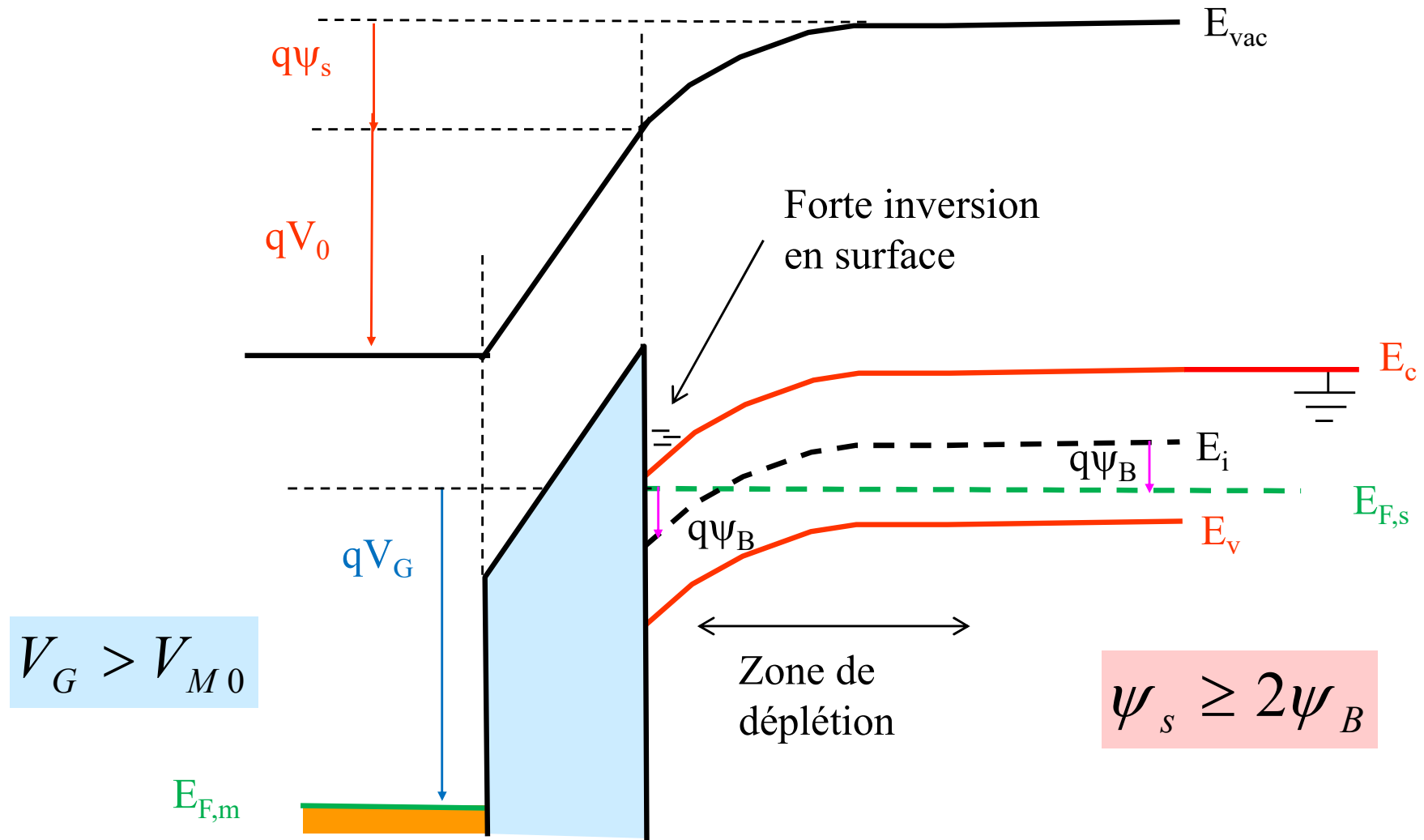




# Inversion faible



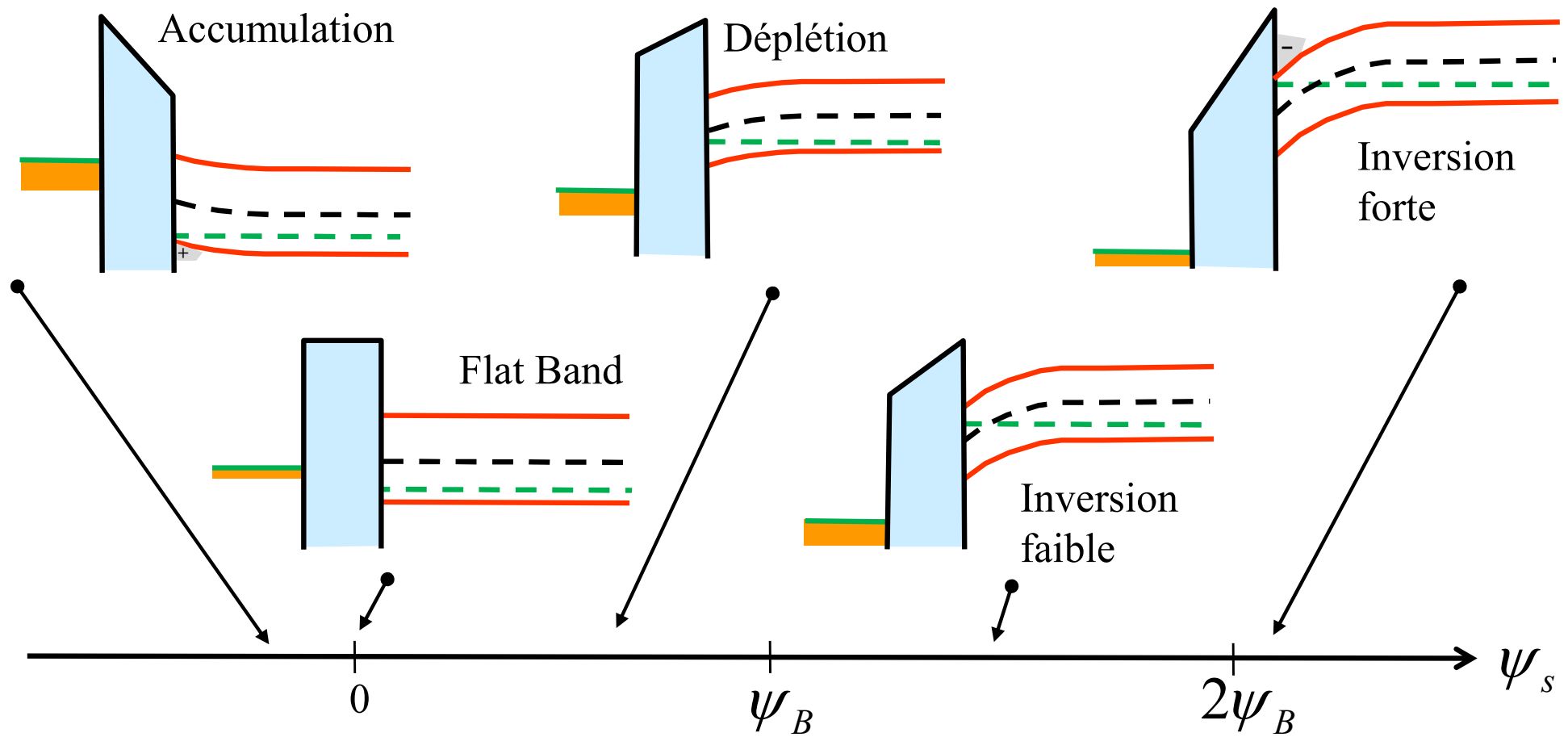
# Inversion forte



# Pliage des bandes et potentiel de surface

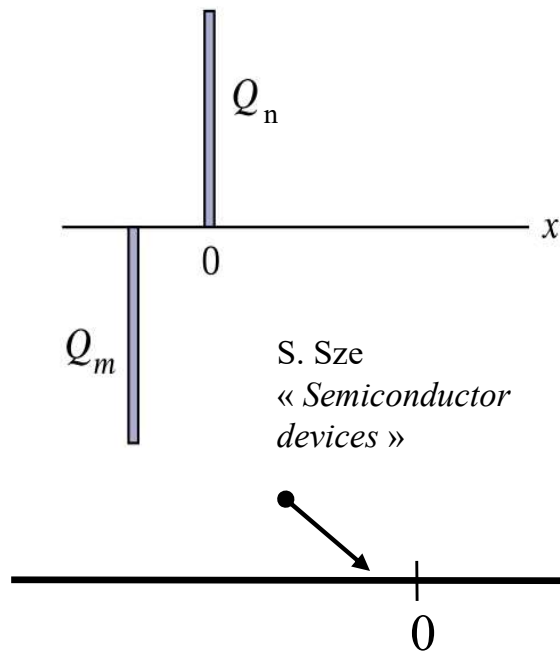


Principe: pas de courant  $\rightarrow$  énergie de Fermi  $E_F$  constante



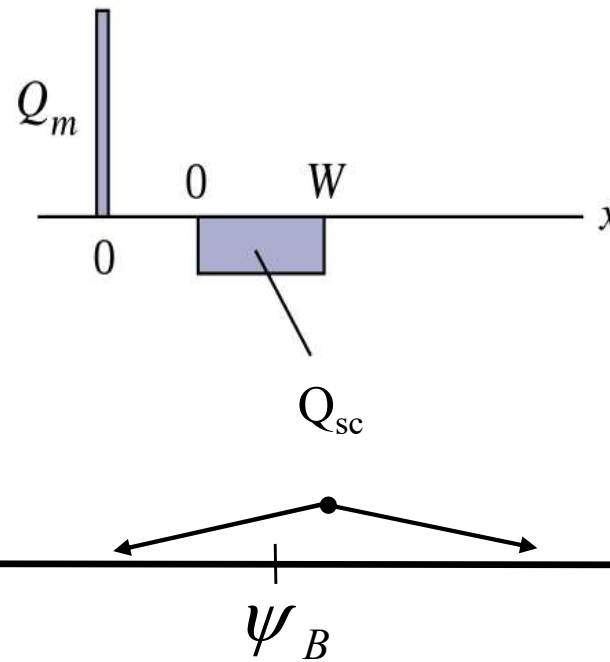
# Charges fixes et charges libres: approximation

**Accumulation**

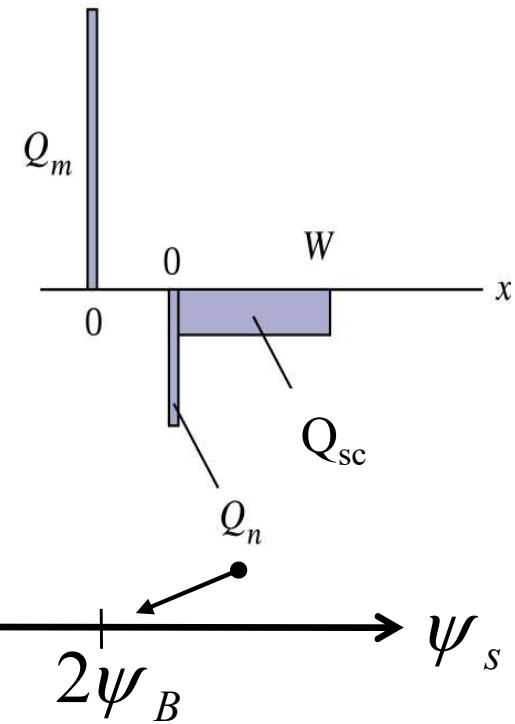


S. Sze  
« Semiconductor  
devices »

**Déplétion et inversion faible**



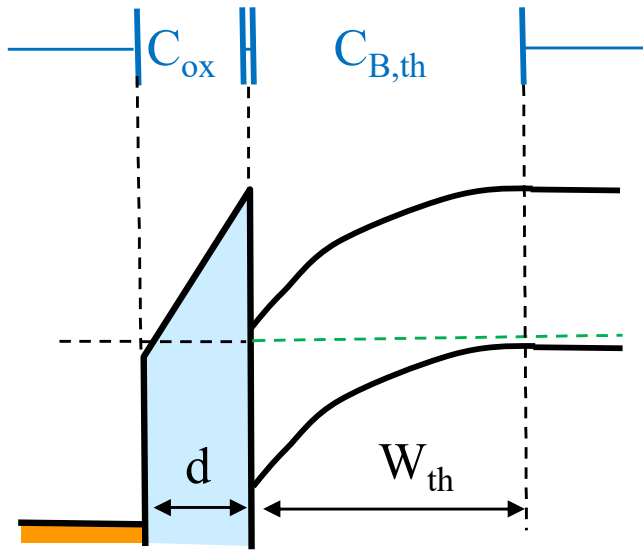
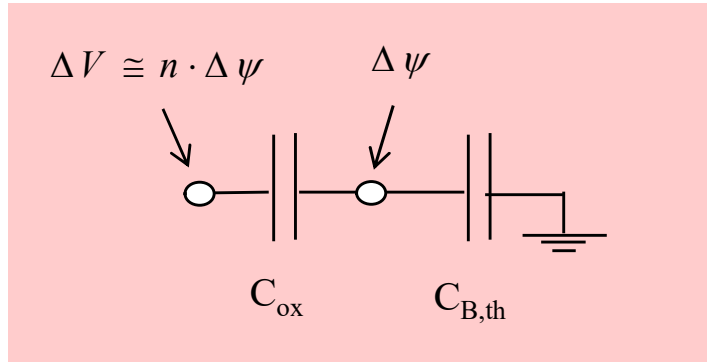
**Inversion forte**



Charge d'espace  $Q_{sc}$ :  
Charge de surface  $Q_n$ :  
Charge  $Q_m$ :

charges fixes dans la zone de déplétion  
charges libres en surface du semiconducteur  
charges libres en surface du métal.

# Paramètres: capacités et « slope factor n »



Capacité surfacique de l'oxyde:

$$\bar{C}_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d}$$

Capacité surfacique « Bulk » au threshold:

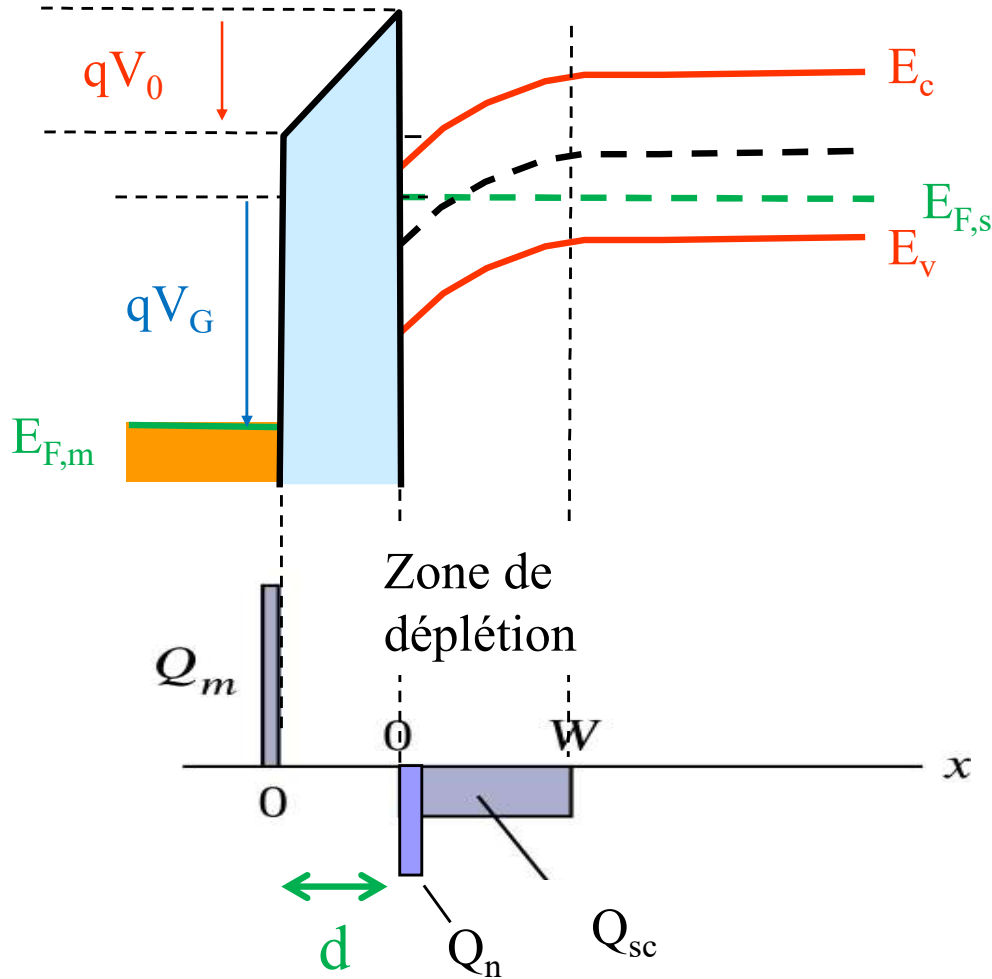
$$\bar{C}_{B,th} \equiv \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W_{th}} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_s q N_A}}{\sqrt{2 \psi_B}}$$

Slope factor n:

$$n \equiv \frac{Z_{B,th} + Z_{ox}}{Z_{B,th}} = 1 + \frac{Z_{ox}}{Z_{B,th}}$$

$$n \equiv 1 + \frac{\bar{C}_{B,th}}{\bar{C}_{ox}} \geq 1$$

# Saut de potentiel $V_0$ sur l'oxyde



L'oxyde est un condensateur, chargé avec  $Q_m$ :

$$Q_m = C_{ox} \cdot V_0 \quad \text{avec} \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d}$$

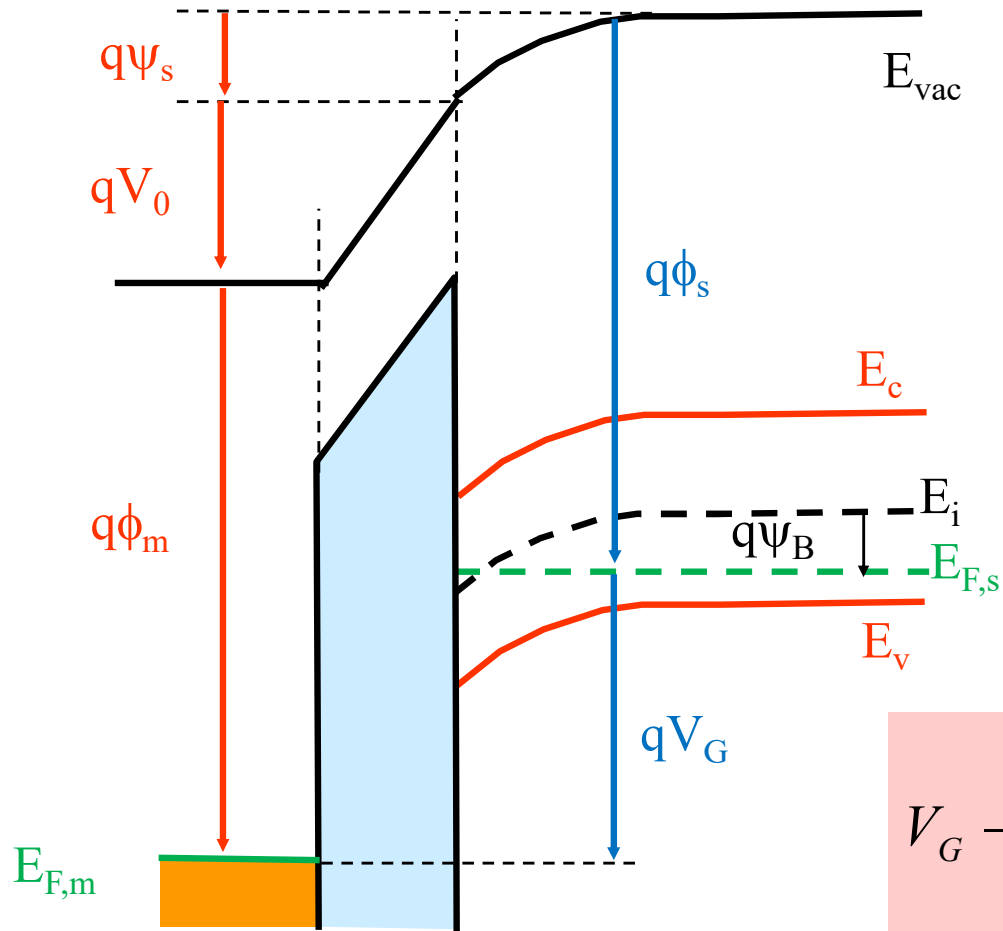
Le champ électrique est nul aux deux extrémités  $\rightarrow$

$$Q_m = -(Q_n + Q_{sc})$$

Saut de potentiel sur l'oxyde:

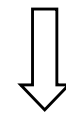
$$V_0 = -\frac{Q_n}{C_{ox}} - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}}$$

$$V_0 = -\frac{Q_n}{C_{ox}} + \left( 2 \frac{C_{B,th}^{(n-1)}}{C_{ox}} \sqrt{2\psi_B} \right) \cdot \sqrt{\psi_s}$$



Potential sur le métal  $V_G$ :

$$\underline{V_G + \phi_s} = \underline{\psi_s + V_0 + \phi_m}$$



$$V_G = V_{fb} + \psi_s + V_0$$

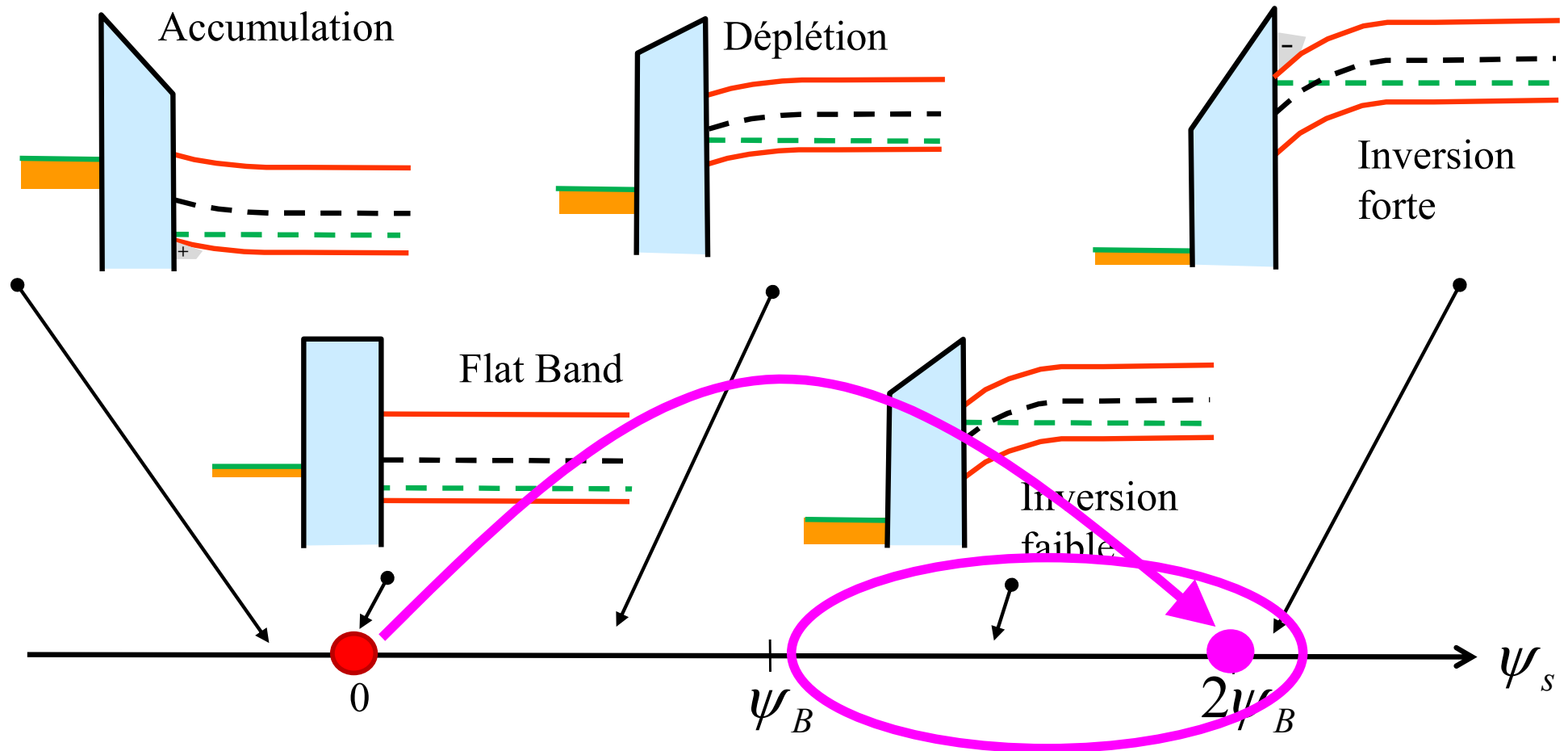


$$V_G - V_{fb} = \psi_s - \frac{Q_n}{C_{ox}} + \underbrace{\left(2(n-1)\sqrt{2\psi_B}\right)}_{\gamma} \cdot \sqrt{\psi_s}$$

# Pliage des bandes et potentiel de surface



Principe: pas de courant  $\rightarrow$  énergie de Fermi  $E_F$  constante



# Threshold voltage $V_{M0}$ et réécriture de l'équation du potentiel

Au threshold :

$$Q_n = 0 \quad \text{et} \quad \psi_s = 2\psi_B$$

Tension de threshold avec un substrat à la masse:

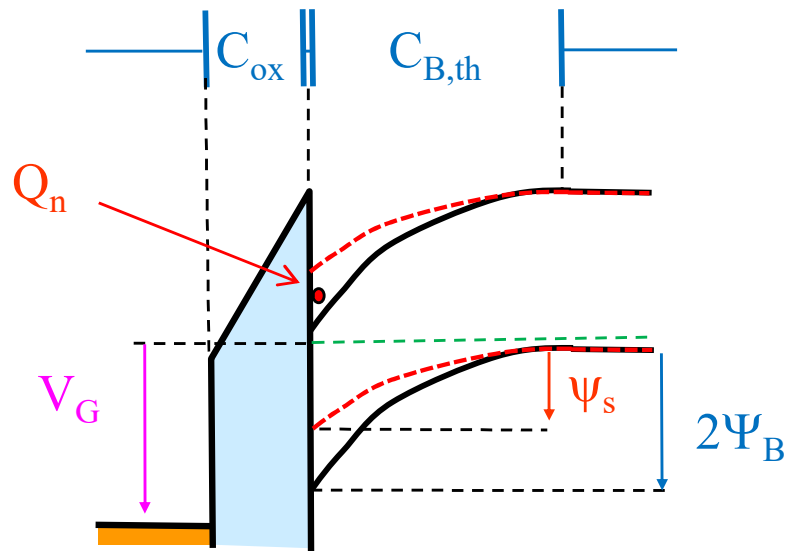
$$V_{M0} - V_{fb} = 2\psi_B \cdot (2n - 1)$$

En général: équation centrale réécrite en fonction de  $V_{M0}$ :

$$V_G - V_{M0} = \underbrace{(\psi_s - 2\psi_B)}_{\text{red}} - \frac{Q_n}{C_{ox}} + \underbrace{\left(2(n-1)\sqrt{2\psi_B}\right) \cdot \left(\sqrt{\psi_s} - \sqrt{2\psi_B}\right)}_{\text{red}}$$

Développement de Taylor :

$$V_G - V_{M0} \cong n \cdot (\psi_s - 2\psi_B) - \frac{Q_n}{C_{ox}}$$



## Paramètres

Déterminés à la tension de threshold  $V_{M0}$

Potentiel de surface au threshold  $2\psi_B$

Tension de flat-band  $V_{fb}$

Tension de gate  $V_G$

Capacité surfacique d'oxyde  $\bar{C}_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d}$

Capacité surfacique du bulk au threshold  $\bar{C}_{B.th} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W_{th}}$

Slope factor  $n = 1 + \frac{\bar{C}_{B.th}}{\bar{C}_{ox}}$

## Inconnues

Potentiel de surface  $\Psi_s$

Charges libre en surface  $Q_n$



## 2 inconnues

A) Potentiel de surface  $\psi_s$  :

$$\psi_s$$

B) Charge libre à l'interface  $Q_n$   
reliée au potentiel sur l'oxyde

$$Q_n$$

## Threshold

$$V_{M0} - V_{fb} = 2\psi_B \cdot (2n - 1)$$

## 2 équations en fct de $V_G$ :

$$1) \frac{V_G - V_{M0}}{n} \cong (\psi_s - 2\psi_B) - \frac{Q_n}{nC_{ox}}$$

### 2) Approximations

- Accumulation

$$\psi_s \cong 0$$

- Déplétion

- Inversion faible

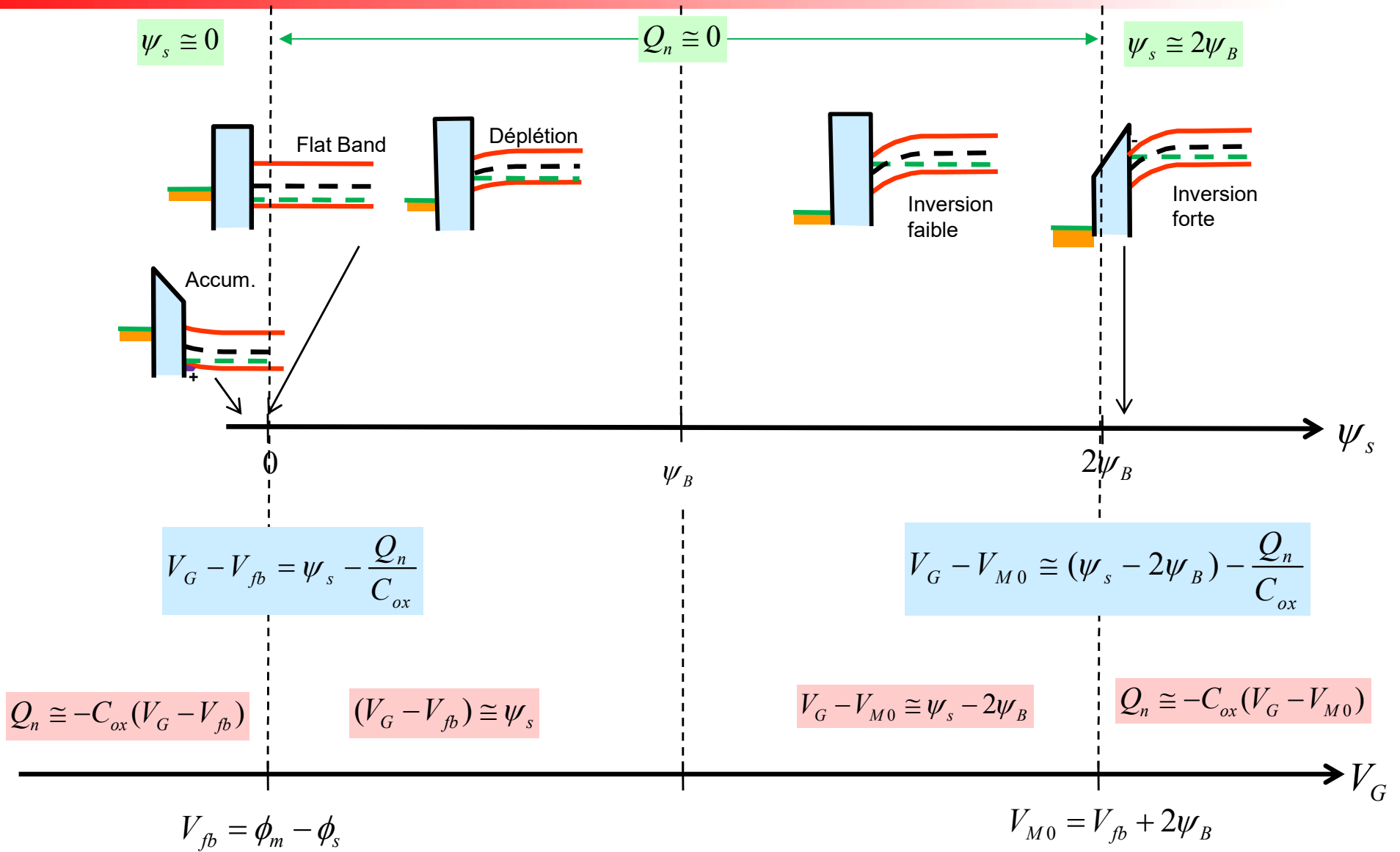
- Déplétion profonde

$$Q_n = 0$$

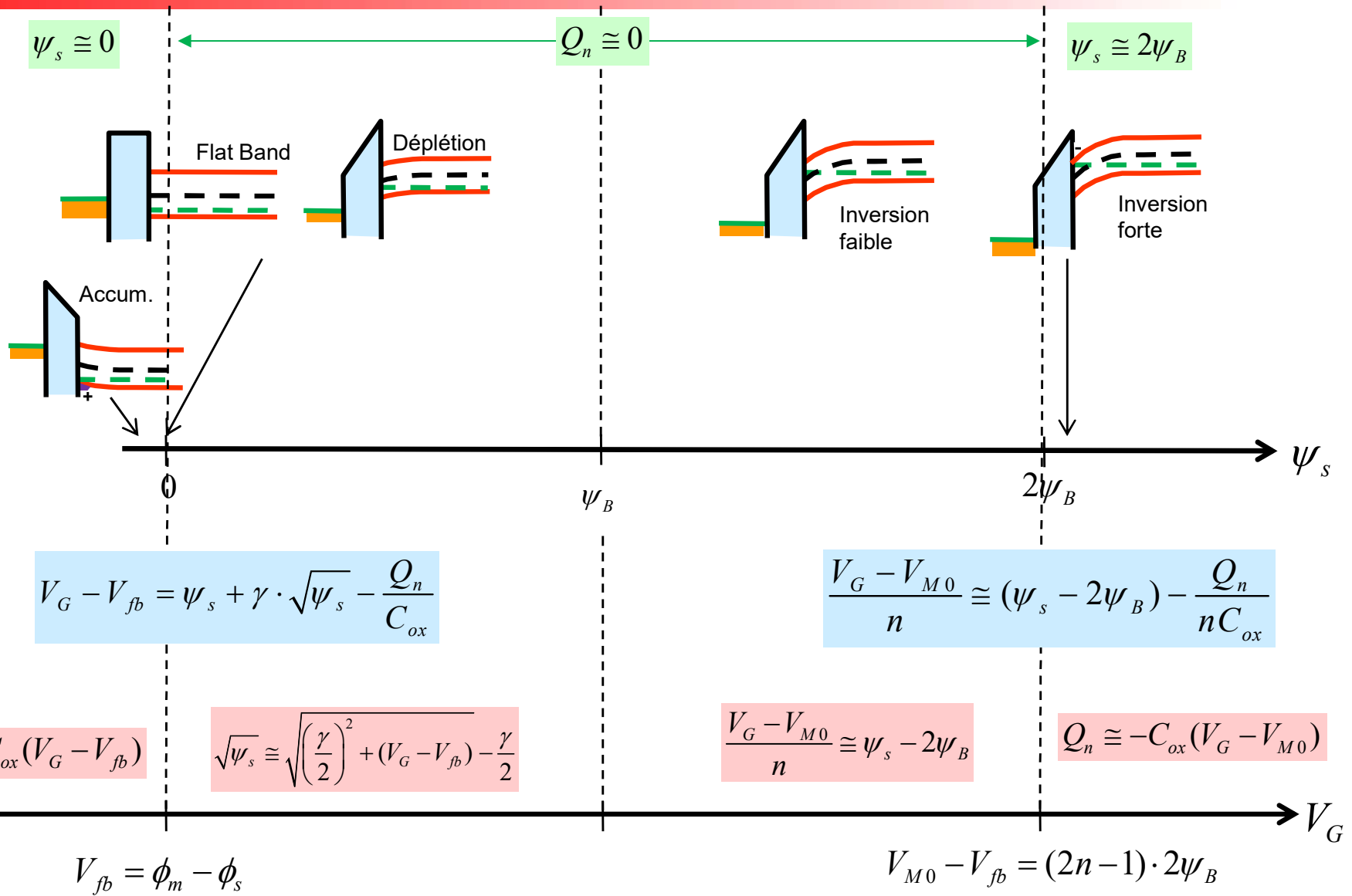
- Inversion forte

$$\psi_s \cong 2\psi_B$$

Formules sans slope factor (n=1)

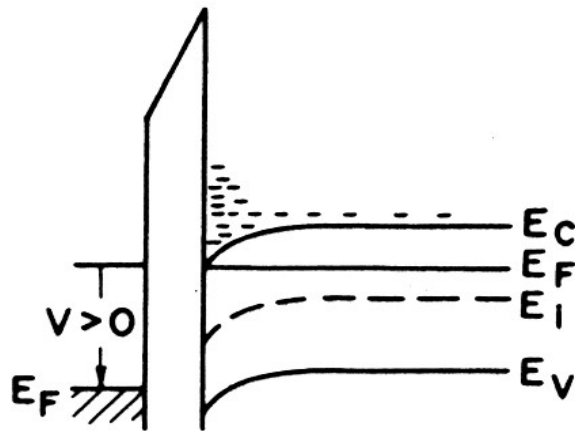


# Résumé: Formules avec slope factor n

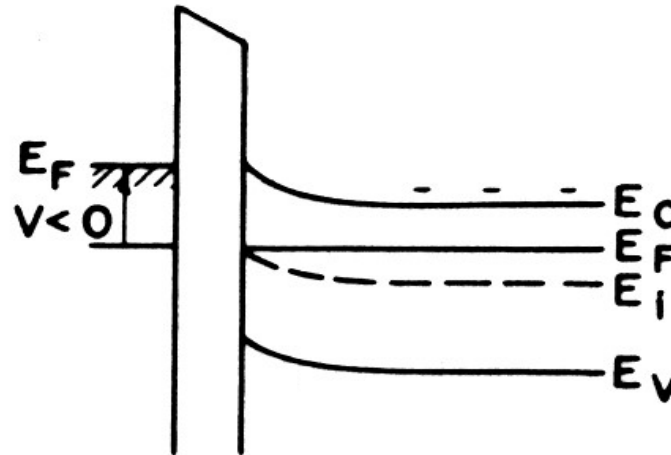


S. Sze « Physics of semiconductor devices »

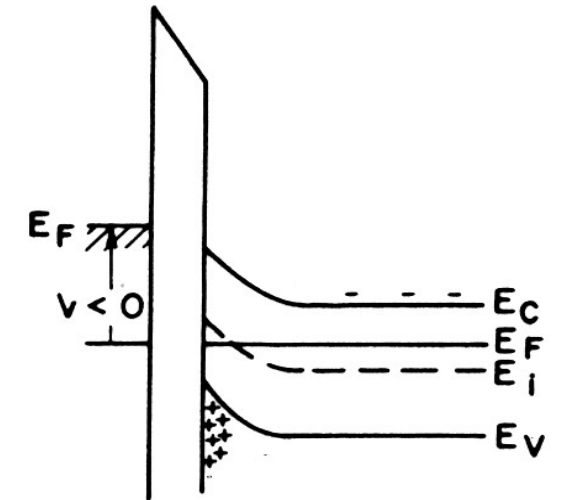
Accumulation



Déplétion ou inversion faible



Inversion forte

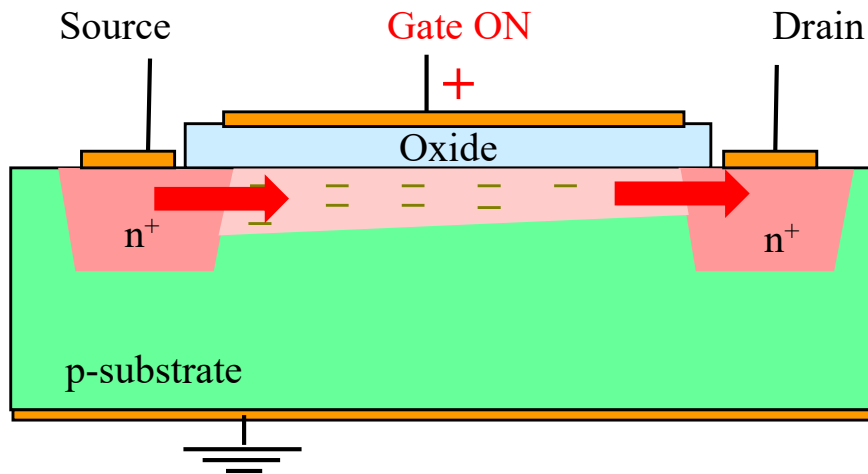


Les calculs sont totalement similaires

Ed Discussion

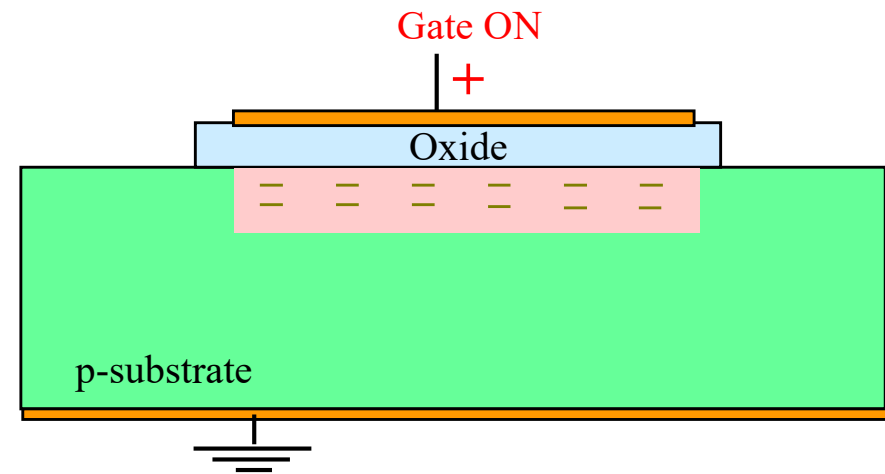
Je ne suis pas sûr d'avoir compris si un courant passe à-travers l'oxyde. Comment pourrait-on expliquer cette accumulation de charge négative du côté du semi-conducteur si aucun transfert se produit entre le métal et le semi conducteur?

## NMOS Transistor



Injection and extraction  
from the source and the drain

## MOS Capacitor



With neither source nor drain:  
??? Origin ???

NMOS transistor



Canal de Corinthe

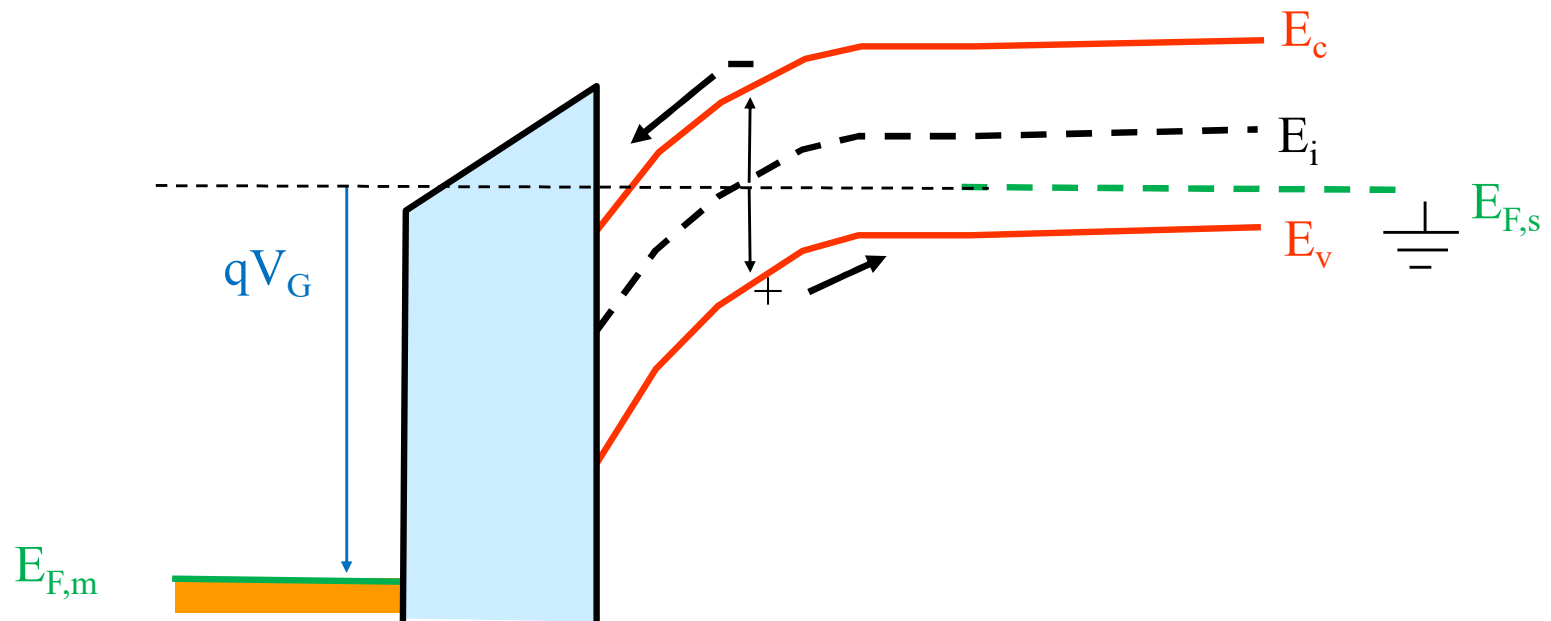
MOS capacitor



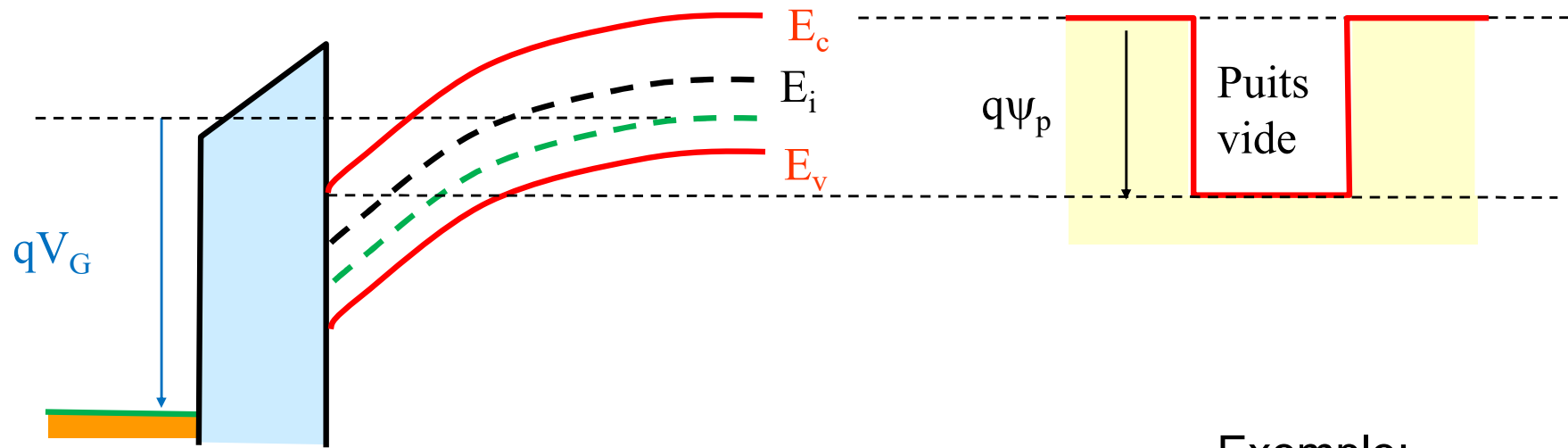
Drainage d'une tourbière

Appliquer soudainement un potentiel  $V_G > V_{M0}$ , d'où provient la charge d'inversion ?

Les électrons s'accumulent lentement  
par génération thermique



Déplétion profonde  $|Q_n| = 0$



Exemple:

$$2\psi_B = 0.6 \text{ V}$$

$$n = 4/3$$

$$V_{M0} = 1 \text{ V}$$

$$V_G = 10 \text{ V}$$

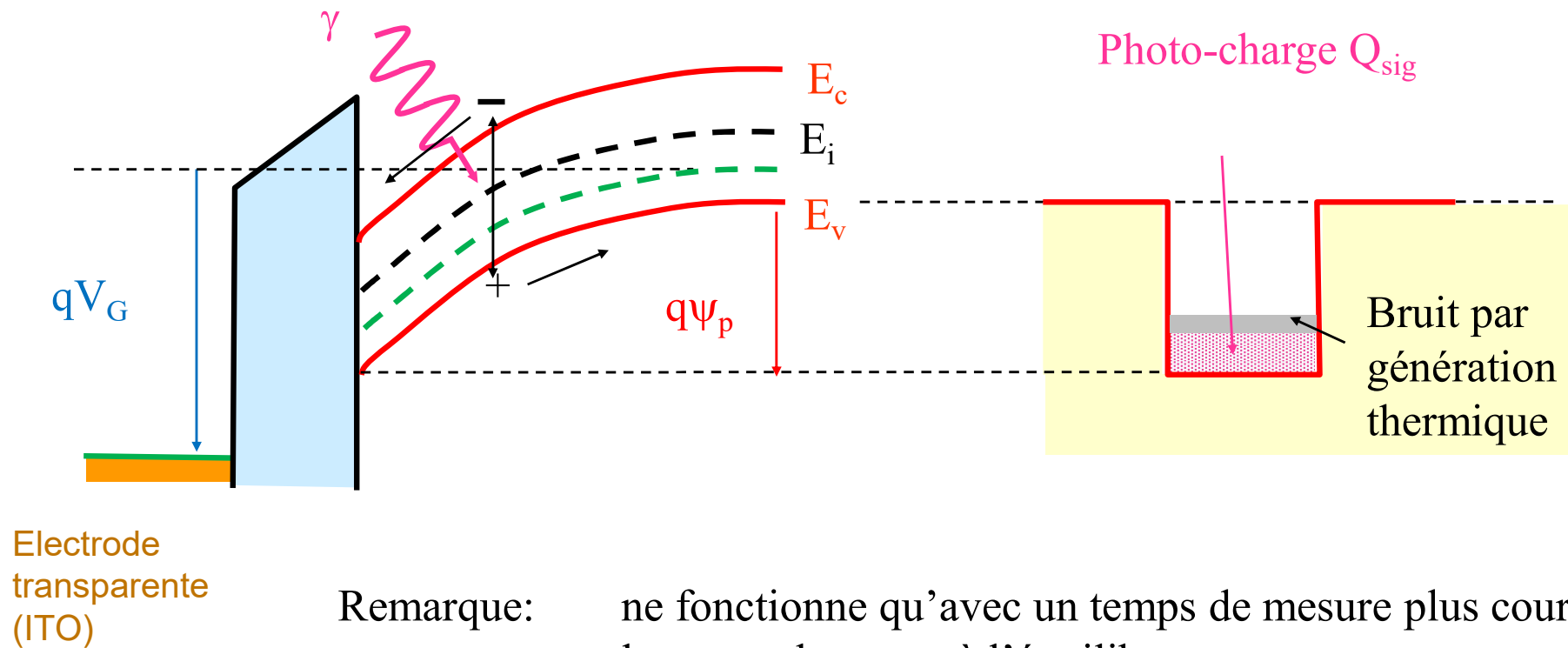
$$\rightarrow \psi_p = 7.35 \text{ V}$$

$$\psi_p \cong \frac{V_G - V_{M0}}{n} + 2\psi_B$$

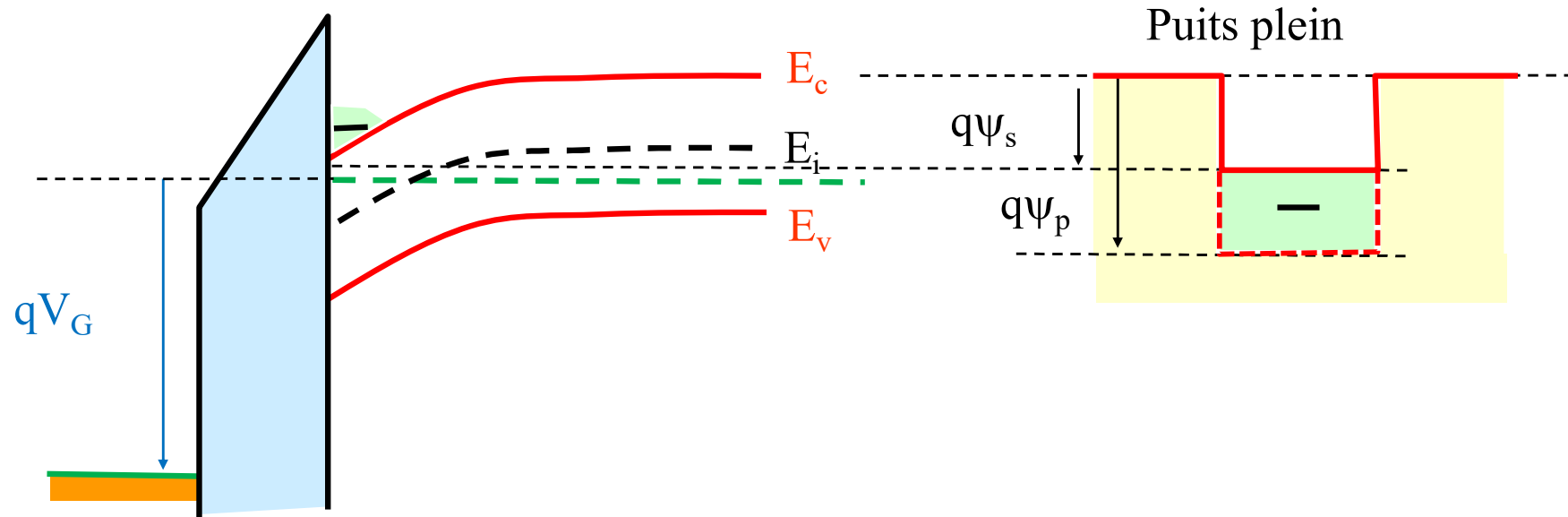
# Photo-génération et accumulation de charges

Appliquer soudainement un potentiel  $V_G > V_{M0}$ :

Les photo-électrons s'accumulent



# Influence des charges libres sur le potentiel de surface

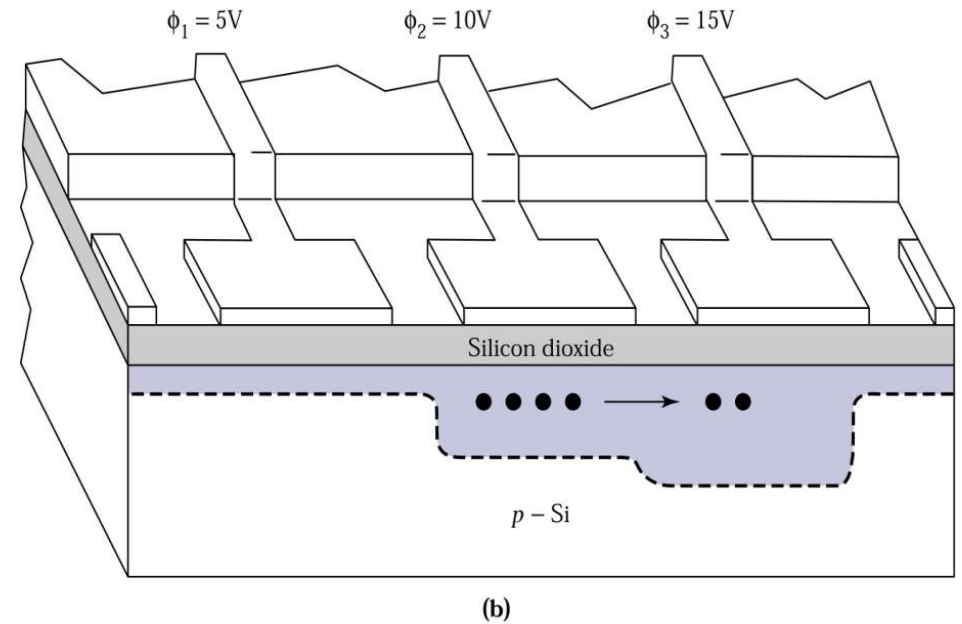
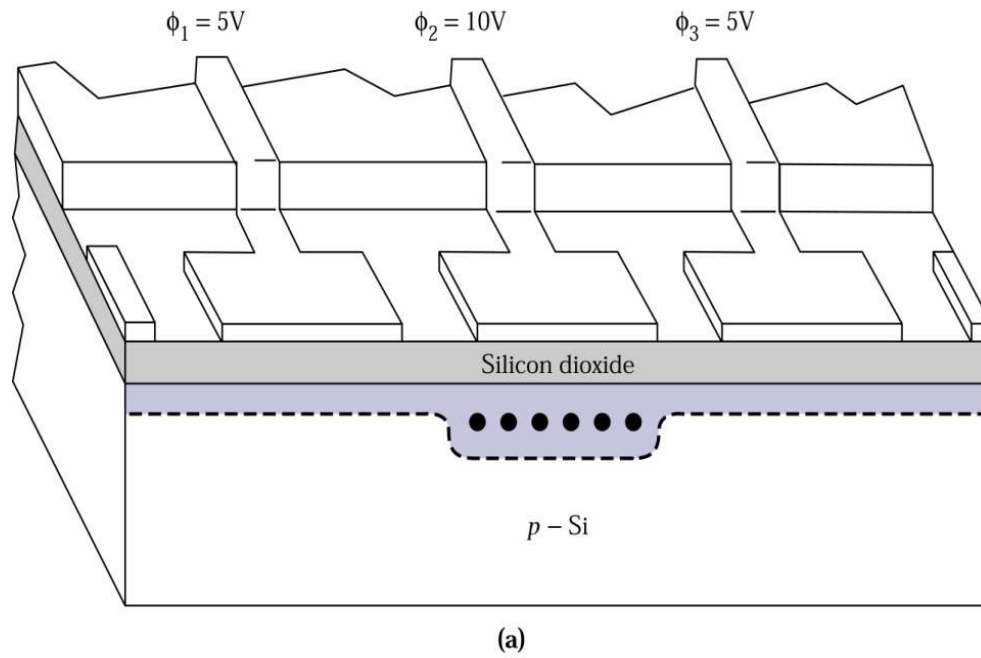


$$\psi_s \cong \underbrace{\frac{V_G - V_{M0}}{n} + 2\psi_B}_{\psi_p} + \frac{Q_n}{nC_{ox}}$$

$$Q_n < 0$$

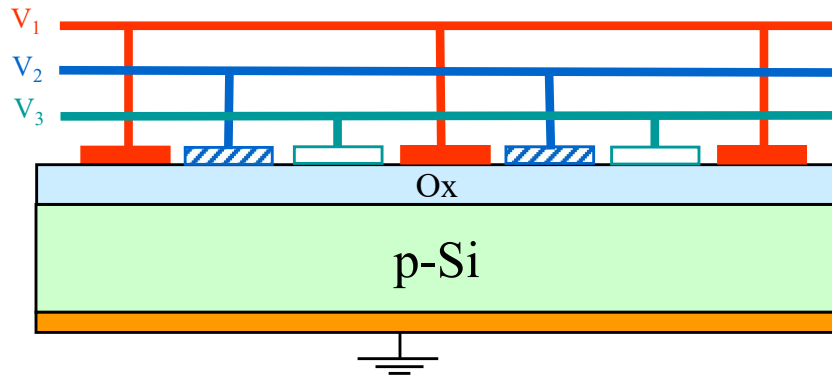
# Registre CCD: transfert d'information

S. Sze « *Semiconductor devices* »

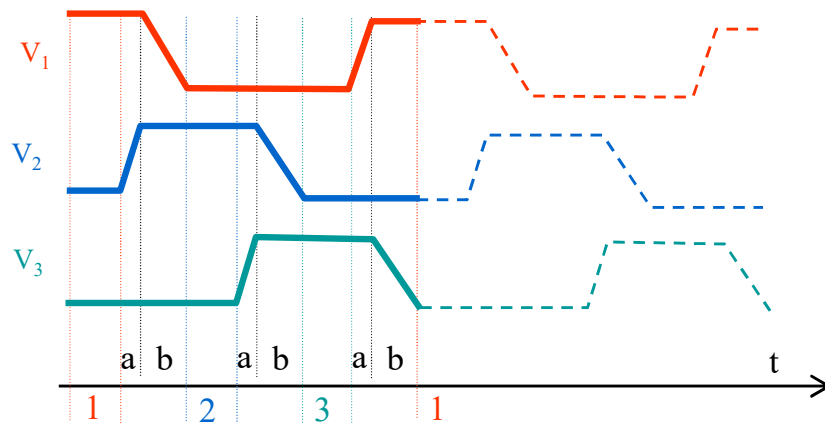


Avantage: l'information ne « s'étale » pas !

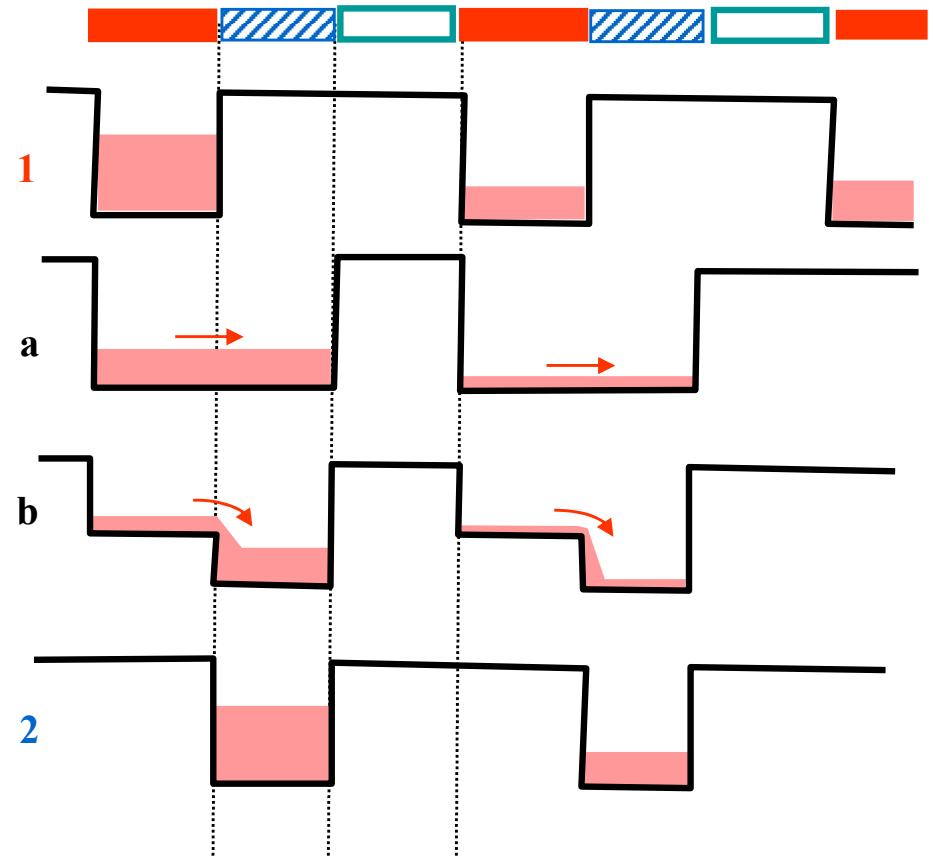
Structure CCD



Séquence de commande



Transfert de charge



# CCD: clocking et read-out (animations internet)

Three Phase CCD Clocking Scheme

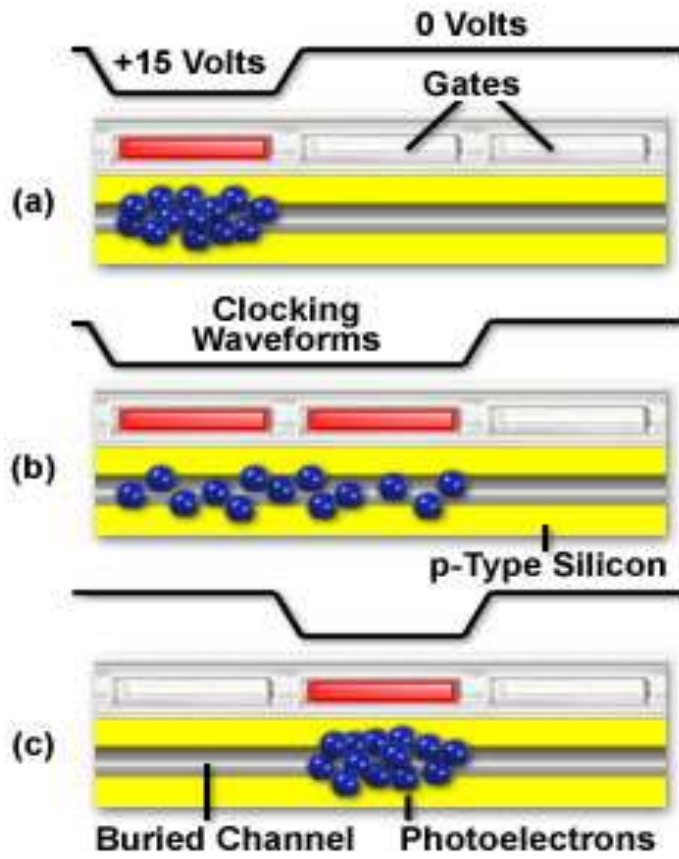


Figure 6

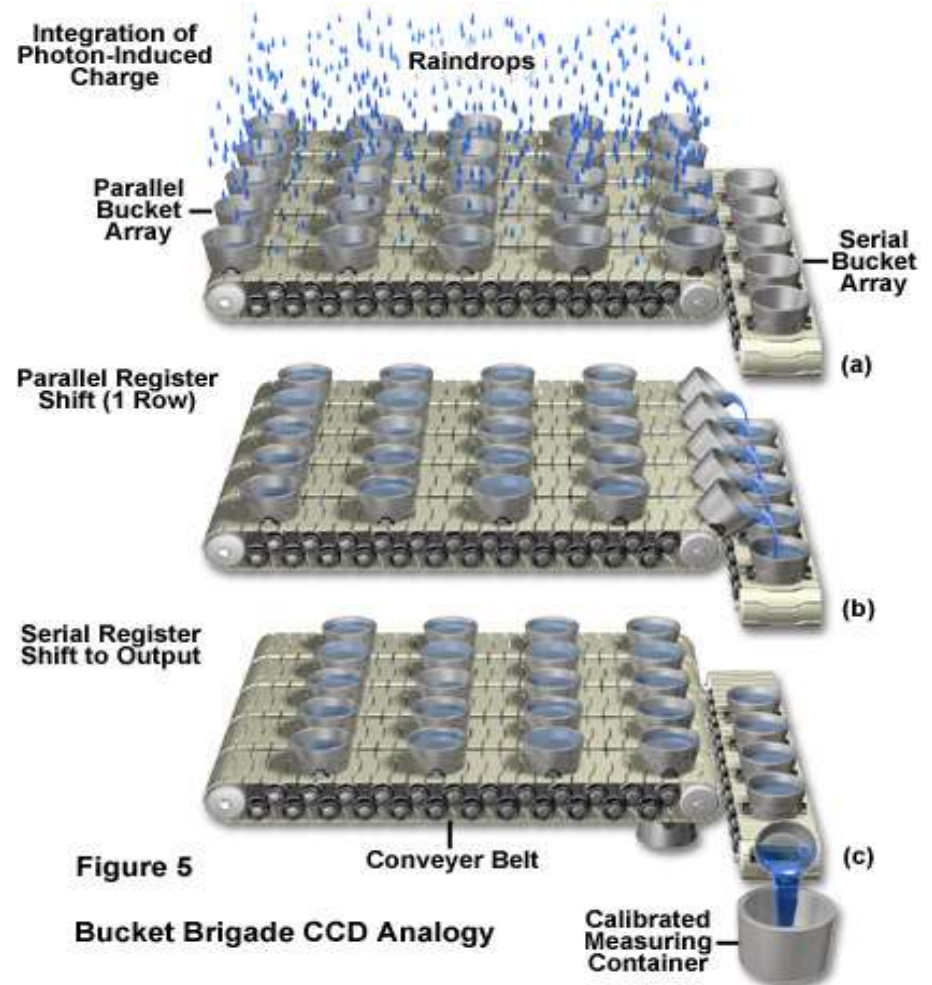
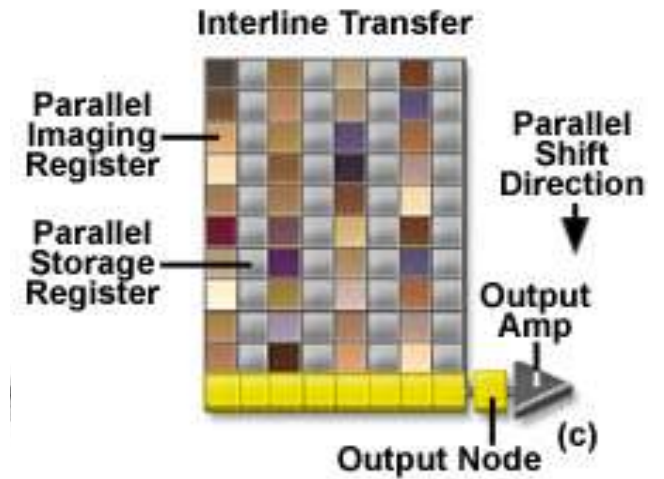
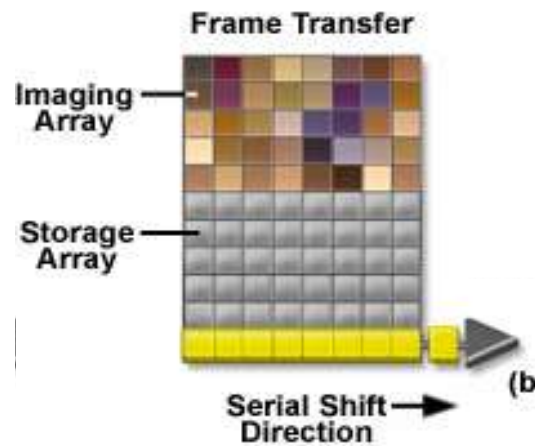
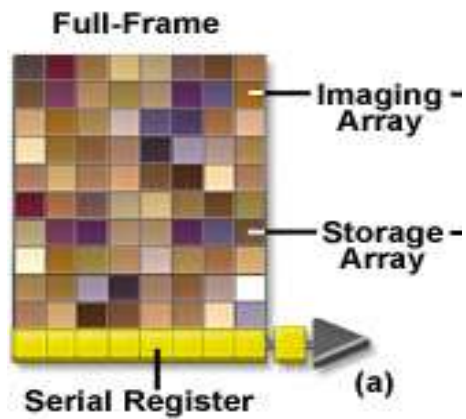


Figure 5

Bucket Brigade CCD Analogy

Calibrated Measuring Container

# Caméra CCD: read-out (animations internet)



**W.S. Boyle, G.E. Smith,  
prix Nobel de Physique 2009**

Capacité:

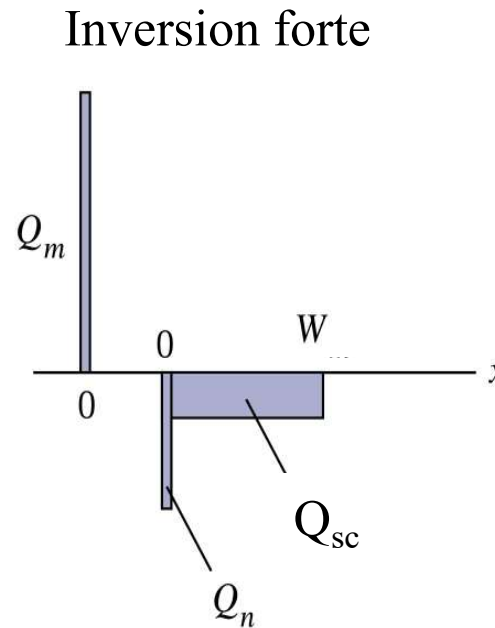
$$C \equiv \left| \frac{\partial Q_m}{\partial V_G} \right|$$

$$Q_m = -(Q_n + Q_{sc})$$

S. Sze « *Semiconductor devices* »

$Q_n$ : Charges libres  
à l'interface

Varie par accumulation  
des minoritaires générés  
thermiquement  
→ lent

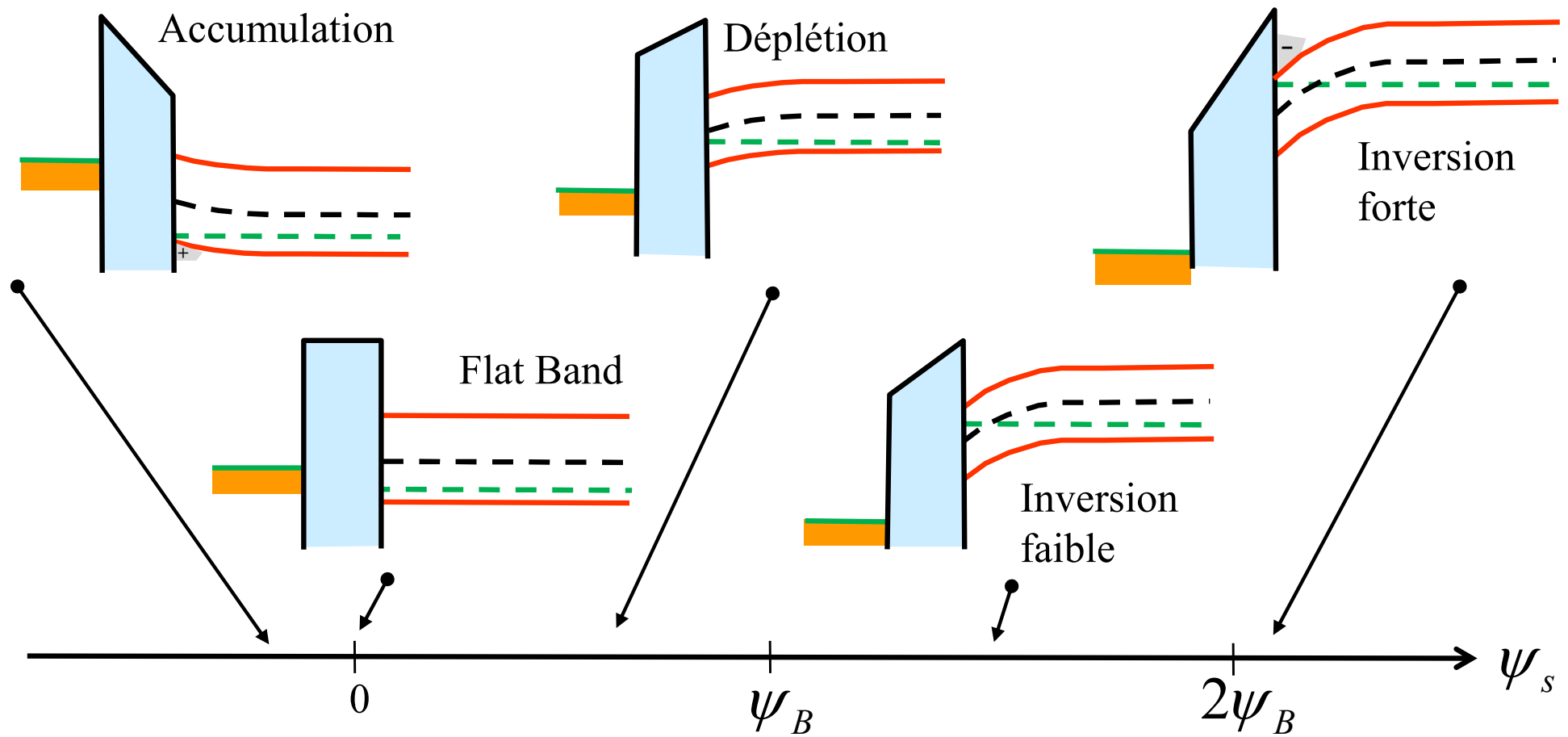


$Q_{sc}$ : Charges fixes dans  
la zone de déplétion

Varie par retrait  
des majoritaires  
→ rapide

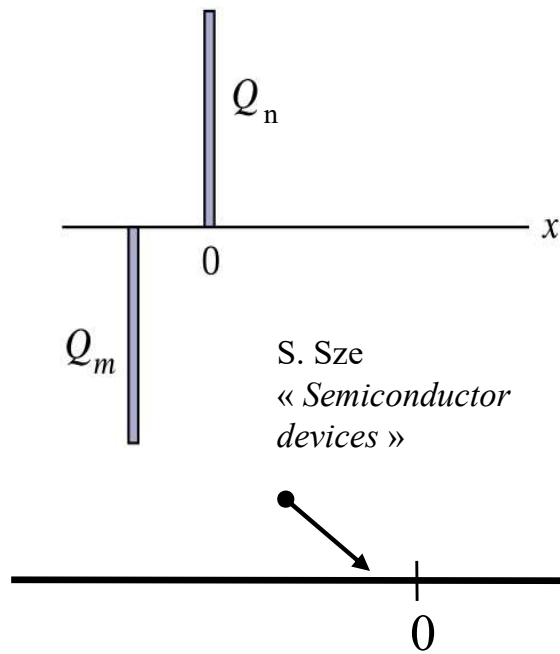


Principe: pas de courant  $\rightarrow$  énergie de Fermi  $E_F$  constante



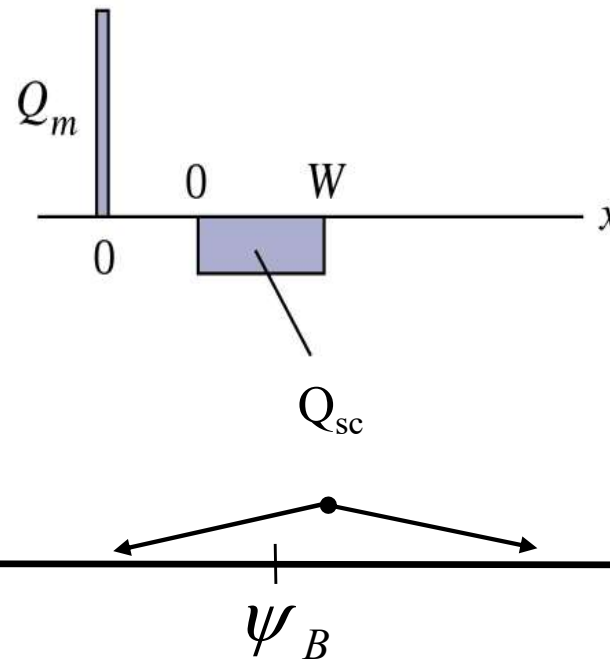
# Charges fixes et charges libres: approximation

**Accumulation**



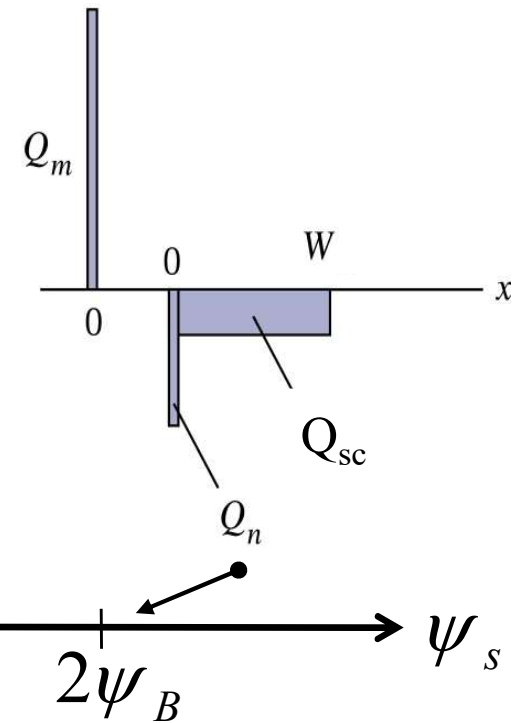
Charge d'espace  $Q_{sc}$ :  
Charge de surface  $Q_n$ :  
Charge  $Q_m$ :

**Déplétion et inversion faible**

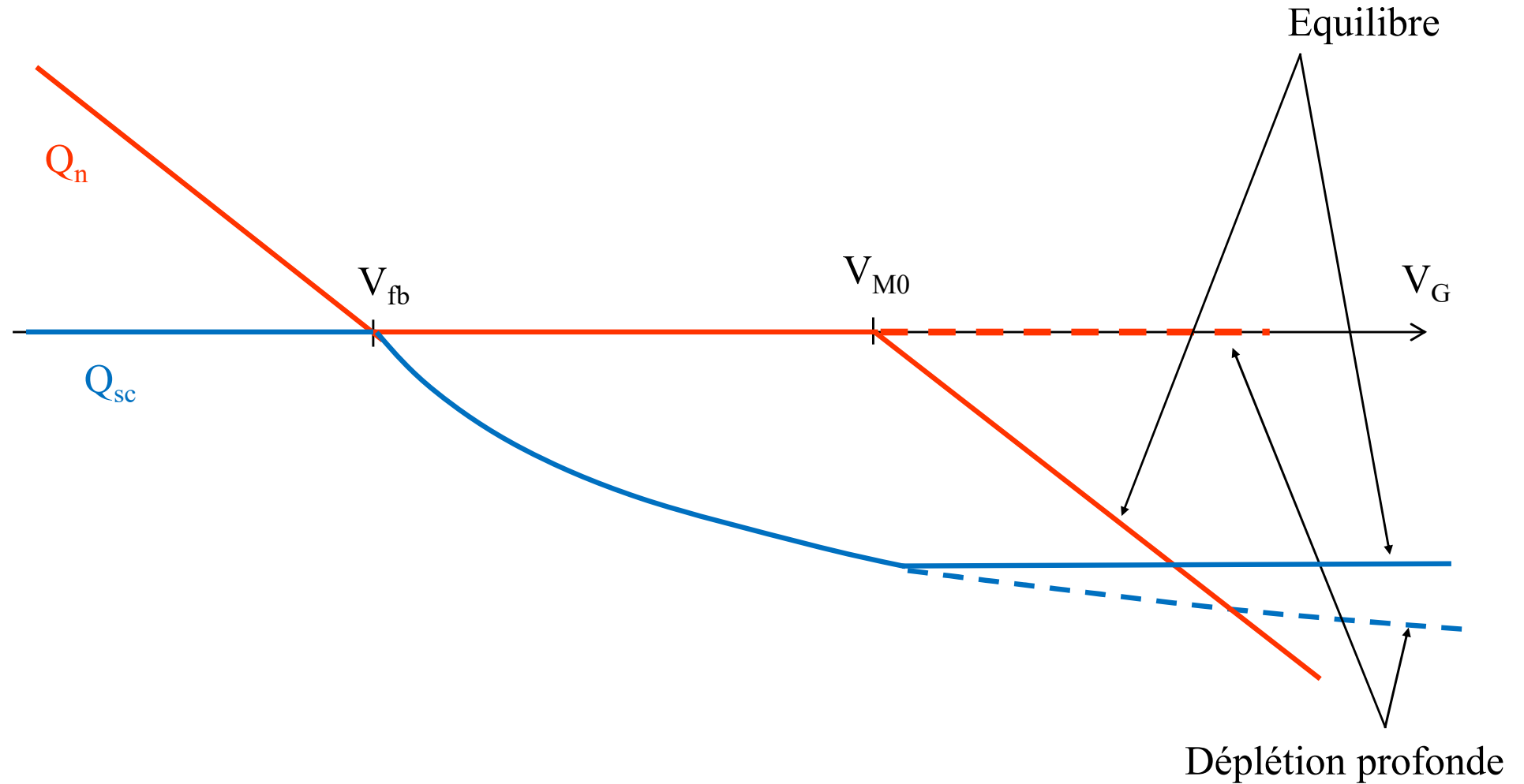


charges fixes dans la zone de déplétion  
charges libres en surface du semiconducteur  
charges libres en surface du métal.

**Inversion forte**

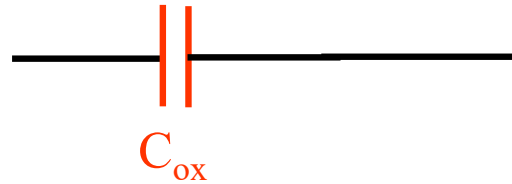


# Comportement qualitatif des charges: cas statiques et dynamiques



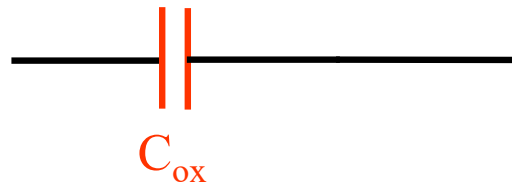
# Capacité MOS: solutions intuitives

Accumulation



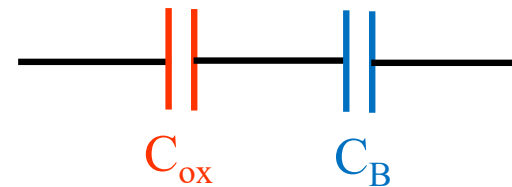
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}}$$

Inversion forte  
(basses fréquences)



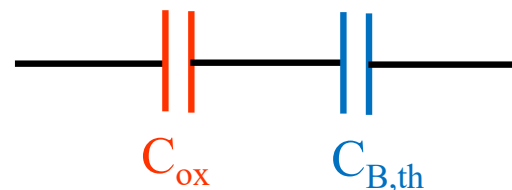
$$C_B = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W}$$

Déplétion,  
inversion faible,  
déplétion profonde



$$C_{B,th} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W_{threshold}}$$

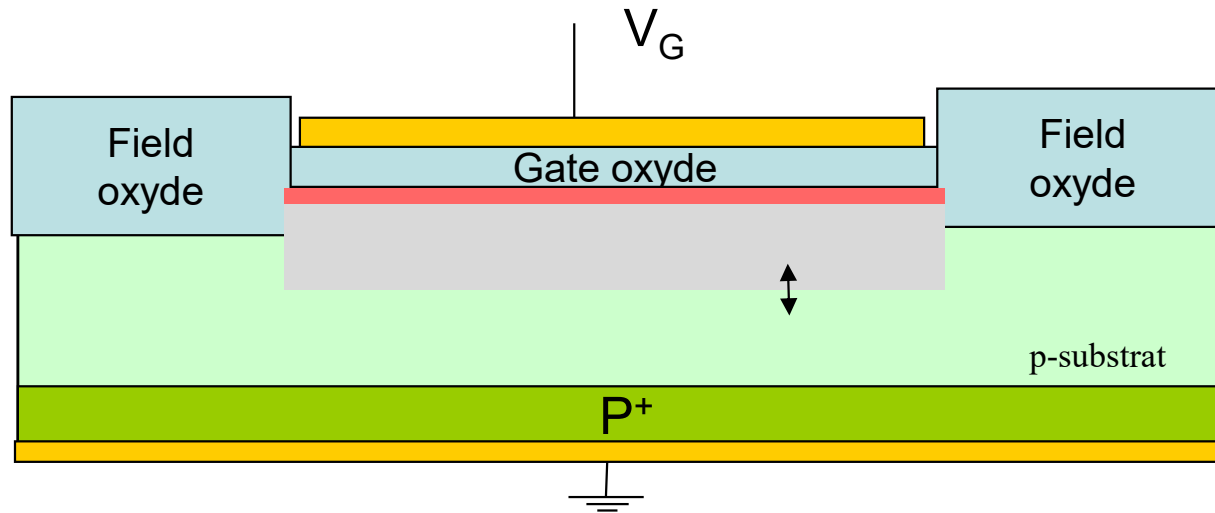
Inversion forte  
(hautes fréquences)



$$C_{mos} = \frac{\epsilon_0}{\left( \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \frac{W}{\epsilon_s} \right)}$$

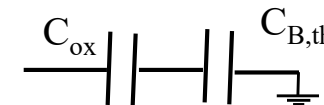
# Modèle de capacité sans source ni drain

Une tension de bias  $V_G$  supérieure au threshold est appliquée sur le gate. Un petit signal haute fréquence (HF) est superposé à la tension de bias pour mesurer la capacité différentielle.



Quel modèle de capacité ?

“sans” source et drain:

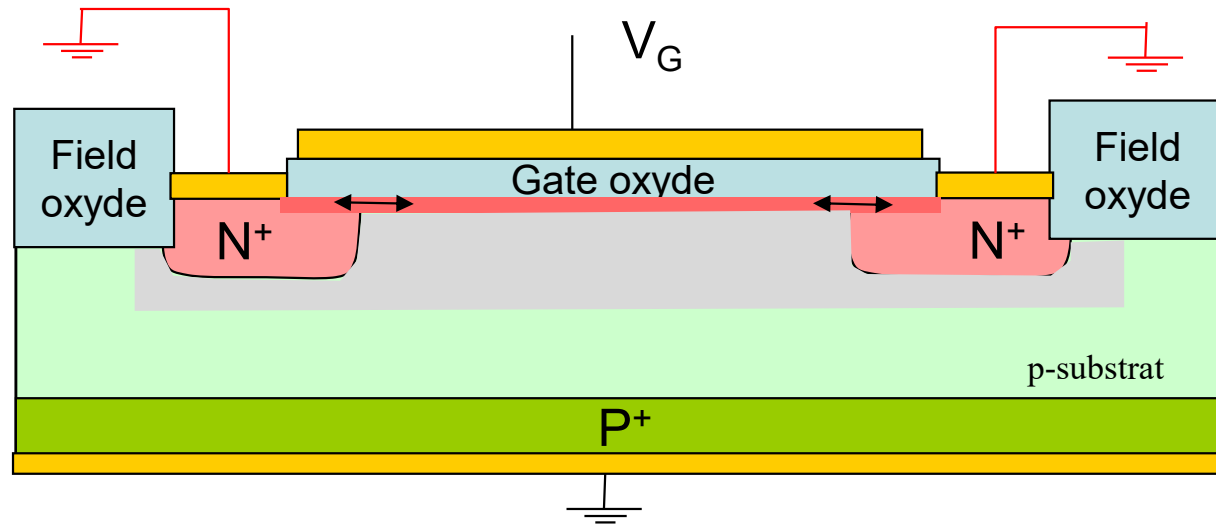


$C_{inv-f}$

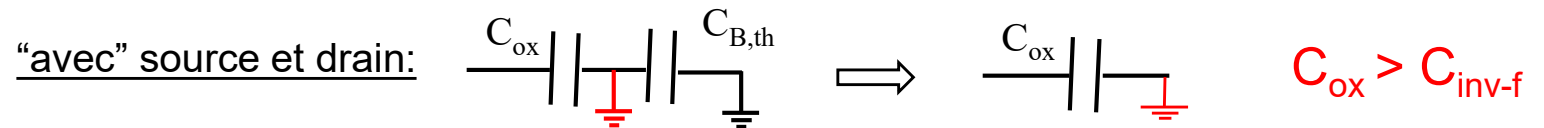
Les charges libres n'ont pas le temps de s'accumuler.  
 → les charges fixes de la zone de dépletion doivent varier

# Modèle de capacité avec source et drain

Une tension de bias  $V_G$  supérieure au threshold est appliquée sur le gate. Un petit signal haute fréquence (HF) est superposé à la tension de bias pour mesurer la capacité différentielle.

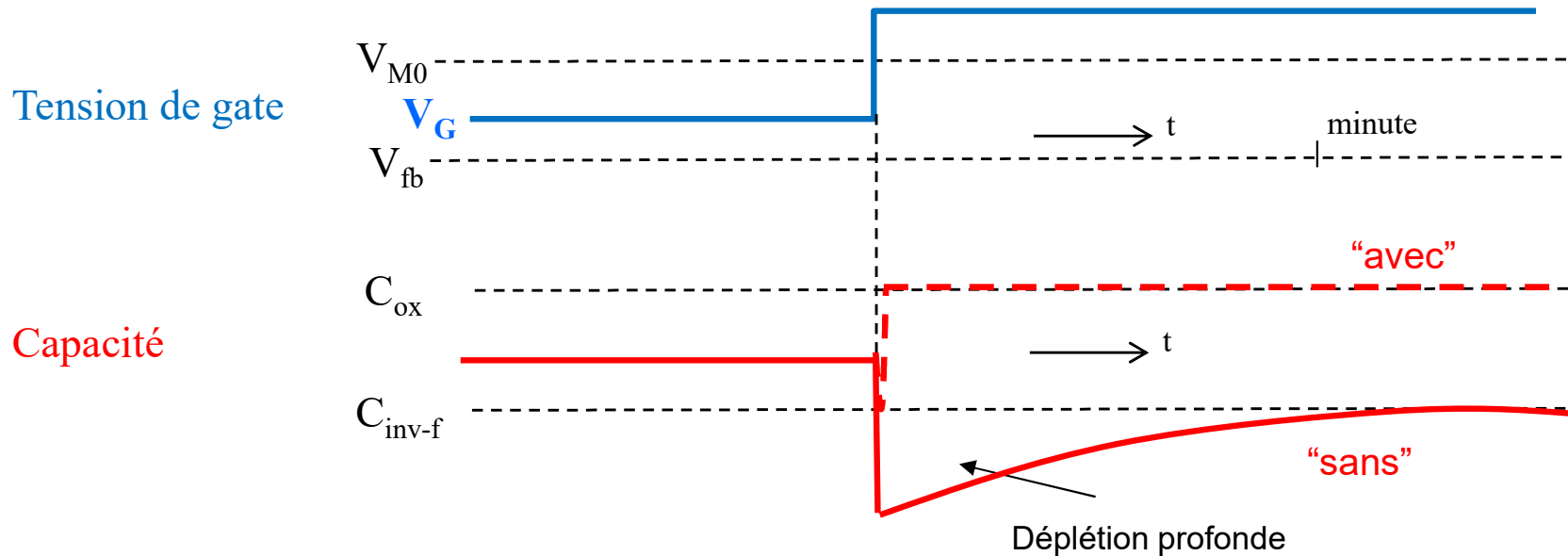


## Quel modèle de capacité ?

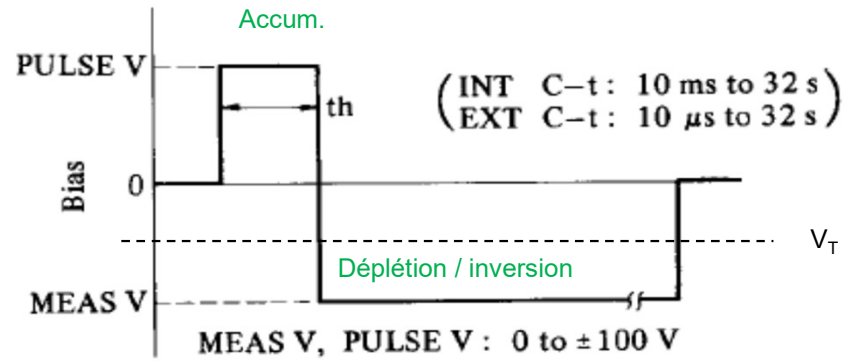
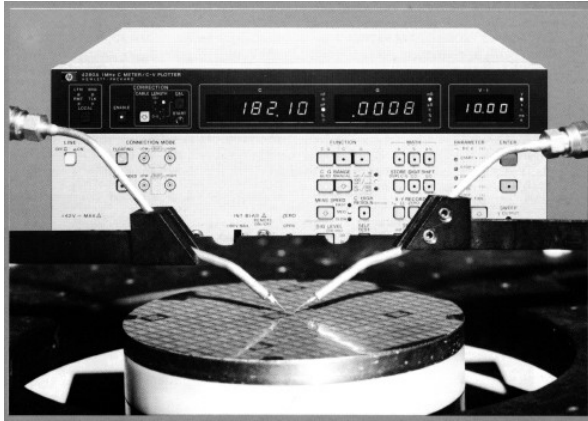


Les électrons peuvent venir rapidement dans le canal à partir de la source et du drain

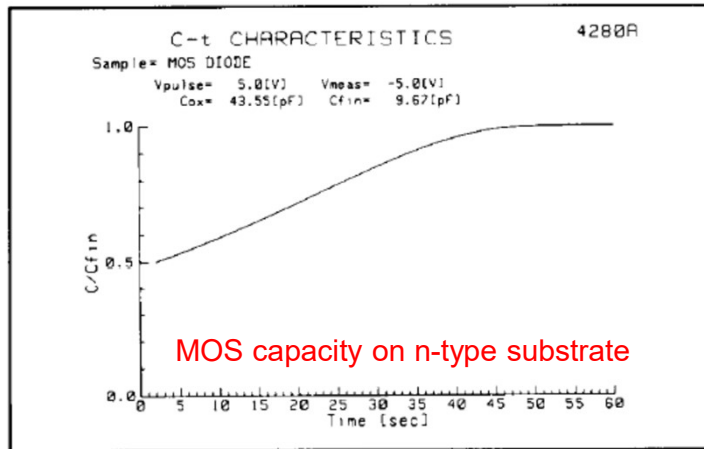
La tension de bias  $V_G$  suit l'évolution temporelle ci-dessous. Le petit signal HF est maintenu tout au long de l'expérience pour mesurer la capacité différentielle.  
 Esquissez l'évolution de cette capacité pour les structures « sans » et « avec » source et drain.



HP 4280 A:



n-type substrate



0

60 sec.

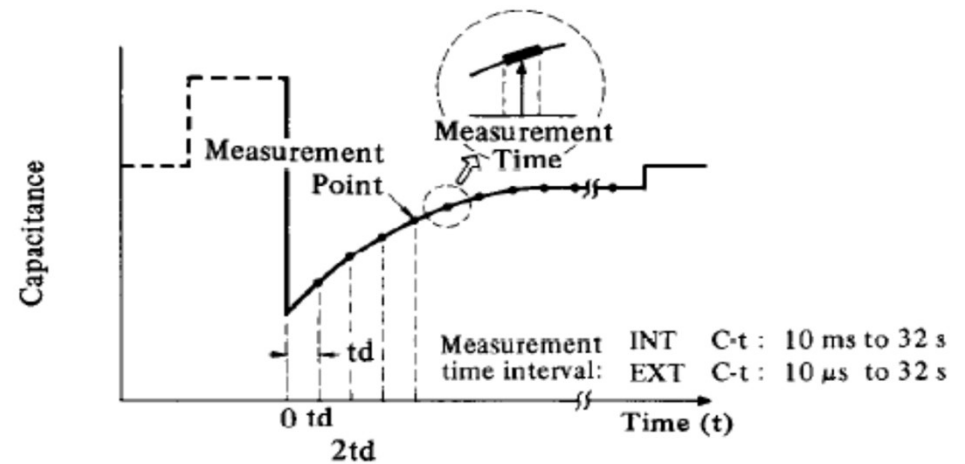


Figure 3-1 C-t Measurement



Répondez aux questions de réflexion 9.2 et 9.3 (script fin du chapitre 9)  
**mais pour une jonction MOS sur substrat n.**

9.2-n	En fonction du potentiel de surface $\psi_s$ , décrivez les modes de fonctionnement d'une jonction MOS sur substrat n. Esquissez le schéma de bande dans la structure.
9.3-n	En fonction du potentiel de surface $\psi_s$ , esquissez les charges dans une jonction MOS sur substrat n. Comment sont-elles modélisées ? Décrivez le champ électrique et les variations de potentiel qu'elles provoquent dans la structure MOS.