

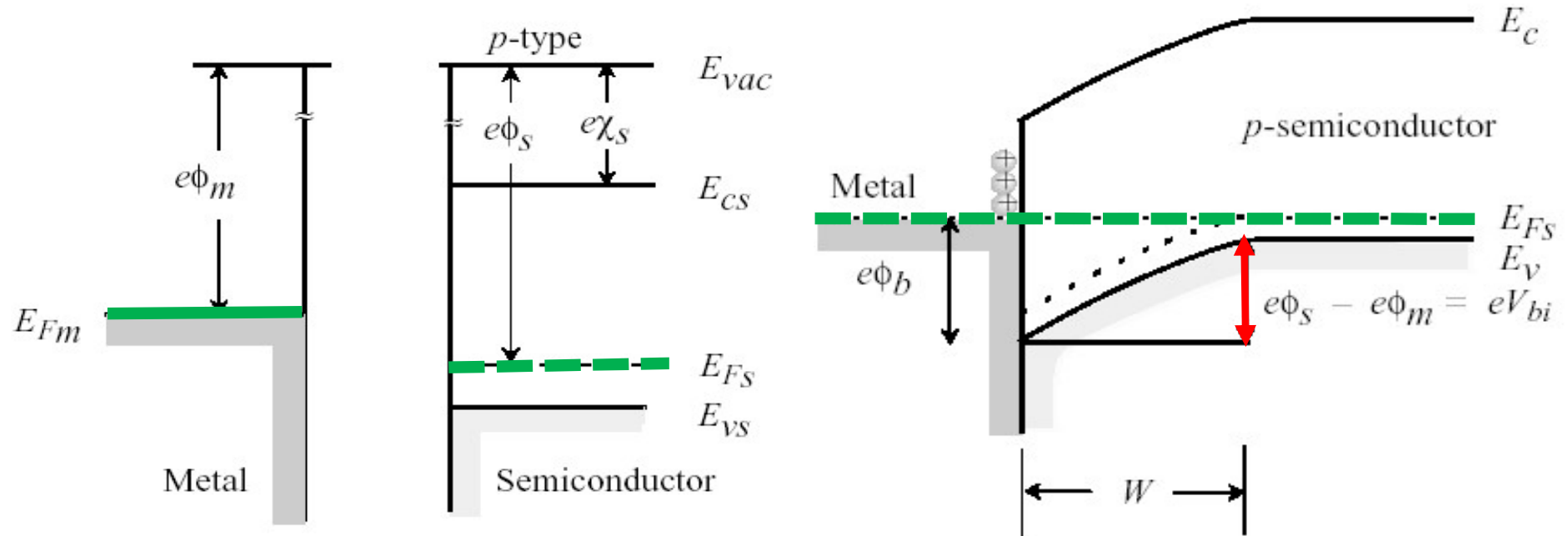
PHYSIQUE DES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

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

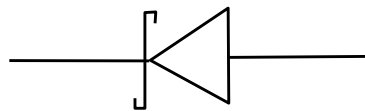
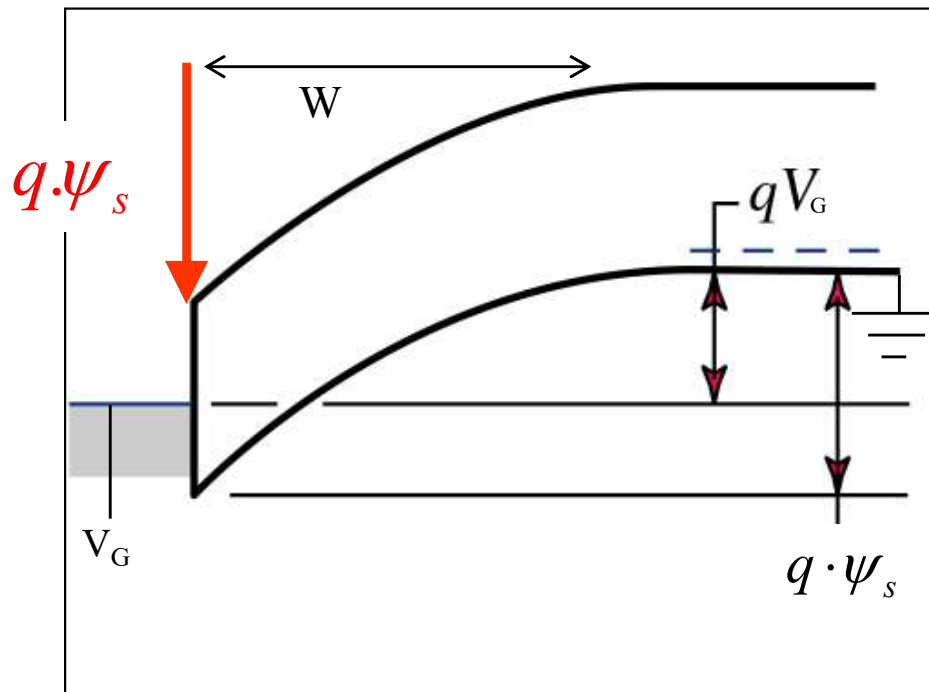
$$V_{bi} = \phi_s - \phi_m$$

J. Singh « *Semiconductor devices* »

Jonction Schottky sur substrat p: hors équilibre

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

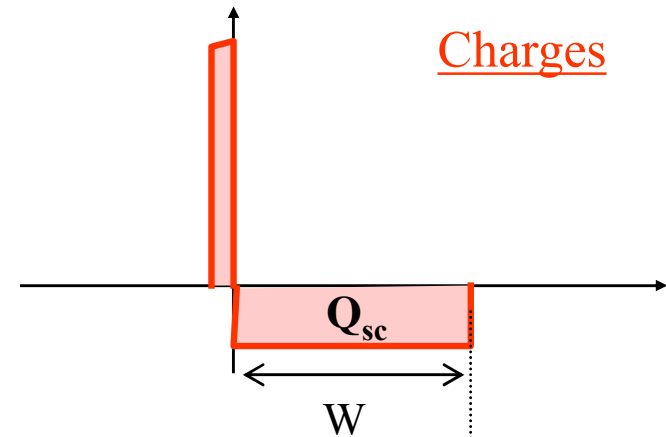
Avec tension de bias $V_G > 0$ sur le métal



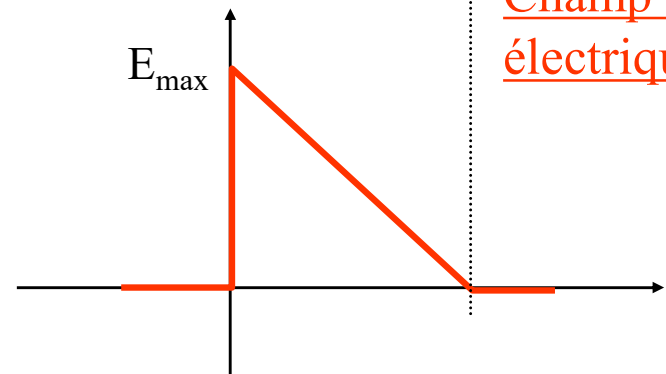
S. Sze
« Semiconductor
devices »

Déplétion

Charges



Champ
électrique



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:

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

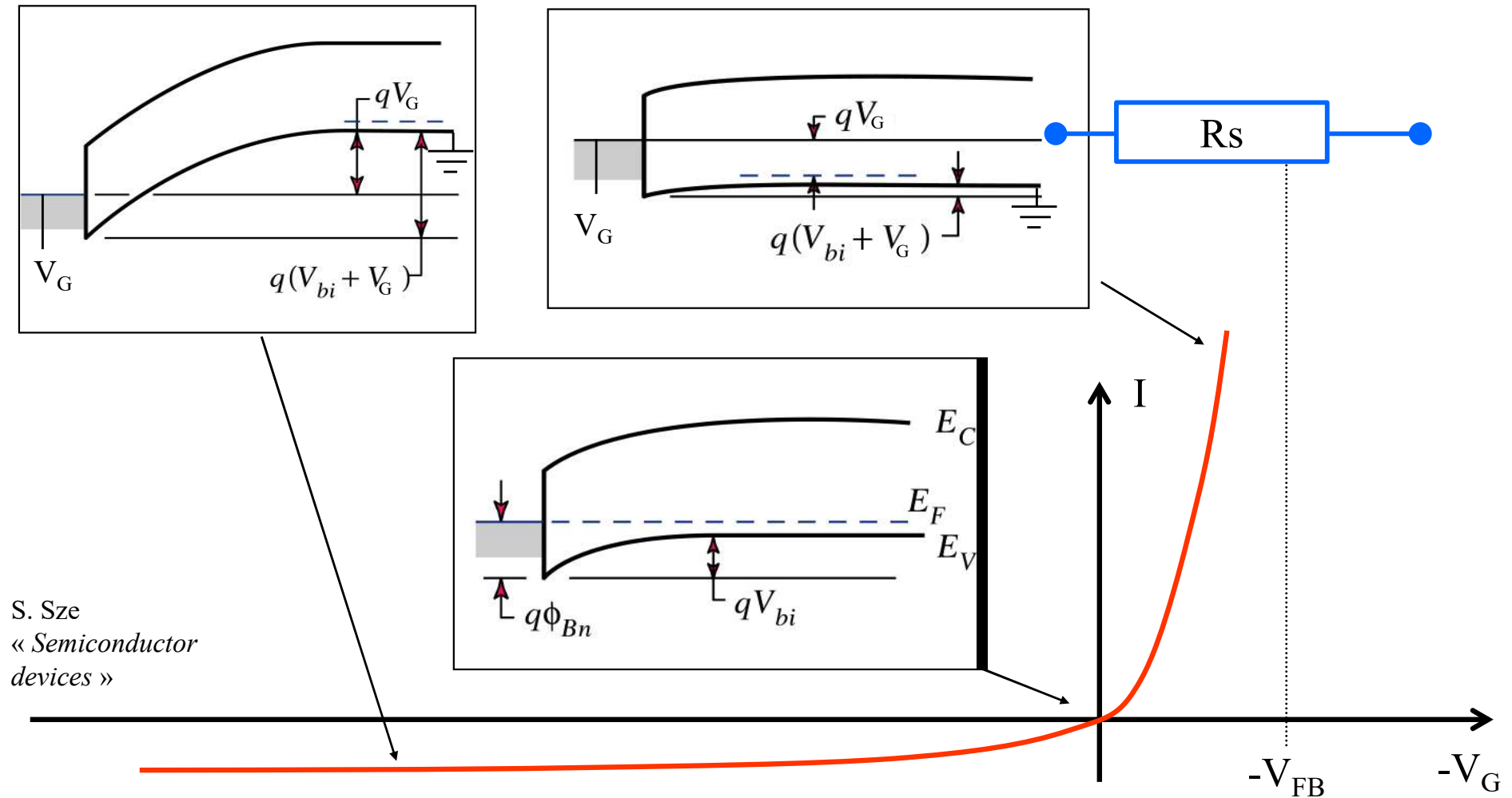
Charges d'espace:

$$\begin{aligned} Q_{sc} &= -qN_A \cdot W = -\sqrt{2qN_A \cdot \varepsilon_0\varepsilon_s} \cdot \sqrt{\psi_s} \\ &= -2 \cdot C_{B,0} \cdot \sqrt{\psi_{s,0}} \cdot \sqrt{\psi_s} \end{aligned}$$

Champ électrique maximal:

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

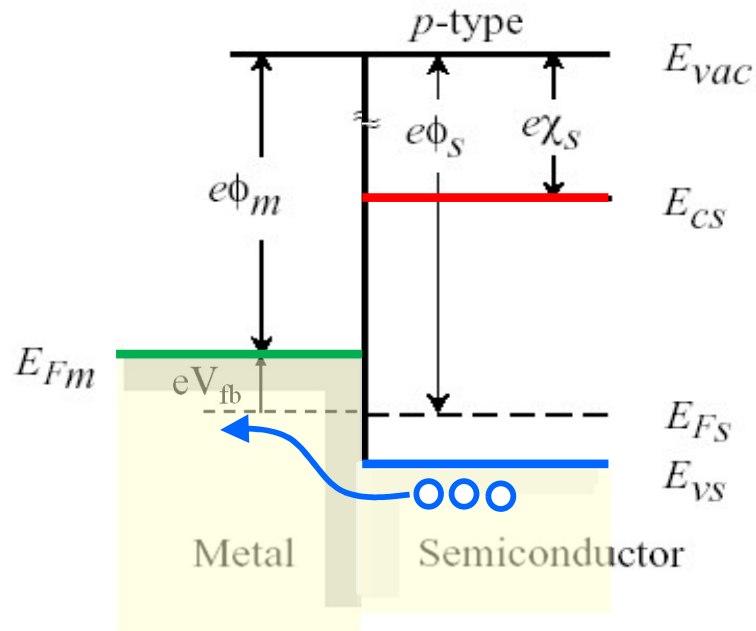
Jonction Schottky sur substrat p: courbe I(V)



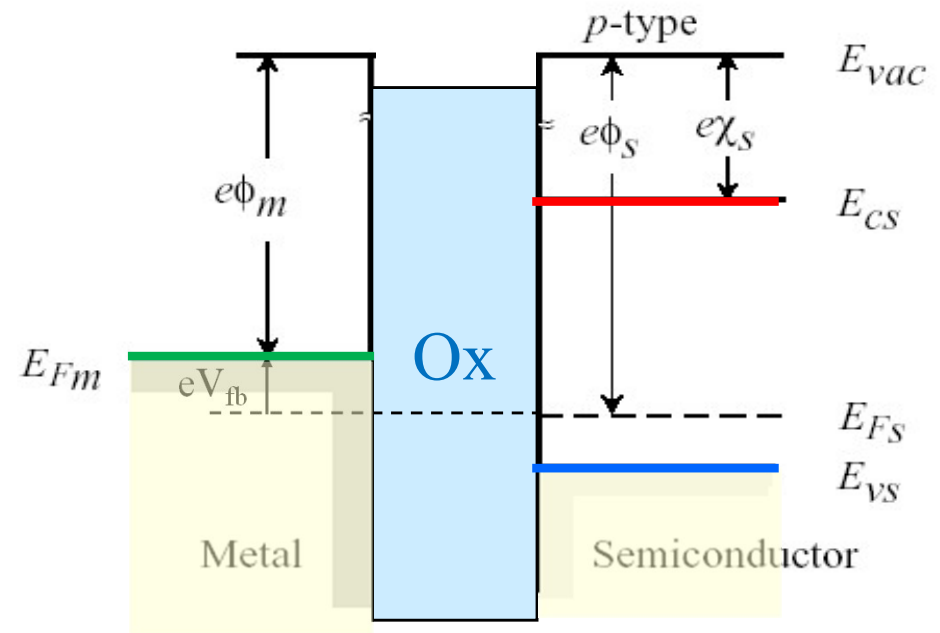
S. Sze
« Semiconductor
devices »

Jonction Schottky et MOS: « Flat Band »

J. Singh « *Semiconductor devices* »



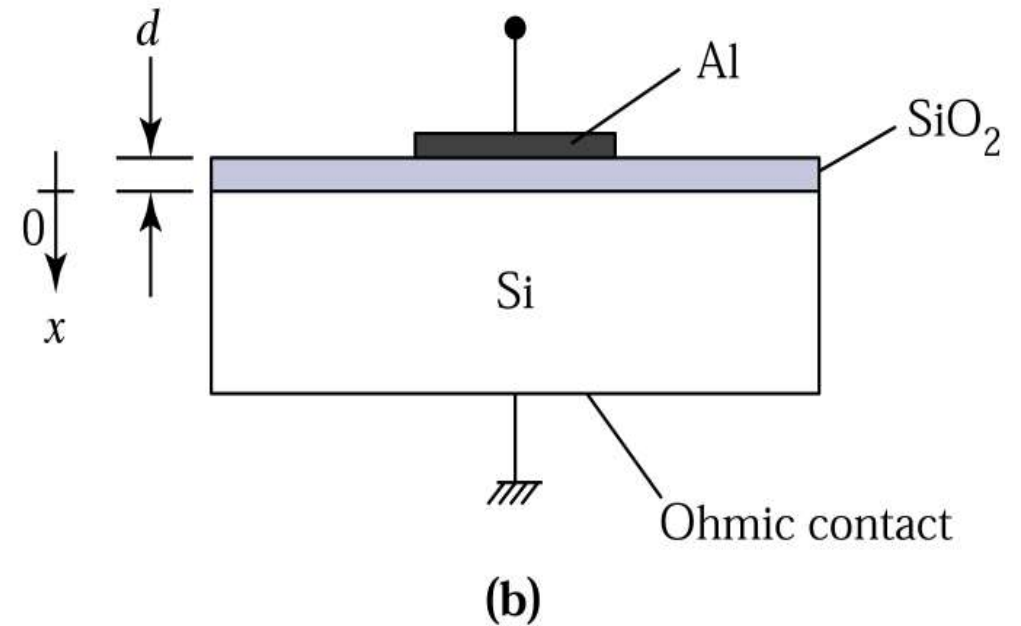
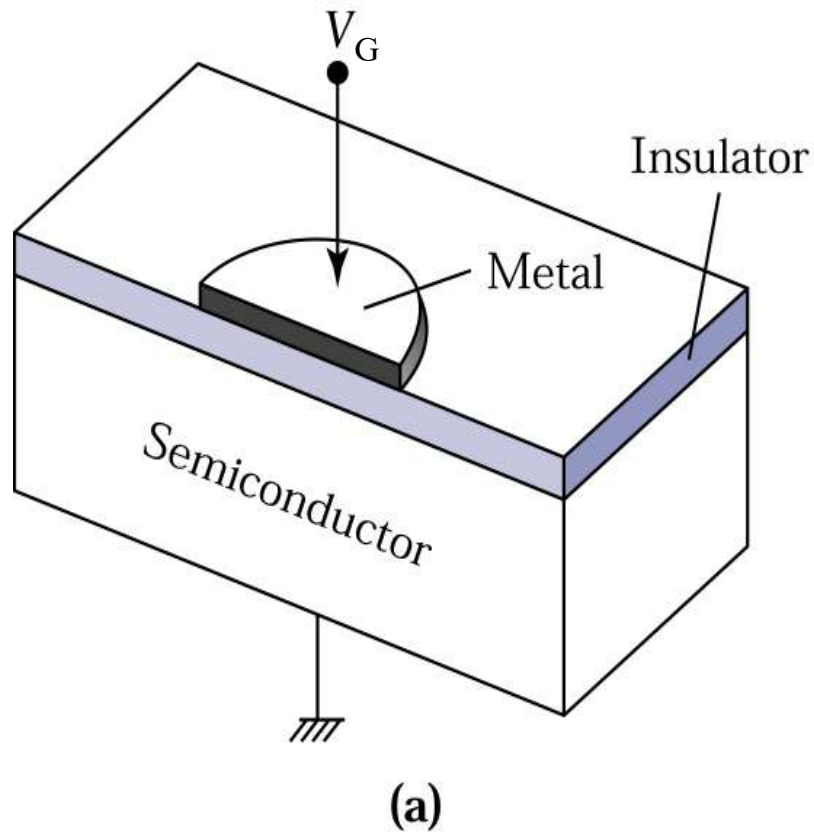
Jonction Schottky:
Impossible car courant diverge



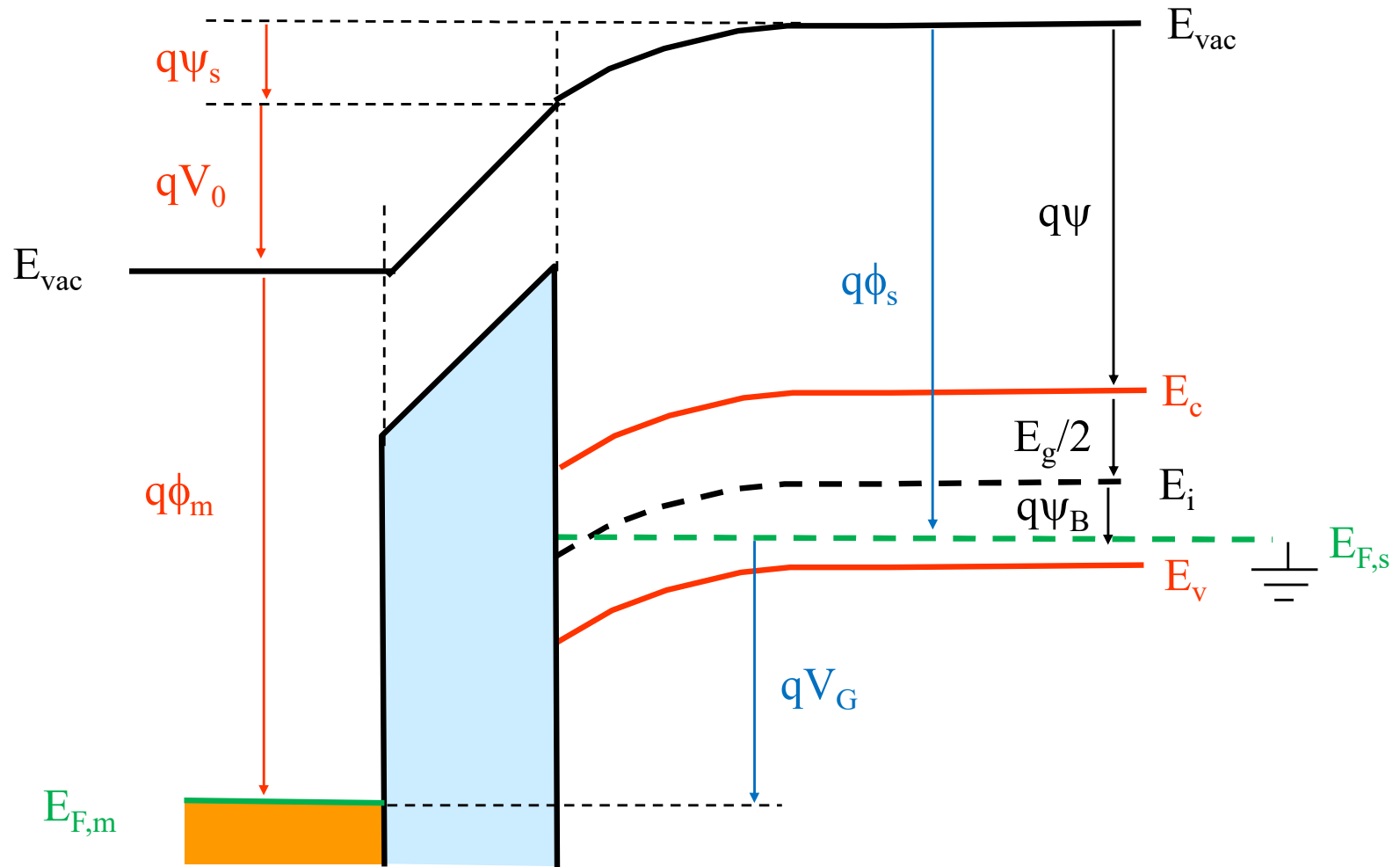
Jonction Métal/Oxyde/Semi-conducteur:
→ Pas de courant

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

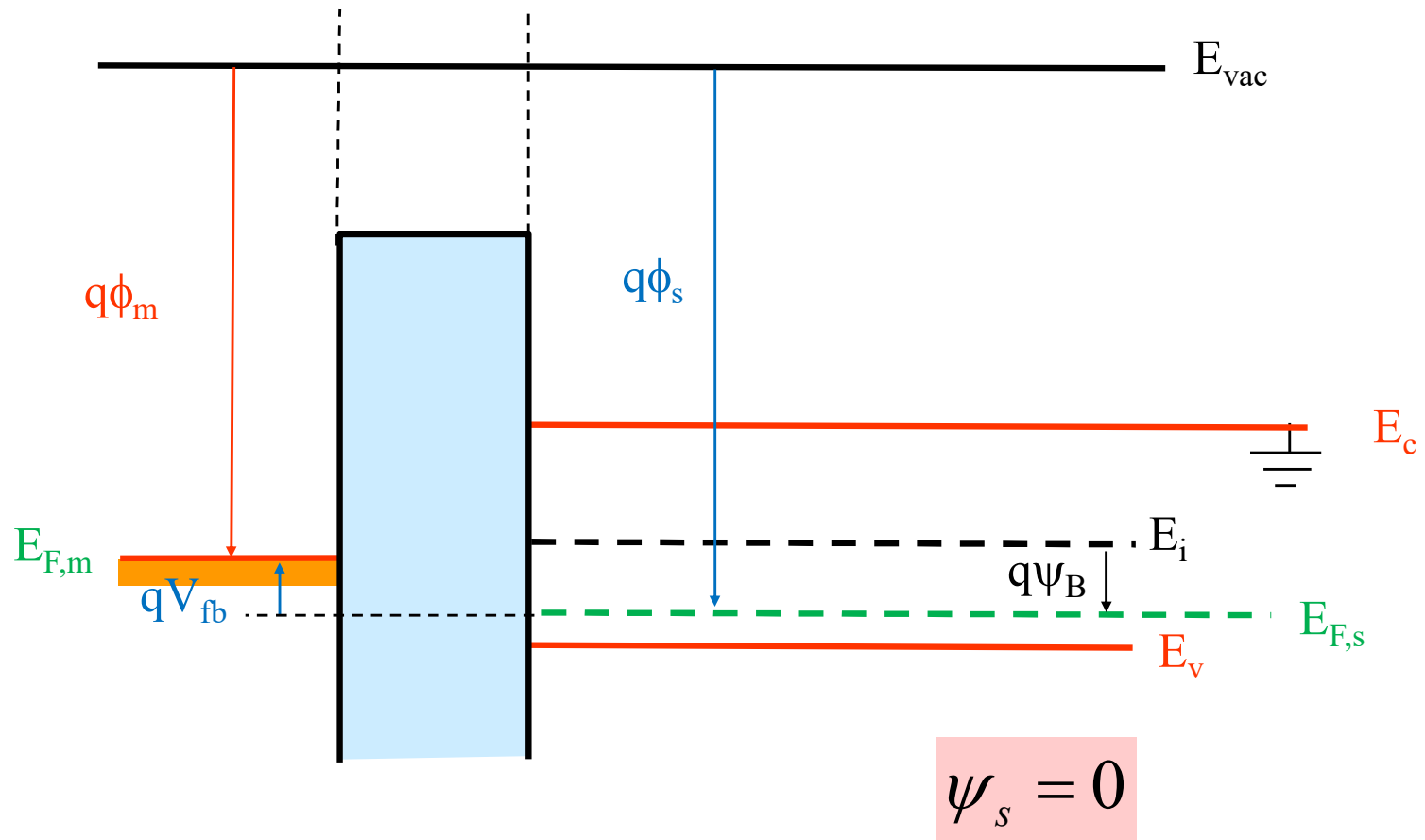
Saut de potentiel sur l'oxyde:

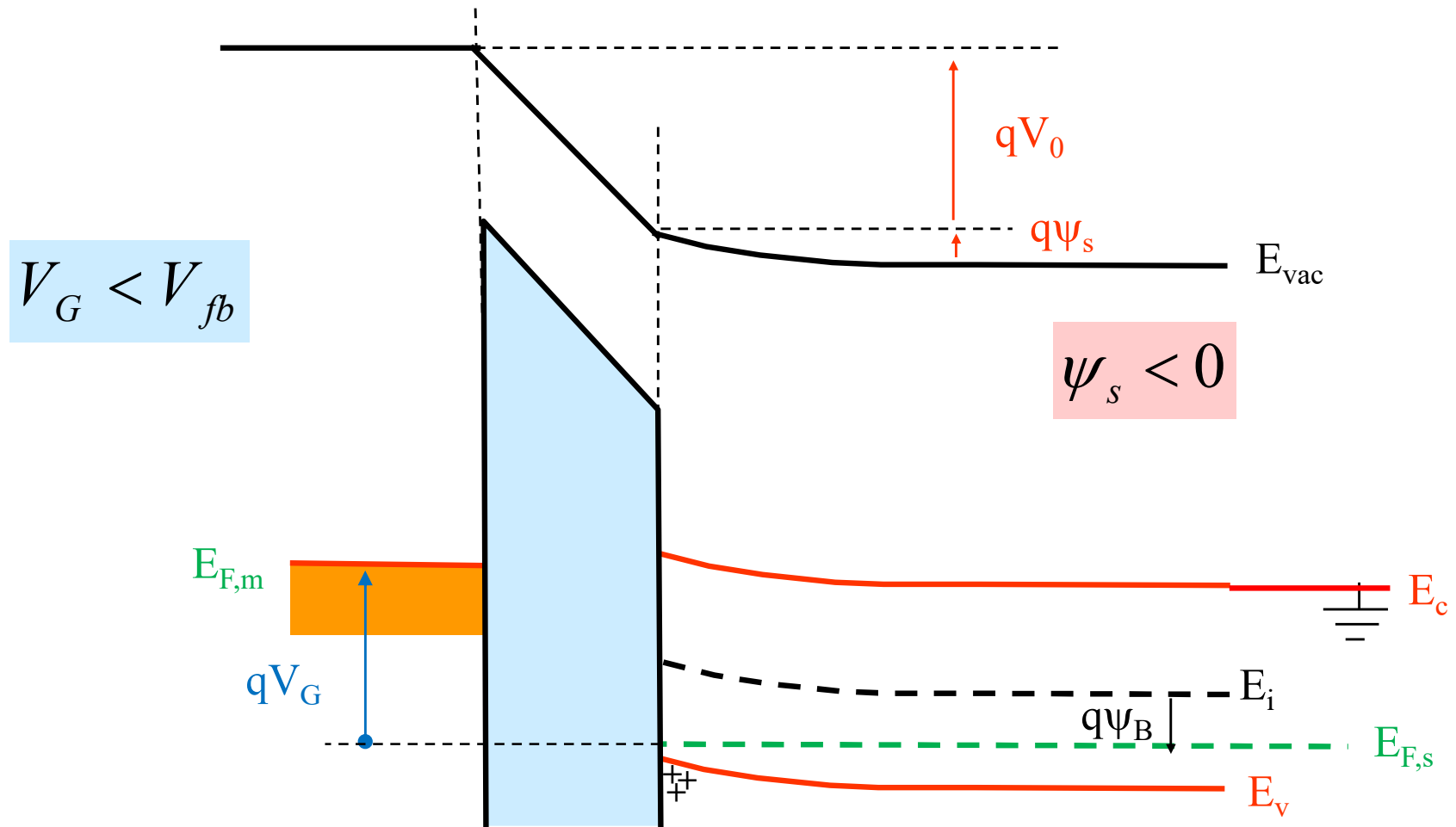
$$V_0$$

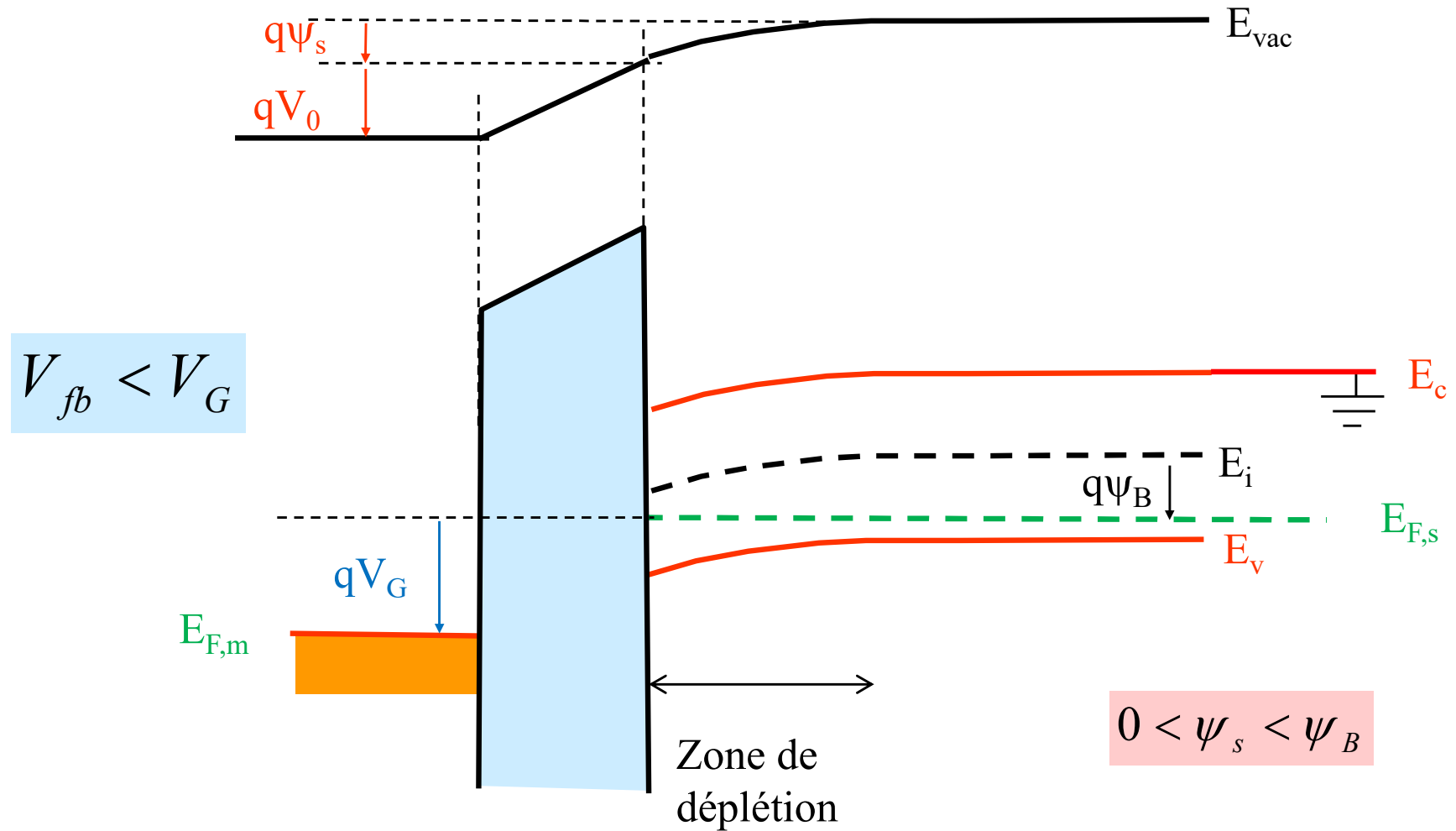
Tension de bias sur le métal:

$$V_G$$

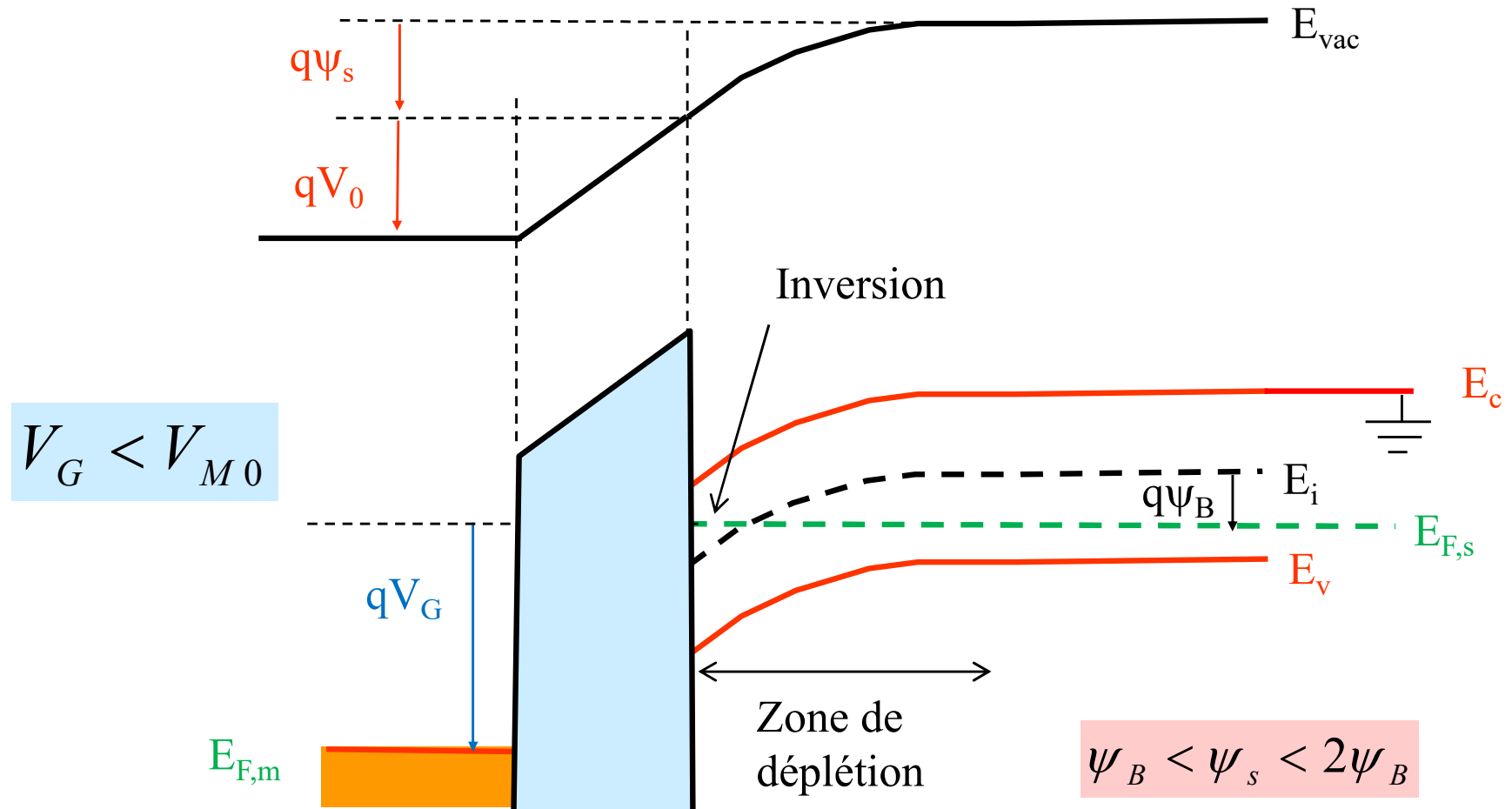
$$V_G = V_{fb} = \phi_m - \phi_s$$



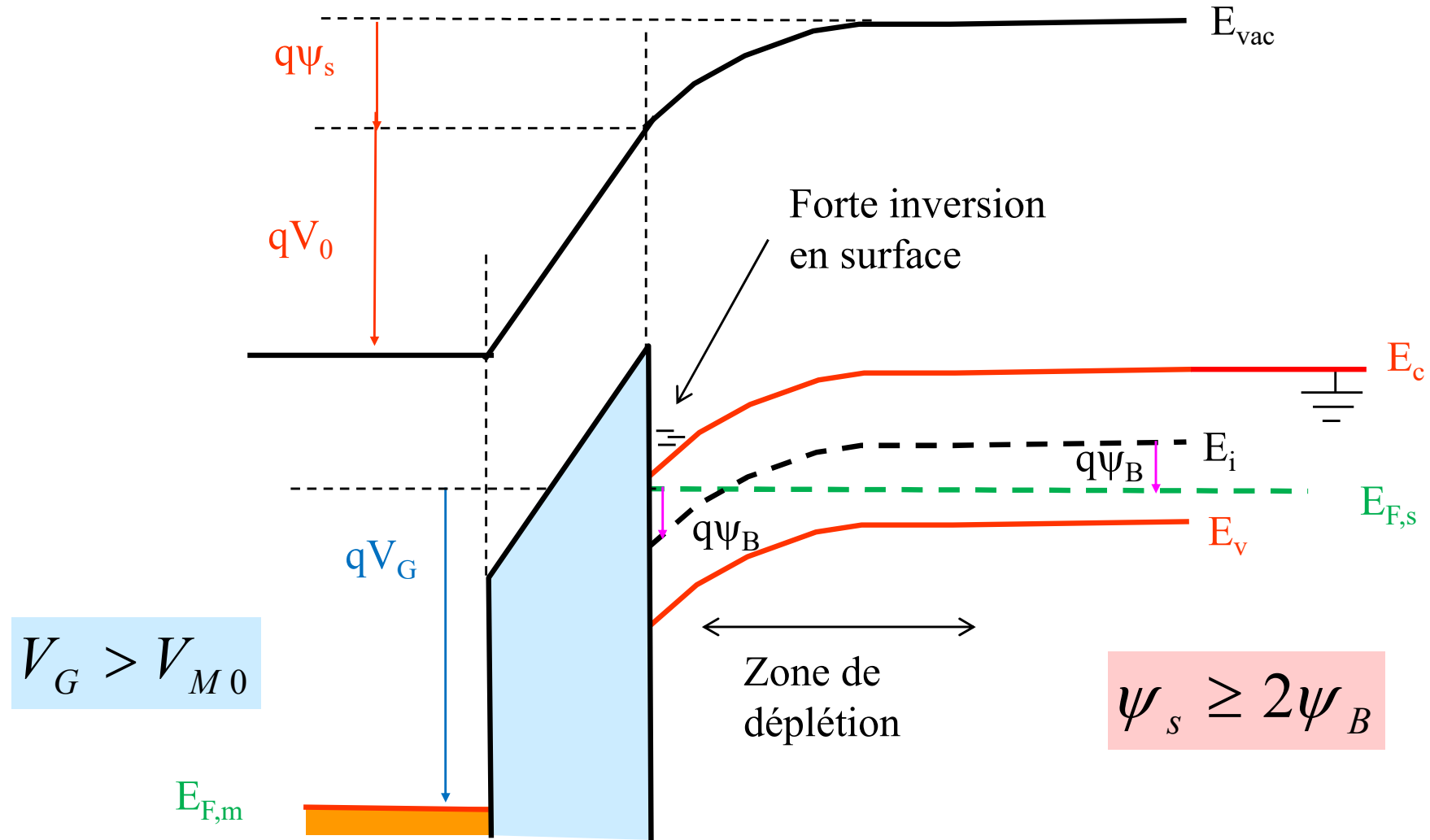




Inversion faible

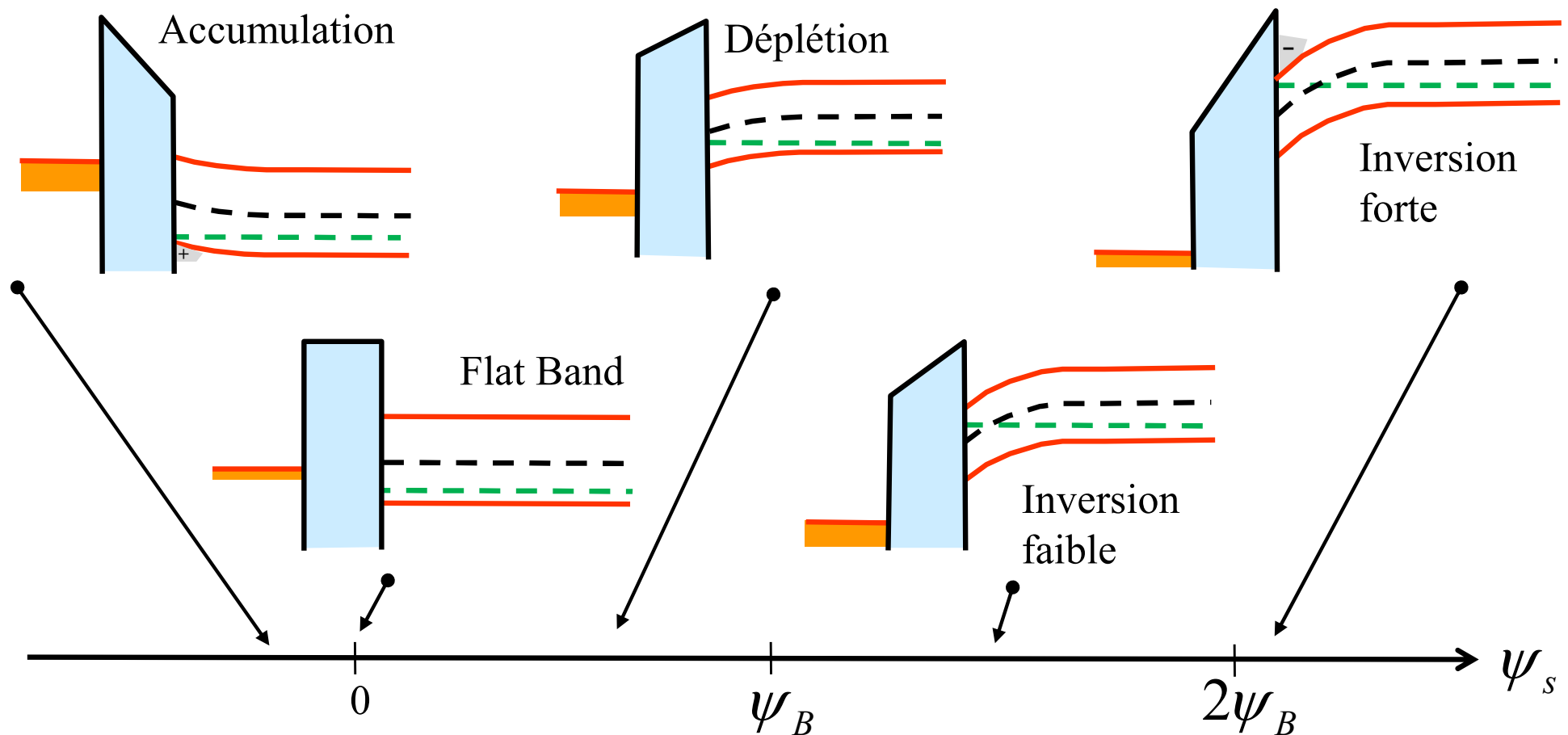


Inversion forte

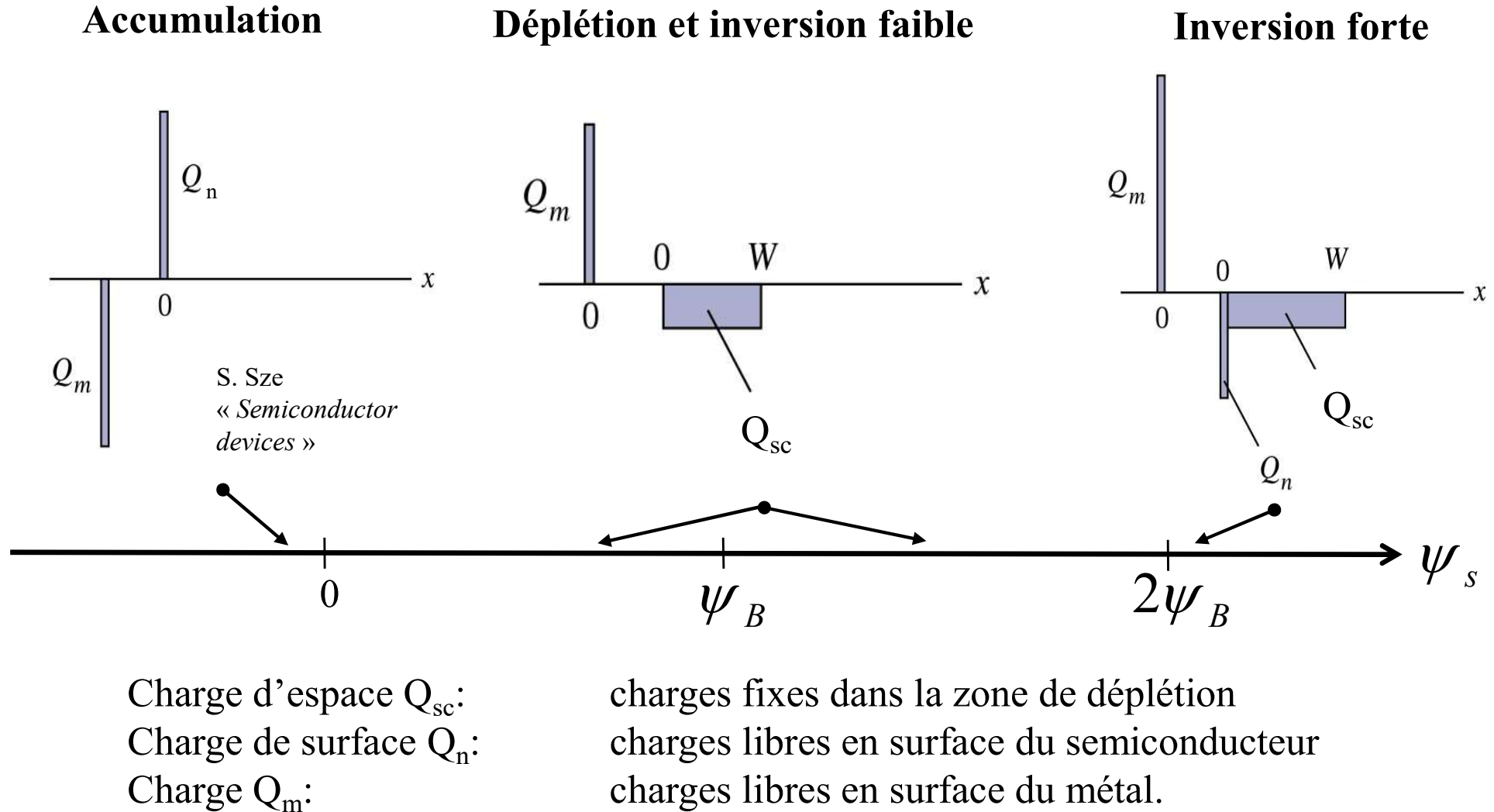




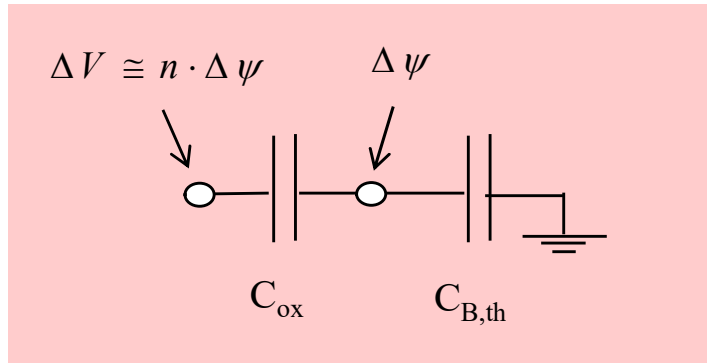
Principe: pas de courant $\rightarrow$ énergie de Fermi E_F constante



Charges fixes et charges libres: approximation



Paramètres: capacités et « slope factor n »



Capacité surfacique de l'oxyde:

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

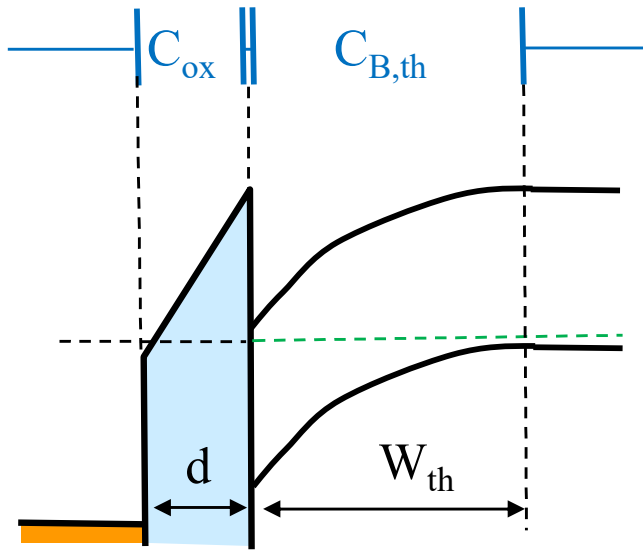
Capacité surfacique « Bulk » au threshold:

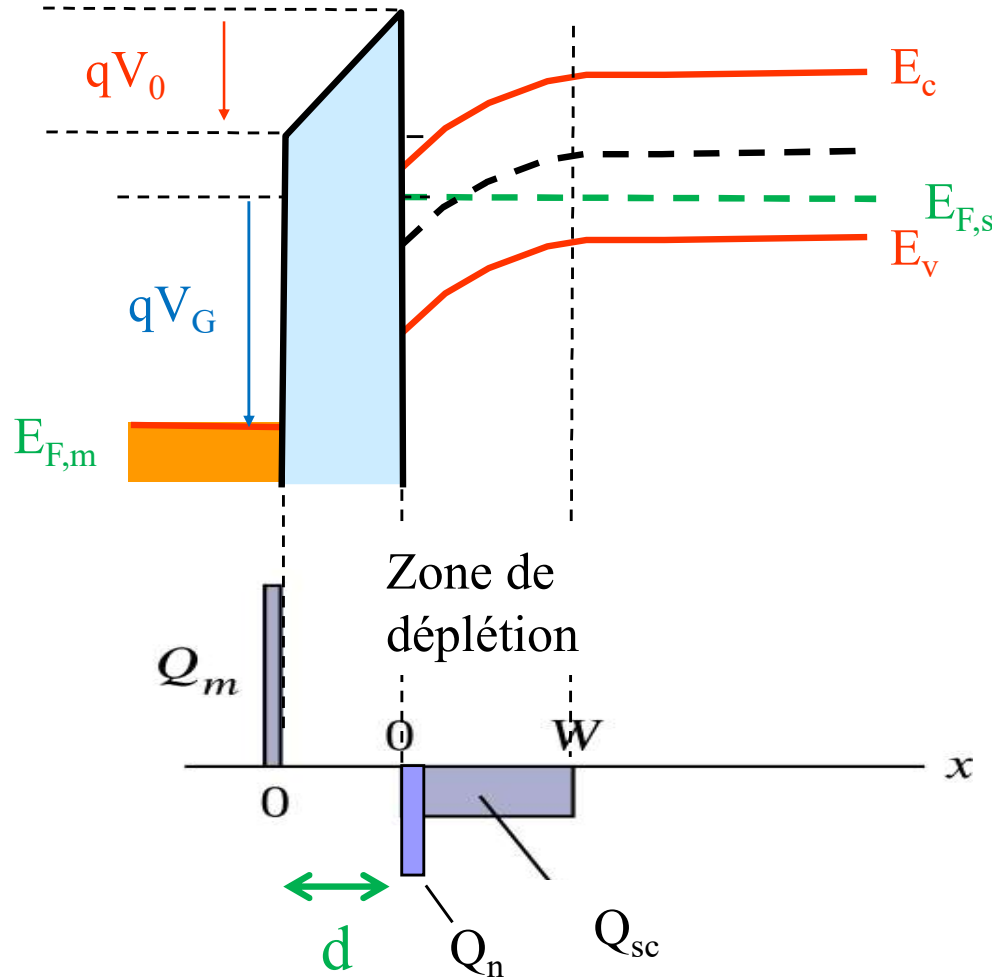
$$\overline{C}_{B,th} \equiv \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W_{th}} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_s q N_A}}{\sqrt{2\psi_B}}$$

Slope factor n:

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

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





L'oxyde est un condensateur,
chargé avec Q_m :

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

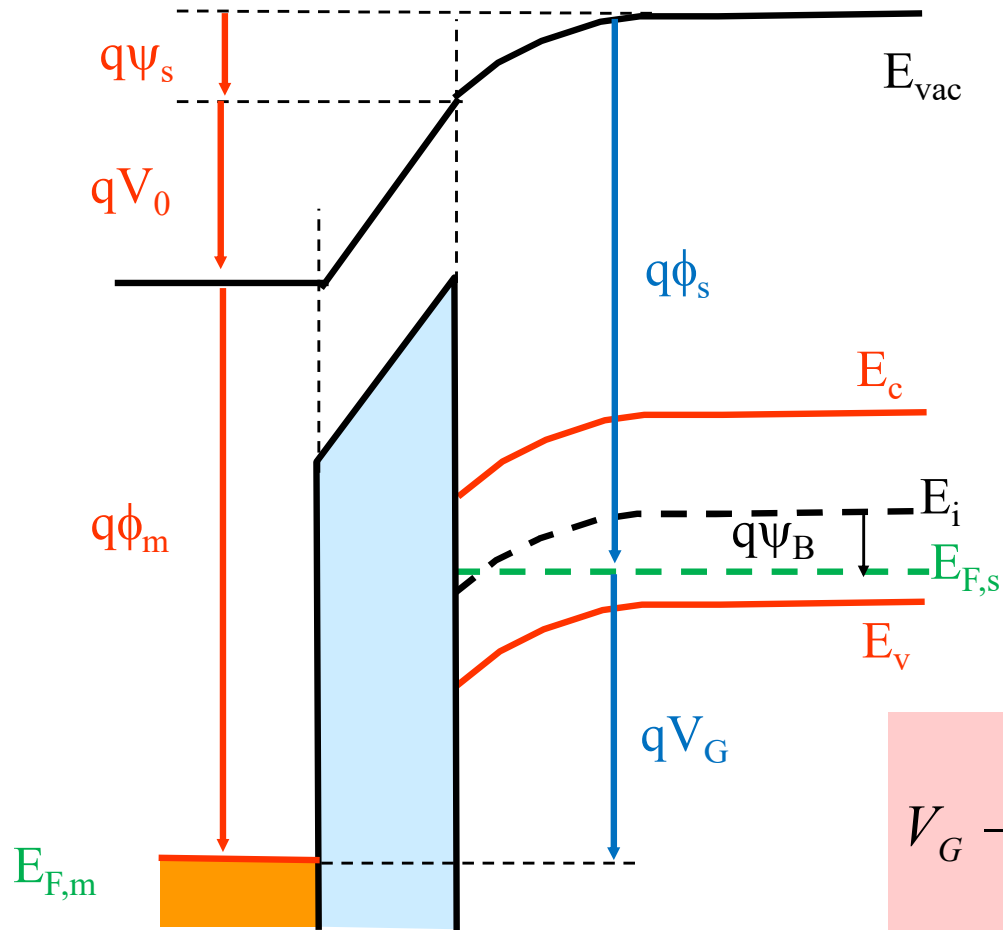
Le champ électrique est nul aux
deux extrémités $\rightarrow$

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

Saut de potentiel sur l'oxyde:

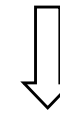
$$V_0 = -\frac{Q_n}{C_{ox}} - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}}$$

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



Potentiel sur le métal V_G :

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



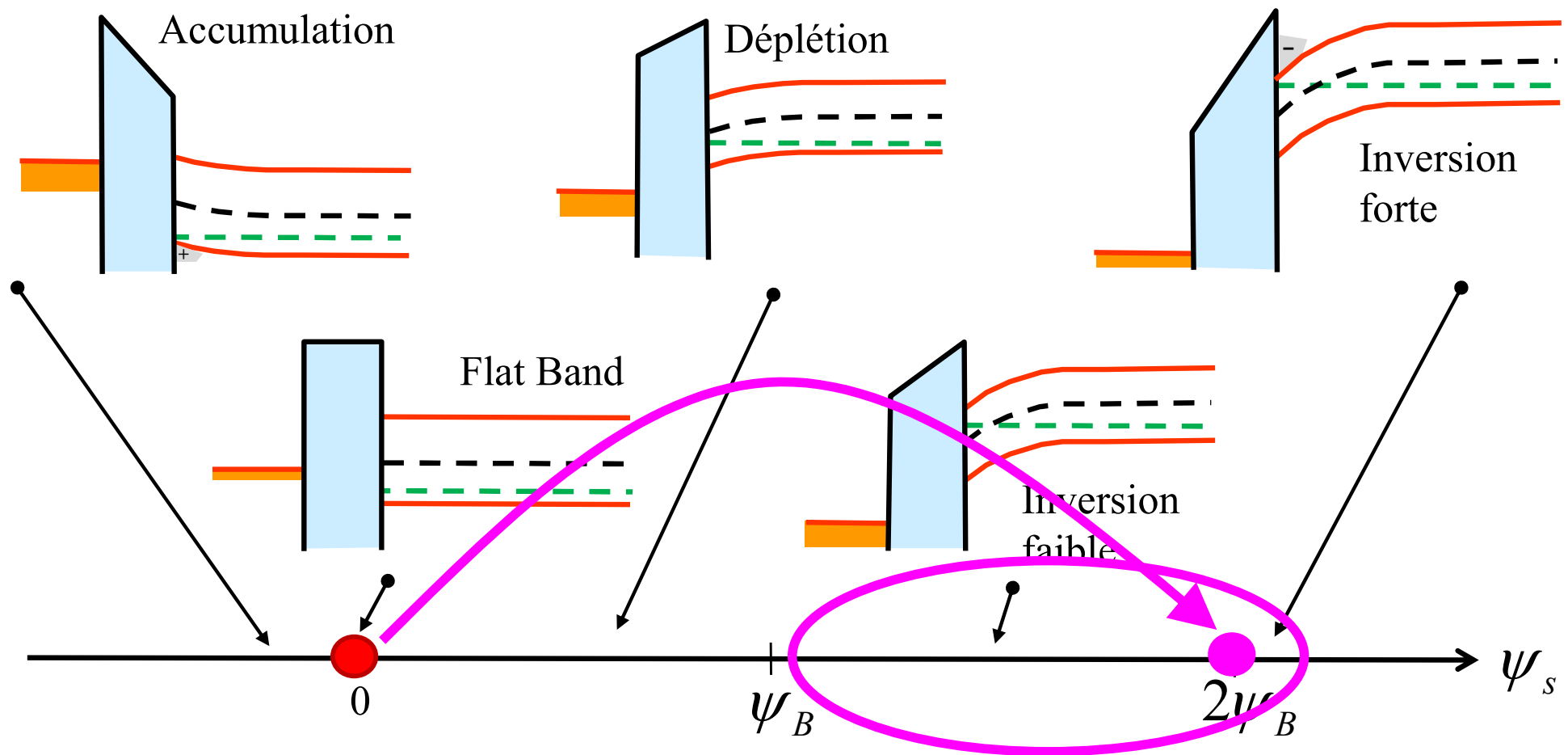
$$V_G = V_{fb} + \psi_s + V_0$$



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



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:

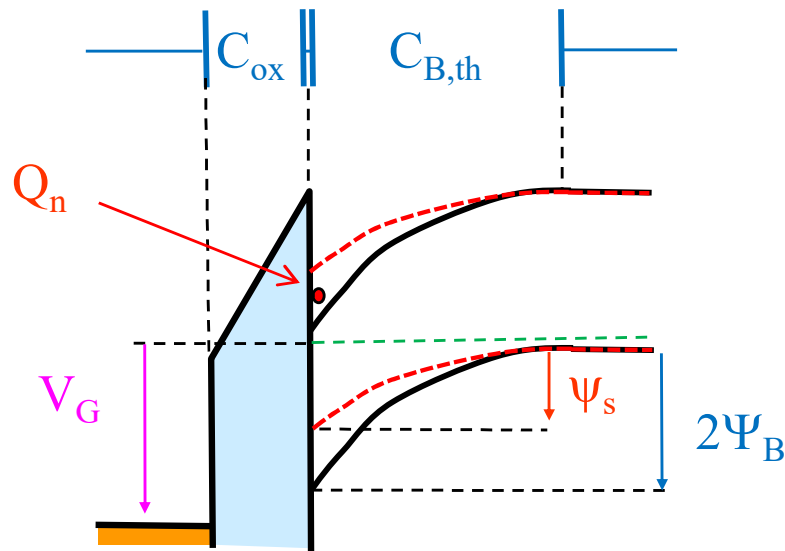
$$V_{M0} - V_{fb} = 2\psi_B \cdot (2n - 1)$$

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

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

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 Ψ_s

Charges libre en surface Q_n



2 inconnues

A) Potentiel de surface ψ_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

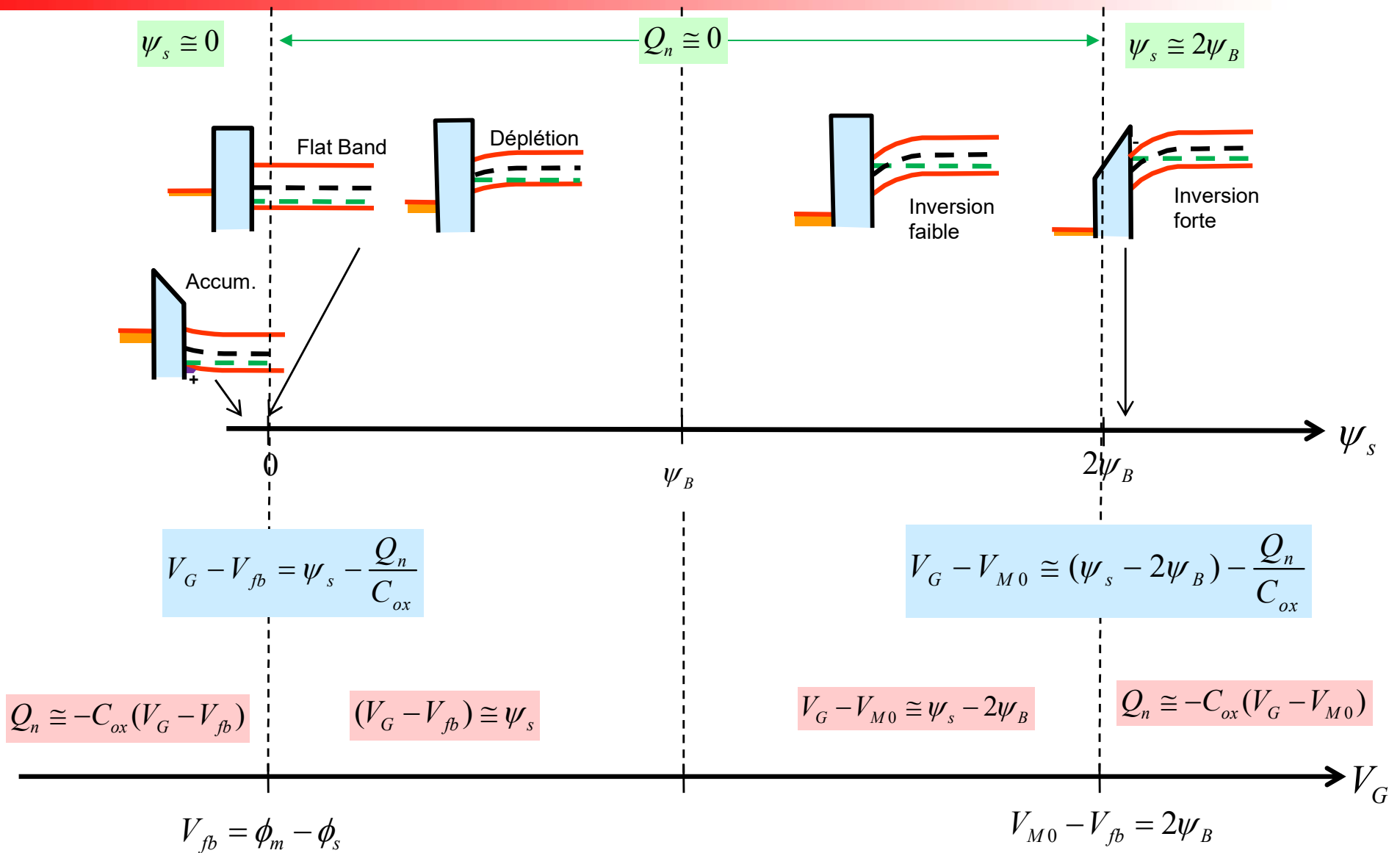
- Déplétion profonde

$$Q_n = 0$$

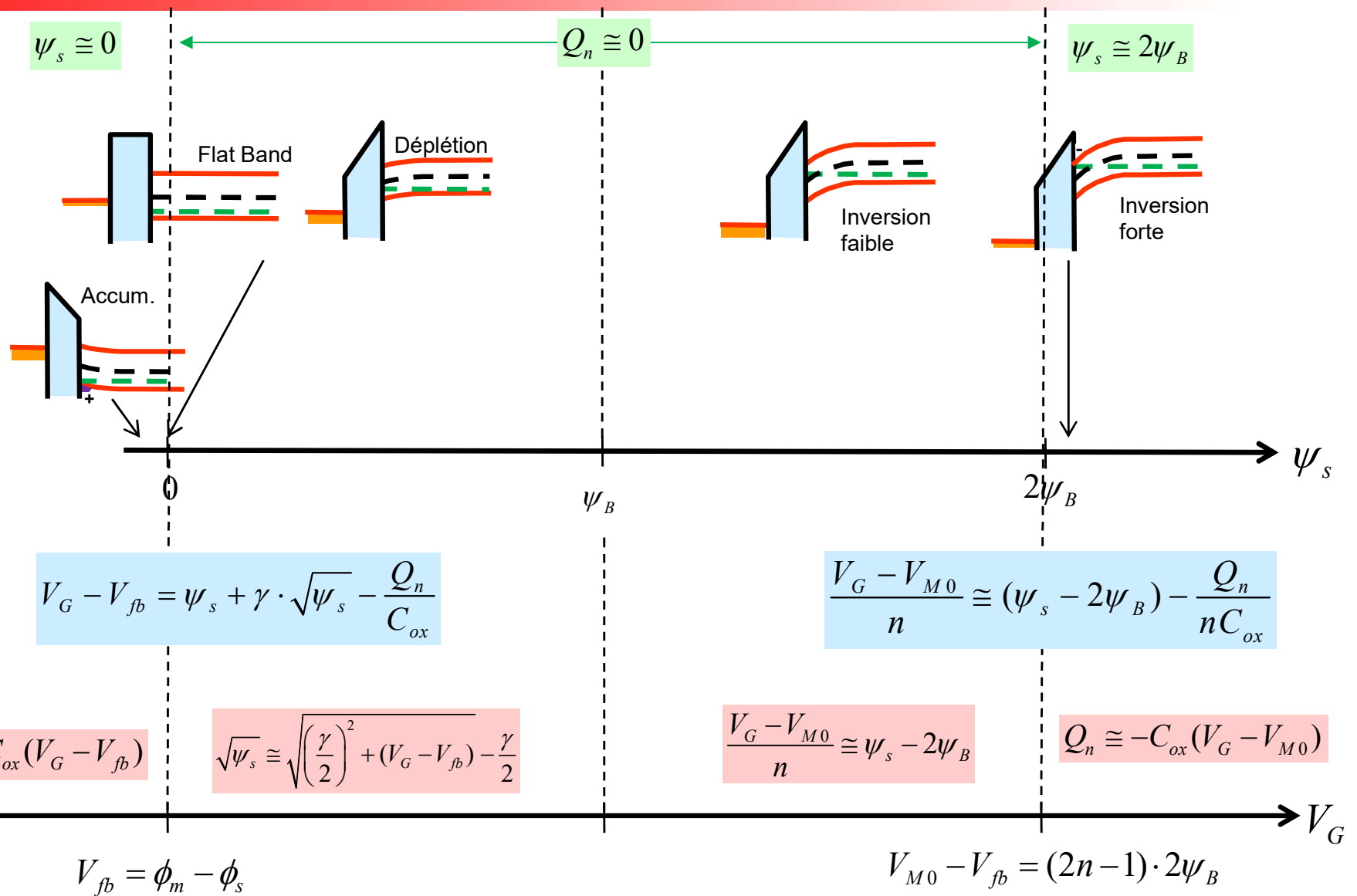
- Inversion forte

$$\psi_s \cong 2\psi_B$$

Résumé: Formules sans slope factor (n=1)

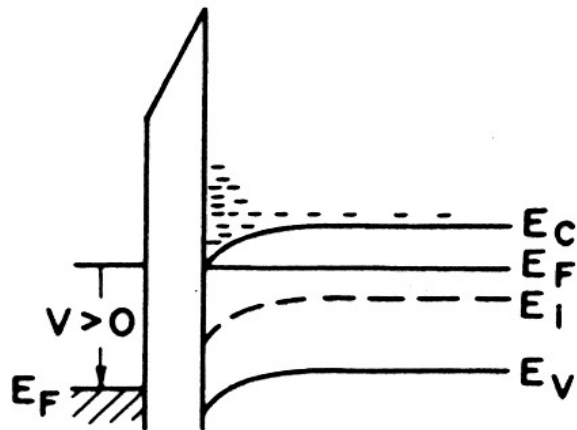


Résumé: Formules avec slope factor n

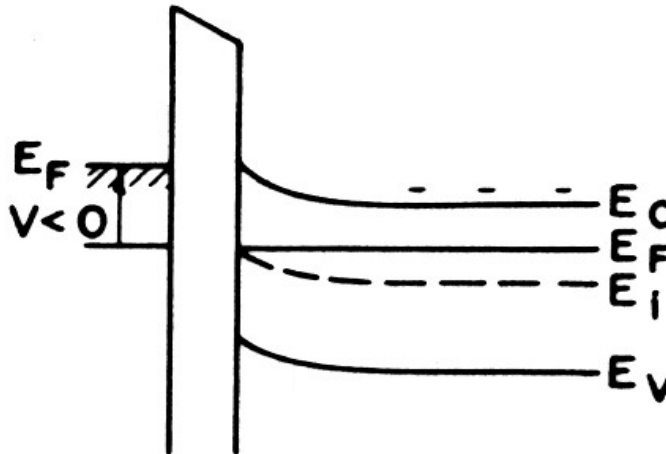


S. Sze « Physics of *semiconductor devices* »

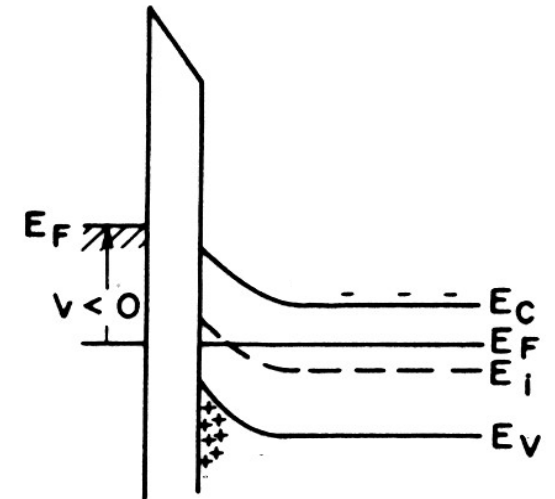
Accumulation



Déplétion ou
inversion faible



Inversion forte

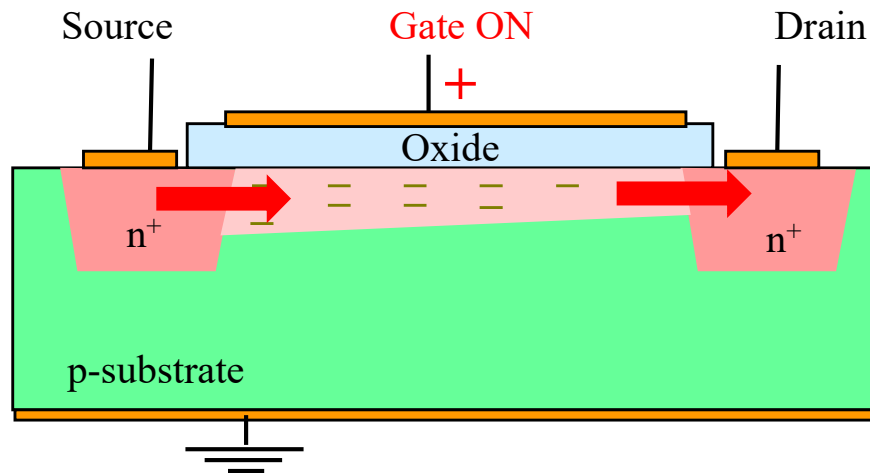


Les calculs sont totalement similaires

Ed Discussion

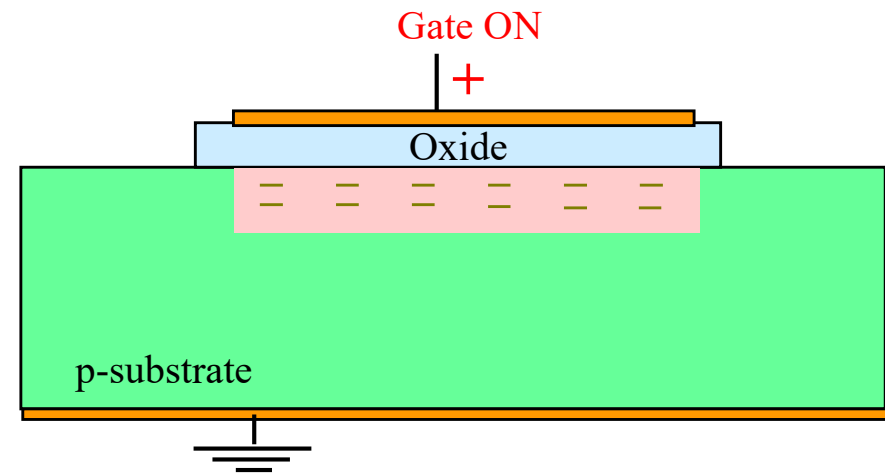
Je ne suis pas sûr d'avoir compris si un courant passe à-travers l'oxyde. Comment pourrait-on expliquer cette accumulation de charge négative du côté du semi-conducteur si aucun transfert se produit entre le métal et le semi conducteur?

NMOS Transistor



Injection and extraction
from the source and the drain

MOS Capacitor



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

NMOS transistor



Canal de Corinthe

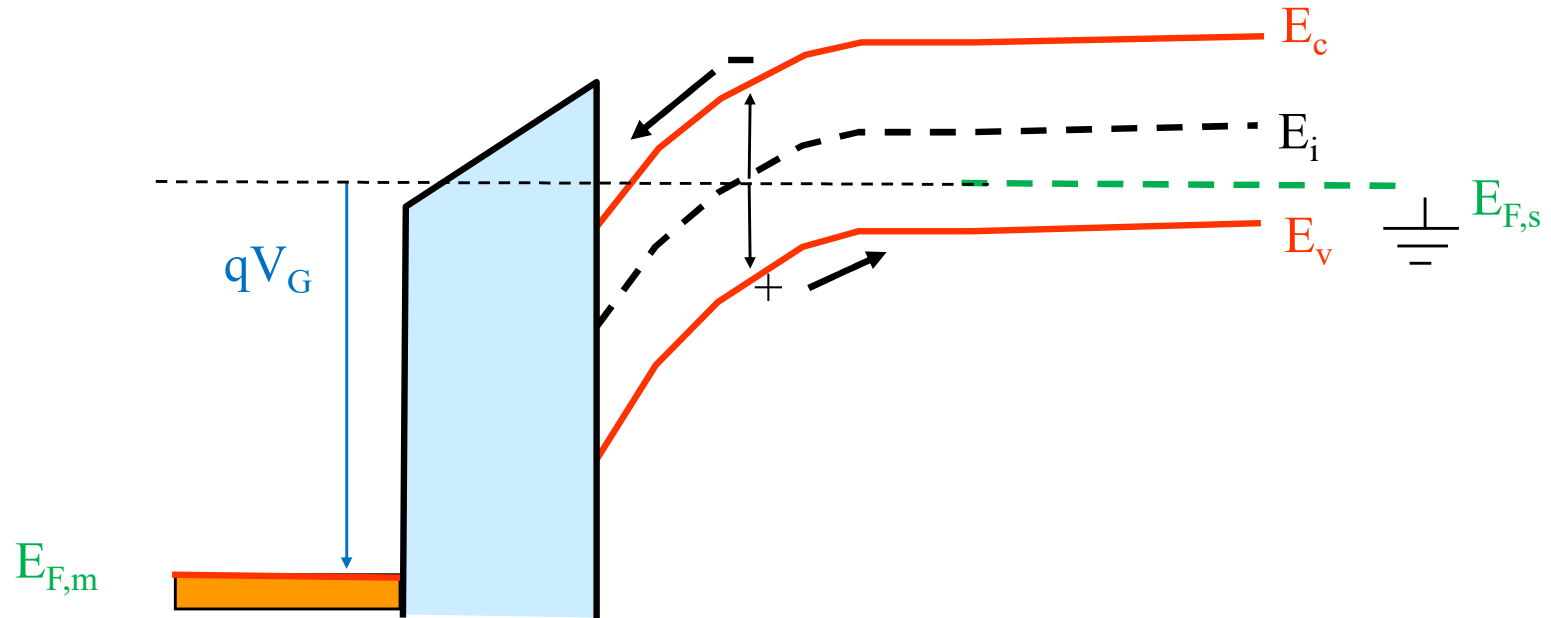
MOS capacitor



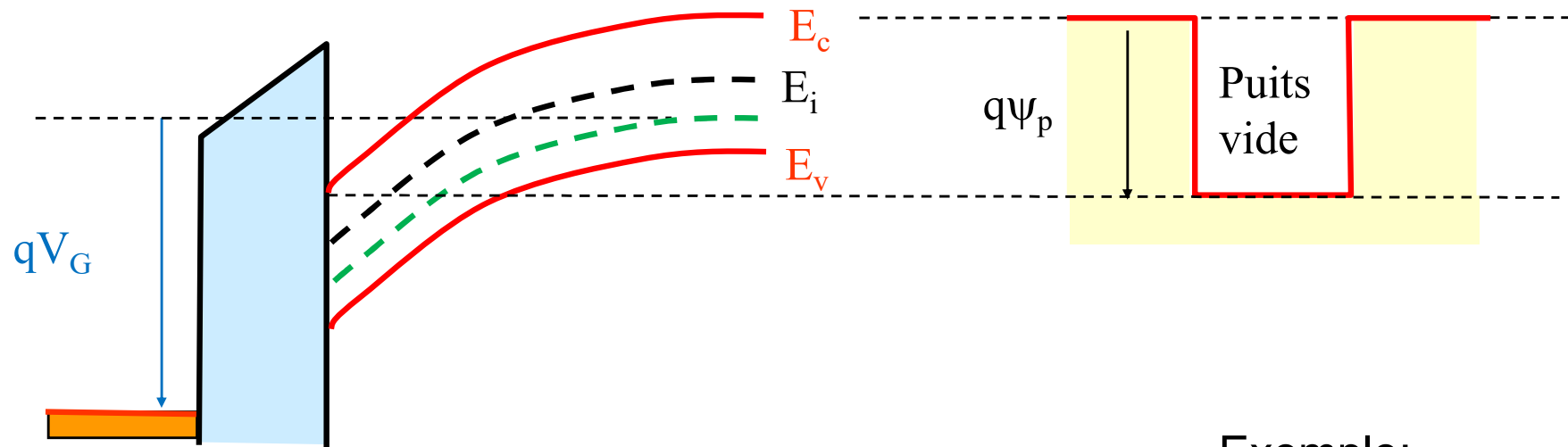
Drainage d'une tourbière

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 $|Q_n| = 0$



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

Exemple:

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

$$n = 4/3$$

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

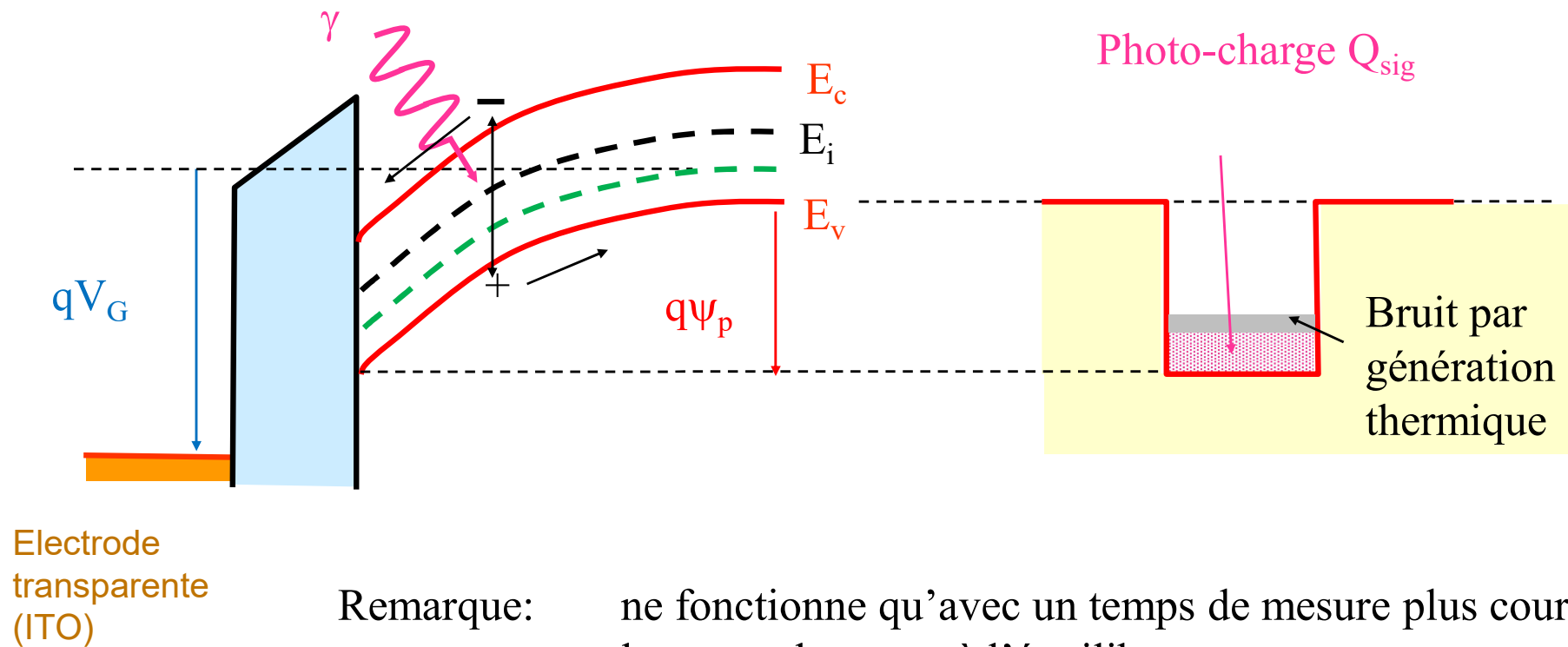
$$V_G = 10 \text{ V}$$

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

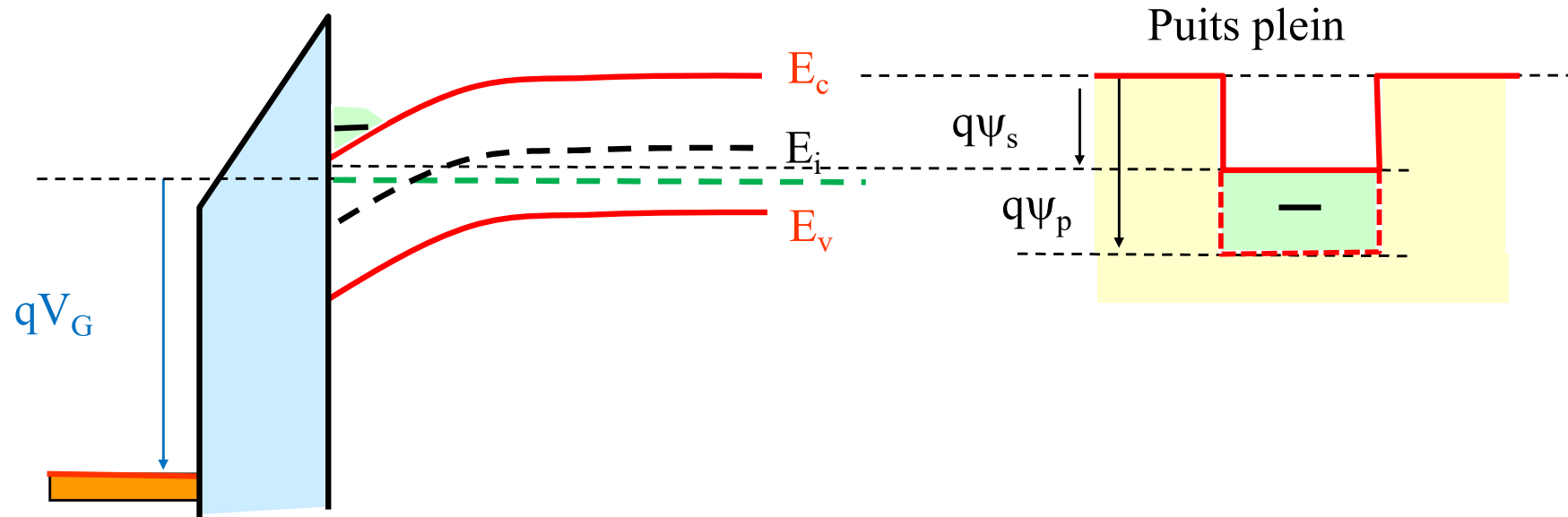
Photo-génération et accumulation de charges

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

Les photo-électrons s'accumulent



Influence des charges libres sur le potentiel de surface

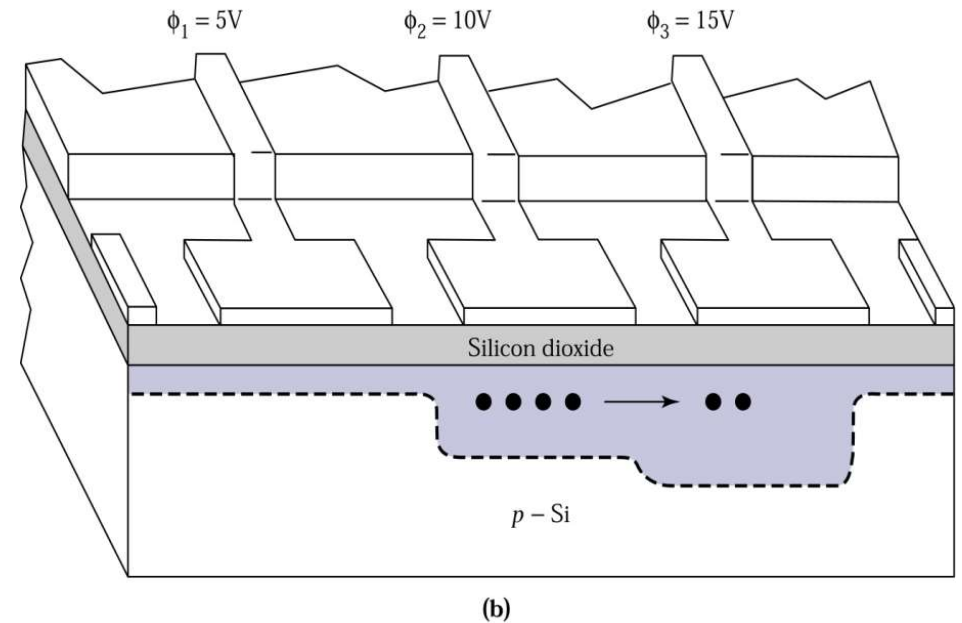
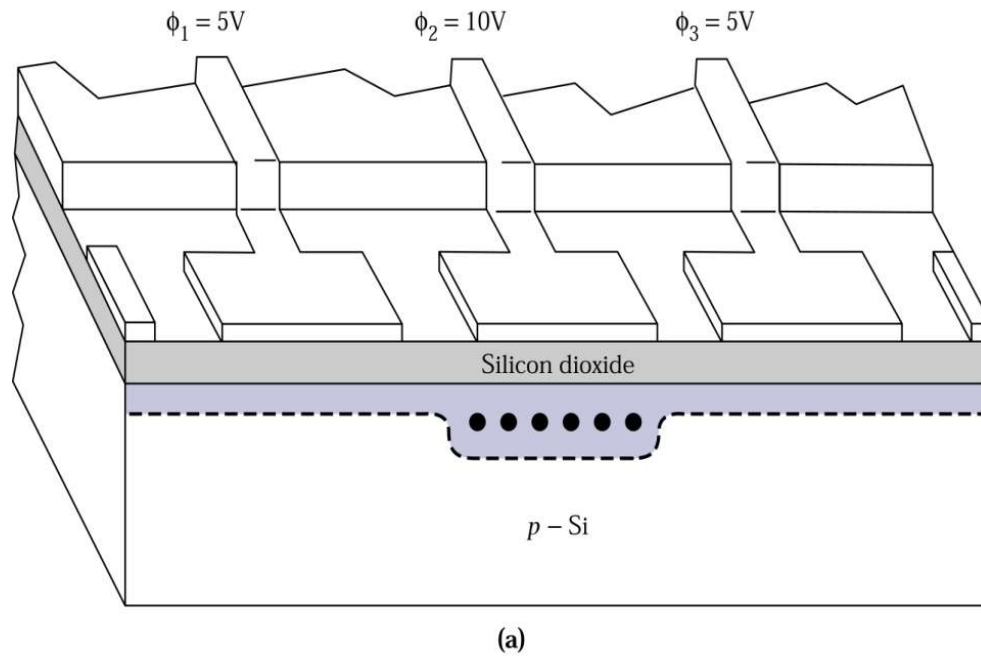


$$\psi_s \cong \underbrace{\frac{V_G - V_{M0}}{n} + 2\psi_B}_{\psi_p} + \frac{Q_n}{nC_{ox}}$$

$$Q_n < 0$$

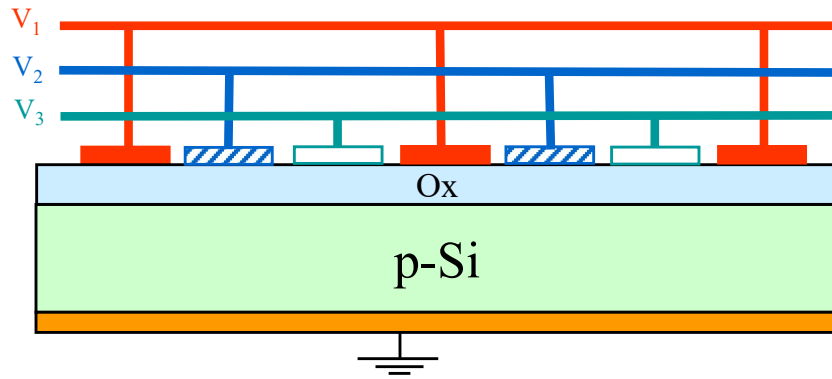
Registre CCD: transfert d'information

S. Sze « *Semiconductor devices* »

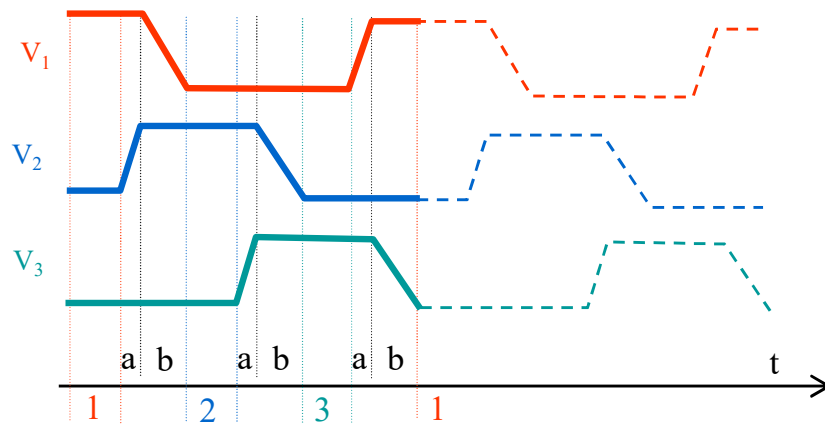


Avantage: l'information ne « s'étale » pas !

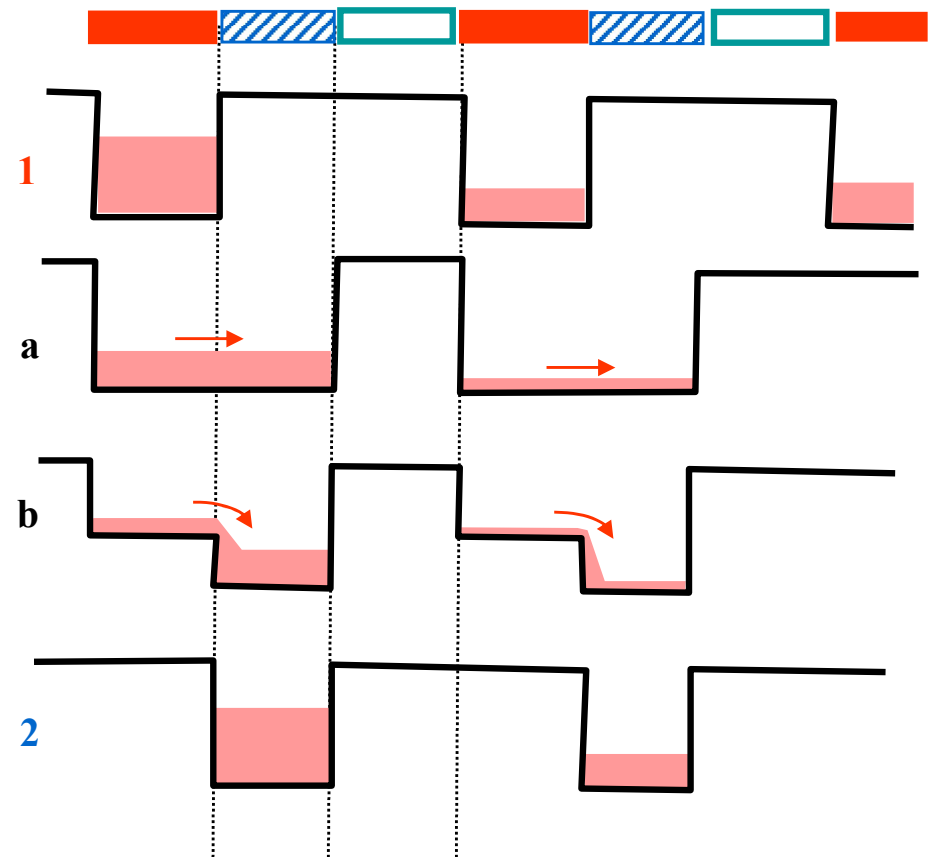
Structure CCD



Séquence de commande



Transfert de charge



CCD: clocking et read-out (animations internet)

Three Phase CCD Clocking Scheme

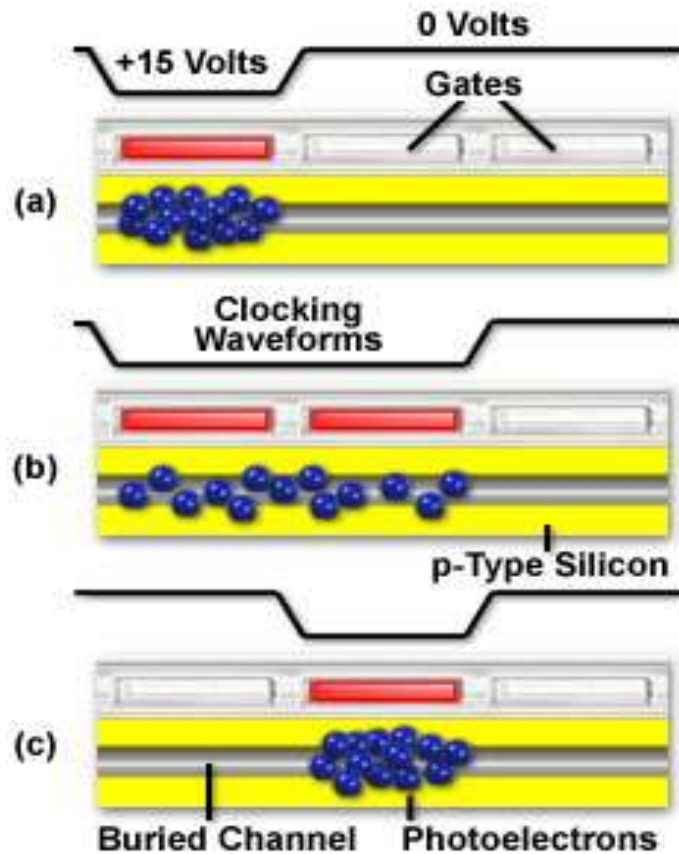
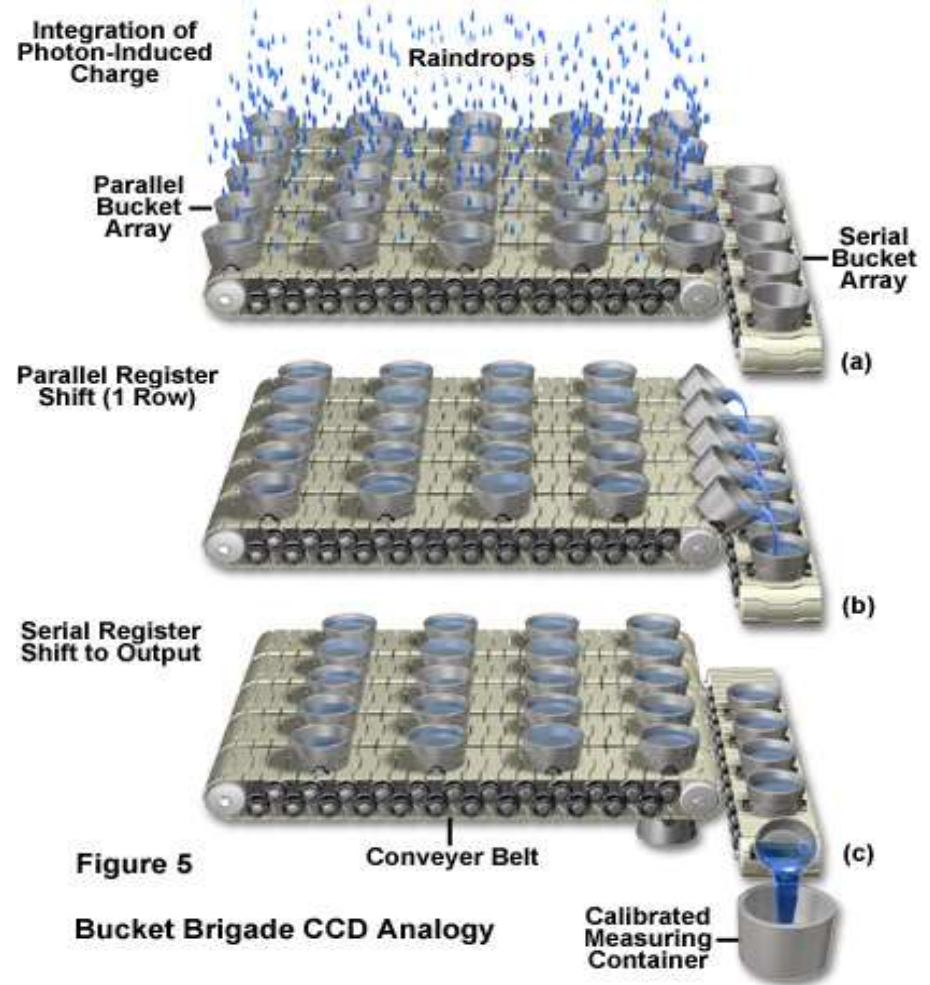
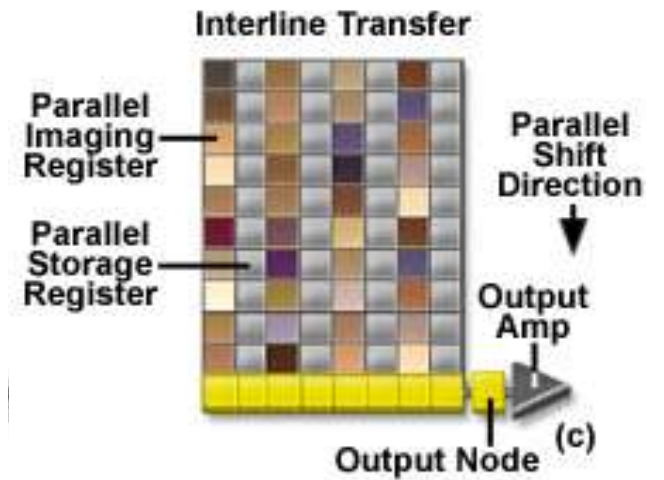
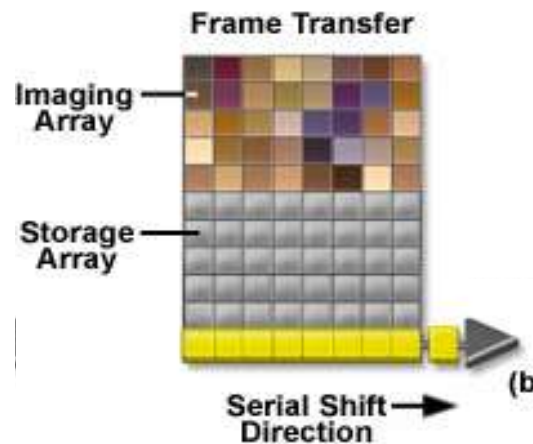
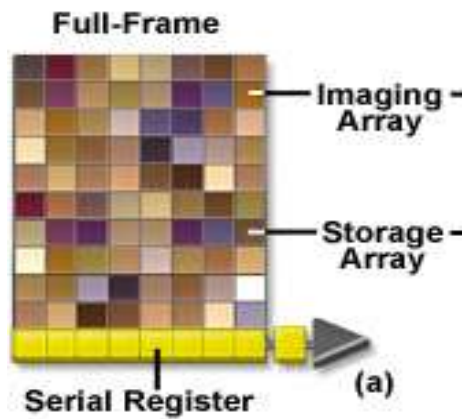


Figure 6



Caméra CCD: read-out (animations internet)



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

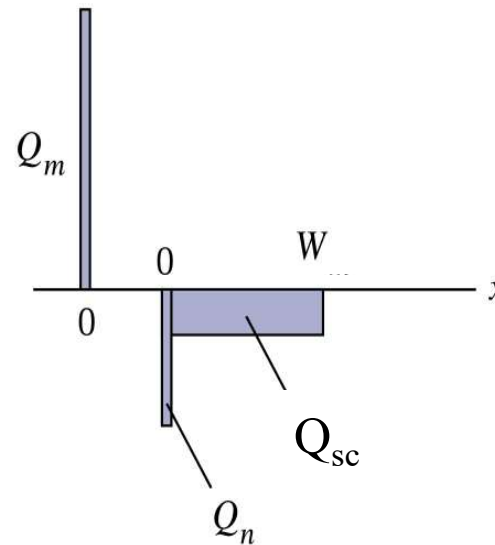
Capacité:

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

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

S. Sze « *Semiconductor devices* »

Inversion forte



Q_n : Charges libres
à l'interface

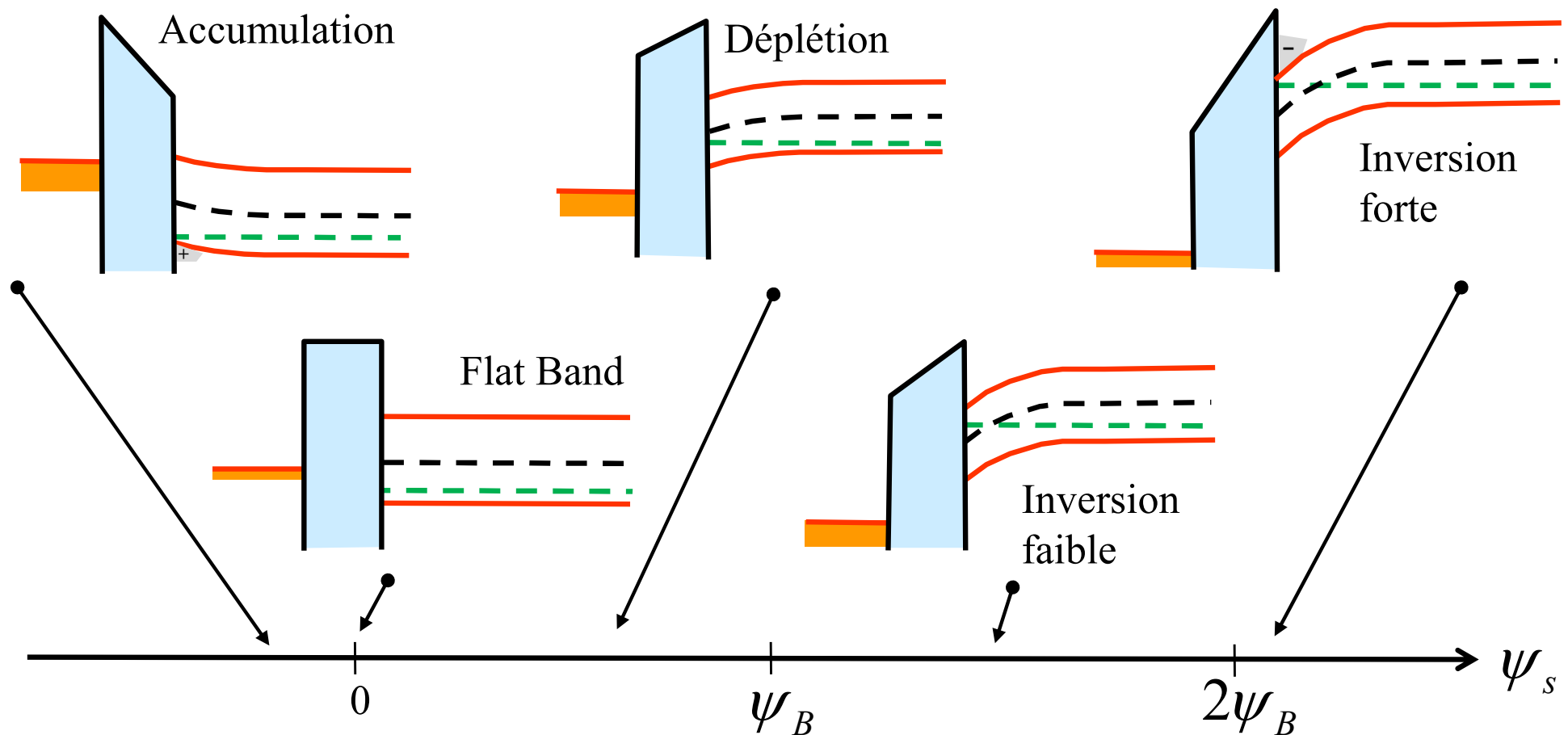
Varie par accumulation
des minoritaires générés
thermiquement
→ lent

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

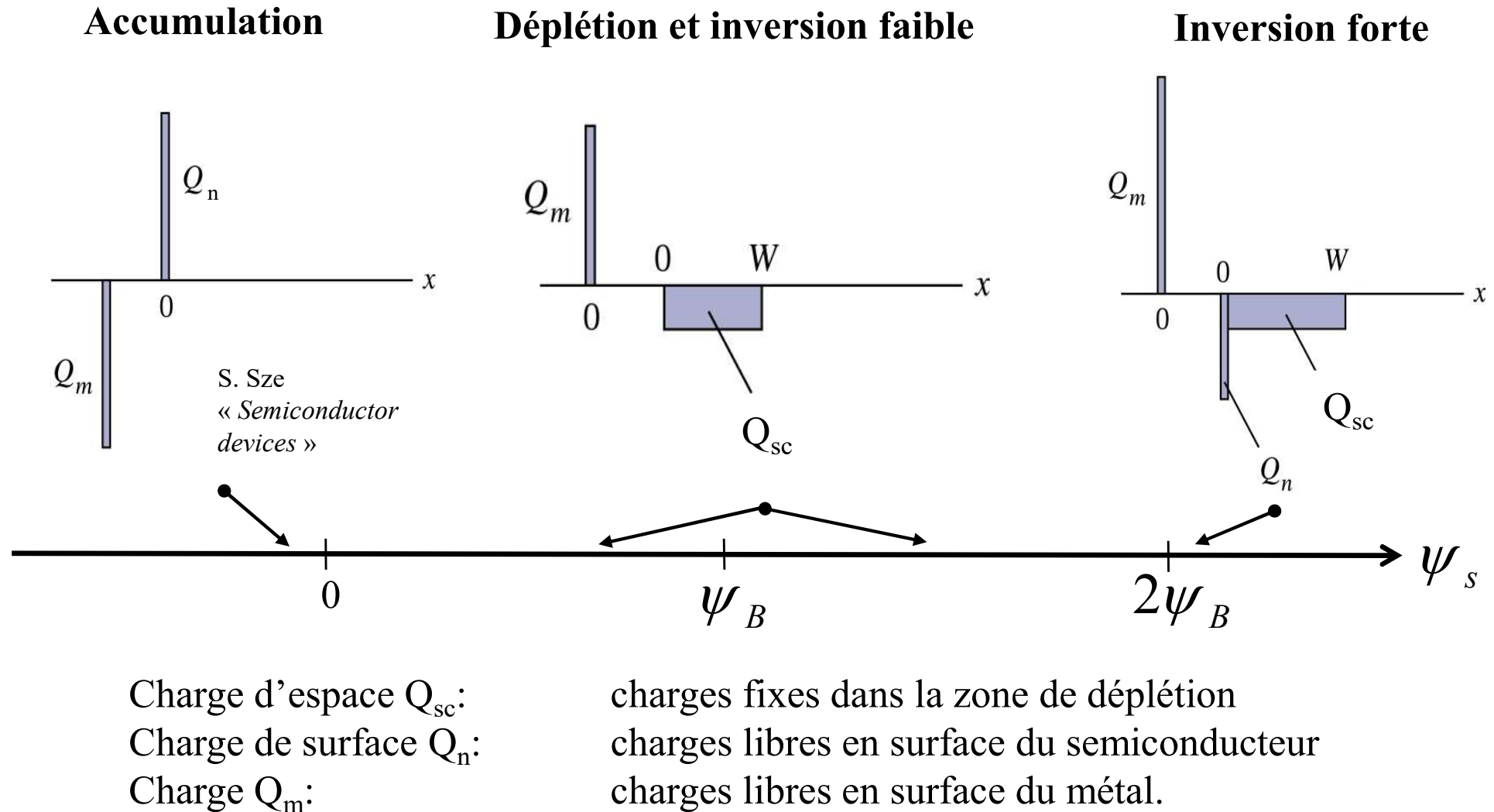
Varie par retrait
des majoritaires
→ rapide



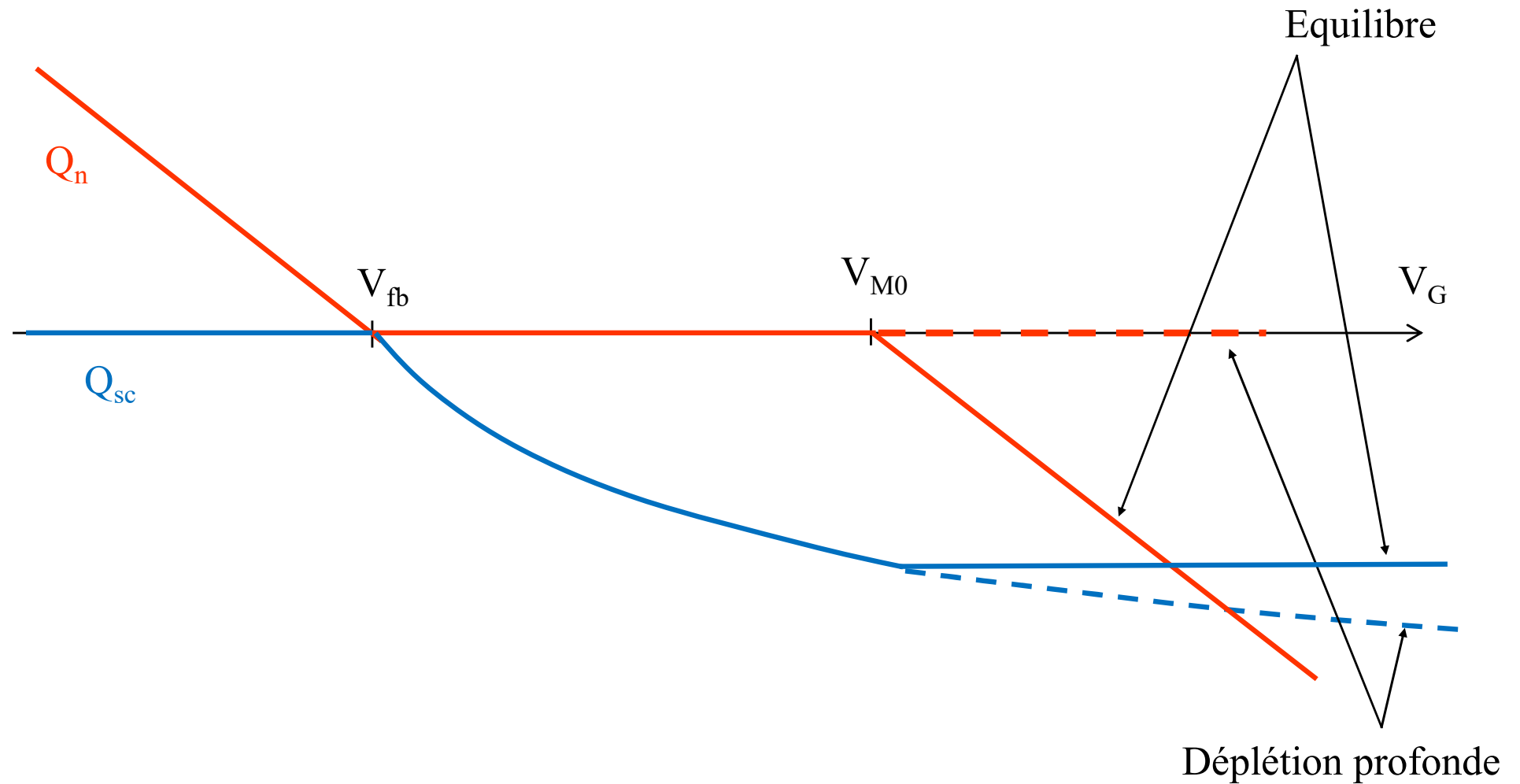
Principe: pas de courant $\rightarrow$ énergie de Fermi E_F constante



Charges fixes et charges libres: approximation

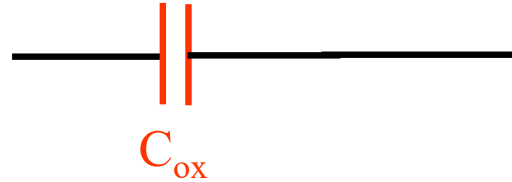


Comportement qualitatif des charges: cas statiques et dynamiques



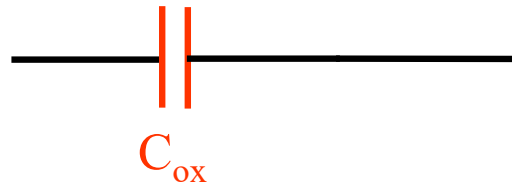
Capacité MOS: solutions intuitives

Accumulation



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

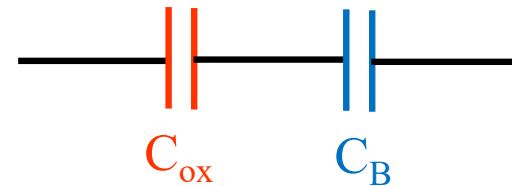
Inversion forte
(basses fréquences)



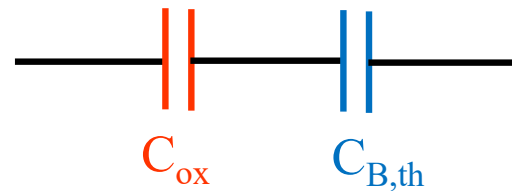
$$C_B = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{W}$$

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

Déplétion,
inversion faible,
déplétion profonde



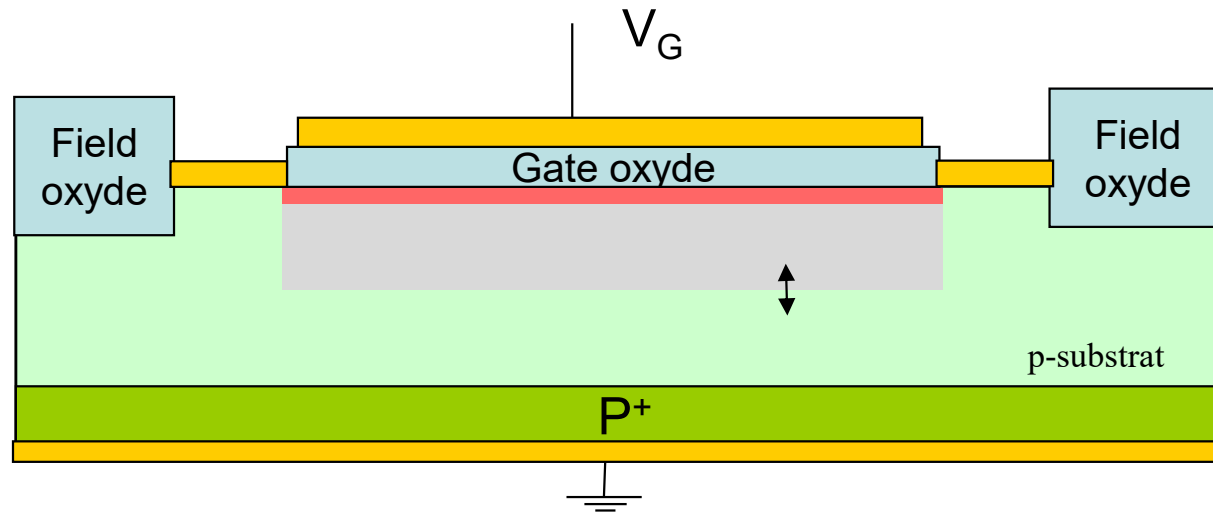
Inversion forte
(hautes fréquences)



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

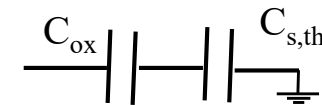
Modèle de capacité sans source ni drain

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:

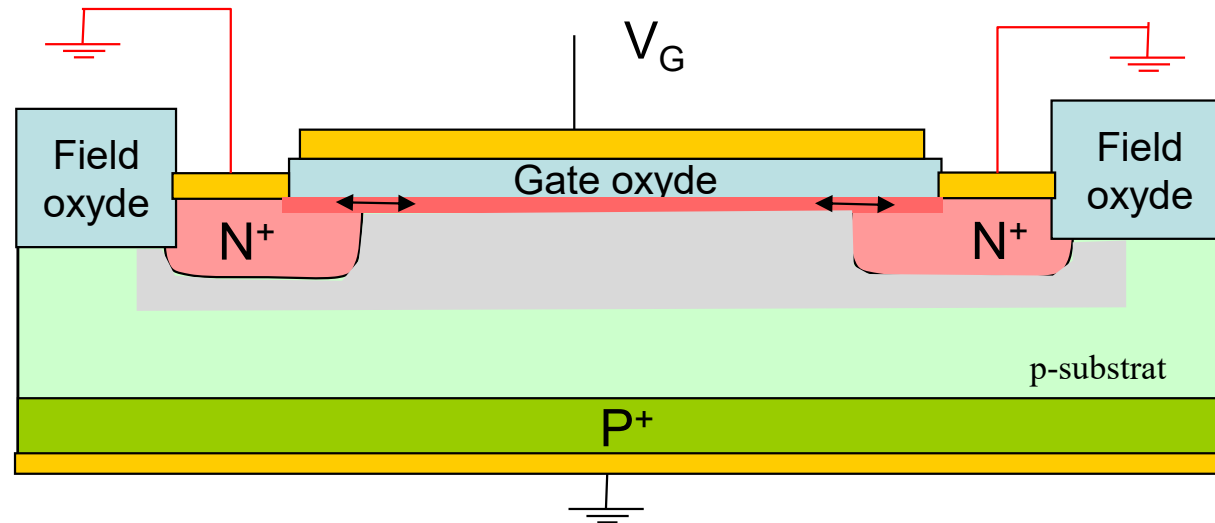


C_{inv-f}

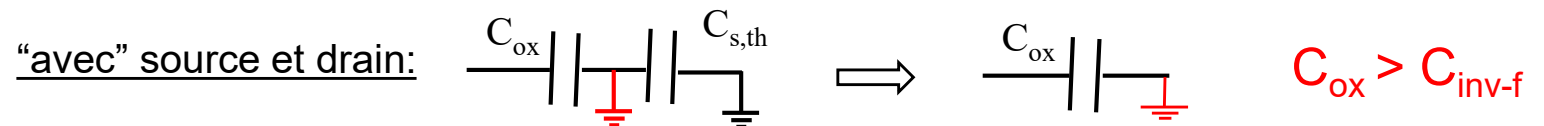
Les charges libres n'ont pas le temps de s'accumuler.
→ les charges fixes de la zone de dépletion doivent varier

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.

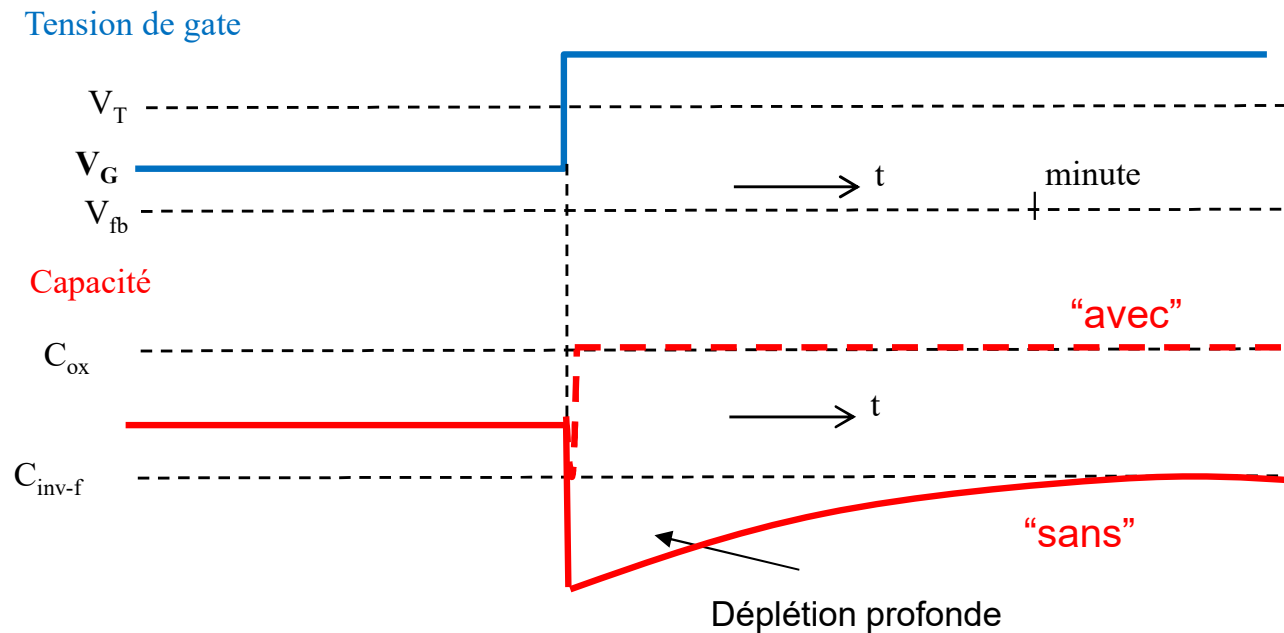


Quel modèle de capacité ?

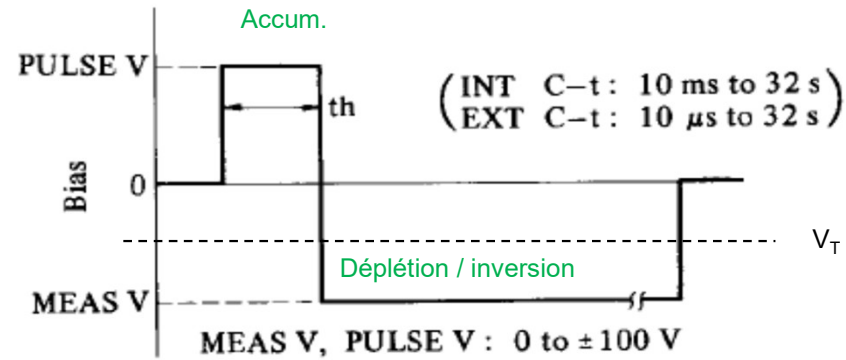
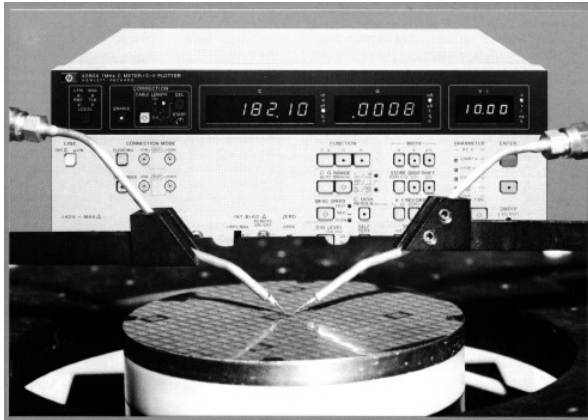


Les électrons peuvent venir rapidement dans le canal
à partir de la source et du drain

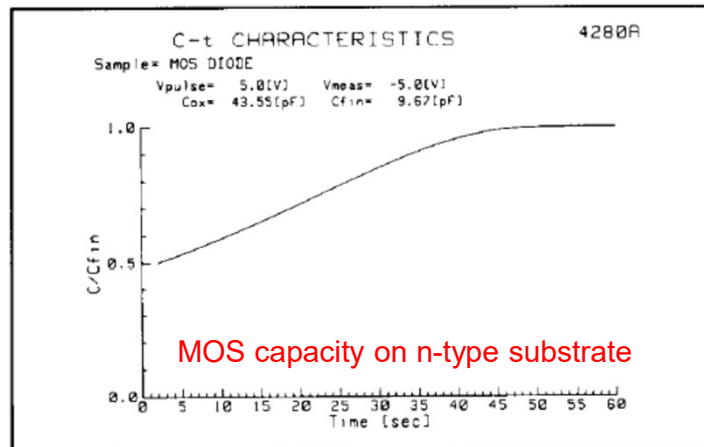
La tension de bias V_G suit l'évolution temporelle ci-dessous. Le petit signal HF est maintenu tout au long de l'expérience pour mesurer la capacité différentielle.
Esquissez l'évolution de cette capacité pour les structures « sans » et « avec » source et drain.



HP 4280 A:



n-type substrate



MOS capacity on n-type substrate

0

60 sec.

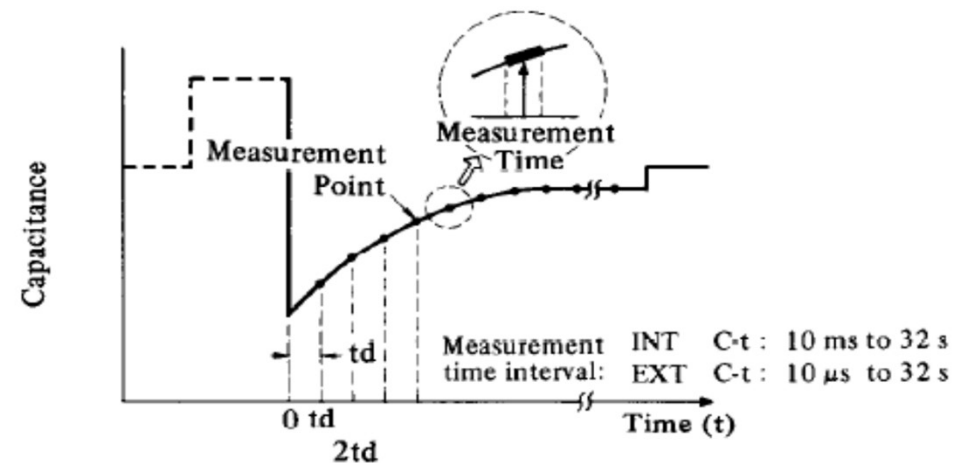


Figure 3-1 C-t Measurement



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 ψ_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 ψ_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.