

# **Jonction PN et fonctionnement du MOS**

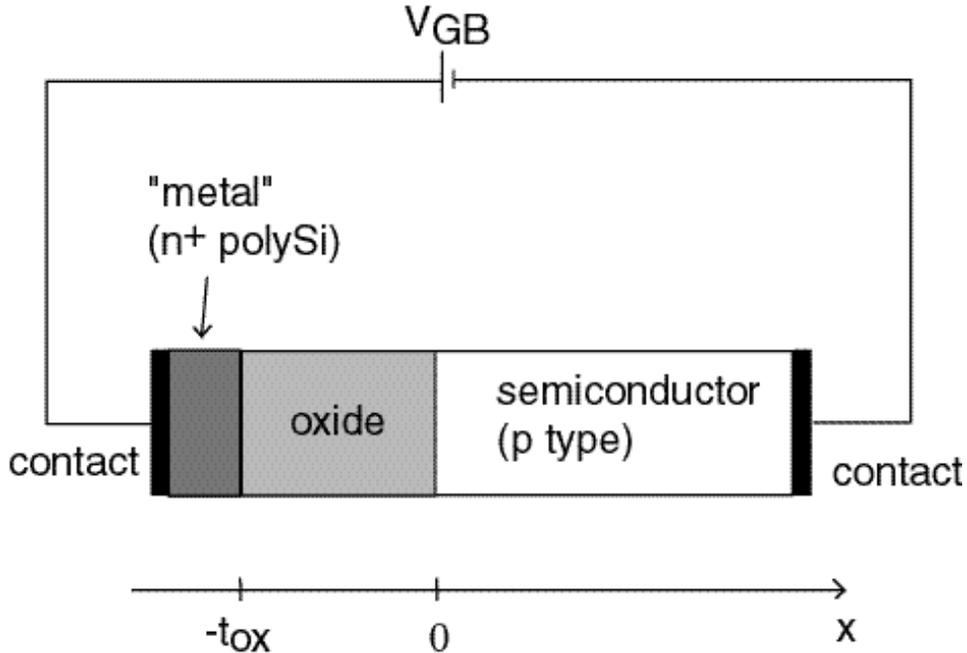
## **Metal-Oxide-Semiconductor (suite)**

### **Sommaire**

1. Fonctionnement du MOS polarisé (bias)
2. Régime de déplétion
3. "Bande Plate"
4. Régime d'accumulation
5. Tension de seuil
6. Régime d'inversion

# 1. Fonctionnement du MOS

## Polarisation



Tension de polarisation:

- Potentiel interne du MOS augmente de  $\phi_B$  à  $\phi_B + V_{GB}$
- L'oxyde interdit le passage du courant  $\Rightarrow$ 
  - $J=0$  dans tout le semiconducteur
  - Nécessité **drift = -diffusion** dans SCR
- Maintien des conditions aux limites à l'interface Si/SiO<sub>2</sub>
  - $E_{ox} / E_s \approx 3$

Comment ceci peut il se faire simultanément?  $\Rightarrow$   
*situation de quasi-équilibre* avec potentiel interne dans le MOS égal à  $\phi_B + V_{GB}$

## Consequence importante du quasi-équilibre:

⇒ Les relations de Boltzmann s'appliquent dans le SC

[On les dérive à partir de  $J_e = J_h = 0$ ]

$$n(x) = n_i e^{q\phi(x)/kT}$$

$$p(x) = n_i e^{-q\phi(x)/kT}$$

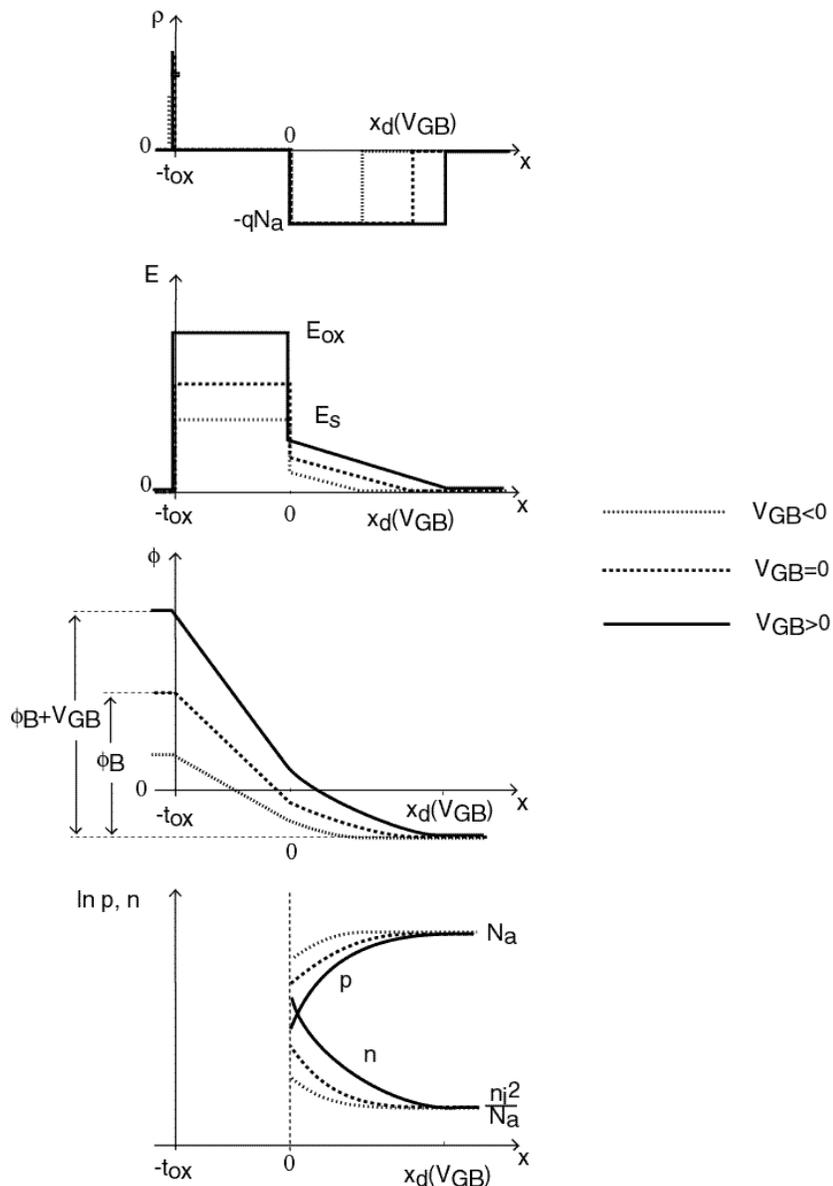
et

$$np = n_i^2 \quad \text{en tout point } x$$

## 2. Régime de déplétion

Pour  $V_{GB} > 0$  métal attire les e- et repousse les trous  
 $\Rightarrow$  *La région de déplétion augmente*

Pour  $V_{GB} < 0$  métal repousse les e- et attire les trous  
 $\Rightarrow$  *La région de déplétion diminue*



En régime de déplétion, tous les résultats obtenus (équilibre) s'appliquent avec  $\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$ .

Par exemple:

Epaisseur de la région de déplétion:

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left[ \sqrt{1 + \frac{2C_{ox}^2 (\phi_B + V_{GB})}{\epsilon_s q N_a}} - 1 \right]$$

Barrière de potentiel dans SCR semiconducteur:

$$V_B(V_{GB}) = \frac{q N_a x_d^2(V_{GB})}{2 \epsilon_s}$$

Potentiel de surface

$$\phi(0) = \phi_p + V_B(V_{GB})$$

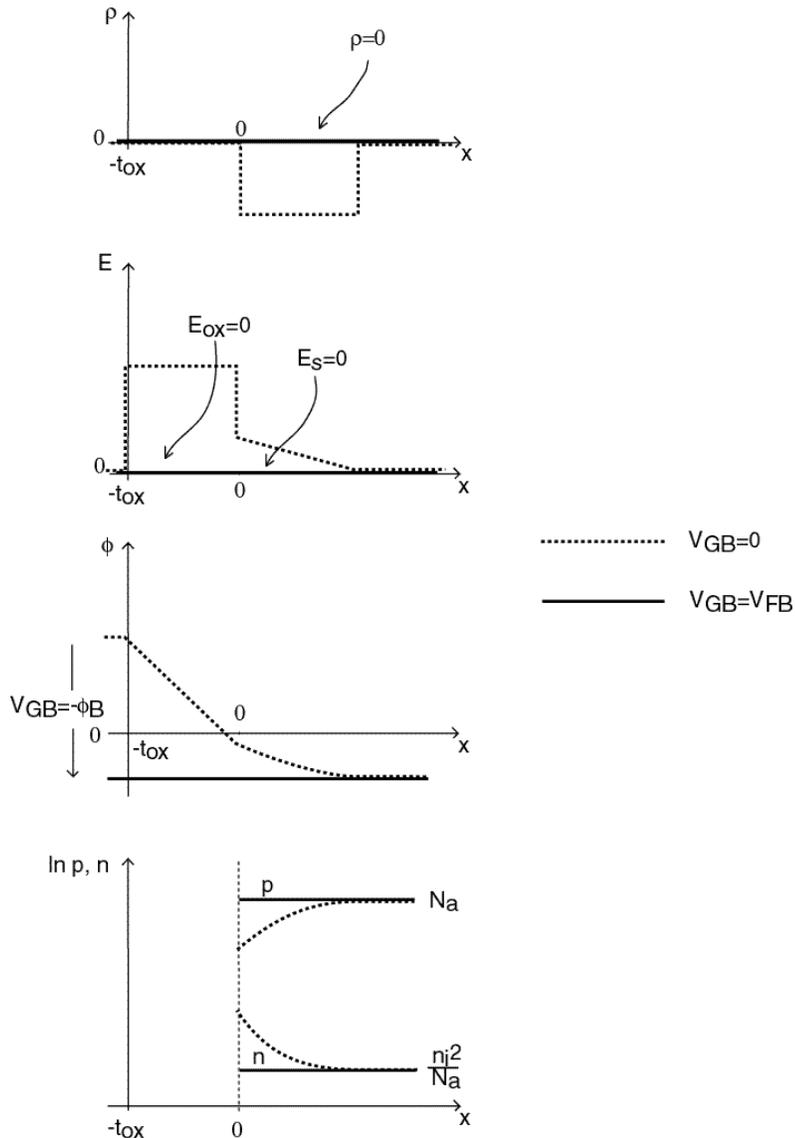
Barrière de potentiel dans l'oxyde:

$$V_{ox}(V_{GB}) = \frac{q N_a x_d(V_{GB}) t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

### 3. "Bande Plate"

Pour une certaine valeur de  $V_{GB}$  la région de déplétion disparaît

⇒ "*Bande plate*"

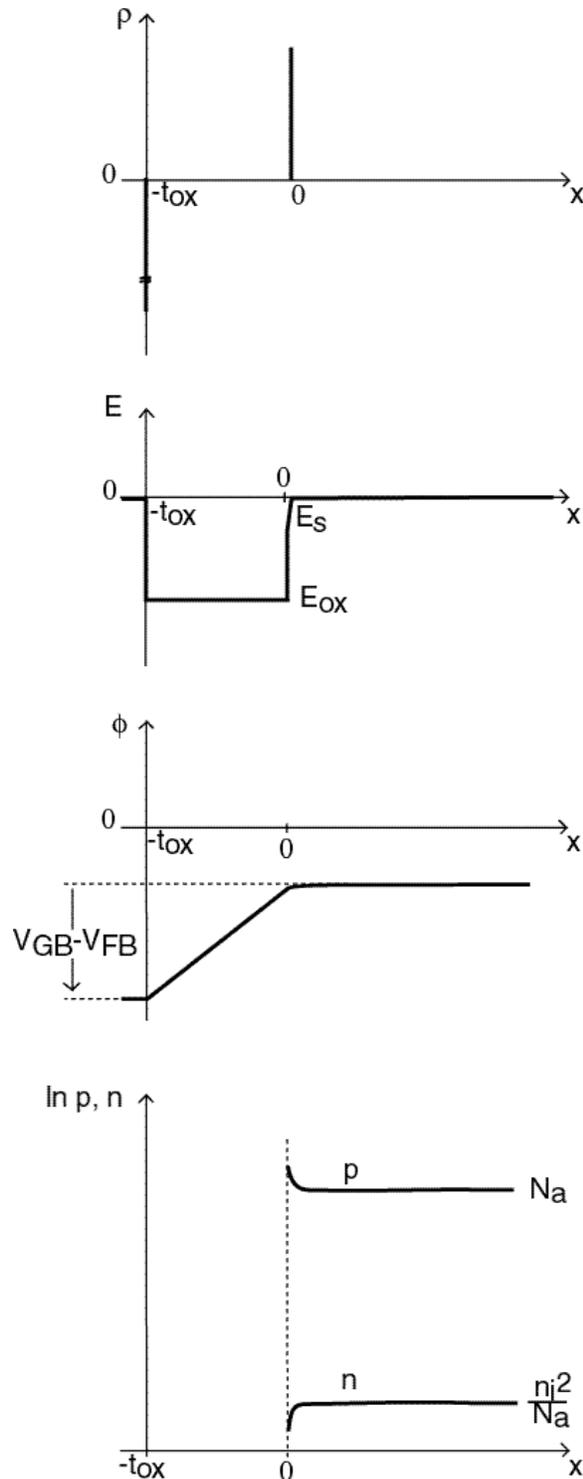


*Tension de bande plate ("FB : Flat Band") :*

$$V_{GB} = V_{FB} = -\phi_B = -(\phi_{N^+} - \phi_p)$$

## 4. Régime d'accumulation

Si  $V_{GB} < V_{FB}$  accumulation de trous à l'interface Si/SiO<sub>2</sub>



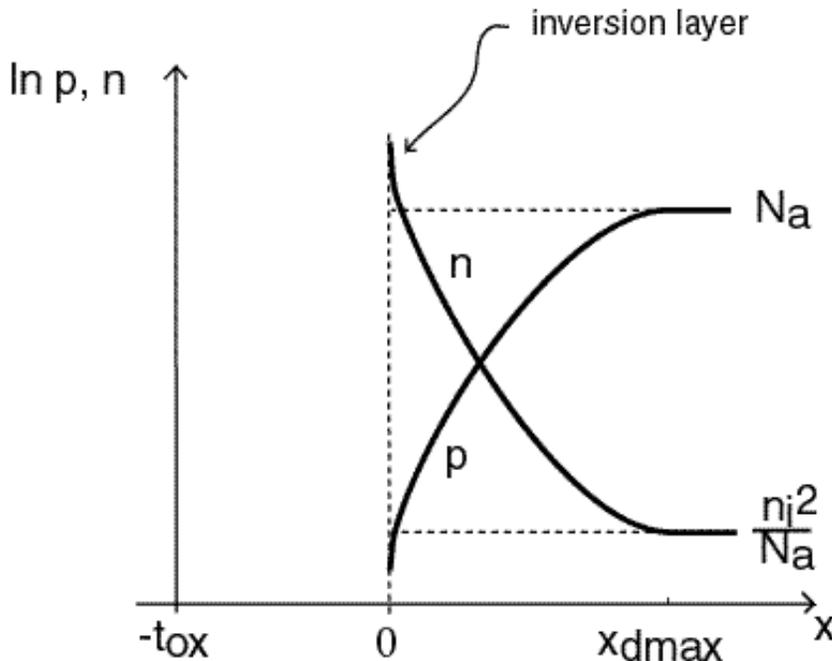
## 5. Tension de seuil

Revenons à  $V_{GB} > 0$

Pour des valeurs suffisamment élevées de  $V_{GB}$

Le fonctionnement "électrostatique" va changer pour  $n(0) = N_a \Rightarrow$  *seuil*

En dessous *du seuil* on ne peut pas négliger les contributions des électrons vers l'électrostatique.



Calculons la tension de grille (*tension de seuil*) qui donne  $n(0) = N_a$ .

**Hypothèse:** déplétion et électrostatique  
(On néglige la concentration des trous ( $p$ ) au seuil)

# Calcul de la tension de seuil ("treshold")

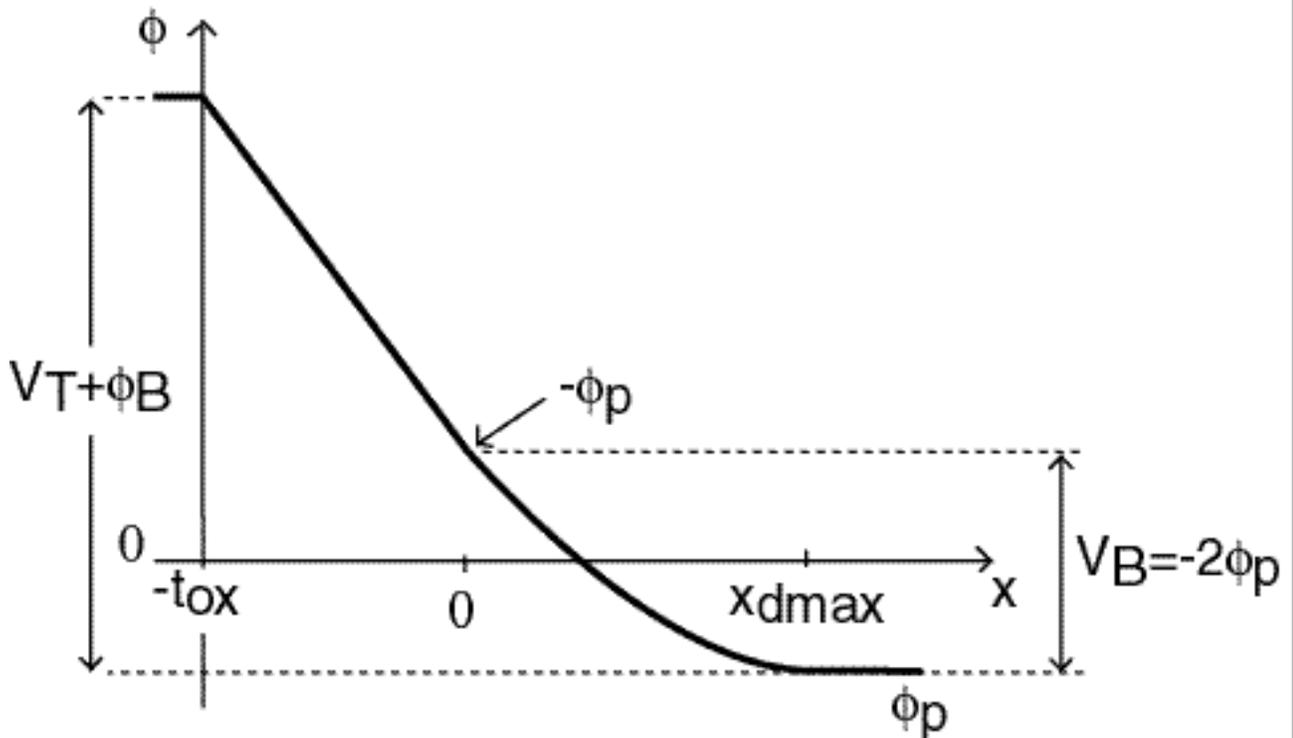
Trois étapes:

**Etape 1 :** Calcul du potentiel dans semiconducteur au seuil. Avec:

$$n(0) = n_i e^{q\phi(0)/kT}$$

Solution  $\phi(0)$  at  $V_{GB} = V_T$ :

$$\phi(0)|_{V_{GB} = V_T} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{n(0)}{n_i} \Big|_{V_{GB} = V_T} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_a}{n_i} = -\phi_p$$



D'où :

$$V_B(V_T) = -2\phi_p$$

## Calcul de la tension de seuil (suite)

**Deuxième étape :** Potentiel dans l'oxyde au seuil.

On a  $x_d(V_T)$  par la relation entre  $V_B$  et  $x_d$  dans la zone de déplétion:

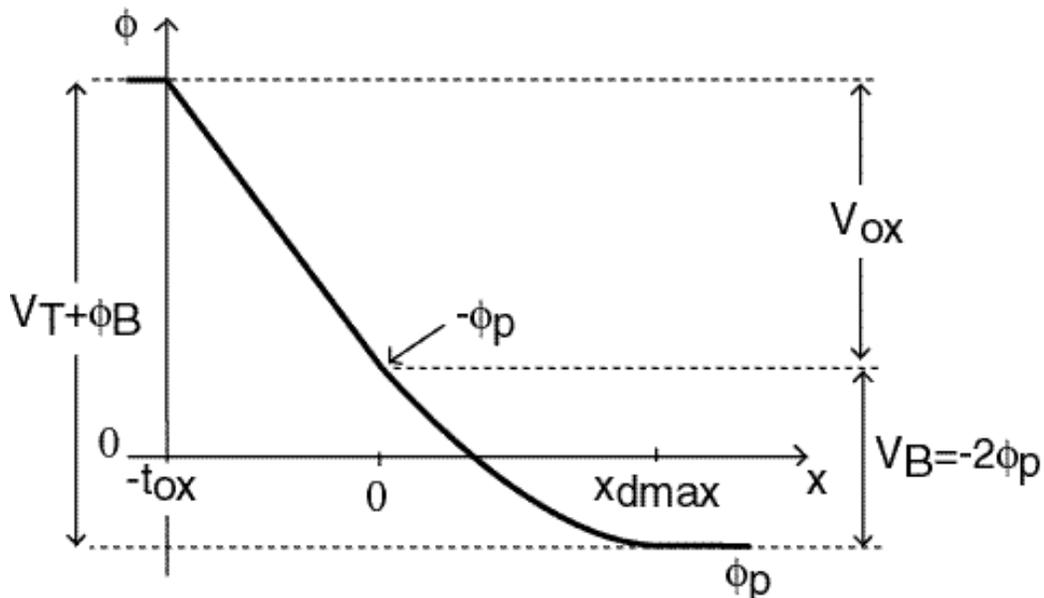
$$V_B (V_{GB} = V_T) = \frac{qN_a x_d^2(V_T)}{2\epsilon_s} = -2\phi_p$$

Solution  $x_d$  à  $V_{GB} = V_T$ :

$$x_d(V_T) = x_{d \max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(-2\phi_p)}{qN_a}}$$

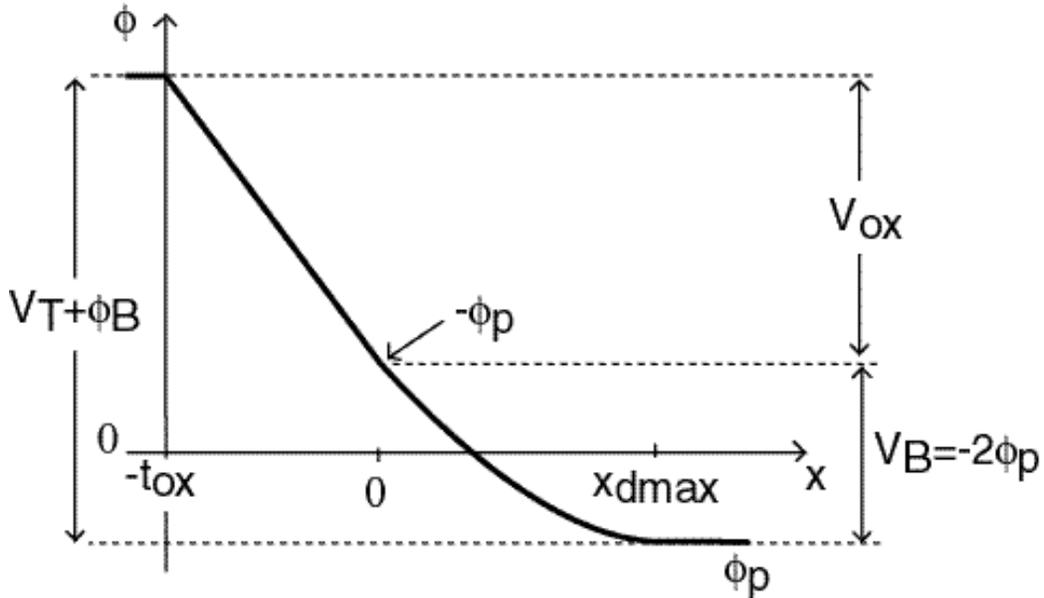
Ainsi :

$$V_{ox}(V_T) = E_{ox}(V_T)t_{ox} = \frac{qN_a x_d(V_T)}{\epsilon_{ox}} t_{ox} = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\epsilon_s qN_a(-2\phi_p)}$$



## Calcul de la tension de seuil (suite et fin ..)

**Finalemment :** Somme des potentiels dans la structure.



$$V_T + \phi_B = V_B(V_T) + V_{ox}(V_T) = -2\phi_P + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\varepsilon_s q N_a (-2\phi_p)}$$

Solution  $V_T$ :

$$V_{GB} = V_T = V_{FB} - 2\phi_P + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\varepsilon_s q N_a (-2\phi_p)}$$

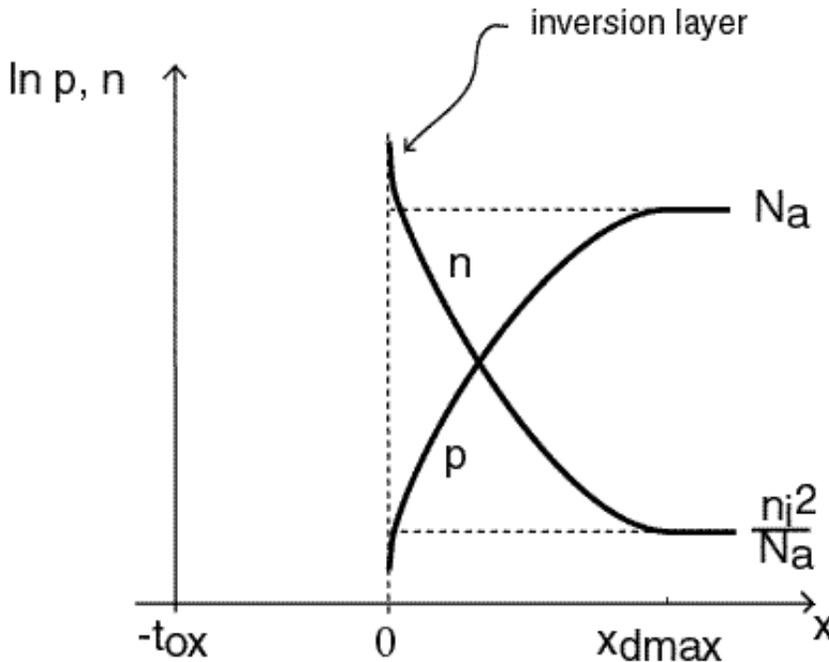
**Dépendances :**

- Si  $N_a \uparrow \Rightarrow V_T \uparrow$ . Plus le dopage est élevé, plus la tension doit être élevée pour avoir  $n(0) = N_a$
- Si  $C_{ox} \uparrow$  ( $t_{ox} \downarrow$ )  $\Rightarrow V_T \downarrow$ . Plus l'oxyde est fin, moins il y a de barrière de potentiel dans l'oxyde.

## 6. Inversion

Que se passe-t-il si  $V_{GB} > V_T$ ?

Plus d'électrons à l'interface Si/SiO<sub>2</sub> que d'accepteurs  
⇒ *inversion*.



Modulation de la concentration à l'interface Si/SiO<sub>2</sub>  
par  $V_{GB} \Rightarrow V_{GB} \uparrow \rightarrow n(0) \uparrow \rightarrow |Q_n| \uparrow$  :

**Contrôle par effet de champ de la concentration de charges mobiles** [base du MOSFET]

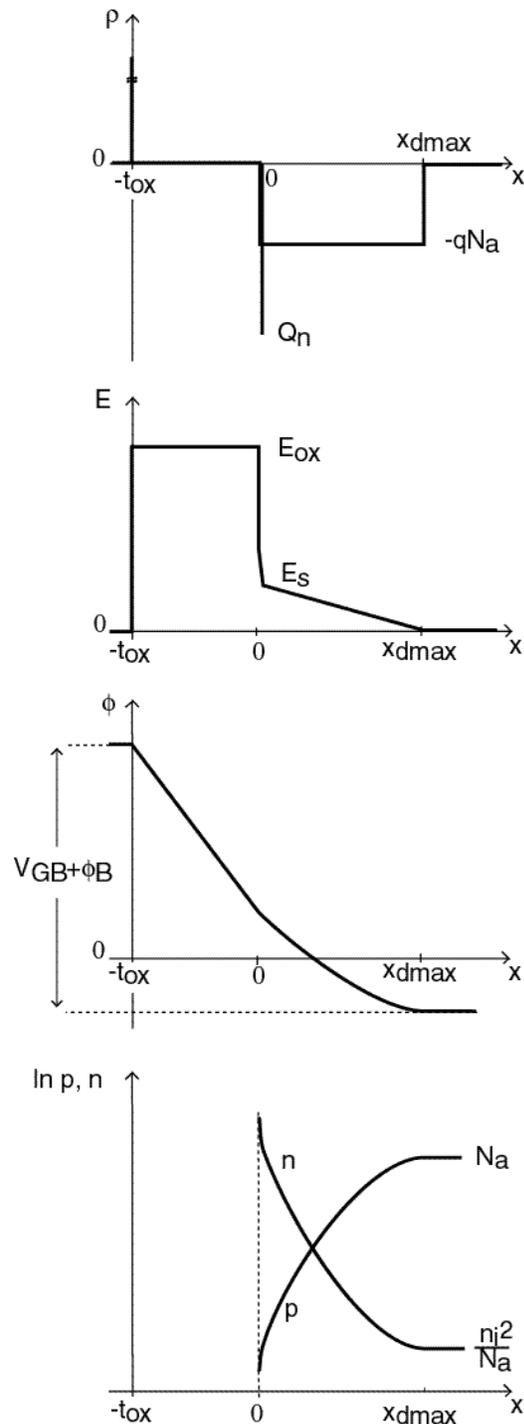
Si on veut calculer  $Q_n$  en fonction de  $V_{GB}$

Relation de contrôle de la charge

On prend *approximation charges localisées*: couche d'e-Si/SiO<sub>2</sub> est très petite par rapport à toute autre dimension entre  $(t_{ox}, x_d)$ .

# Relation de contrôle de la charge

Pour l'obtenir, reprenons le fonctionnement général



## Relation de contrôle de la charge (suite)

### Hypothèses:

$$n(0) \propto e^{q\phi(0)/kT}$$

$$qN_a x_d \propto \sqrt{\phi(0)}$$

Ainsi pour  $V_{GB} \uparrow$  et  $\phi(0) \uparrow$ ,  $n(0)$  varie beaucoup, mais  $|Q_d|$  varie très peu.

### Conséquences:

- $x_d$  n'augmente pas au dessus du seuil:

$$x_d(\text{inv.}) \approx x_d(V_T) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(-2\phi_p)}{qN_a}} = x_{d,\text{max}}$$

- $V_B$  augmente peu au dessus du seuil  $V_B(V_T) = -2\phi_p$  (une fine "feuille" d'e- ne contribue pas à  $V_B$ ):

$$V_B(\text{inv.}) \approx V_B(V_T) = -2\phi_p$$

## Relation de contrôle de la charge (suite..)

- Toute tension supérieure à  $V_T$  sert à augmenter la charge d'inversion  $Q_n$ , analogie avec une capacité :
  - Electrode supérieure: grille métallique
  - Electrode inférieure: couche d'inversion

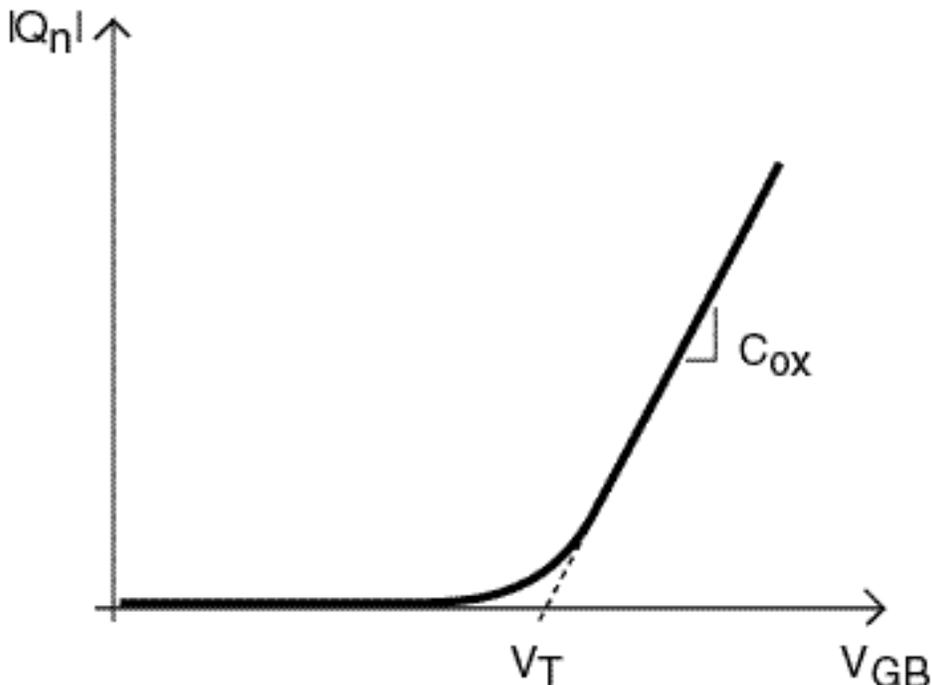
$$Q = CV$$

⇒

$$Q_n = -C_{ox} (V_{GB} - V_T) \quad \text{pour } V_{GB} > V_T$$

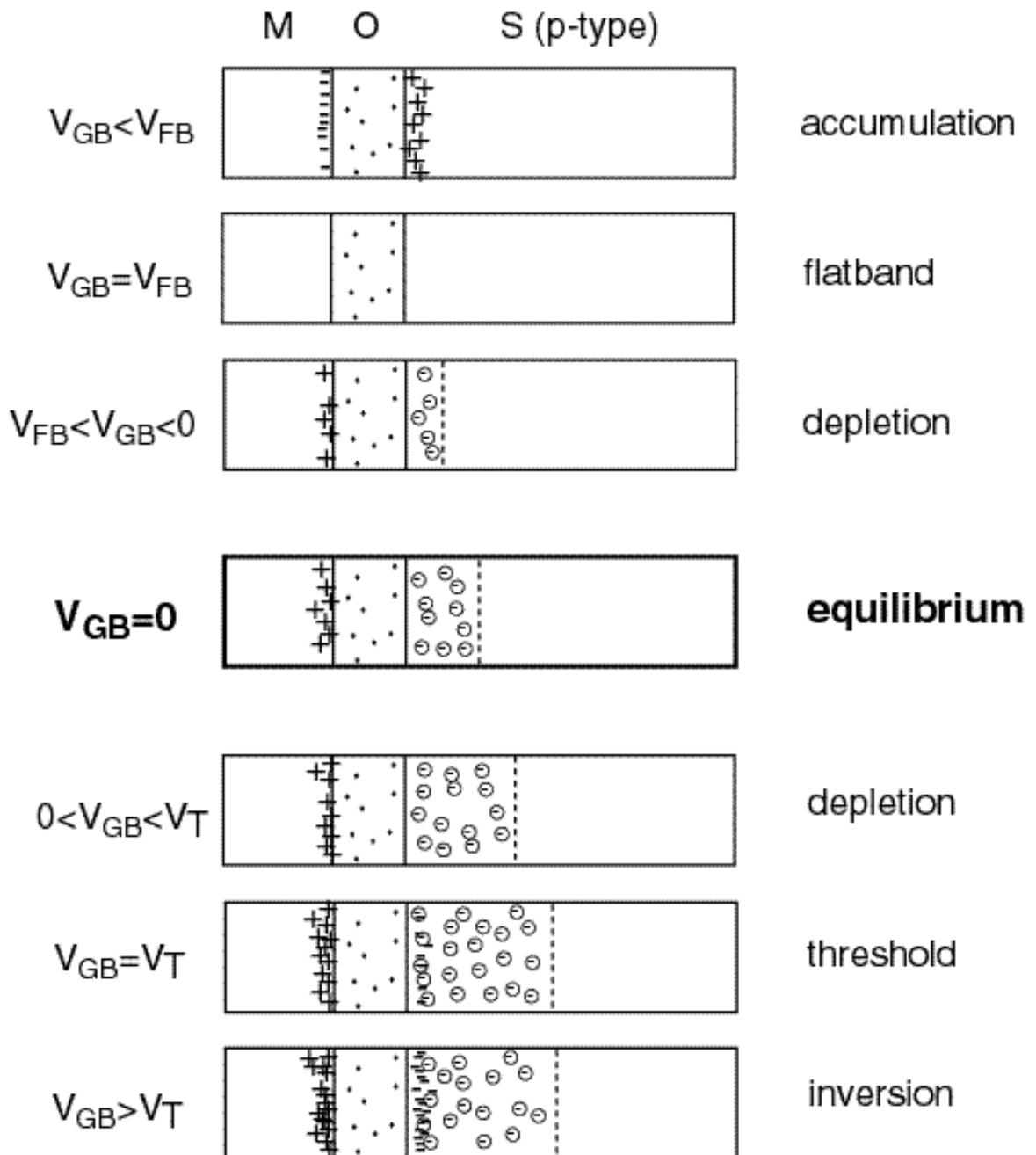
Coul/cm<sup>2</sup>

Existence de  $Q_n$  et contrôle de  $Q_n$  par  $V_{GB}$   
⇒ clé de l'électronique du MOS



# Qu'a t-on appris?

## Résumé



**A l'inversion:**

$$|Q_n| = C_{ox} (V_{GB} - V_T) \quad \text{for } V_{GB} > V_T$$