



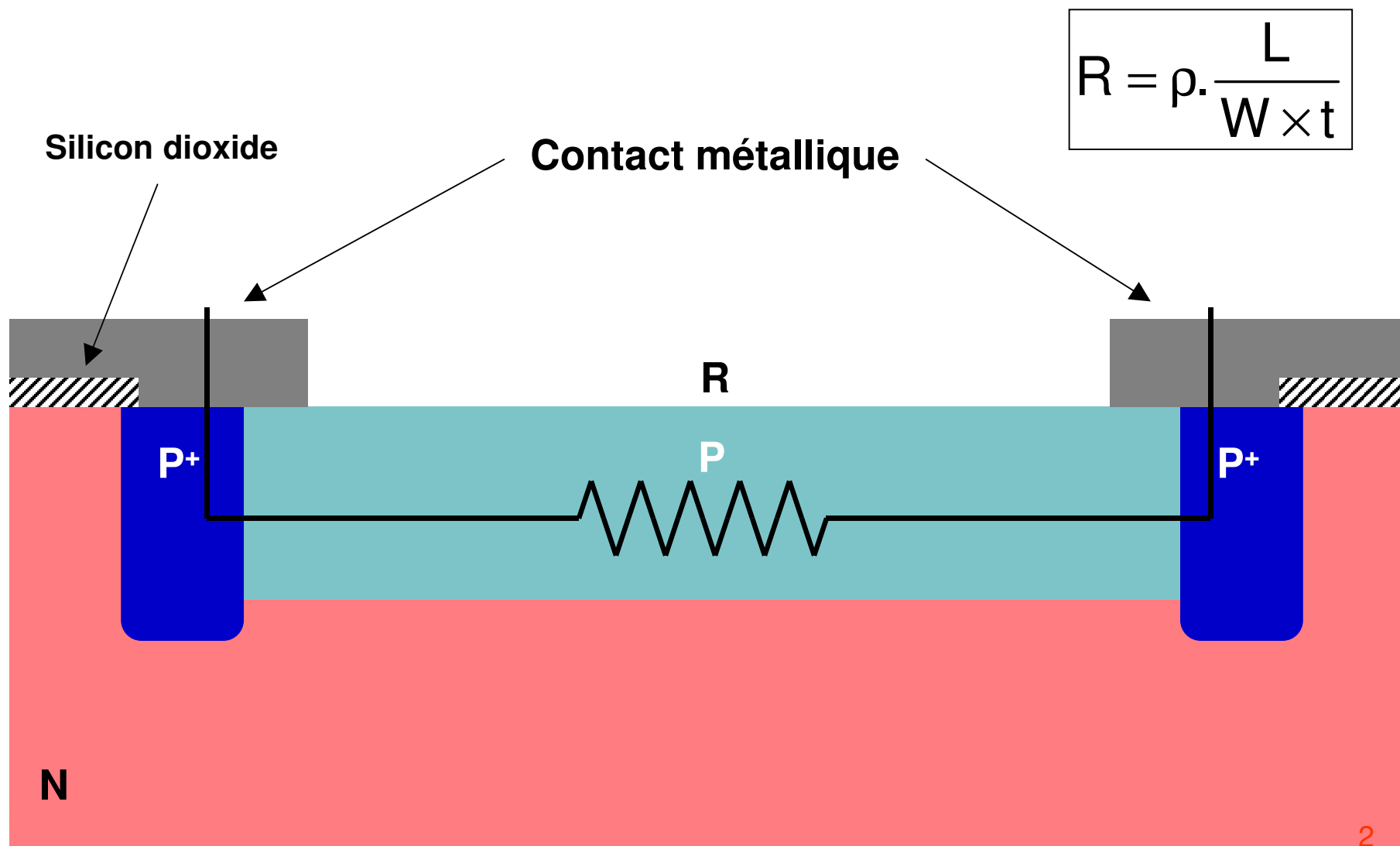
LU3EE200
**Techniques et dispositifs pour l'électronique
analogique et numérique**

Chapitre n° 3 :
Le MOSFET





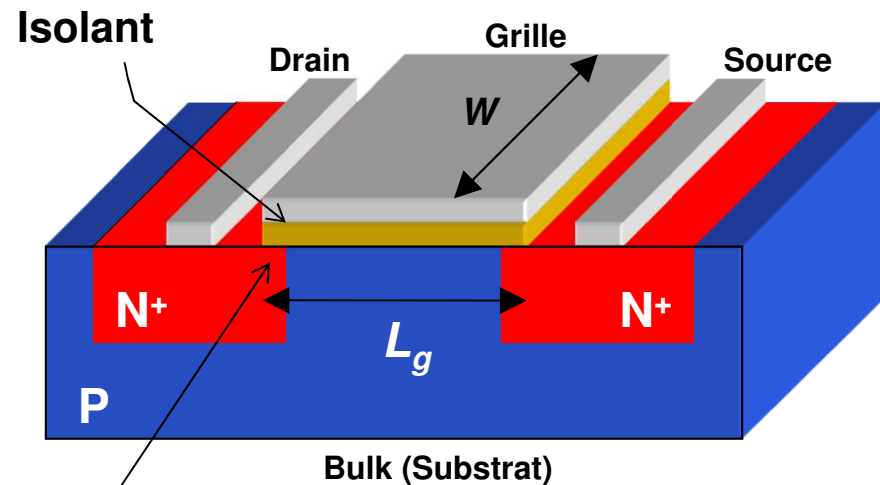
Résistance



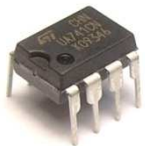


Structure et fonctionnement du MOSFET

- **NMOS 3D**



$$L_g = L + 2.L_{ov}$$

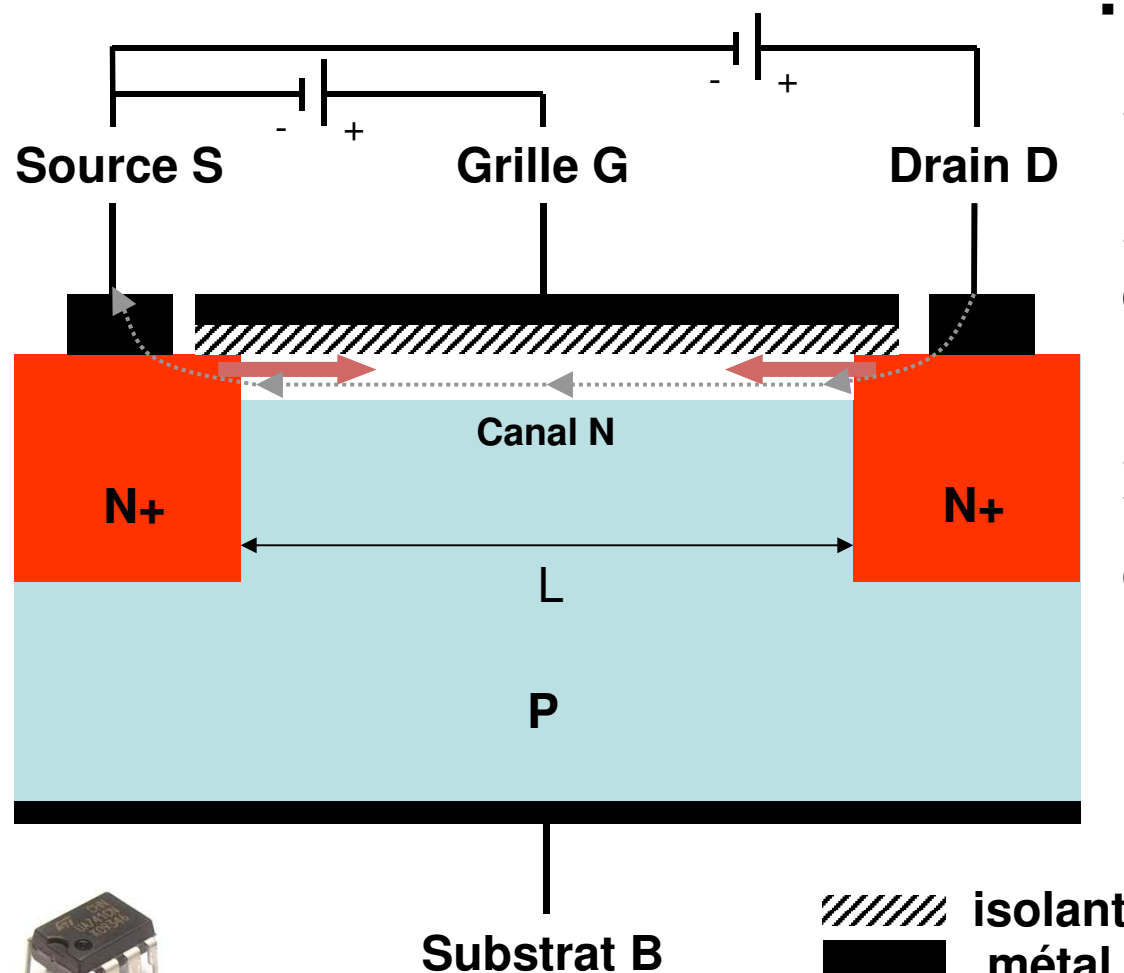


Recouvrement de la grille sur le drain : Overlap $\rightarrow L_{ov}$
L est la longueur du canal \rightarrow Pour un MOSFET Canal long $L_{ov} \ll L$ donc $L \approx L_g$



Structure et fonctionnement du MOSFET

- **NMOS 2D**



- On applique une tension $V_{GS} > V_{Tn}$

→ Les trous sous le canal sont repoussés vers le substrat

→ Les électrons de la source et du drain sont attirés sous la grille

création d'un canal N

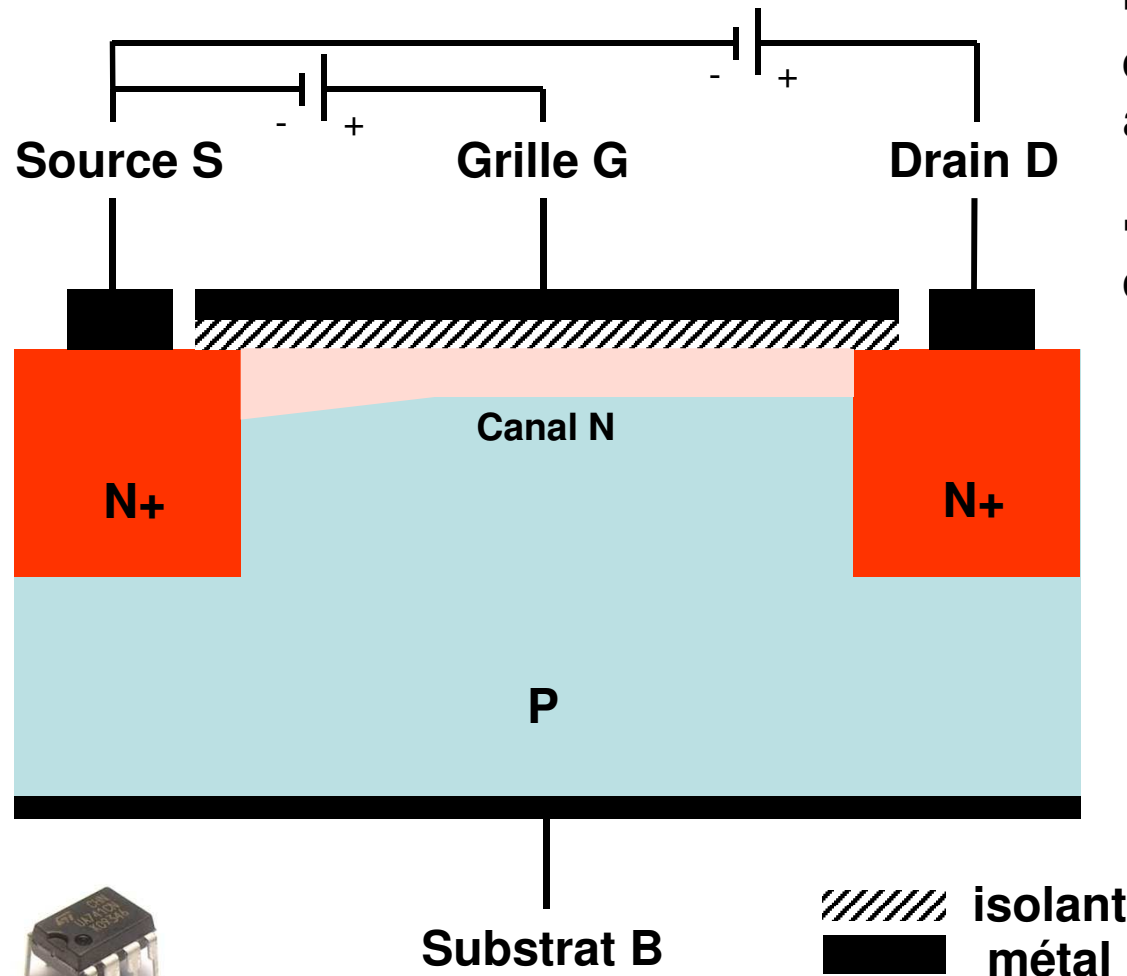
→ Si on applique une tension $V_{DS} > 0$ alors un courant I_{DSn} circule du drain vers la source





Structure et fonctionnement du MOSFET

- **NMOS 2D**



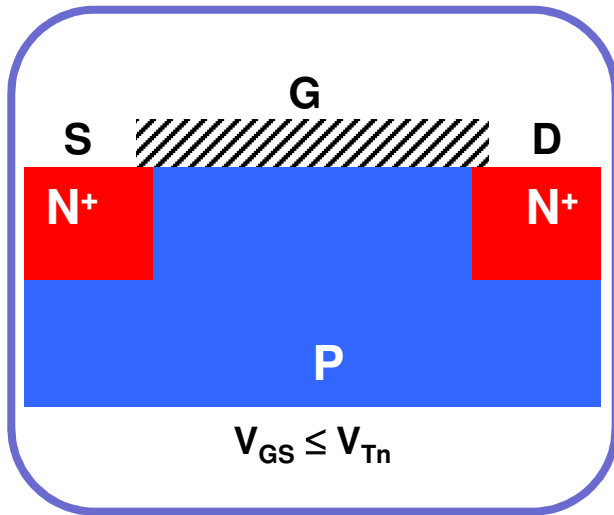
- Pour des tensions V_{DS} faibles le courant I_{Dn} augmente linéairement avec V_{DS}
- Lorsque la tension V_{DS} augmente on constate un effet de **pincement**
→ Le courant I_{DSn} tend à se stabiliser et à rester à peu près constant



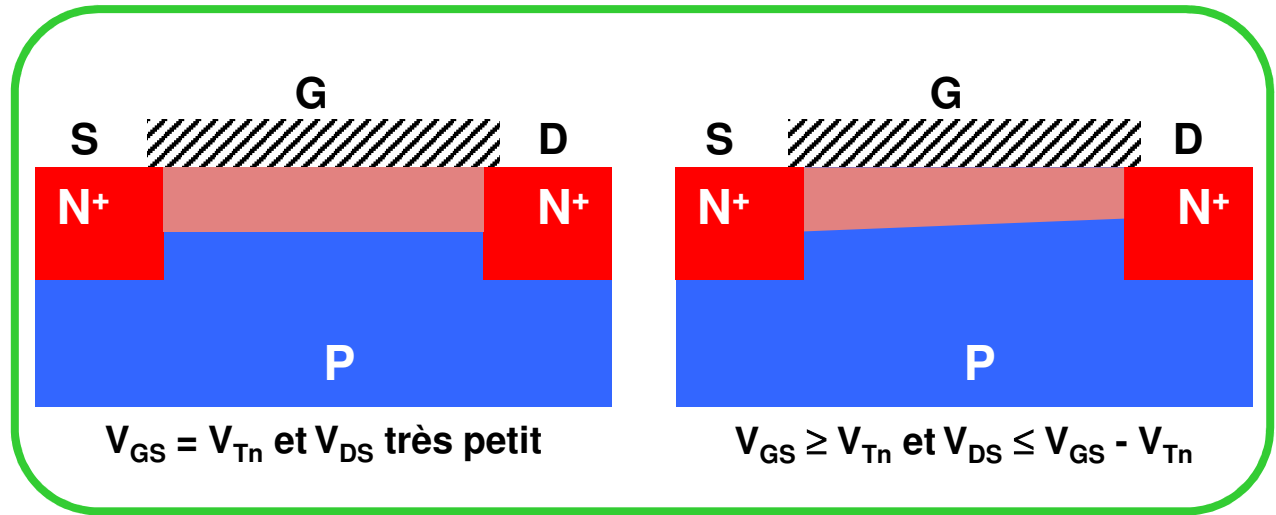


Structure et fonctionnement du MOSFET

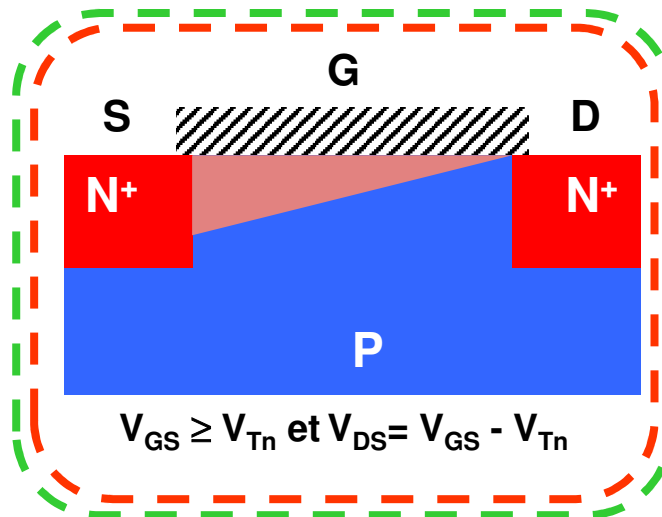
bloqué



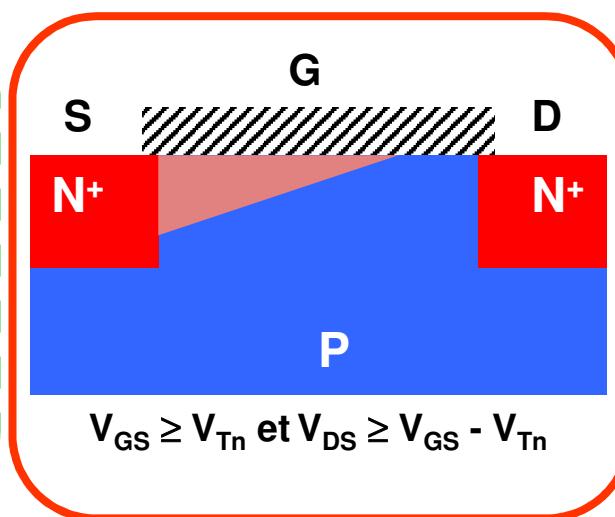
Régime ohmique



Limite
ohmique
saturé



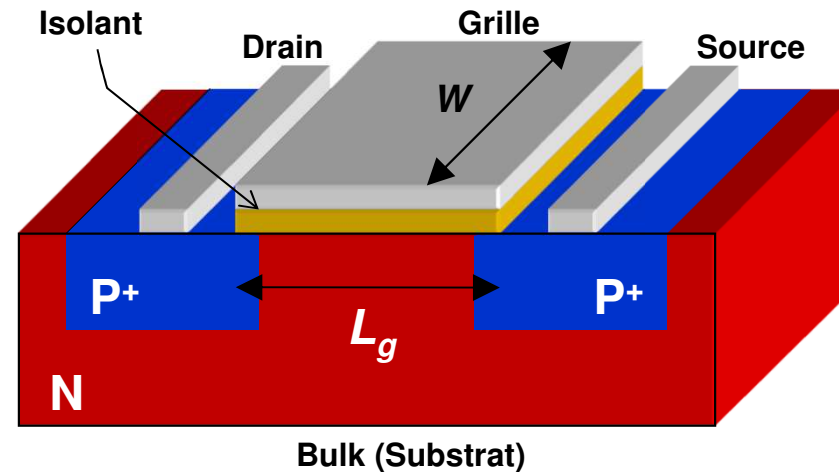
Régime
saturé





Structure et fonctionnement du MOSFET

- **PMOS 3D**



Mobilité du NMOS $\mu_n = 2 \text{ à } 3 \mu_p$ Mobilité du PMOS

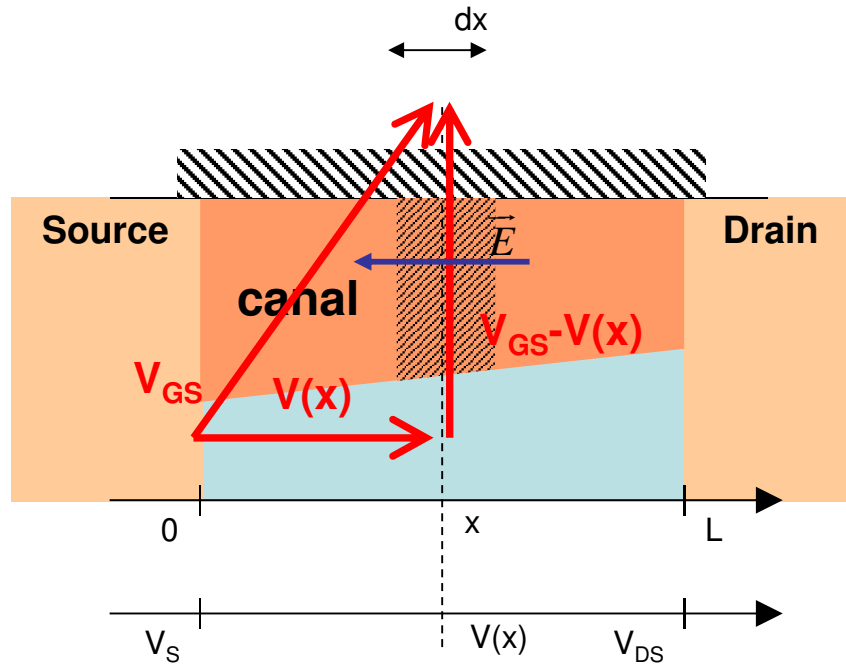




Calcul du courant dans le NMOS

Régime ohmique

On considère une portion infinitésimale du canal de dimension dx , située à une distance x de la source. On établit la quantité de charge $dq(x)$



Le courant i_{DS} est orienté de D vers S et est opposé au courant d'électrons i

$$dq(x) = -C_{ox} W dx (V_{GS} - V(x) - V_{Tn})$$

Donc le courant est

$$i = \frac{dq(x)}{dt} = -C_{ox} W \frac{dx}{dt} (V_{GS} - V(x) - V_{Tn})$$

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$

avec

$$v(x) = \frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$$

$$i = -\mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{Tn}) \frac{dV(x)}{dx}$$

$$i_{DS} = \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{Tn}) \frac{dV(x)}{dx}$$





Calcul du courant dans le NMOS

Régime ohmique

$$i_{DS} = \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{Tn}) \frac{dV(x)}{dx}$$
$$\Rightarrow i_{DS} dx = C_{ox} W \mu_n dV(x) (V_{GS} - V(x) - V_{Tn})$$
$$\Rightarrow \int_0^L i_{DS} dx = \int_0^{V_{DS}} \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V_{Tn} - V(x)) dV(x)$$
$$\Rightarrow i_{DS} L = C_{ox} W \mu_n \left[(V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$i_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

- Limite Régime ohmique-saturé $V_{GS} \geq V_{Tn}$ et $V_{DS} = V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Tn}$

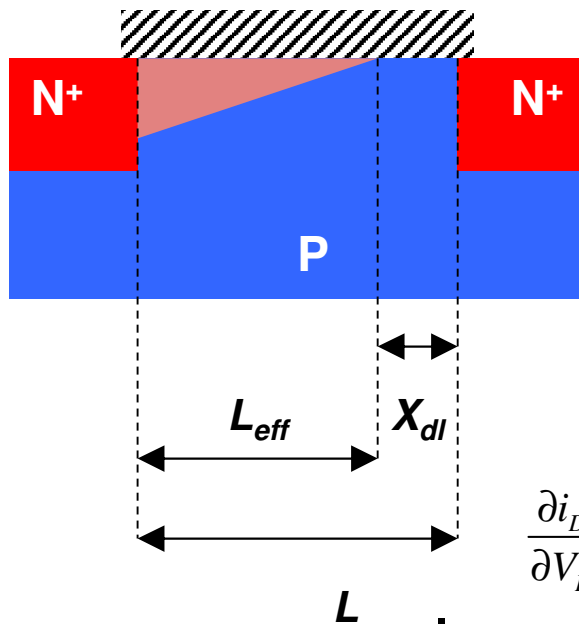
$$i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DSsat}^2$$





Calcul du courant dans le NMOS

Régime saturé



$$i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{Tn})^2$$

$$\Rightarrow i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \frac{L}{L_{eff}}$$

$$\Rightarrow i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \frac{L_{eff} + X_{dl}}{L_{eff}}$$

$$\Rightarrow i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \left(1 + \frac{X_{dl}}{L_{eff}} \right)$$

$$\frac{\partial i_{DS}}{\partial V_{DS}} = -\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}^2} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \frac{\partial L_{eff}}{\partial V_{DS}}$$

$$L_{eff} = L - X_{dl}$$

$$\frac{\partial L_{eff}}{\partial V_{DS}} = \frac{\partial L}{\partial V_{DS}} - \frac{\partial X_{dl}}{\partial V_{DS}}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial i_{DS}}{\partial V_{DS}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}^2} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \frac{\partial X_{dl}}{\partial V_{DS}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \left[\frac{1}{L_{eff}} \frac{\partial X_{dl}}{\partial V_{DS}} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{\partial i_{DS}}{\partial V_{DS}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \lambda = i_{DS} \cdot \lambda$$

$$i_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn})^2 (1 + \lambda [V_{DS} - V_{DSsat}])$$





Courant dans le PMOS

- Régime bloqué

$$i_{SD} = 0$$

- Régime ohmique $V_{SG} \geq |V_{Tp}|$ et $V_{SD} \leq V_{SDsat} = V_{SG} - |V_{Tp}|$

$$i_{SD} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD} - \frac{V_{SD}^2}{2} \right]$$

- Limite Régime ohmique-saturé $V_{SG} \geq |V_{Tp}|$ et $V_{SD} = V_{SDsat} = V_{SG} - |V_{Tp}|$

$$i_{SD} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|)^2$$

- Régime saturé $V_{SG} \geq |V_{Tp}|$ et $V_{SD} \geq V_{SDsat} = V_{SG} - |V_{Tp}|$

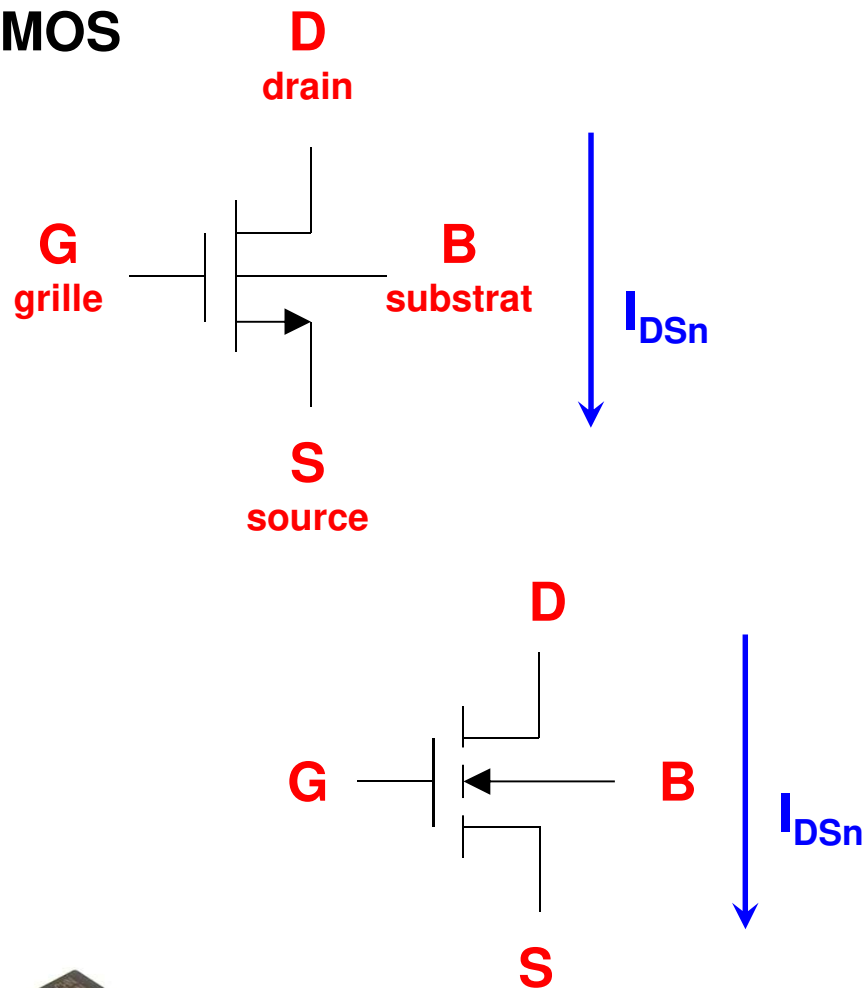
$$i_{SD} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|)^2 (1 + \lambda [V_{SD} - V_{SDsat}])$$



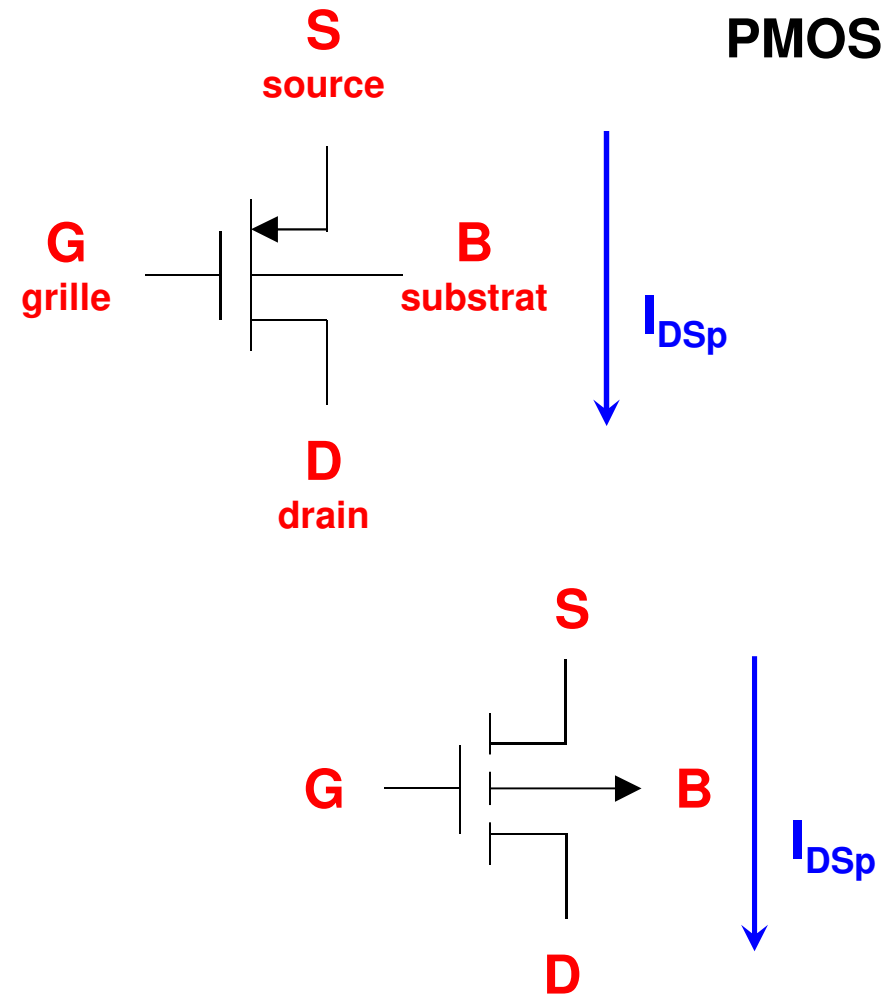


Symboles des MOSFETS

NMOS

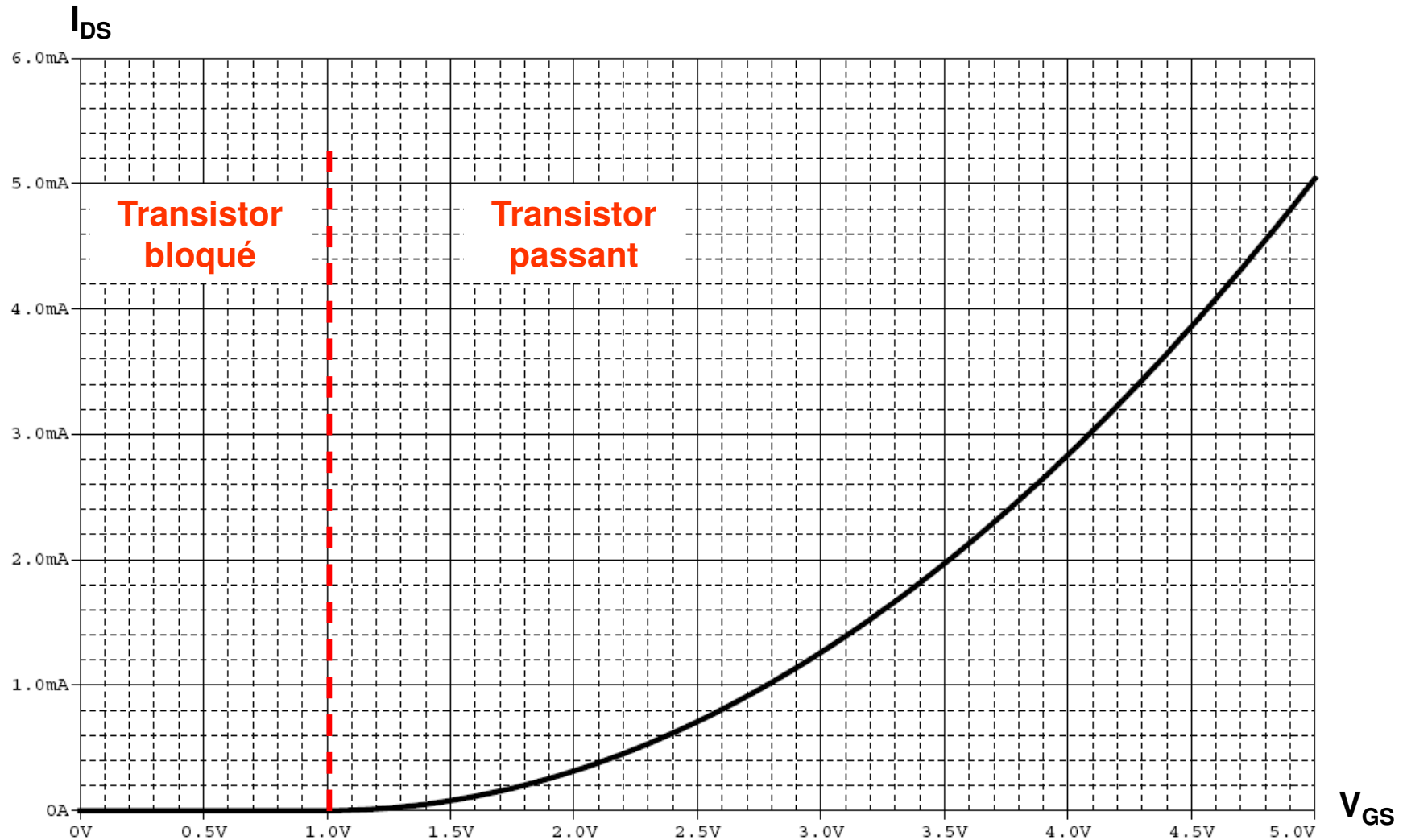


PMOS





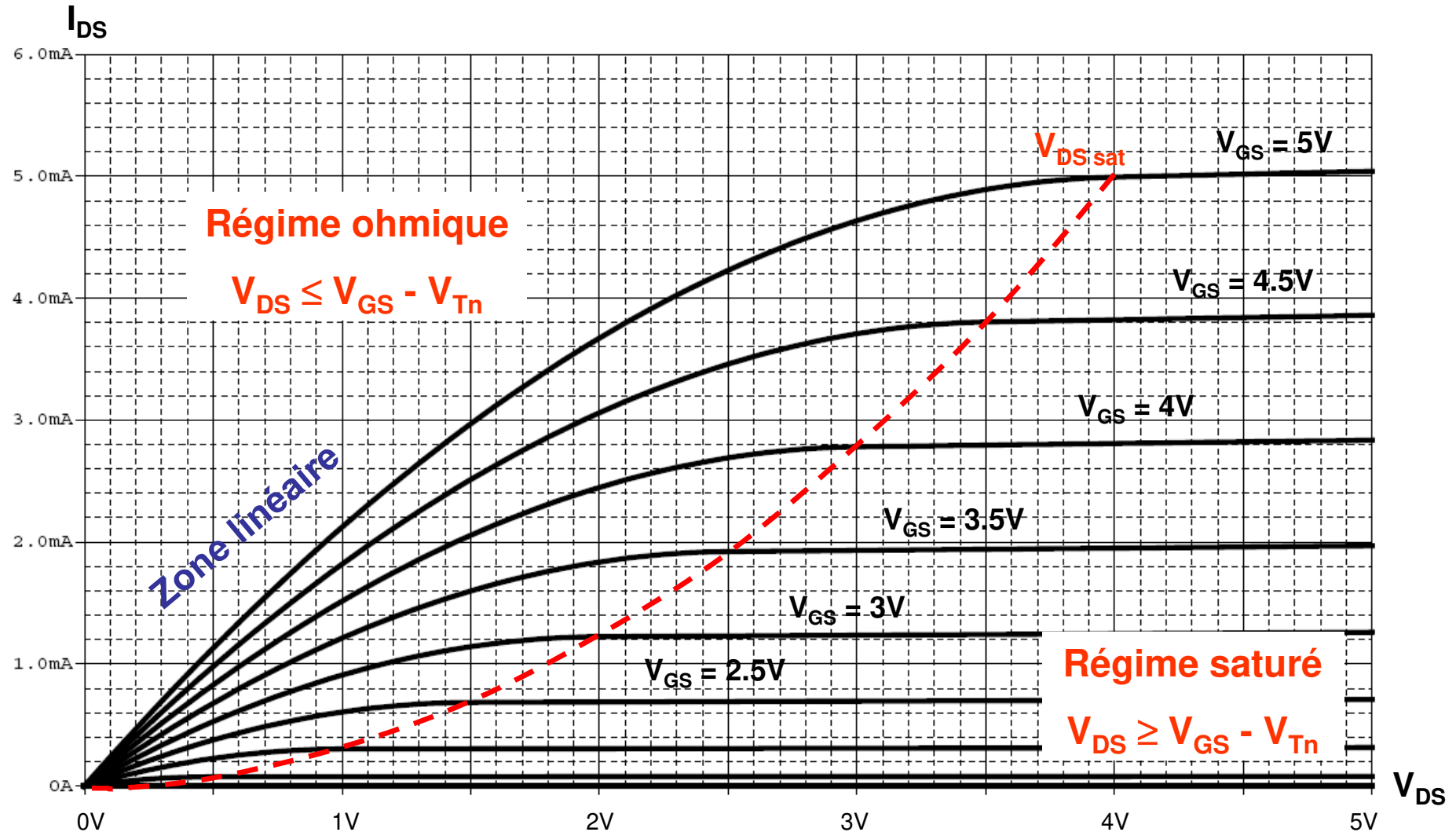
Caractéristiques courant-tension NMOS



NMOS; $L = 2\mu\text{m}$; $W = 10\mu\text{m}$; $\mu_n \cdot C_{ox} = 120\mu\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$; $V_{Tn0} = 1\text{V}$; $\lambda = 0.1\text{V}^{-1}$; $V_{DS} = 5\text{V}$



Caractéristiques courant-tension NMOS

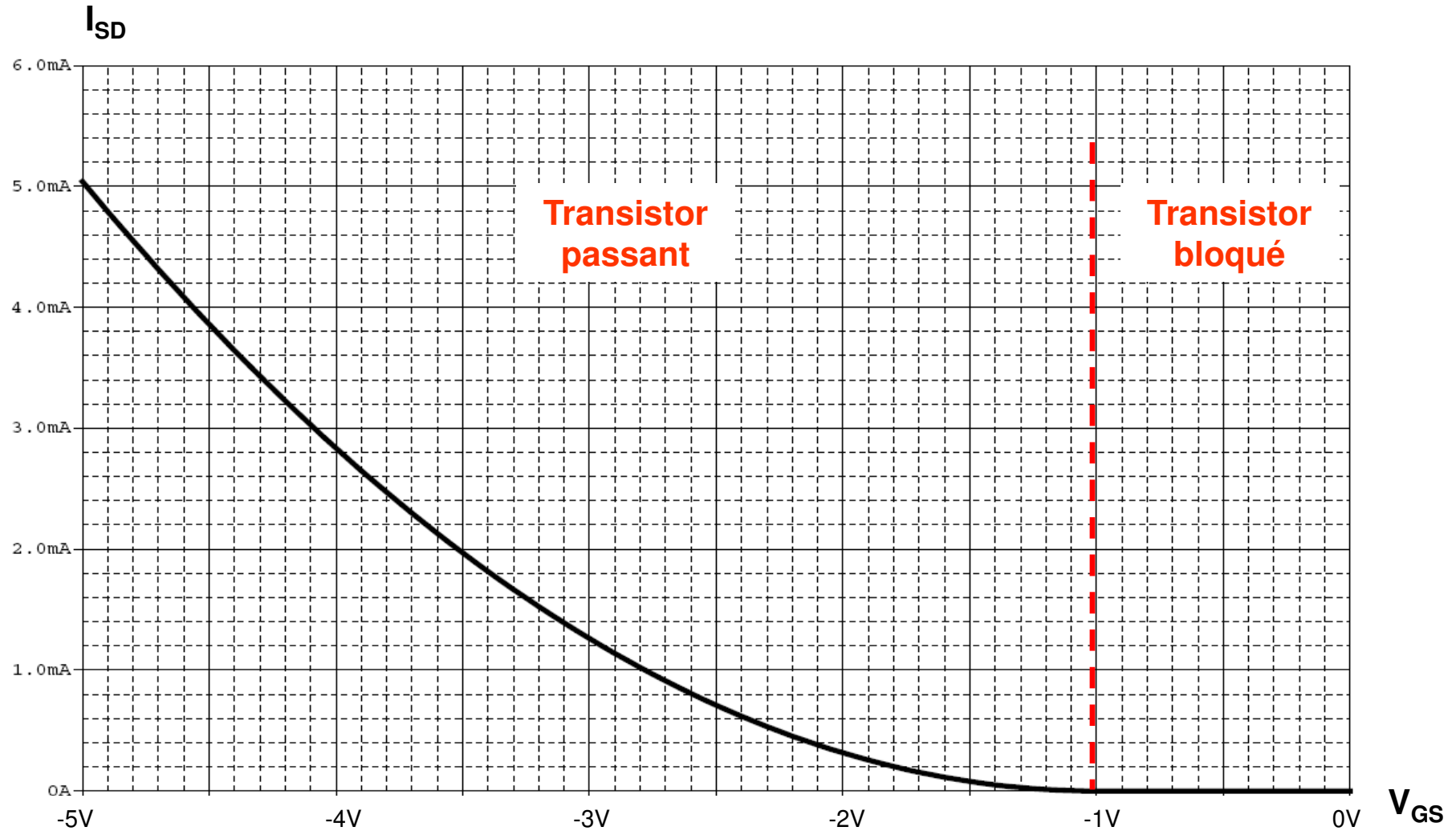


NMOS; $L = 2\mu\text{m}$; $W = 10\mu\text{m}$; $\mu_n.C_{ox} = 120\mu\text{A.V}^{-2}$; $V_{Tn0} = 1\text{V}$; $\lambda = 0.1\text{V}^{-1}$





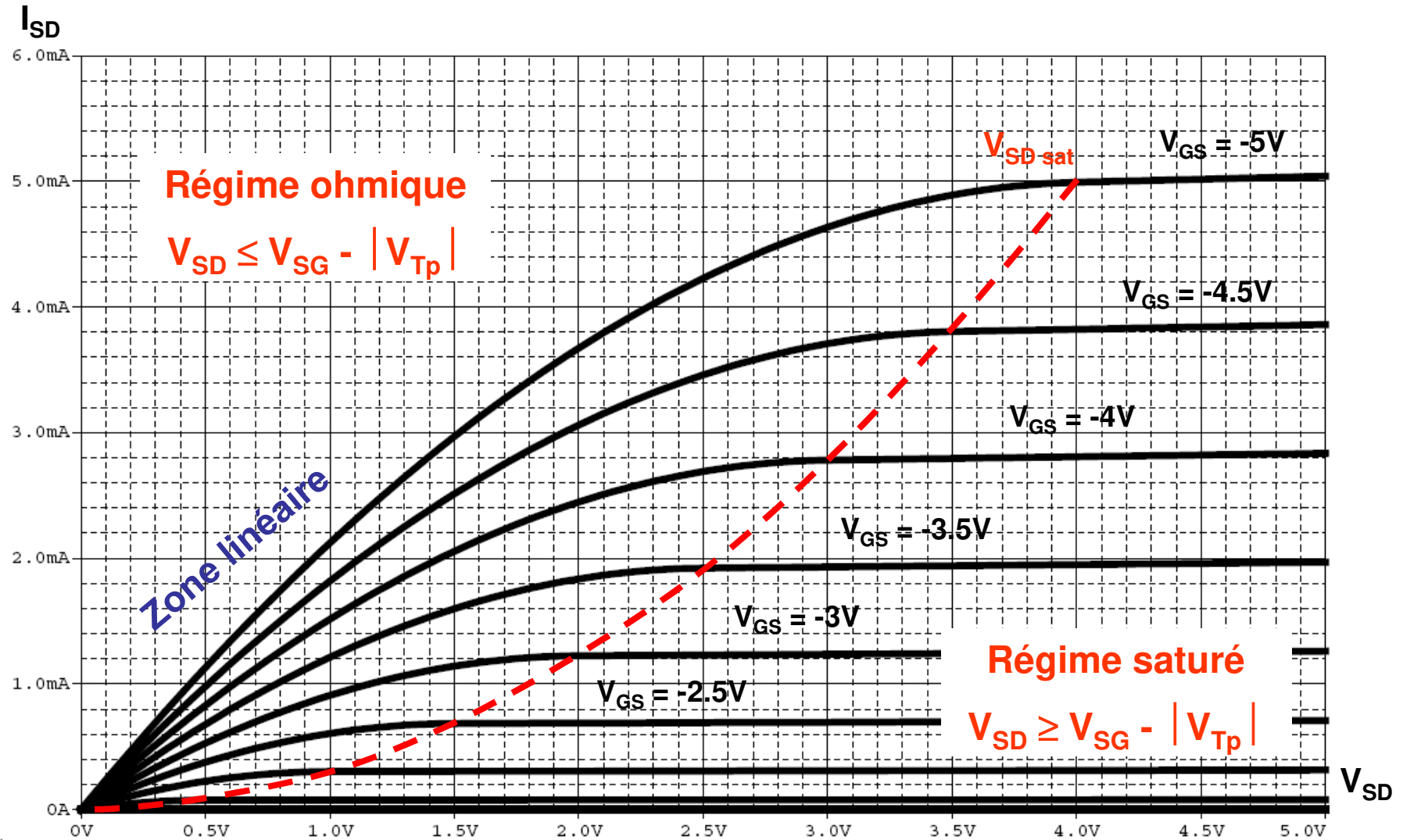
Caractéristiques courant-tension PMOS



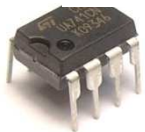
PMOS; $L = 2\mu\text{m}$; $W = 30\mu\text{m}$; $\mu_p.C_{ox} = 40\mu\text{m.V}^{-2}$; $V_{Tp0} = -1\text{V}$; $\lambda = 0.1\text{V}^{-1}$; $V_{SD} = 5\text{V}$



Caractéristiques courant-tension PMOS



PMOS; $L = 2\mu\text{m}$; $W = 30\mu\text{m}$; $\mu_p.C_{ox} = 40\mu\text{A.V}^{-2}$; $V_{Tp0} = -1\text{V}$; $\lambda = 0.1\text{V}^{-1}$

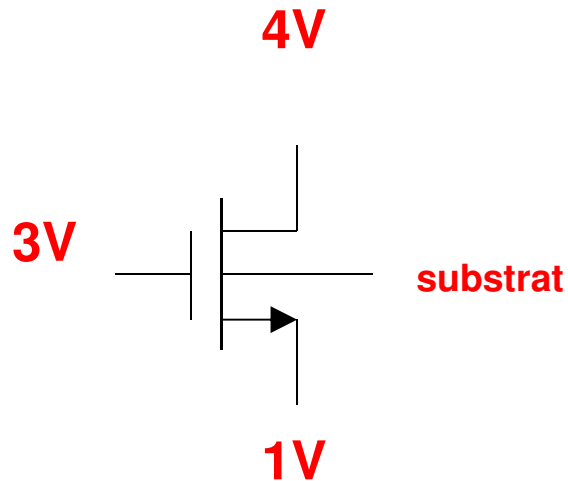




Exercice

NMOS

- $V_{DD} = 5 \text{ V}$; $V_{SS} = 0 \text{ V}$
- $L = 2\mu\text{m}$; $W = 10\mu\text{m}$; $\mu_n \cdot C_{ox} = 120\mu\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$;
- $V_{Tn0} = 1 \text{ V}$; $\lambda = 0.1 \text{ V}^{-1}$; $2\phi_f = 0.6 \text{ V}$;
 $\gamma_n = 0,5 \text{ V}^{1/2}$;



$$V_{Tn} = V_{Tn0} + \gamma_n \left(\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f} \right)$$

- Régime bloqué : Si $V_{GS} \leq V_{Tn}$

$$I_{Dn} = 0$$

- Régime ohmique : Si $V_{GS} \geq V_{Tn}$ et $V_{DS} \leq V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Tn}$

$$I_{Dn} = \left(\frac{W_n}{L_n} \right) \mu_n \cdot C_{ox} \left[V_{GS} - V_{Tn} - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}$$

- Régime saturé : Si $V_{GS} \geq V_{Tn}$ et $V_{DS} \geq V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Tn}$

$$I_{Dn} = \frac{1}{2} \left(\frac{W_n}{L_n} \right) \mu_n \cdot C_{ox} [V_{GS} - V_{Tn}]^2 (1 + \lambda_n \cdot (V_{DS} - V_{DSsat}))$$