

Soutenance de Thèse
Vendredi 8 Octobre 2004

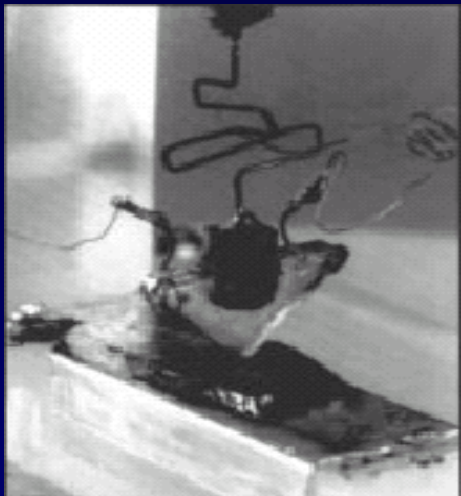
Modélisation des structures
Métal-Oxyde-Semiconducteur (MOS) :
Applications aux dispositifs mémoires

Sandrine BERNARDINI





- Introduction
- La capacité MOS
- Le transistor MOS
- La mémoire à nodules de silicium
- Conclusions
- Perspectives



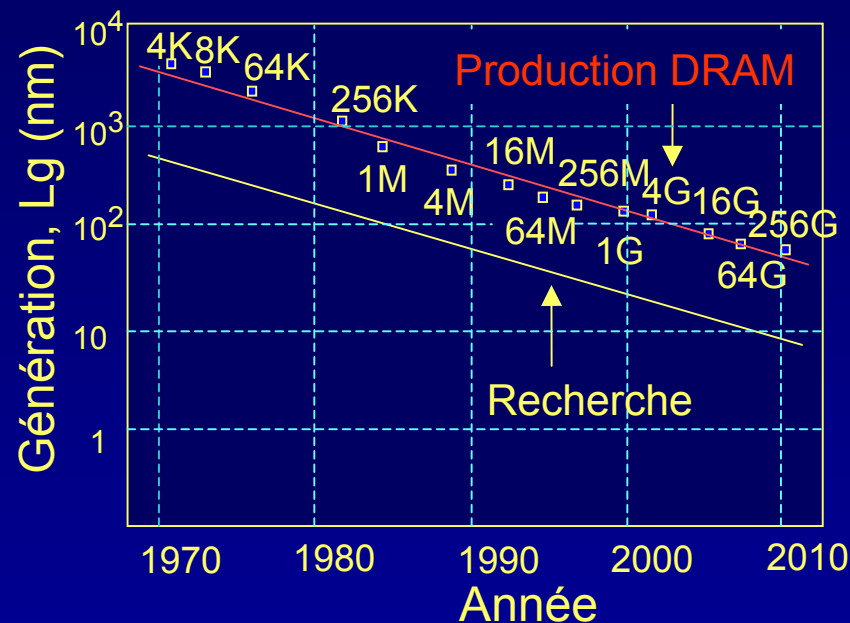
➤ 1947 : 1^{er} transistor bipolaire en Germanium



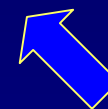
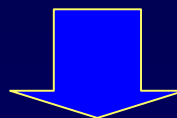
➤ 1963 : 1^{er} transistor MOSFET

➤ 1965 : La loi de Moore

- 12 mois : Nombre de composants X2
- Réduction de la taille des composants



Multimédia



Automobile

Électronique embarquée



Télécommunication

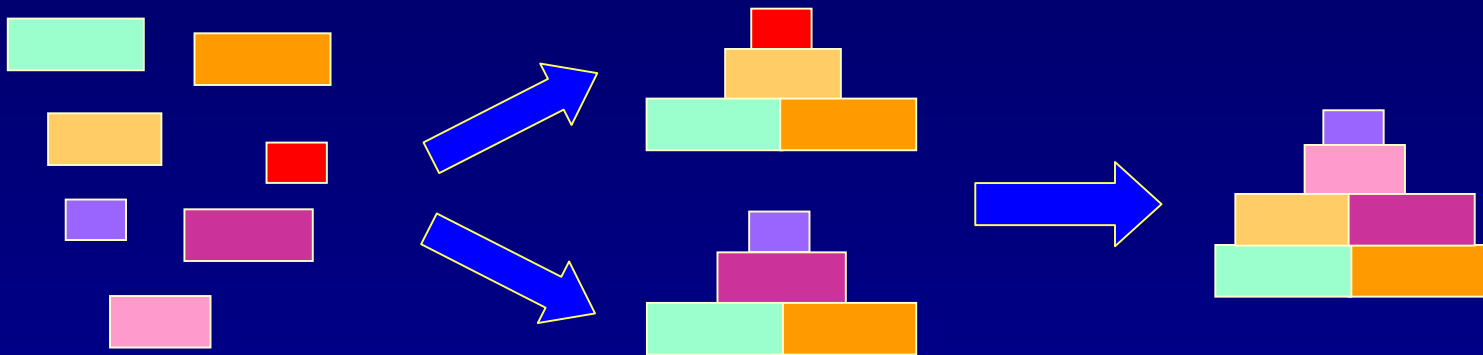


🕒 Objectif de la thèse

Étude des phénomènes parasites liés à l'évolution des dispositifs

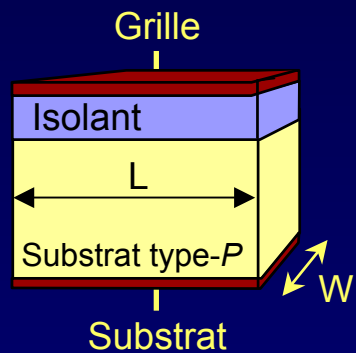
➤ Deux outils : la modélisation et la caractérisation

- Comprendre les mécanismes de fonctionnement
 - Élaborer des algorithmes pour décrire un phénomène

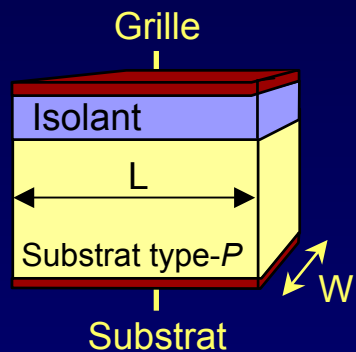


- Comparer les simulations avec des données expérimentales
 - Élaborer des modèles plus complexes

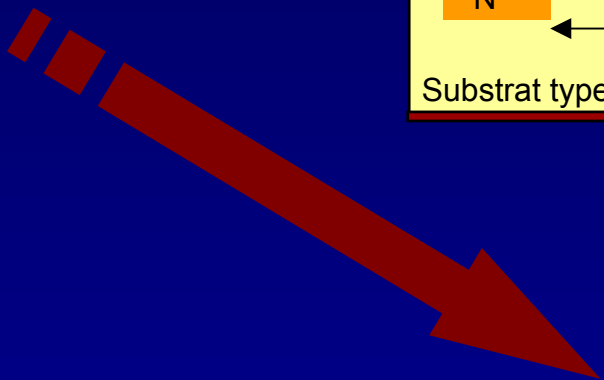
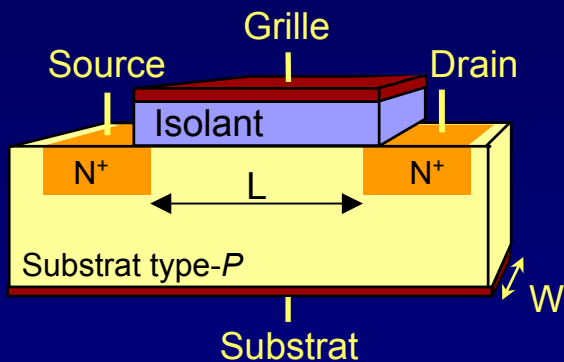
Capacité



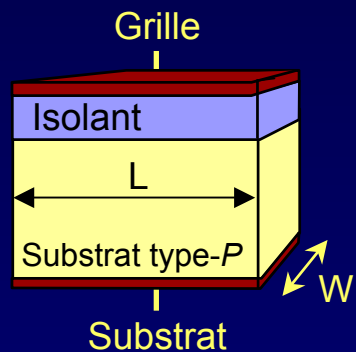
Capacité



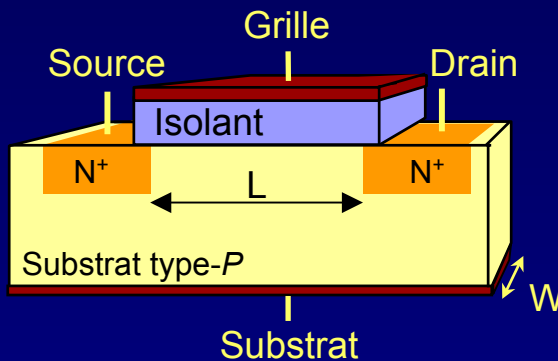
MOSFET



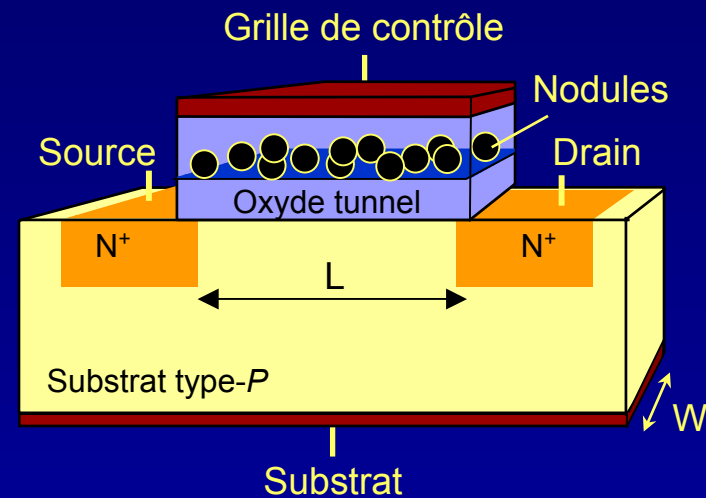
Capacité



MOSFET



Mémoires



- Introduction
- La capacité MOS**
- Le transistor MOS
- La mémoire à nodules de silicium
- Conclusions
- Perspectives

- Calcul du potentiel de surface Ψ_S
 - Neutralité électrique et équation aux potentiels

$$\begin{cases} Q_G + Q_{SC} = 0 \\ V_{GS} - V_{BS} = V_{OX} + \Psi_S + \Phi_{MS} \end{cases} \longrightarrow V_{GB} = \Phi_{MS} + \Psi_S - \frac{Q_{SC}(\Psi_S)}{C_{OX}}$$

Résolution de l'équation implicite : Méthode de Newton-Raphson

□ Calcul du potentiel de surface Ψ_S

- Neutralité électrique et équation aux potentiels

$$\begin{cases} Q_G + Q_{SC} = 0 \\ V_{GS} - V_{BS} = V_{OX} + \Psi_S + \Phi_{MS} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad V_{GB} = \Phi_{MS} + \Psi_S - \frac{Q_{SC}(\Psi_S)}{C_{OX}}$$

Résolution de l'équation implicite : Méthode de Newton-Raphson

□ Calcul de la charge dans le semiconducteur

- Eq. de Poisson, Th. de Gauss $\longrightarrow Q_{SC}(\Psi_S)$

□ Calcul du potentiel de surface Ψ_S

- Neutralité électrique et équation aux potentiels

$$\begin{cases} Q_G + Q_{SC} = 0 \\ V_{GS} - V_{BS} = V_{OX} + \Psi_S + \Phi_{MS} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad V_{GB} = \Phi_{MS} + \Psi_S - \frac{Q_{SC}(\Psi_S)}{C_{OX}}$$

Résolution de l'équation implicite : Méthode de Newton-Raphson

□ Calcul de la charge dans le semiconducteur

- Eq. de Poisson, Th. de Gauss $\longrightarrow Q_{SC}(\Psi_S)$

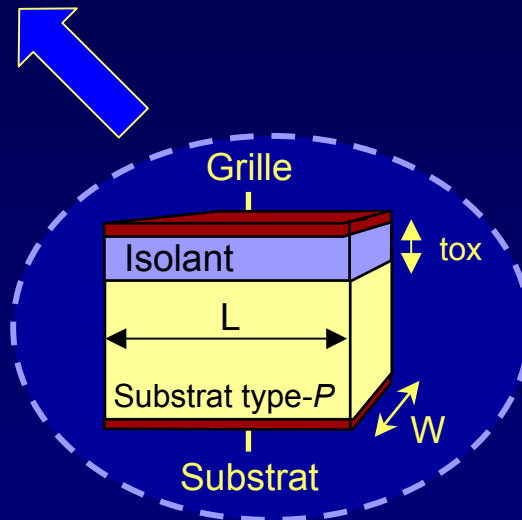
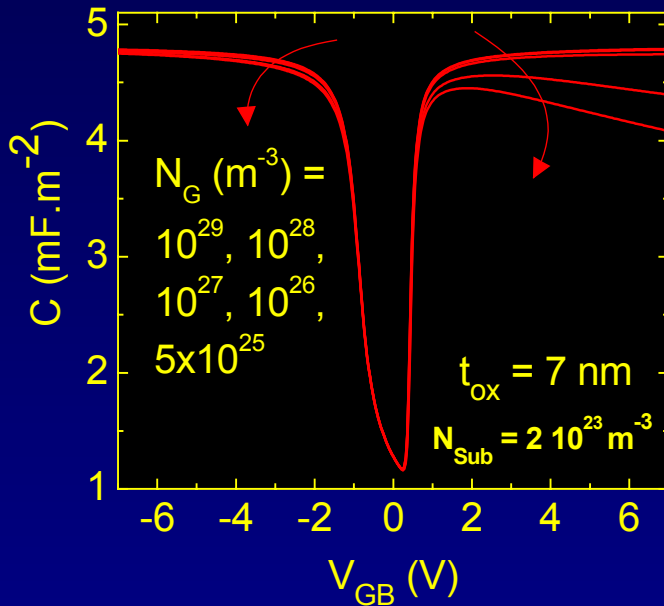
□ Expression de la capacité

$$C_{SC} = \left| \frac{\partial Q_{SC}}{\partial \Psi_S} \right| \quad \longrightarrow \quad C = \frac{1}{\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_{SC}}}$$

- Poly-désertion de la grille
- 2 résolutions de Newton imbriquées

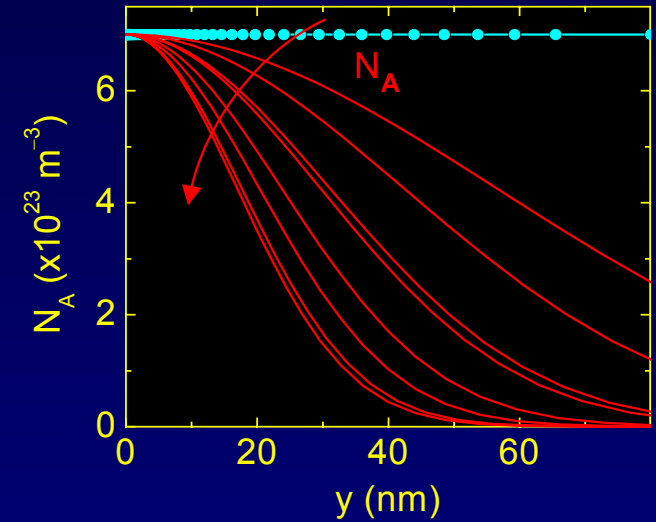
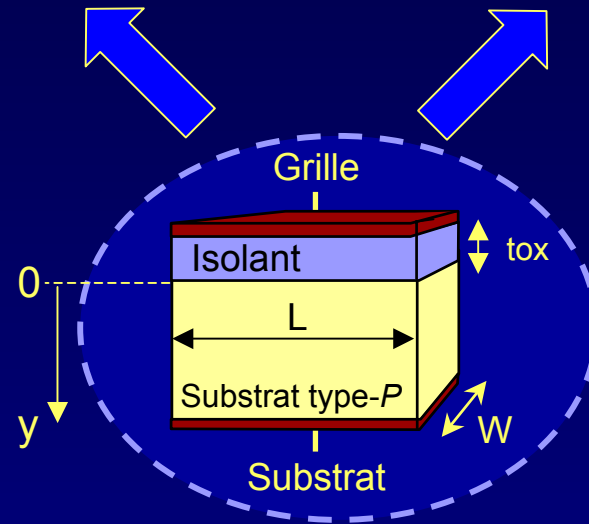
$$V_{GB} = \Phi_{MS} + \Psi_S - \Psi_{SG} - \frac{Q_{SC}(\Psi_S)}{C_{ox}}$$

Rajout d'un terme dans l'équation implicite

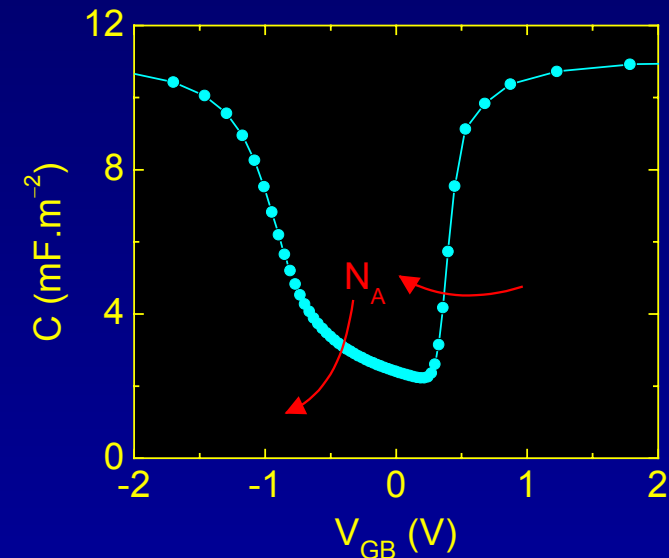


❑ Poly-désertion de la grille

❑ Non uniformité de N_A



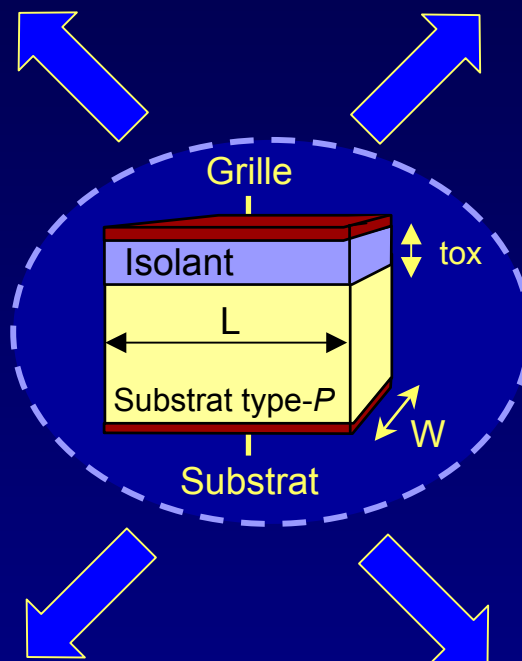
Résolution de l'équation de Poisson
méthode des différences finis



Création d'abaques



- ❑ Poly-désertion de la grille
- ❑ Non uniformité de N_A



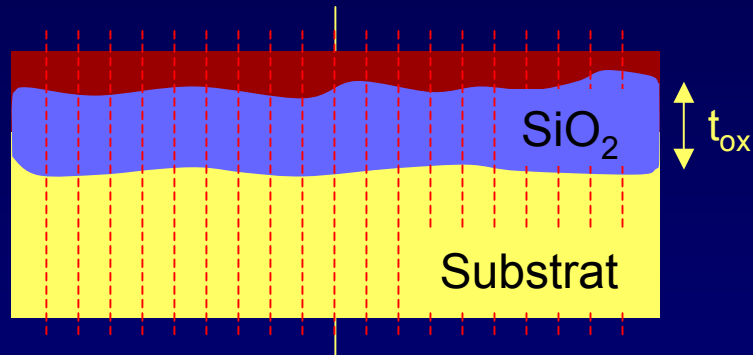
- ❑ Non uniformité Q_{ox}
- ❑ Non uniformité de t_{ox}

coll. M. Houssa et F. Lalande

coll. L. Raymond et X. Cuinet

□ Quand t_{ox} influence de la rugosité

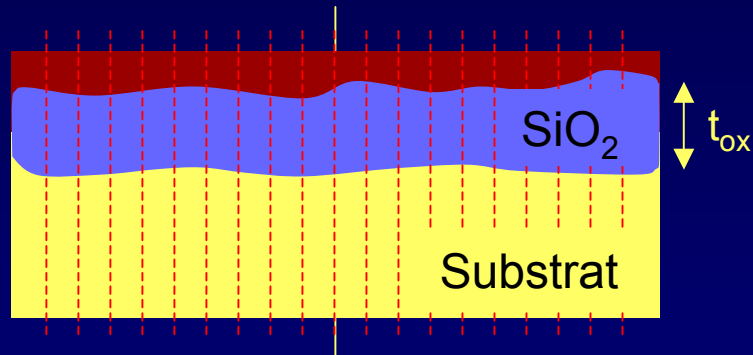
□ Modèle pseudo 2 D : Découpage en capacités élémentaires



$$C = \sum_i A_{effi} \frac{1}{\frac{1}{C_{oxi}} + \frac{1}{C_{sc}}}$$

□ Quand t_{ox} influence de la rugosité

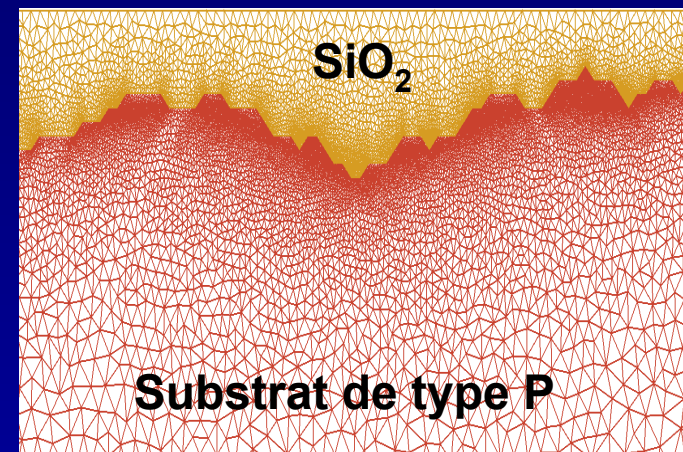
□ Modèle pseudo 2 D : Découpage en capacités élémentaires



$$C = \sum_i A_{effi} \frac{1}{\frac{1}{C_{oxi}} + \frac{1}{C_{sc}}}$$

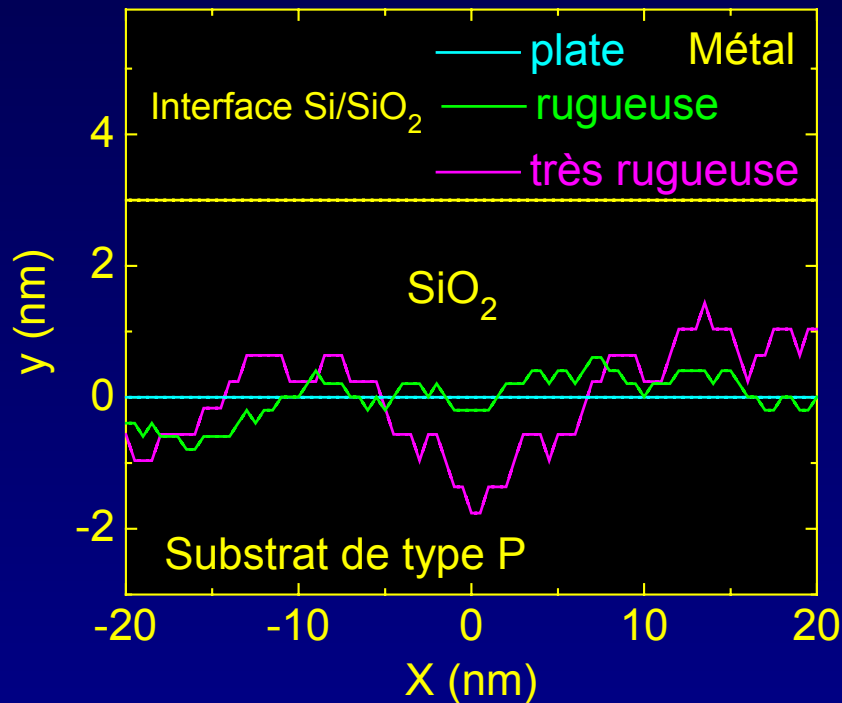
□ Modèle 2D : Code C++ développé par L. Raymond

- Non uniformité du ξ transverse
- Méthode des éléments finis
- Maillage triangulaire
- Discrétisation de l'équation de Poisson



- Comparaison entre les modèles 2D et pseudo 2D

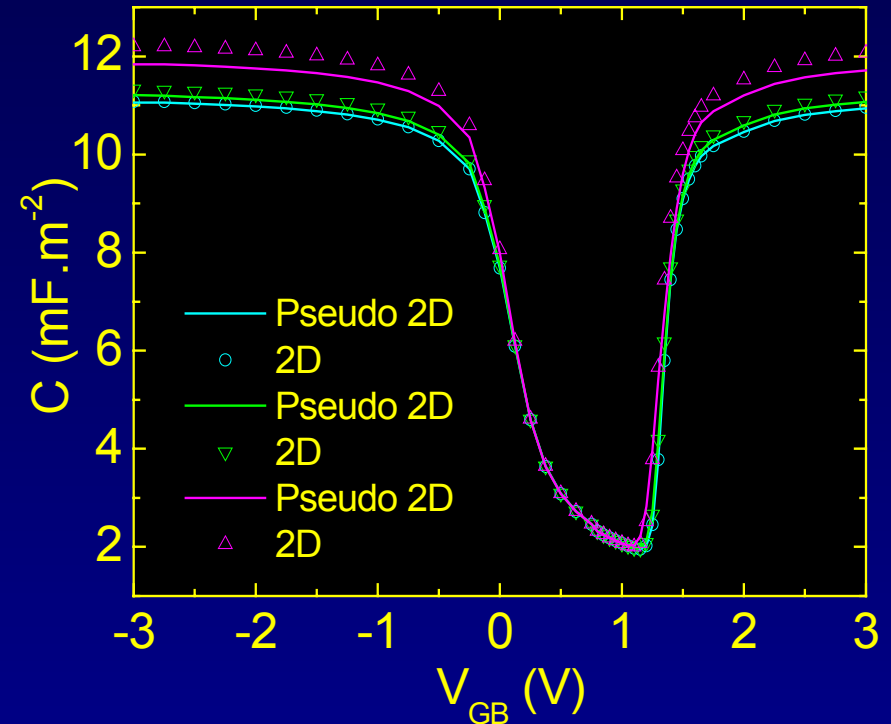
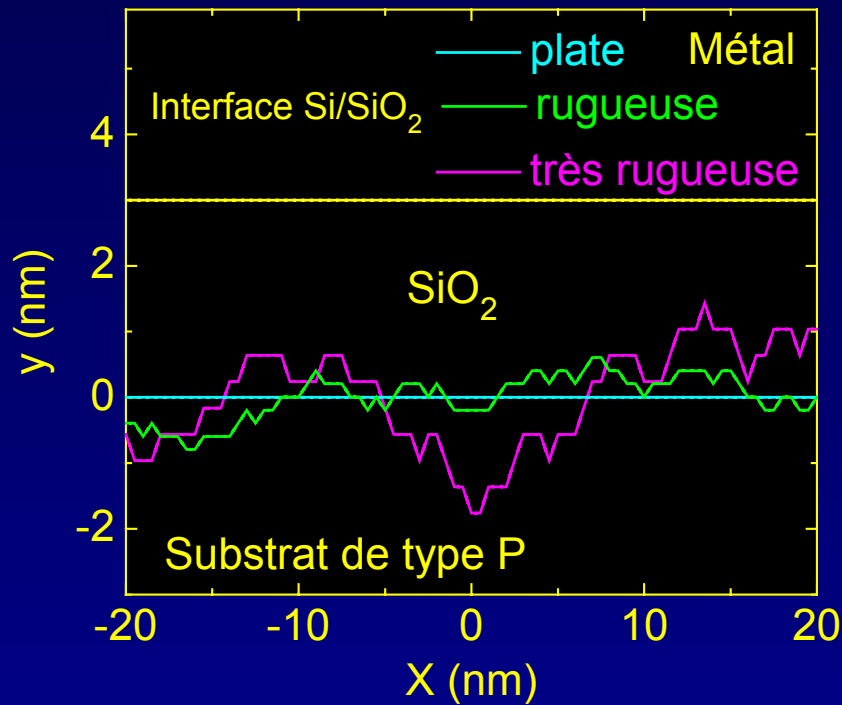
Rms = 0, 0.33nm et 0.77nm



t_{ox} moyen = 3 nm

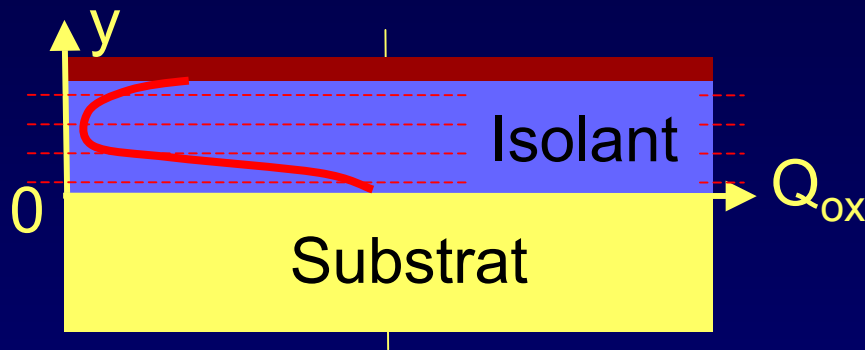
- Comparaison entre les modèles 2D et pseudo 2D

Rms = 0, 0.33nm et 0.77nm



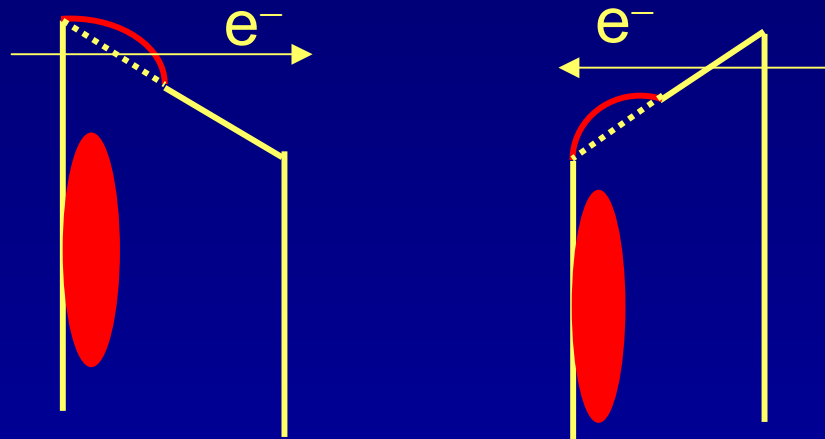
- Bon accord (à faible rugosité)
- Pseudo 2D : outil de base pour tester \neq approximations

- Objectif : Étudier l'impact de charges fixes localisées



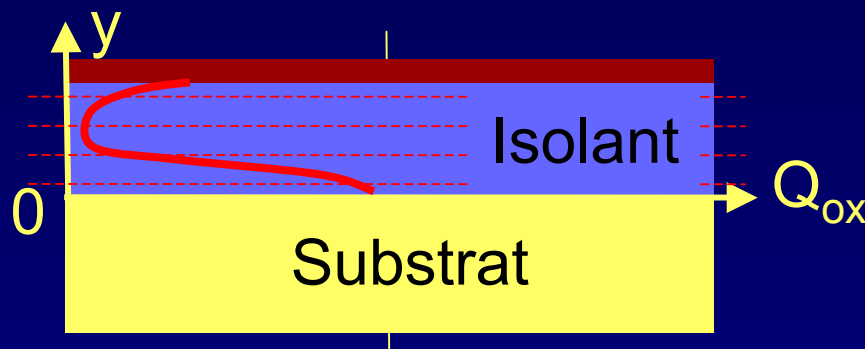
*Coll. M. Houssa
et F. Lalande*

- Structure Métal / SiO_2 / Si : Simulations et mesures
- Structure Métal / HfO_2 / SiO_2 / Si : Simulations



□ Modélisation des charges fixes

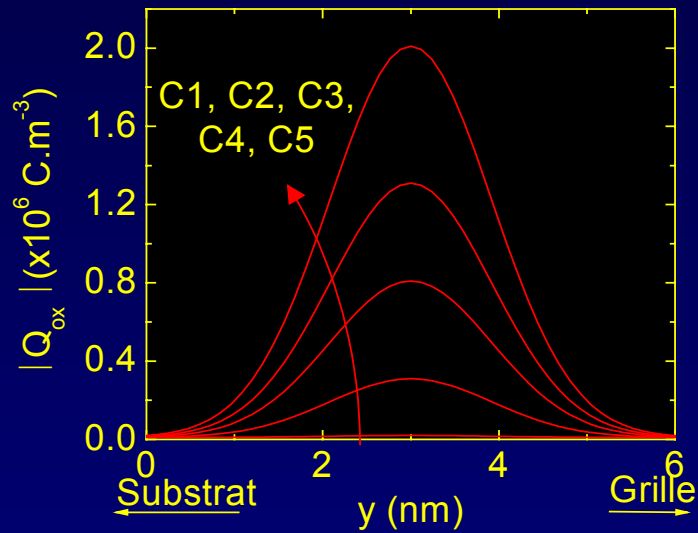
- Équation aux potentiels $V_{GB} = \Phi_{MS} + \Psi_S - \Psi_{SG} - \frac{Q_{SC}(\Psi_S)}{C_{OX}} - \frac{Q_{Oxeff}}{C_{OX}}$



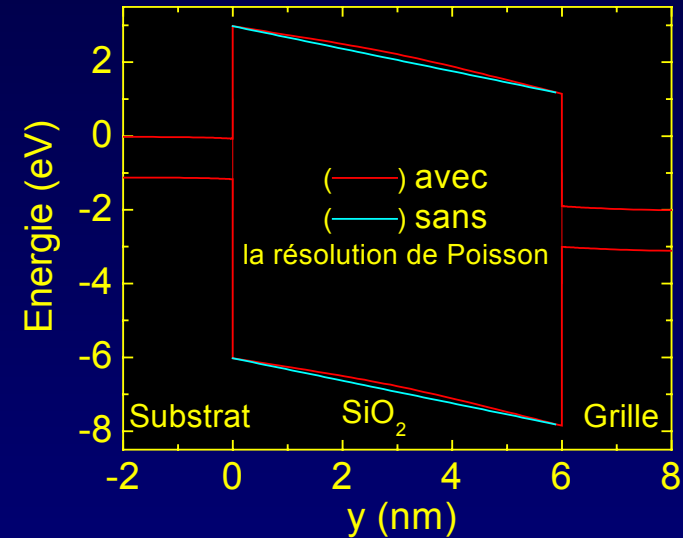
- Charge (m^{-2}) vue de l'interface $Q_{Oxeff} = \int_0^{t_{ox}} \frac{t_{ox}-y}{t_{ox}} Q_{ox}(y) dy$

- V_{GB} et Q_{OX} données $\Rightarrow \Psi_S, \Psi_{SG}, Q_{npoly}, Q_{nsi}$ et V_{OX}

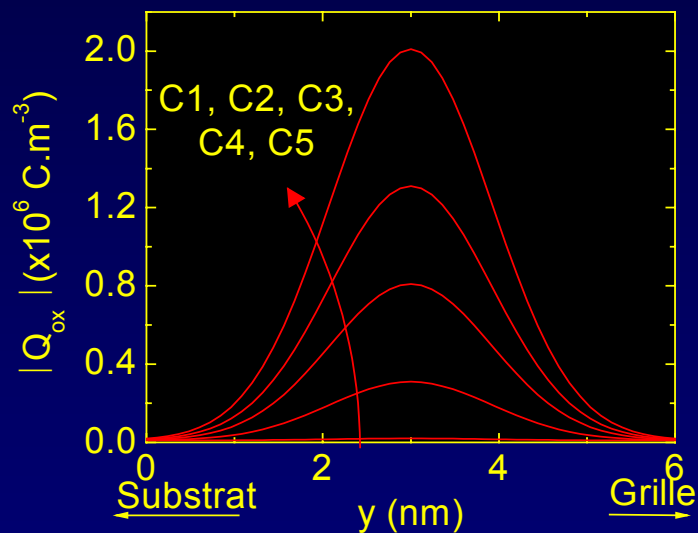
□ Profils simulés



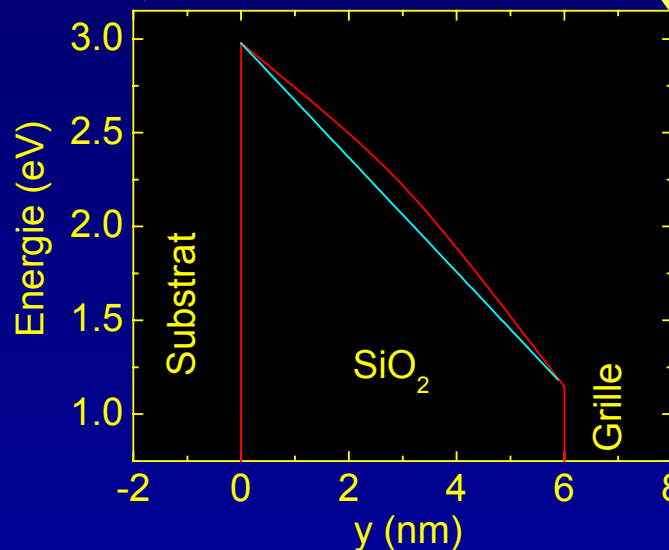
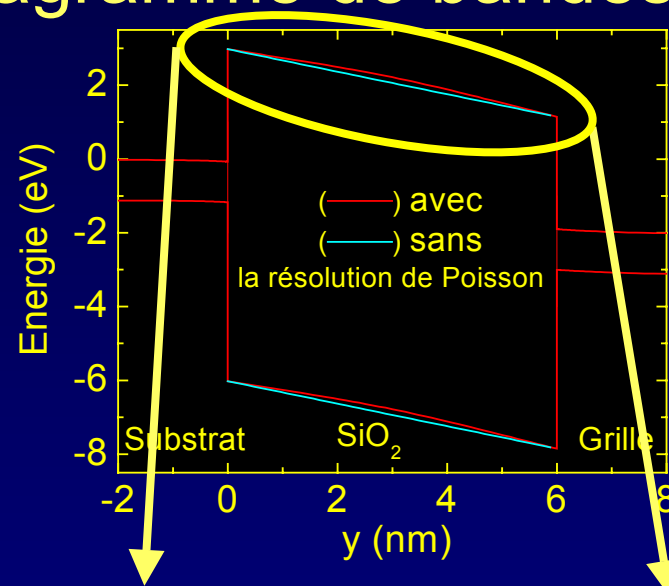
□ Diagramme de bandes (C5)



□ Profils simulés



□ Diagramme de bandes (C5)



Profils simulés

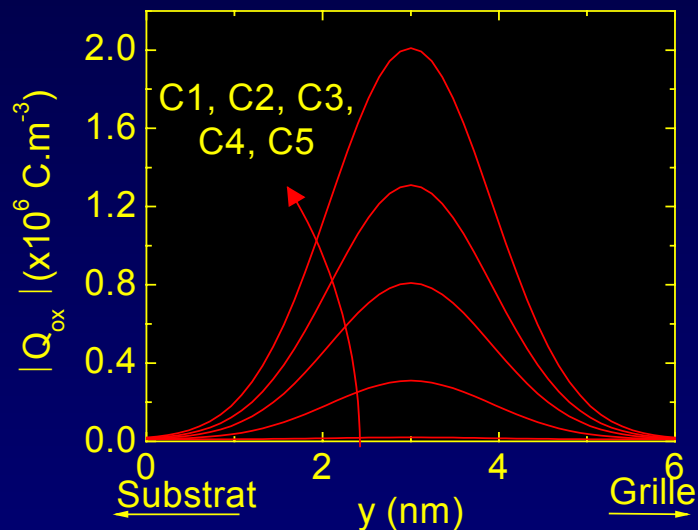
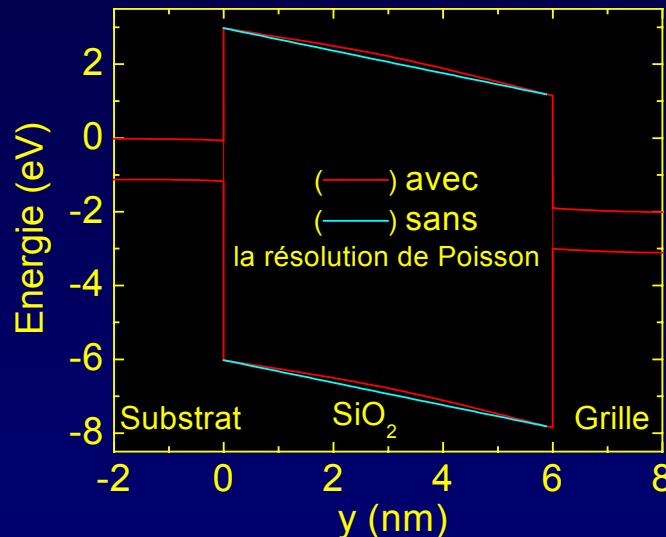
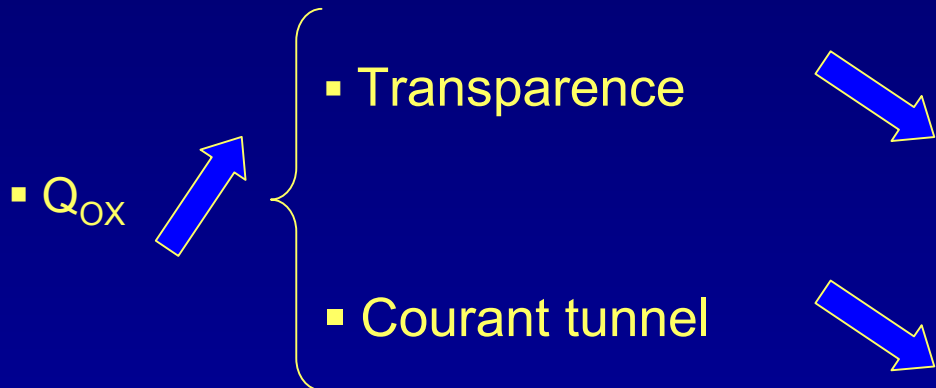
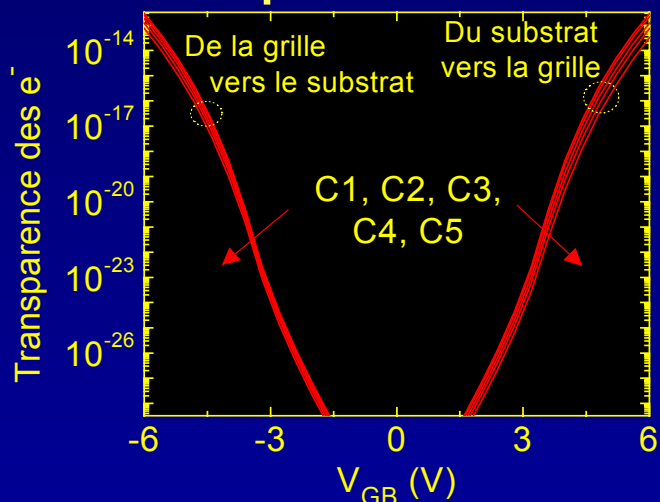


Diagramme de bandes (C5)



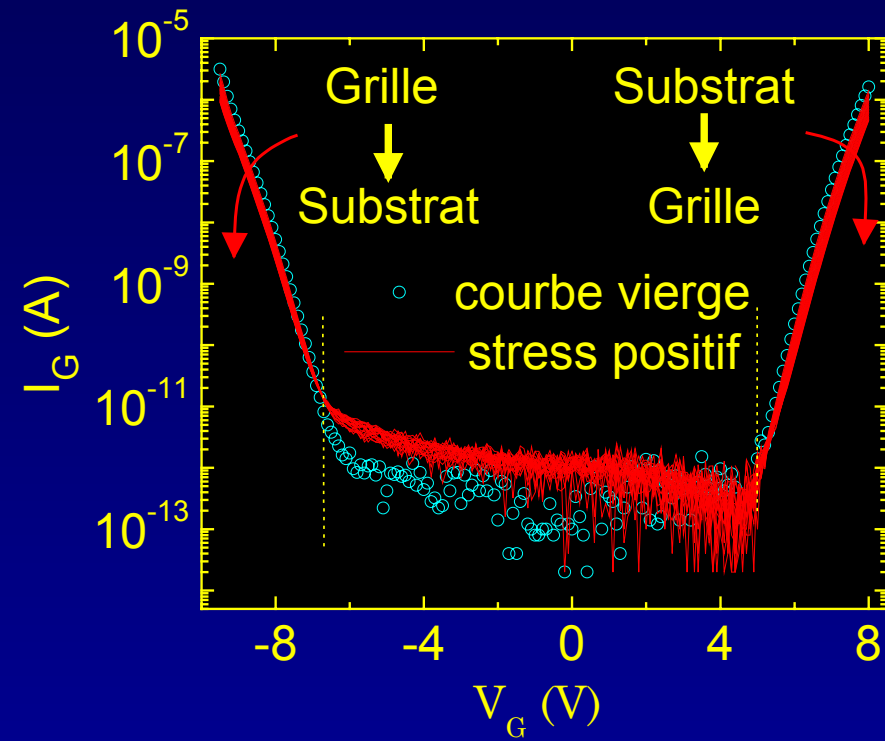
Transparence des électrons



□ Étude expérimentale : effet des stress électriques

$$V_G = 8 \text{ V}$$

Électrons Substrat \longrightarrow Grille



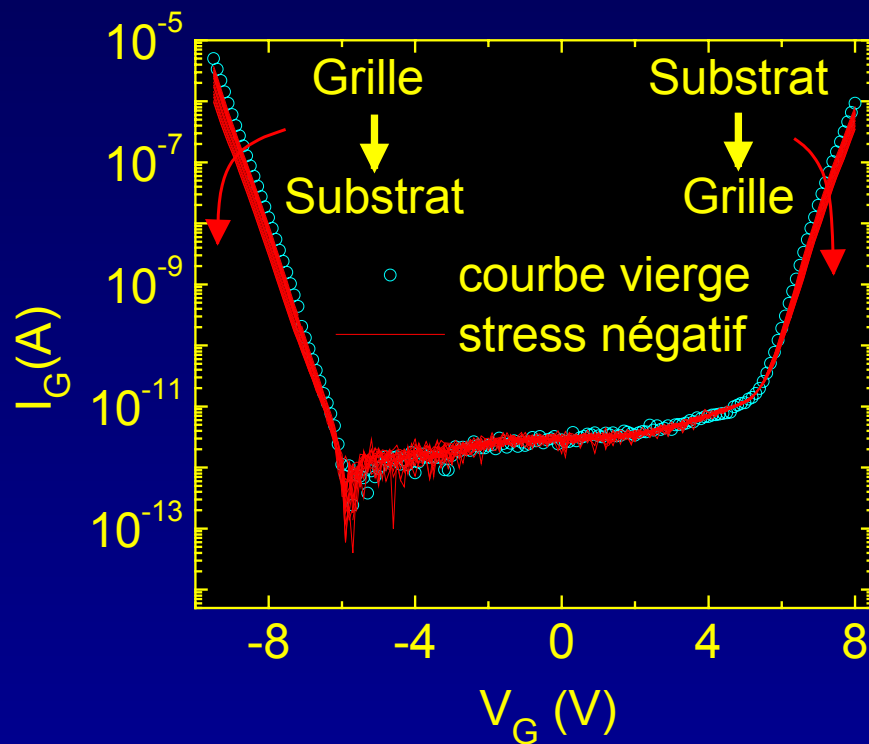
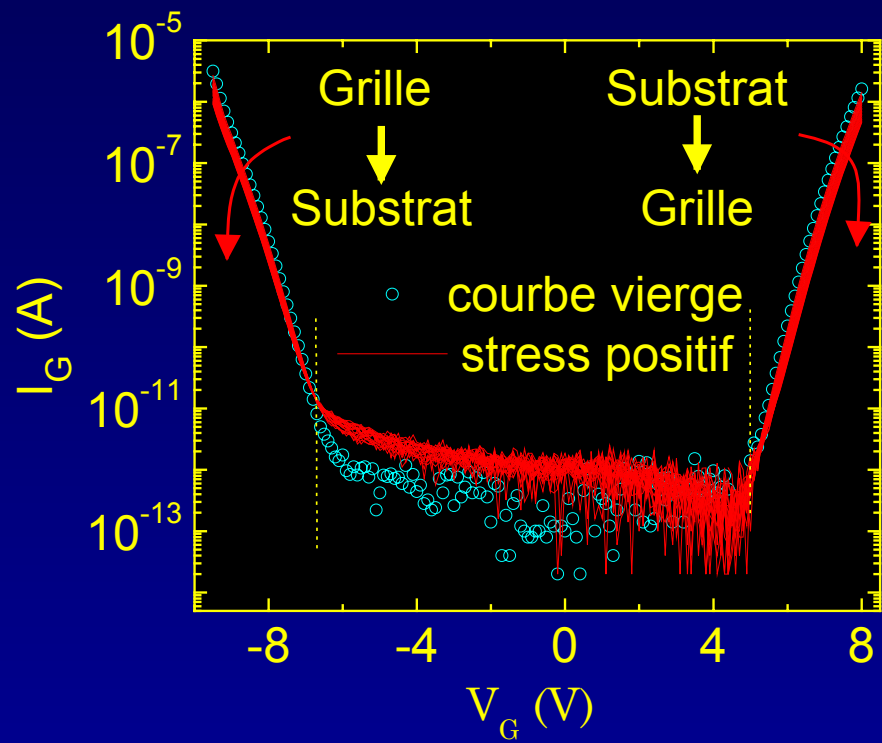
□ Étude expérimentale : effet des stress électriques

$V_G = 8 \text{ V}$

Électrons Substrat \rightarrow Grille

$V_G = -9.5 \text{ V}$

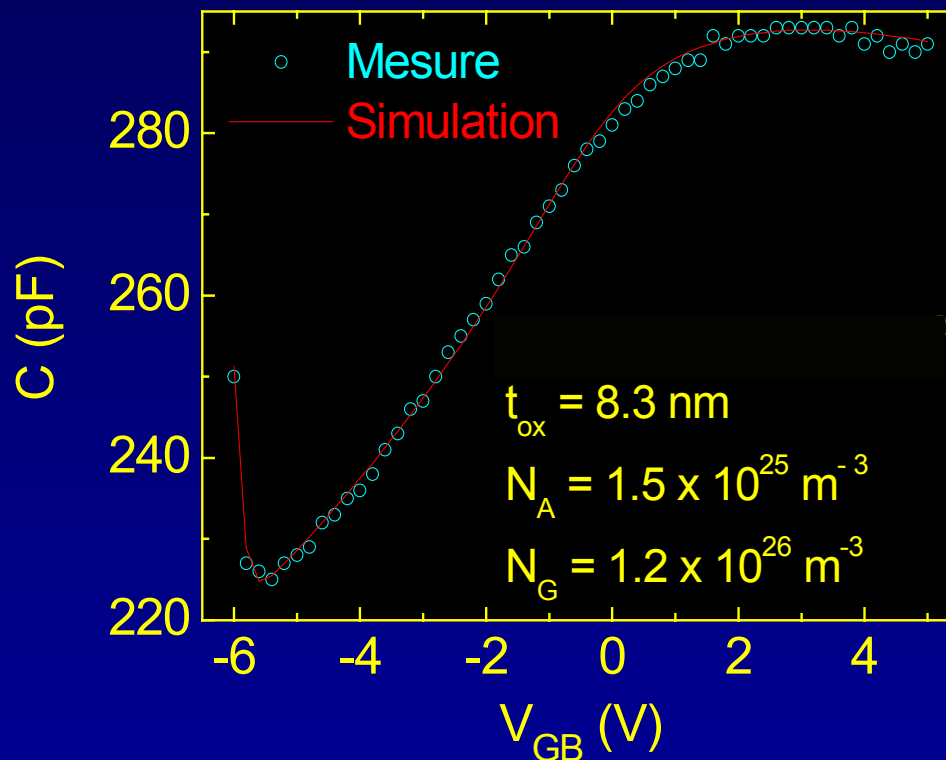
Électrons Grille \rightarrow Substrat

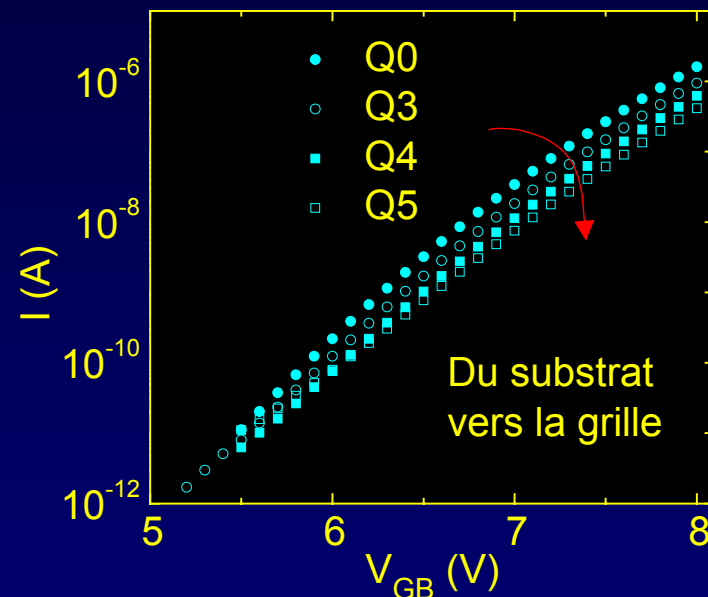
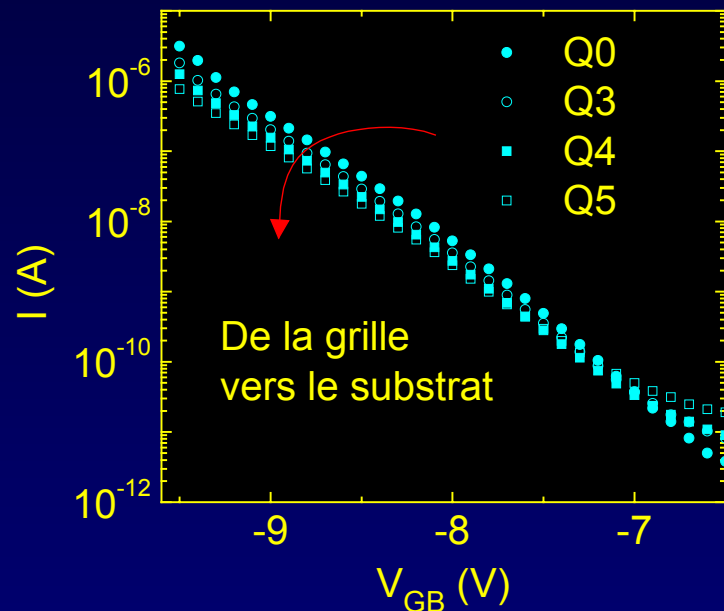


I_{tun} \rightarrow dissymétrique

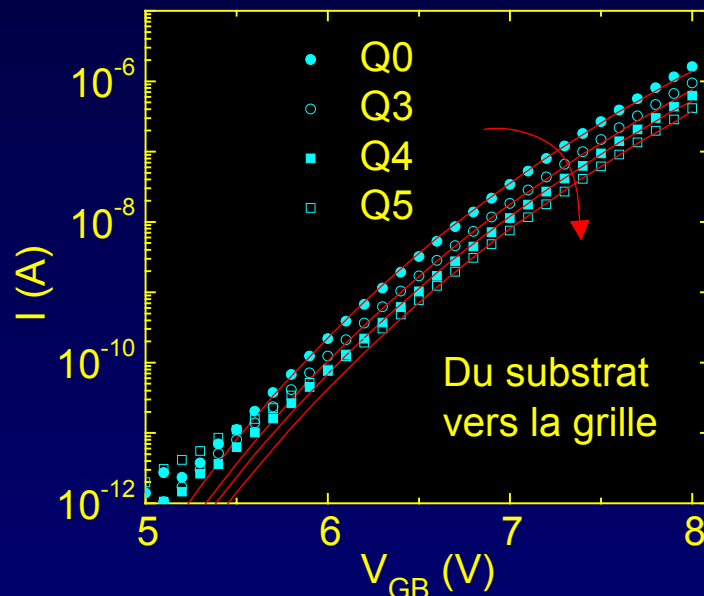
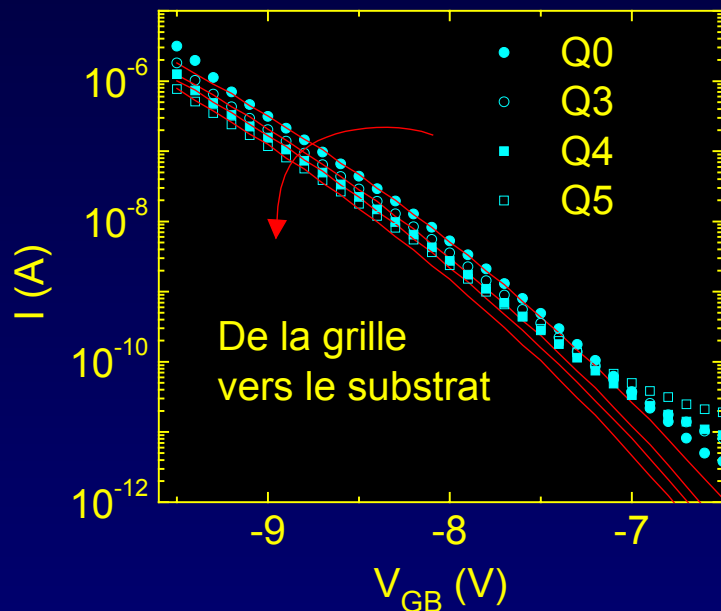
□ Étude expérimentale : mesure C-V

- $W \times L = 1000 \times 75 \mu\text{m}^2$
- Extraction des paramètres





**Mesures
après des
stress positifs**



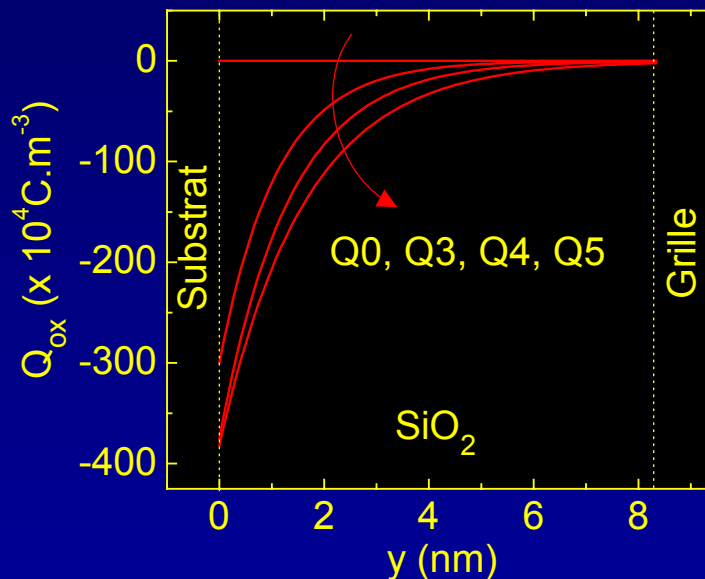
➤ Meilleurs résultats :
répartition exponentielle

$$Q_{OX} = Q_{max} \exp\left(\frac{-y}{\lambda}\right) + Q_{min}$$

▪ Stress



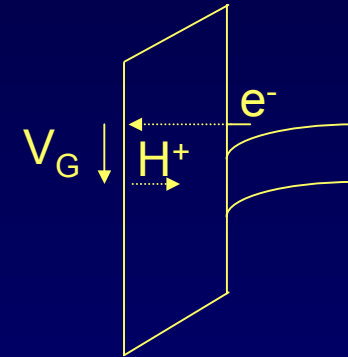
$\left\{ \begin{array}{l} Q_{OX} \\ \lambda \end{array} \right.$



□ Modèle du transport de l'hydrogène : (*M. Houssa 2001*)

La génération de charges est limitée par

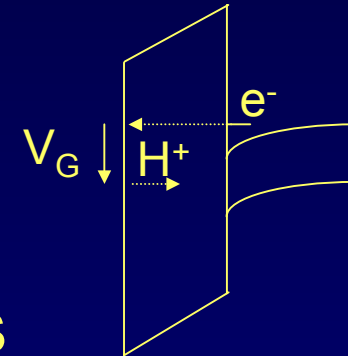
- les sauts aléatoires des ions H^+
- leur piégeage dans la couche de SiO_2



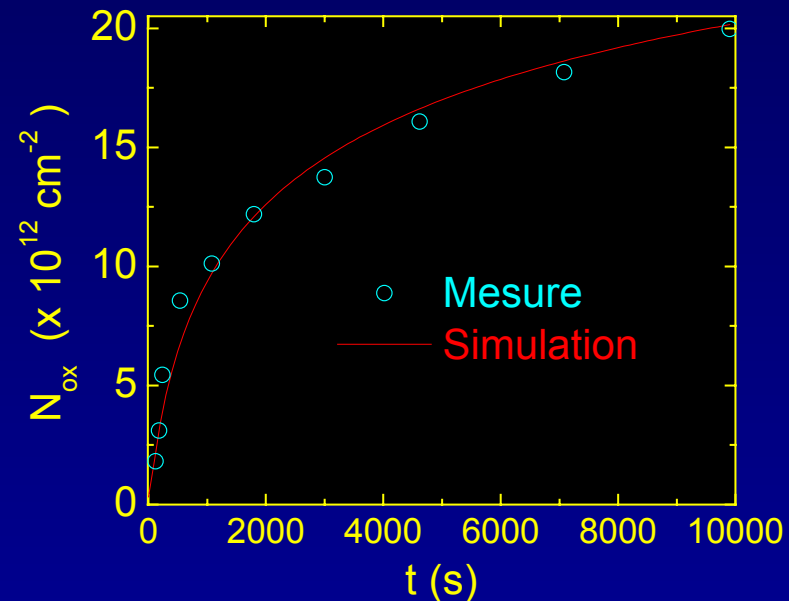
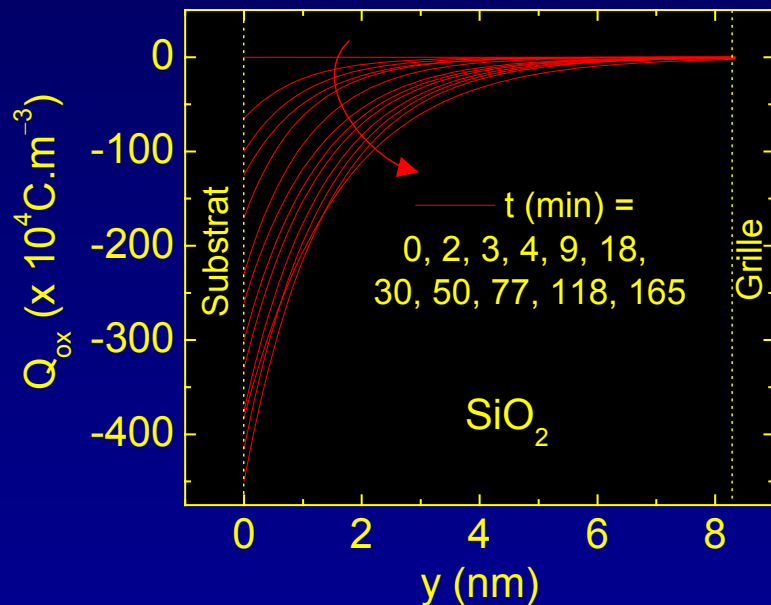
❑ Modèle du transport de l'hydrogène : (M. Houssa 2001)

La génération de charges est limitée par

- les sauts aléatoires des ions H^+
- leur piégeage dans la couche de SiO_2



❑ Comparaison mesures - simulations



- Bon accord entre les mesures et les simulations

- Introduction
- La capacité MOS
- Le transistor MOS**
- La mémoire à nodules de silicium
- Conclusions
- Perspectives

Modèles simplifiés

- Tension de seuil
- Mobilité
- Dopage du substrat
- Potentiel de surface

Modèles continus pseudo 2D

- Pao et Sah
- Feuillet

Approche segmentée pseudo 2D

- Non uniformités

□ Deux approches pour le calcul du courant

➤ Modèle de Pao et Sah [1966]

- Intégrale de Q_n le long du canal (Φ_C)

- Prise en compte d'effets parasites : présence de pièges dans l'isolant ou à son interface, poly-déplétion de la grille...

- Calculs relativement lents

$$I_{DS} = - \frac{W}{L} \mu_{\text{eff}} \int_{\Phi_C(0)}^{\Phi_C(L)} Q_n d\Phi_C$$

□ Deux approches pour le calcul du courant

➤ Modèle de Pao et Sah [1966]

$$I_{DS} = - \frac{W}{L} \mu_{\text{eff}} \int_{\Phi_C(0)}^{\Phi_C(L)} Q_n d\Phi_C$$

- Intégrale de Q_n le long du canal (Φ_C)
- Prise en compte d'effets parasites : présence de pièges dans l'isolant ou à son interface, poly-déplétion de la grille...
- Calculs relativement lents

➤ Modèle en feuillet [1978]

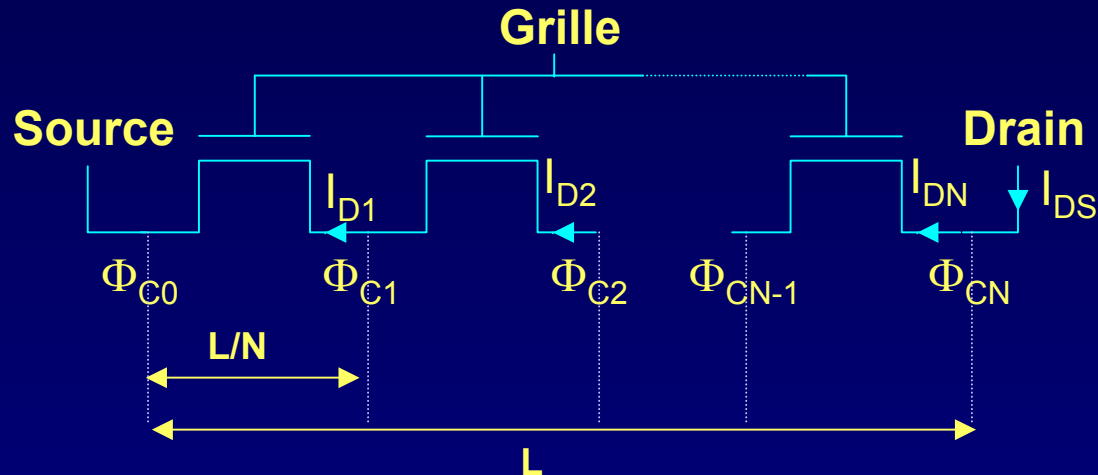
- Évaluation du potentiel de surface uniquement à la source et au drain
- Calcul plus rapide

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_0 C_{ox} [F(L) - F(0)]$$

$$\text{avec } F(x) = f(V_{GB}, \Psi_S, \Phi_C)$$

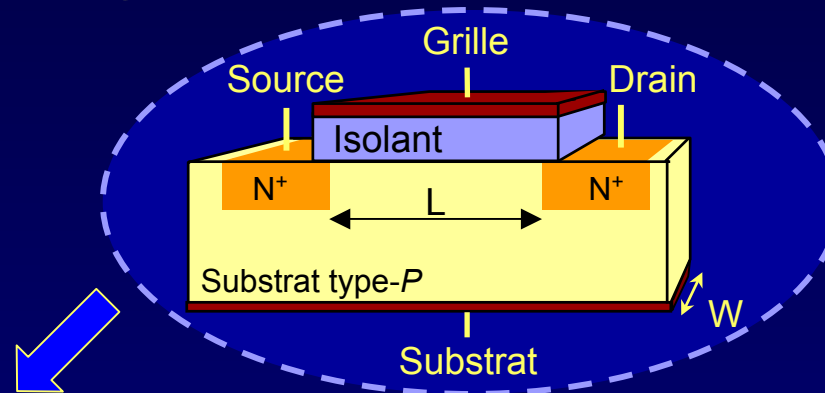
□ Modèle segmenté

- Découpage du TMOS en N TMOS élémentaires

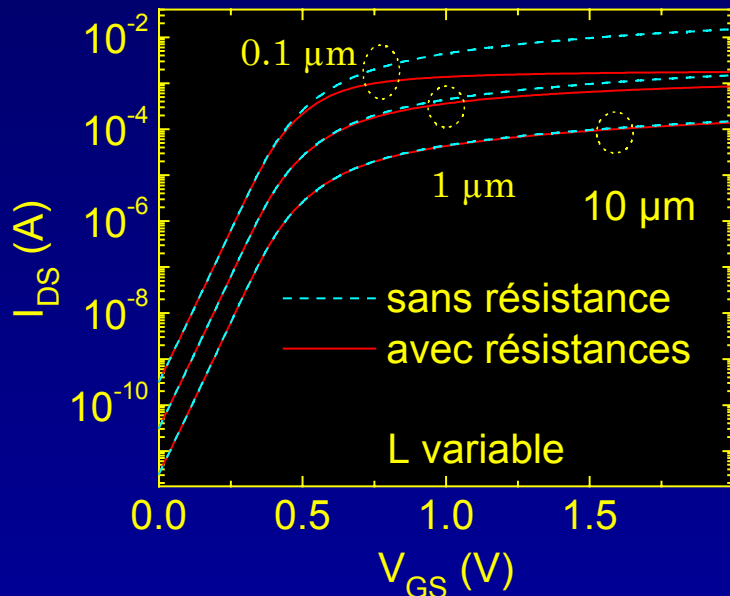


- $\Phi_C (0) = V_{BS}$ et $\Phi_C (L) = V_{DB} - V_{SB}$
- N équations à $(N-1)$ inconnues
- TMOS élémentaire \equiv résistance
- Loi du pont diviseur couplée à un système itératif

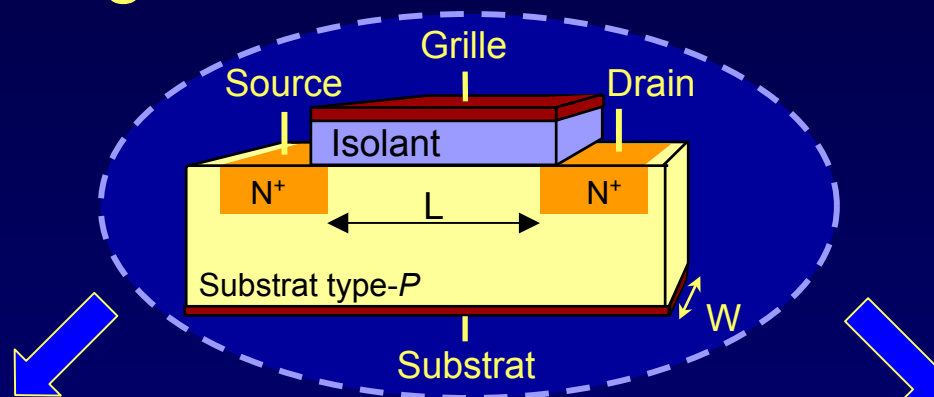
□ Approche Segmentée : Modèle de base



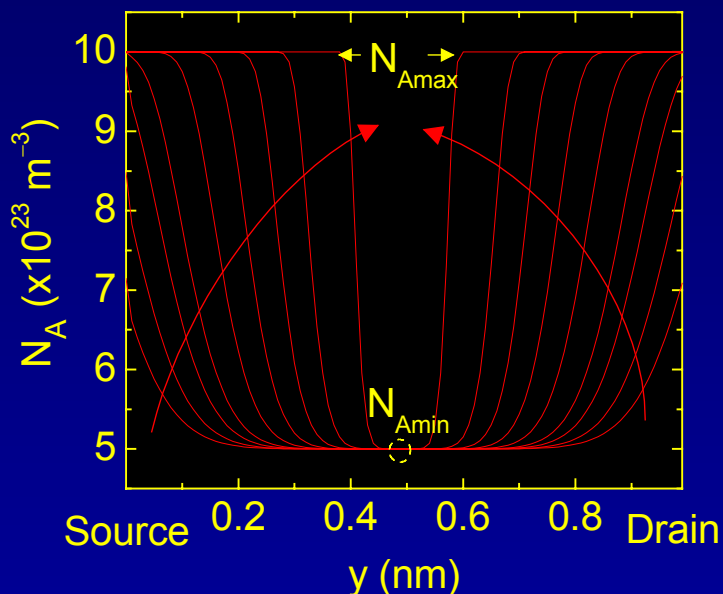
■ Résistances séries



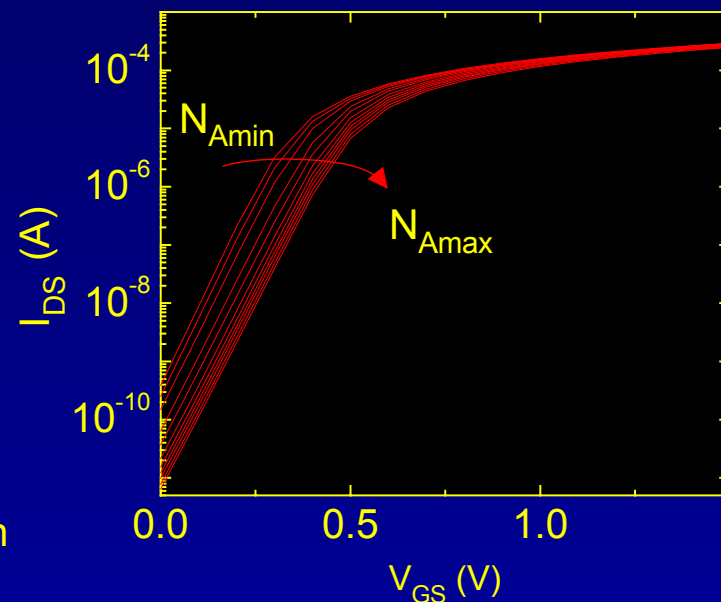
Approche Segmentée : Modèle de base



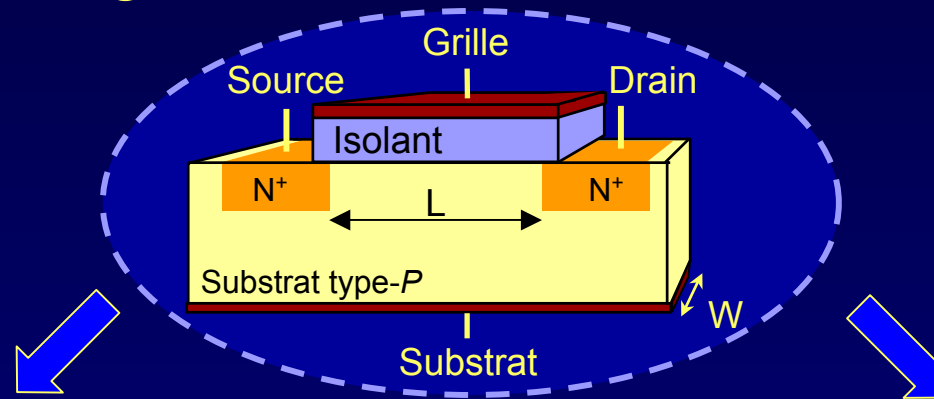
■ Résistances séries



■ Non uniformité de N_A



□ Approche Segmentée : Modèle de base



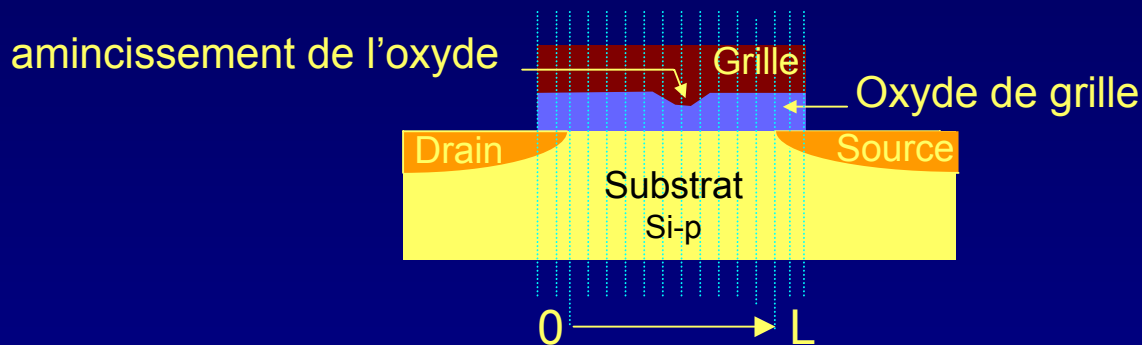
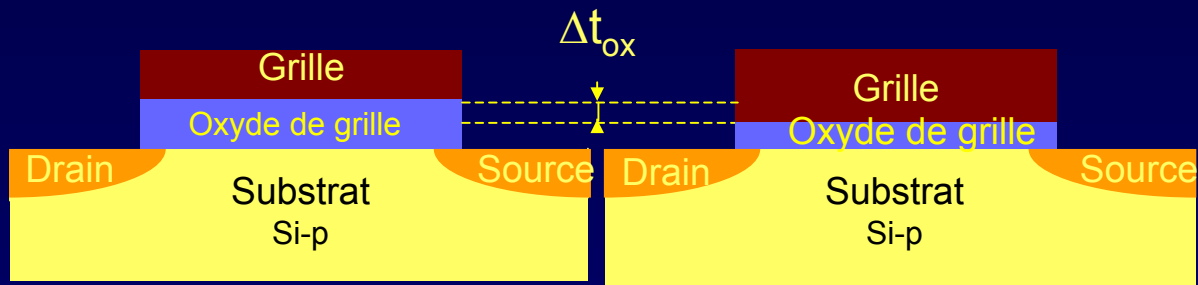
▪ Résistances séries

▪ Non uniformité de N_A

▪ Amincissement de t_{ox}

coll. J.M. Portal

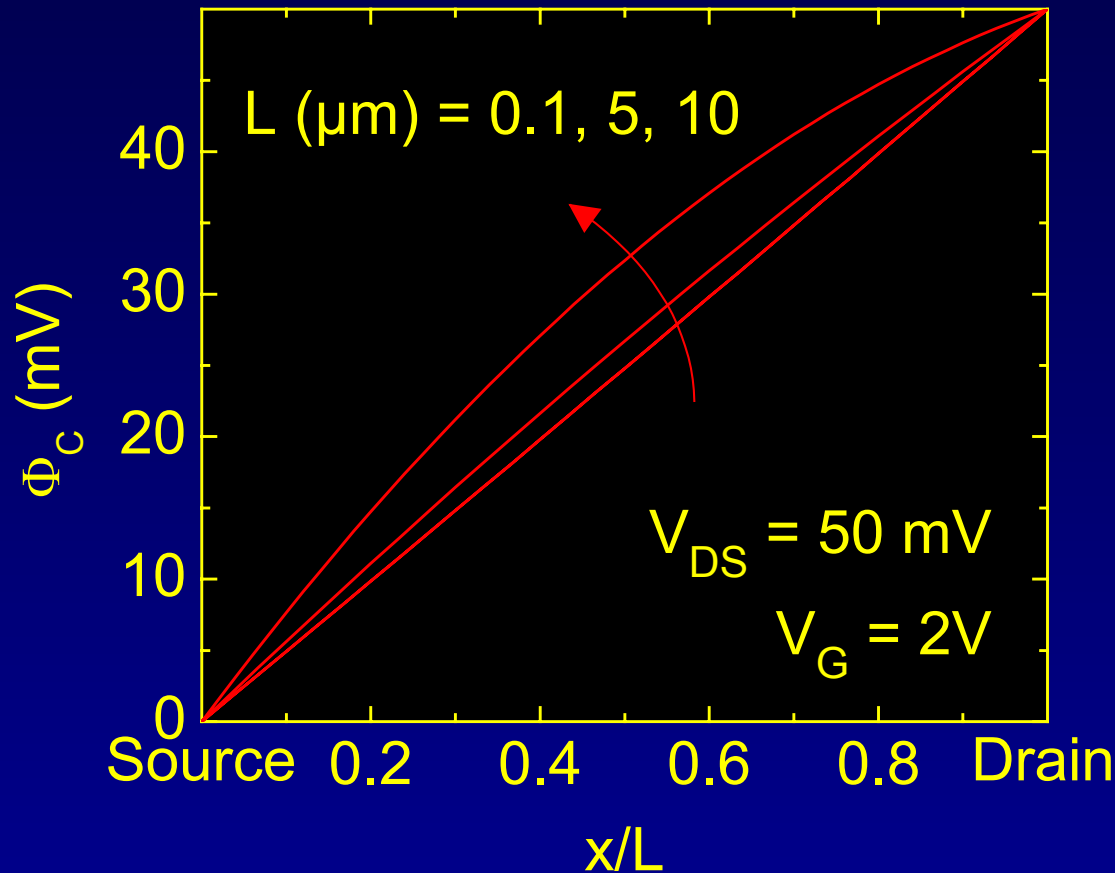
□ Analyse du problème



▪ t_{ox} diminue \longrightarrow I_G important

▪ $I_D \neq I_S$

- Modification de la répartition de Φ_C



Paramètres de simulation

$$N_A = 7 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$$

$$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$$

$$W = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

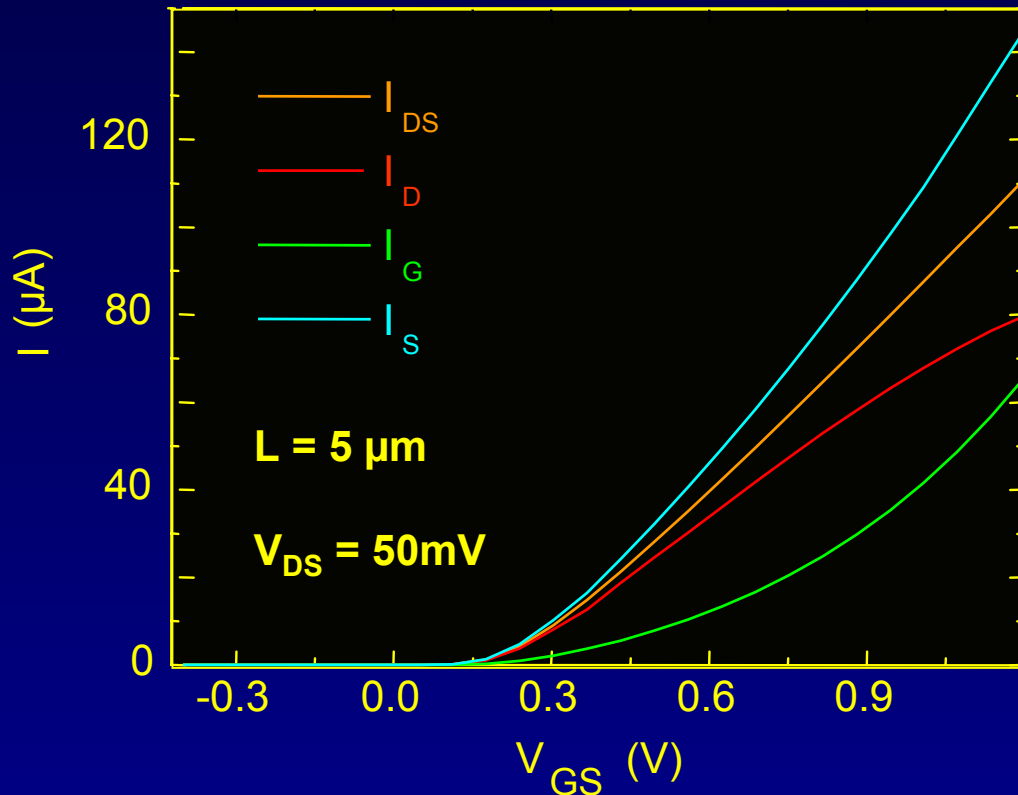
$$V_{FB} = -1 \text{ V}$$

$$I_G \approx W \times L \text{ et } I_{DS} \approx W/L$$



influence des canaux longs

□ Modification de la répartition du courant



Paramètres de simulation

$$N_A = 7 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$$

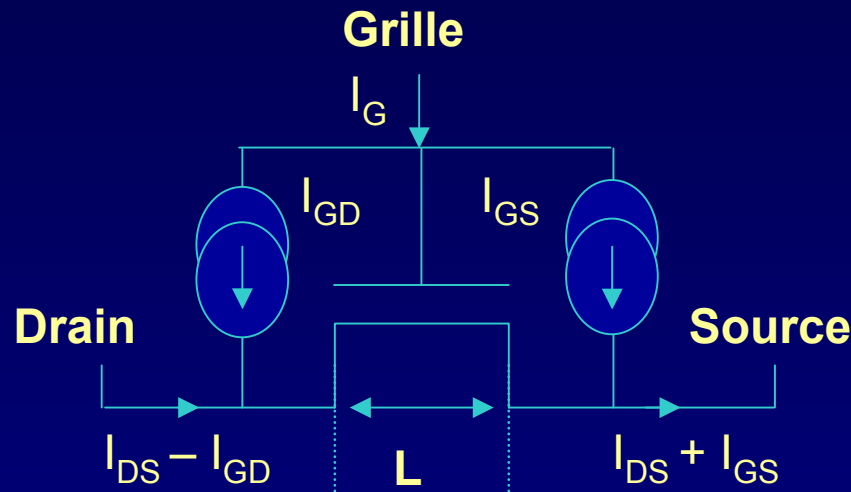
$$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$$

$$W = 1 \mu\text{m}$$

$$V_{FB} = -1 \text{ V}$$

- Canaux courts : pas de modification des paramètres
- Canaux longs : I_D n'est pas donné par l'équation classique

- ❑ Modélisation du TMOS avec fuite de grille



GLNMOS

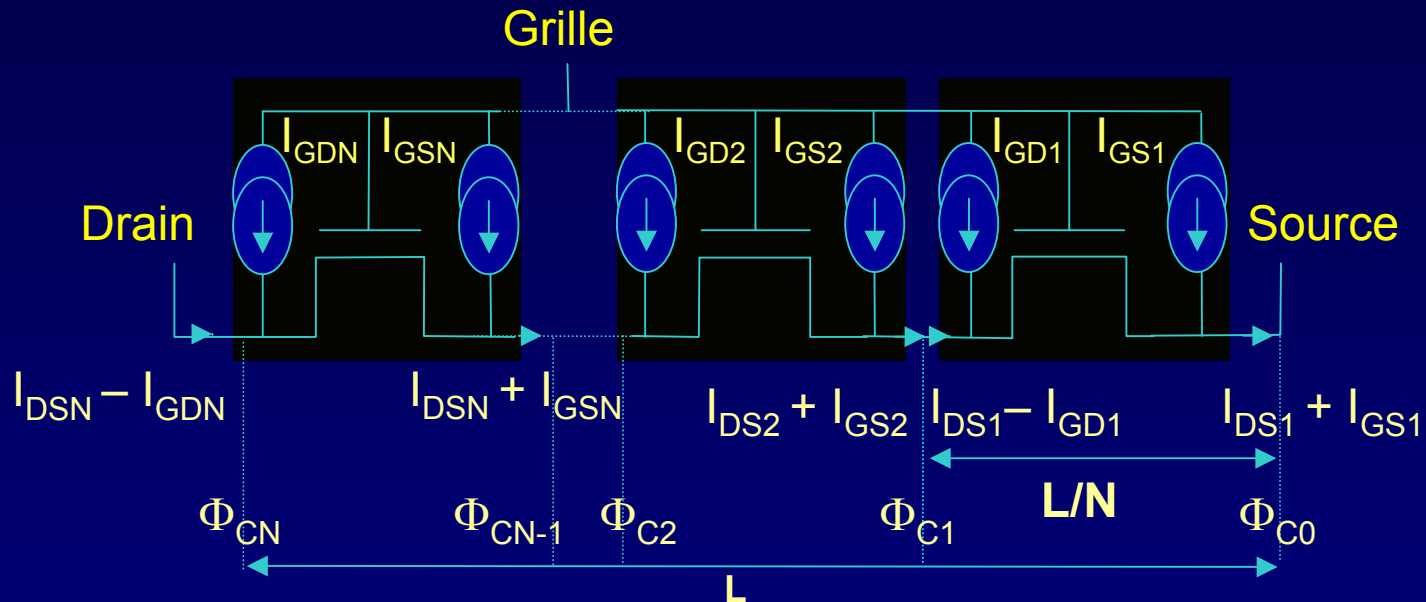
Symétrie du modèle

$$I_G = I_{GS} + I_{GD}$$

- Le courant tunnel est donné par l'équation :

$$I_G = \frac{WL}{2} (Q_n S F_{imp} T_S + Q_n D F_{imp} T_D)$$

□ Modèle segmenté modifié : N GLNMOS

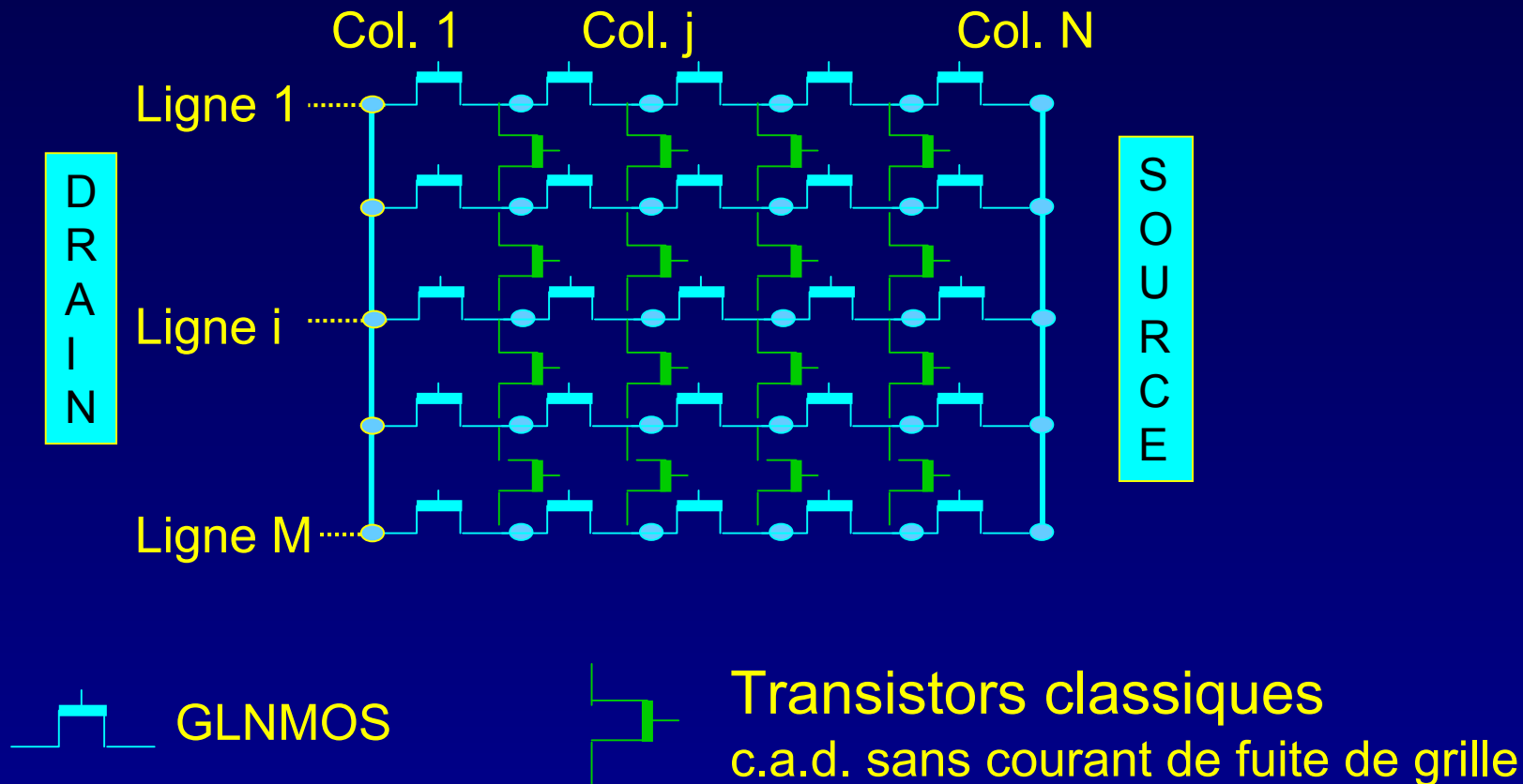


- Utilisation du modèle en feuillet
- V_{GS} fixée, il faut trouver la variation de Φ_C en imposant :

$$I_{DS_{N-1}} - I_{GD_{N-1}} = I_{DS_N} + I_{GS_N}$$

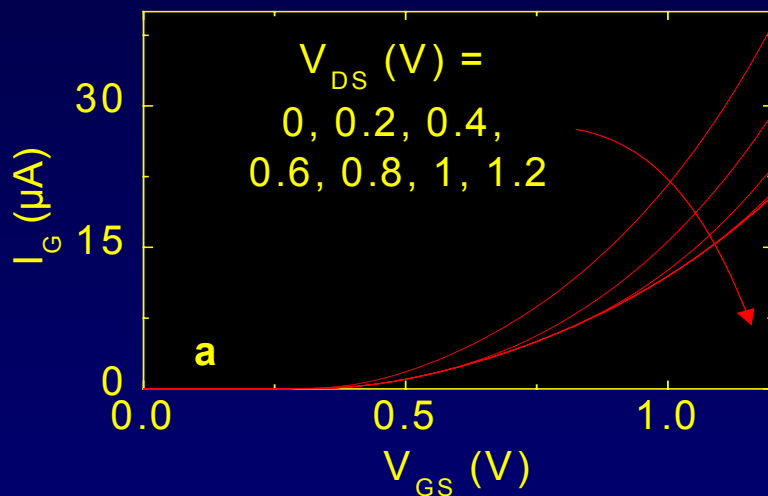
➤ Programme sous environnement Mathcad et ELDO

- Modélisation avec fuite de grille *coll. JM Portal*

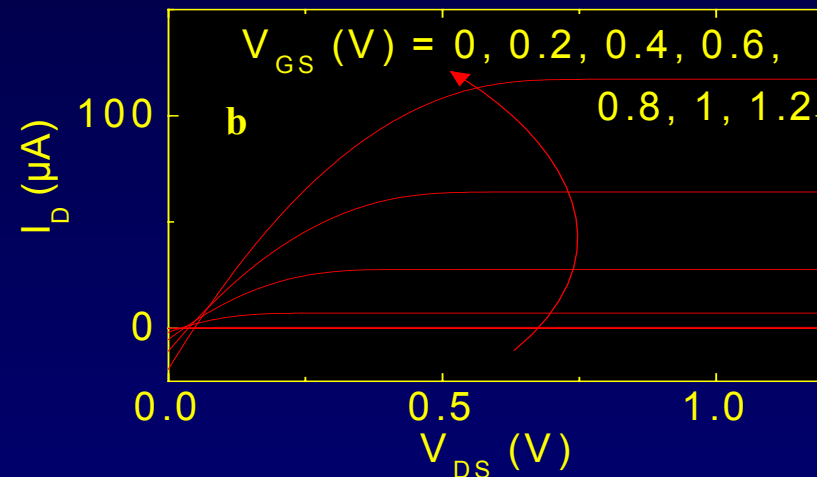


Syrzycki «Modeling of Gate Oxide Shorts in MOS Transistors », IEEE Trans. On Computer Aided Design, 1989

□ Simulation TMOS référence : $W \times L = 10 \times 10 \mu\text{m}^2$ & $t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$

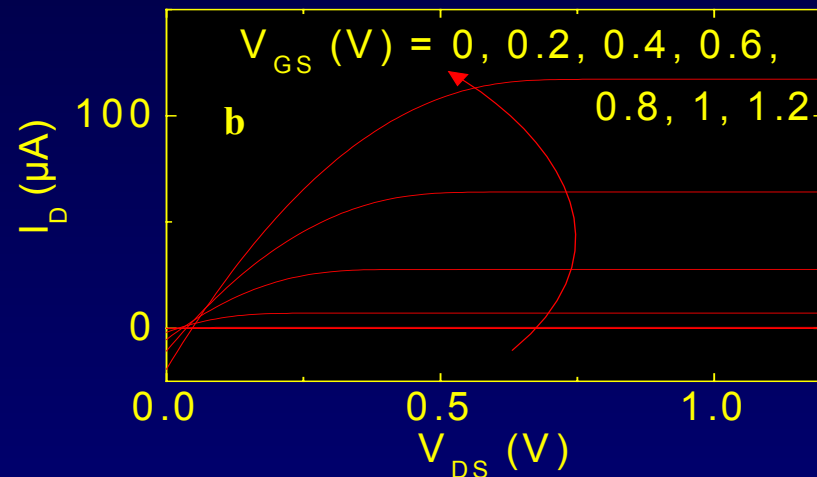
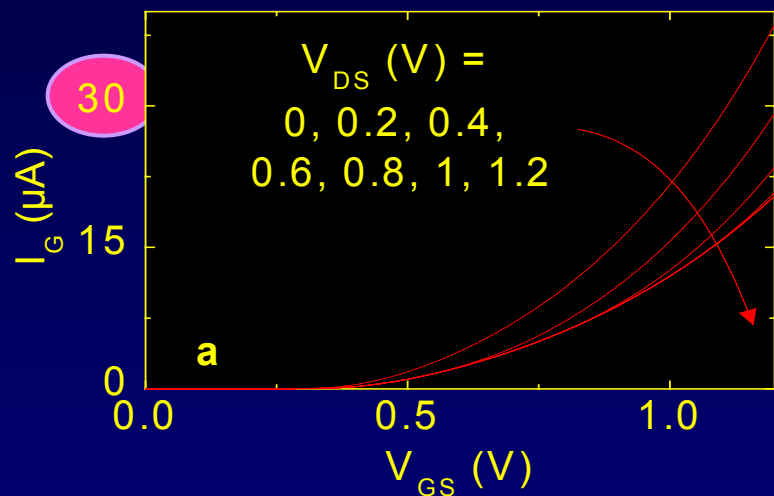


Analyse Qualitative

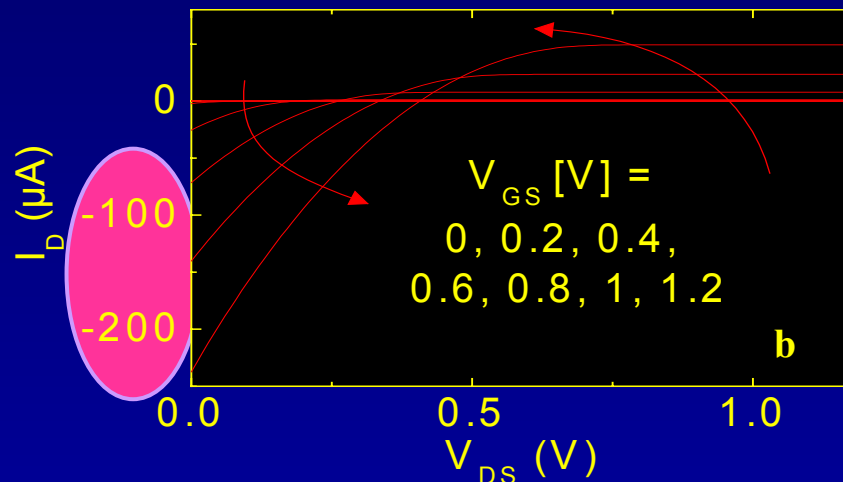
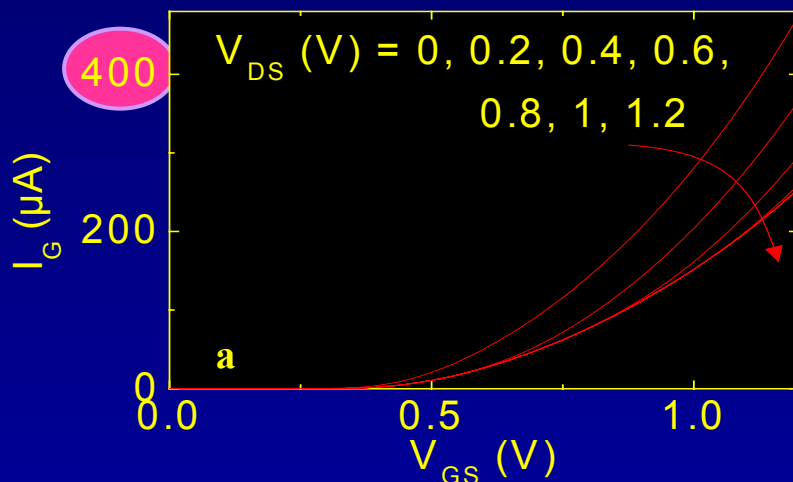


Validation du modèle

□ Simulation TMOS référence : $W \times L = 10 \times 10 \mu\text{m}^2$ & $t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$



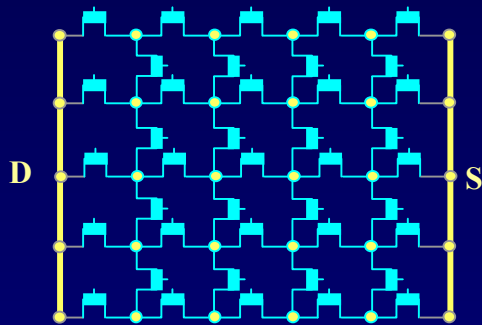
□ Simulations TMOS défectueux : $W \times L = 10 \times 10 \mu\text{m}^2$ & $t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$



□ Influence de la position des défauts

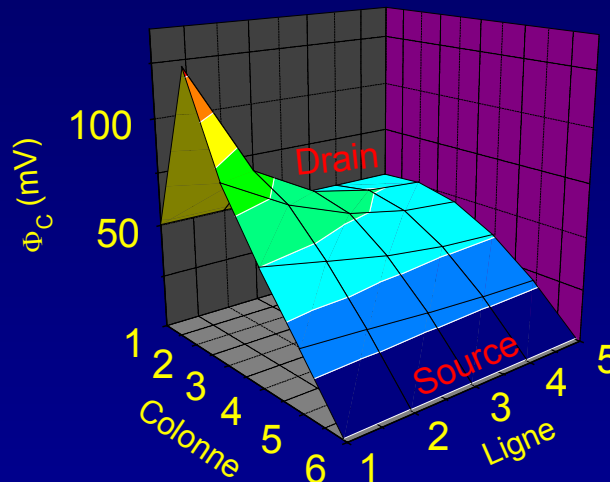
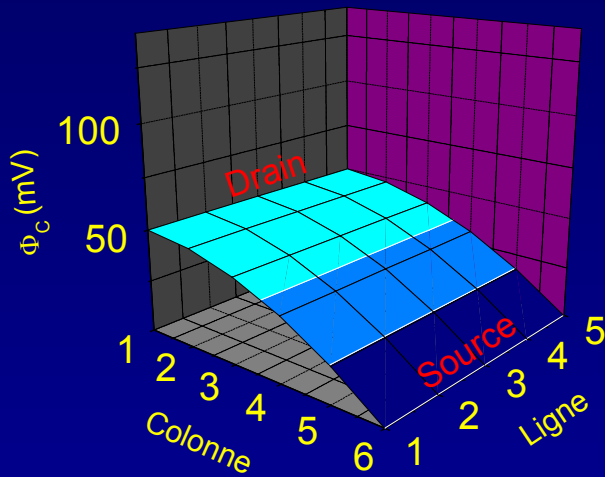
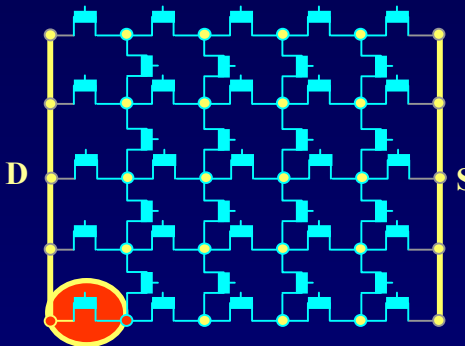
TMOS Référence

$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$



Défaut coté drain

$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$

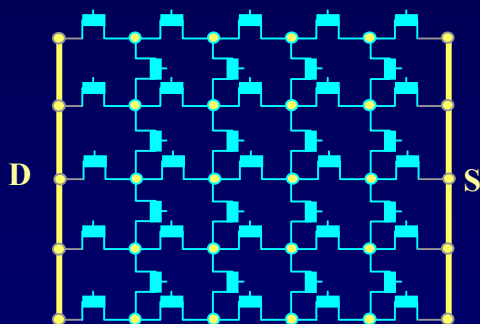


Simulations réalisées pour $V_{DS} = 50 \text{ mV}$ et $V_{GS} = 1.2 \text{ V}$

□ Influence de la position des défauts

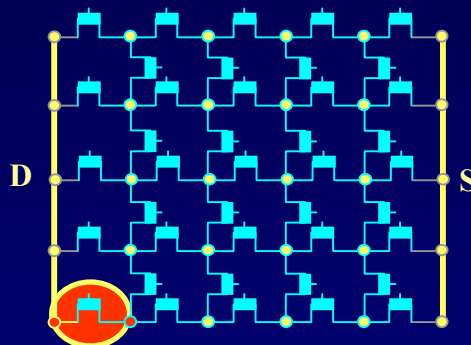
TMOS Référence

$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$



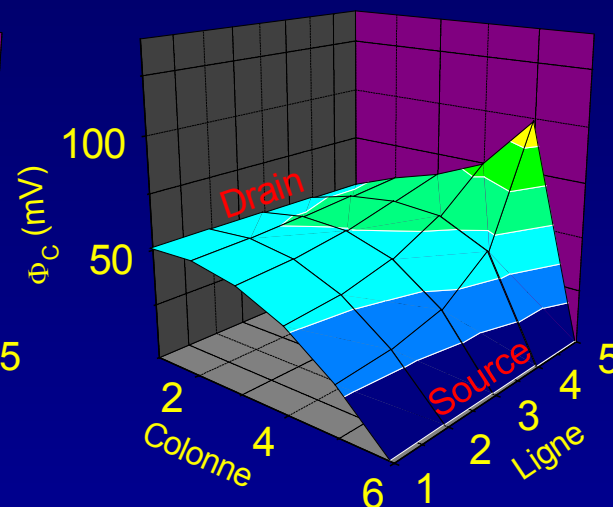
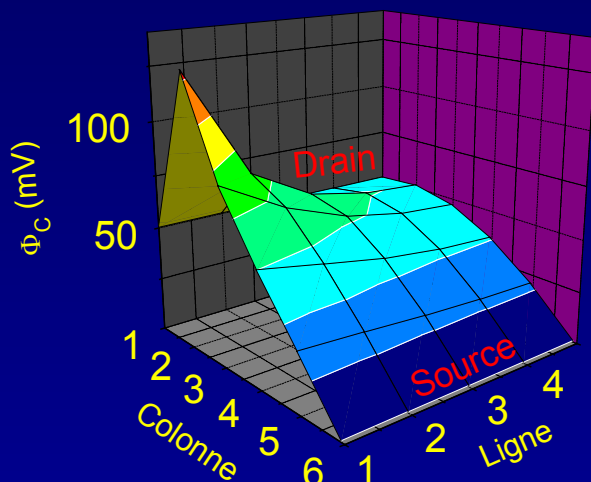
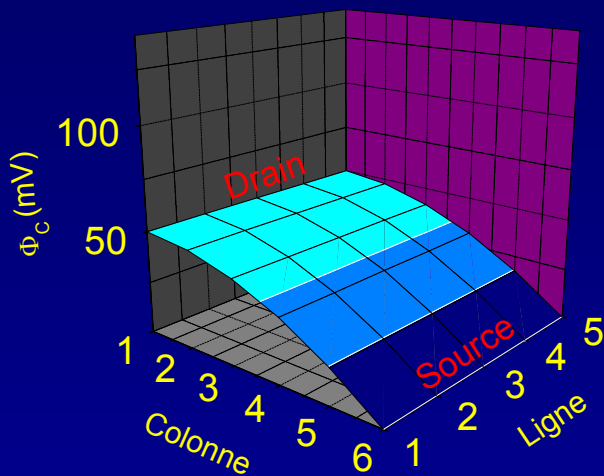
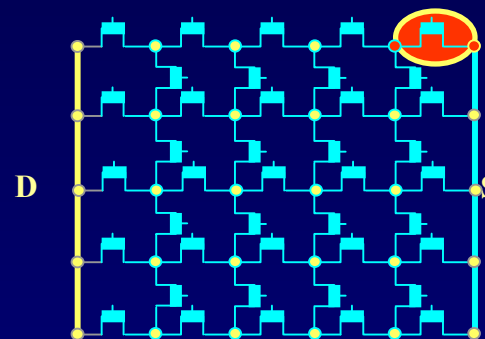
Défaut coté drain

$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$



Défaut coté source

$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$

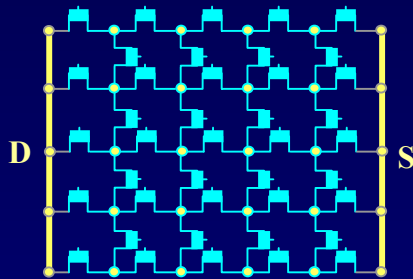


Simulations réalisées pour $V_{DS} = 50 \text{ mV}$ et $V_{GS} = 1.2 \text{ V}$

□ Influence de la taille des défauts

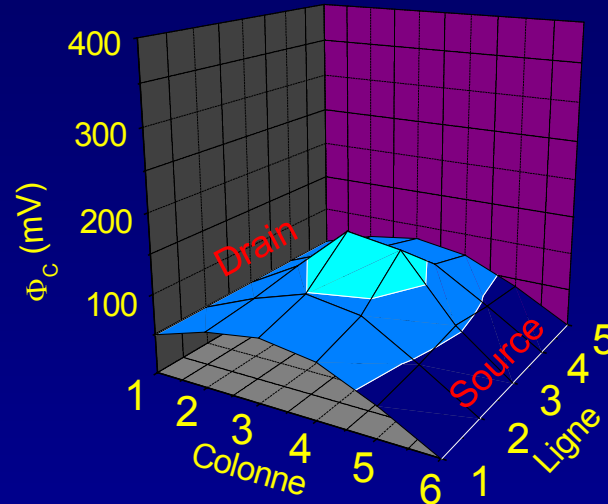
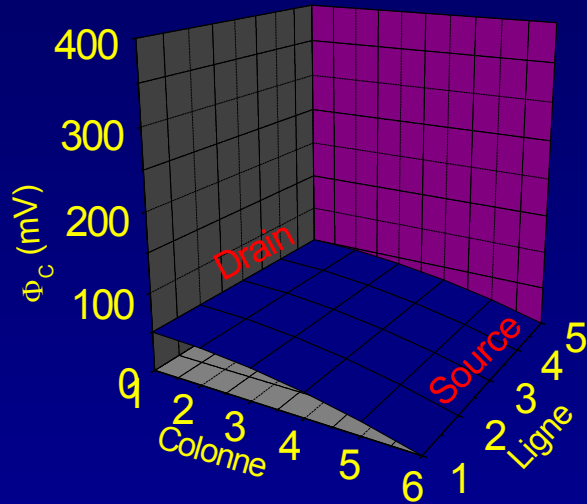
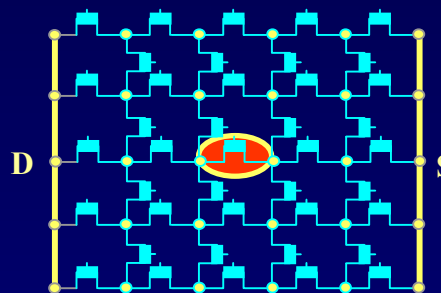
TMOS Référence

$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$



1 transistor défectueux

$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$

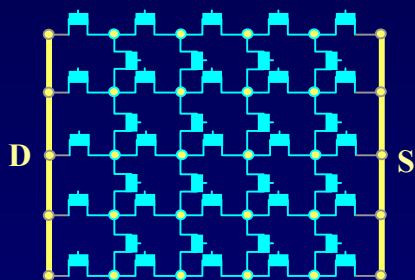


Simulations réalisées pour $V_{DS} = 50 \text{ mV}$ et $V_{GS} = 1.2 \text{ V}$

□ Influence de la taille des défauts

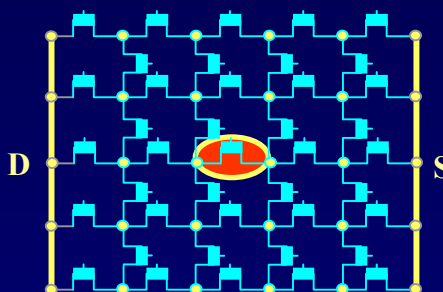
TMOS Référence

$t_{ox} = 1.5 \text{ nm}$



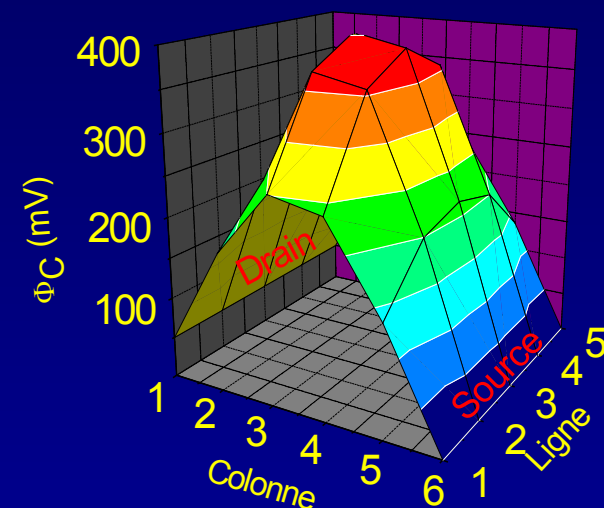
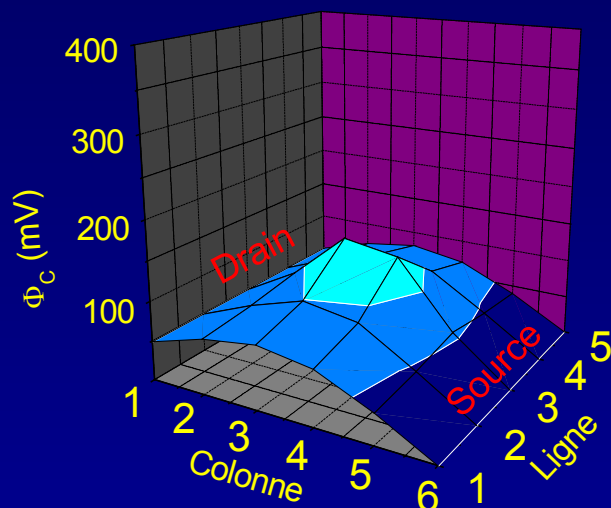
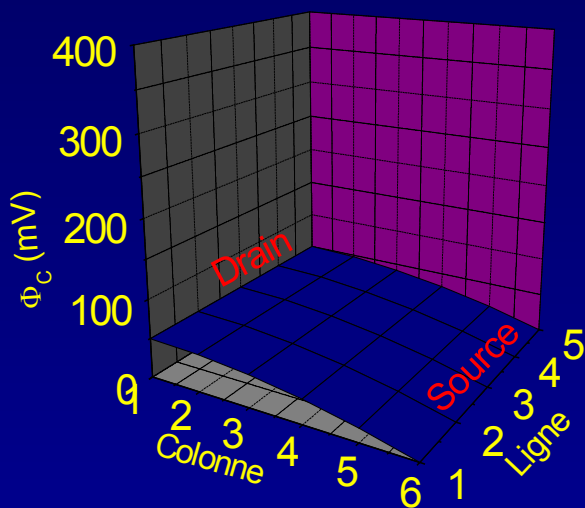
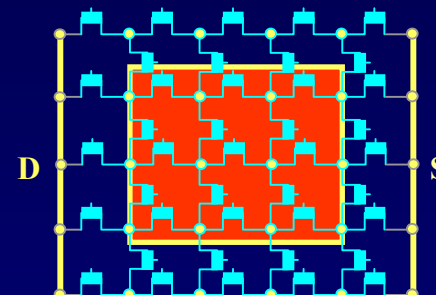
1 transistor défectueux

$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$



9 transistors défectueux

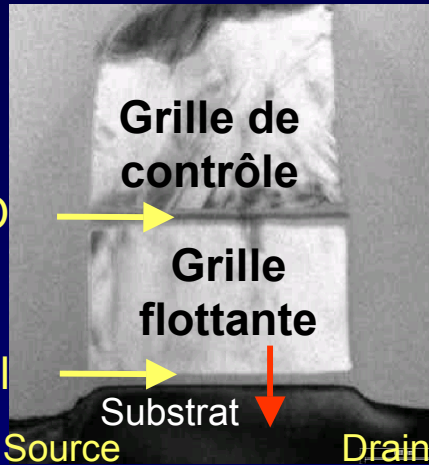
$t_{ox} = 1.2 \text{ nm}$



Simulations réalisées pour $V_{DS} = 50 \text{ mV}$ et $V_{GS} = 1.2 \text{ V}$

- Introduction
- La capacité MOS
- Le transistor MOS
- La mémoire à nodules de silicium
- Conclusions
- Perspectives

□ Description de la cellule



Isolant ONO

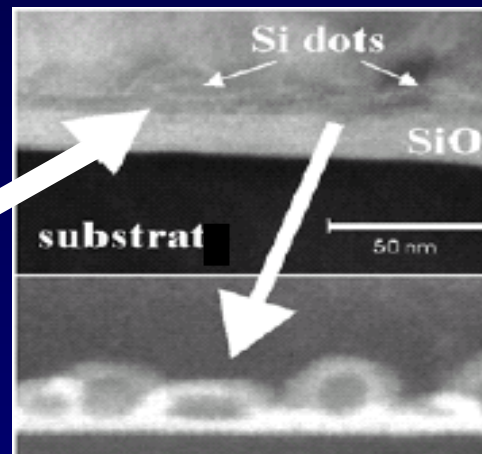


Oxyde tunnel

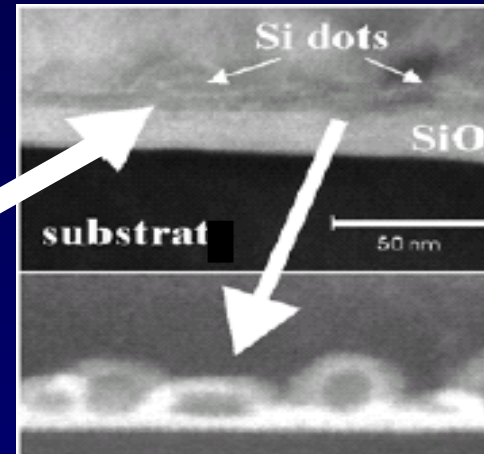
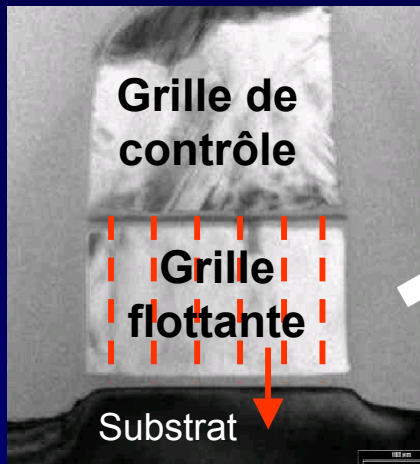


- mémoire la plus importante des NVM
- Un seul transistor
- Densité d'intégration et rapidité d'écriture

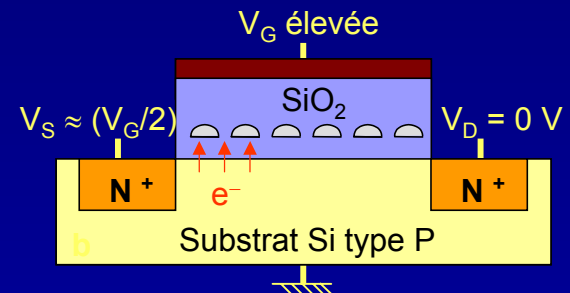
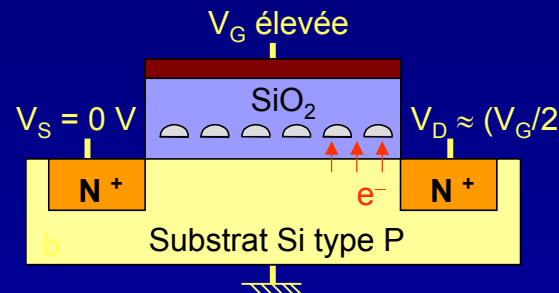
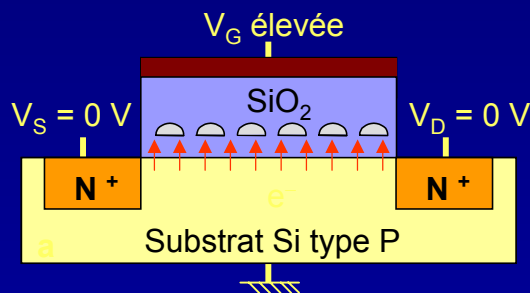
- Solution : stockage discret



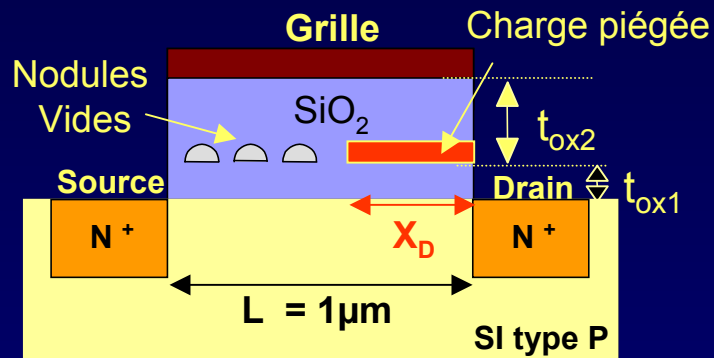
□ Solution : stockage discret



- Nano-cristaux de silicium en remplacement de la grille flottante
 - Préservent d'une perte totale des charges
 - Permettent de stocker 4 états : logique à deux bits



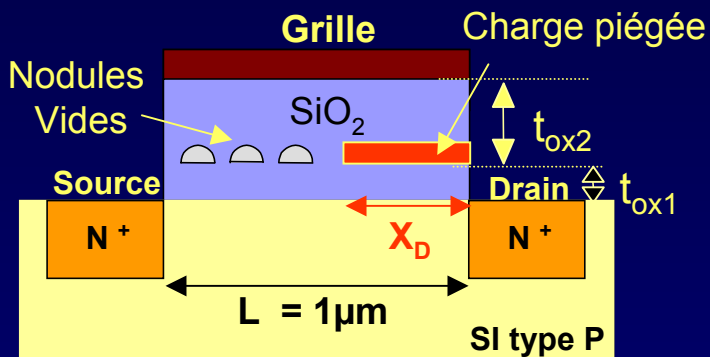
□ Simulations statiques des mémoires à nodules



R_{eff} : Surface occupée par les nodules

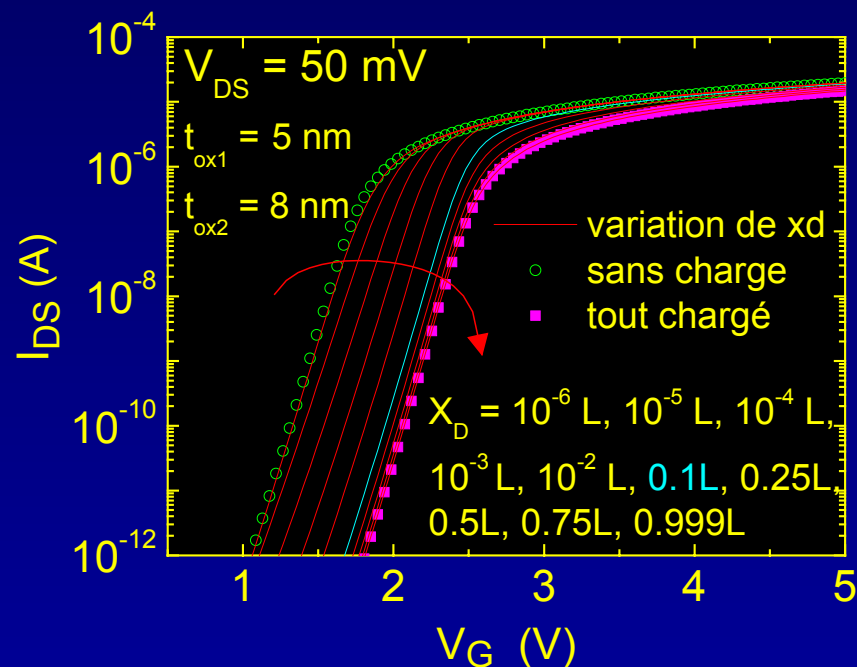
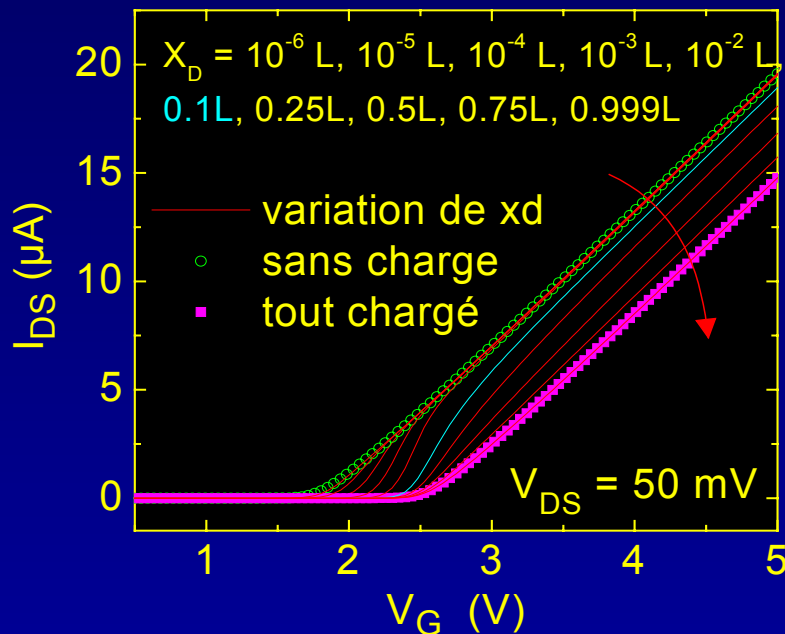
$$R_{\text{eff}} = N_{\text{dot}} \Pi \left(\frac{D_{\text{dot}}}{2} \right)^2$$

□ Simulations statiques des mémoires à nodules



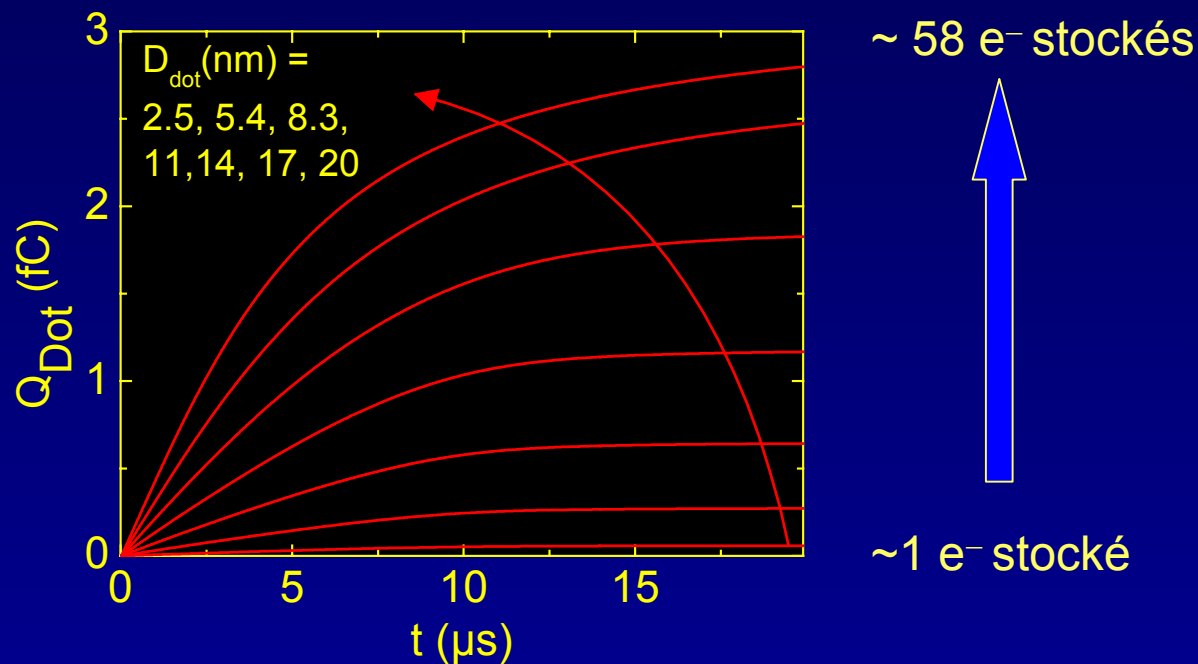
R_{eff} : Surface occupée par les nodules

$$R_{\text{eff}} = N_{\text{dot}} \Pi \left(\frac{D_{\text{dot}}}{2} \right)^2$$



□ Modélisation : variation de la charge stockée

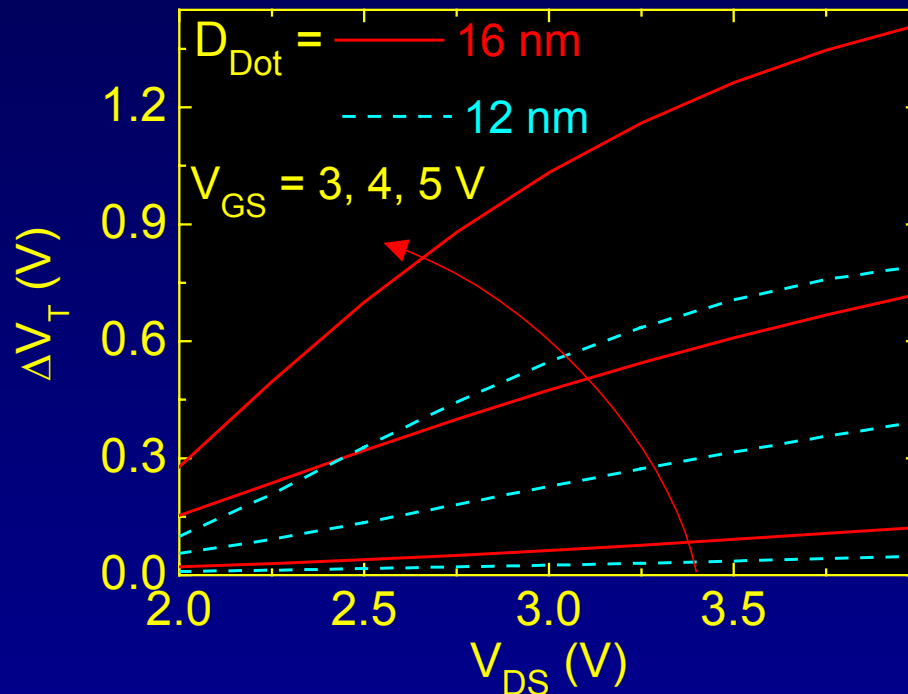
- Modification du simulateur de mémoires Flash
- Segmentation du TMOS
- Chargement des dots (porteurs chauds)



- Le nombre d'électrons stockés = f (du temps d'écriture et de D_{Dot})

□ Modélisation : variation de V_T

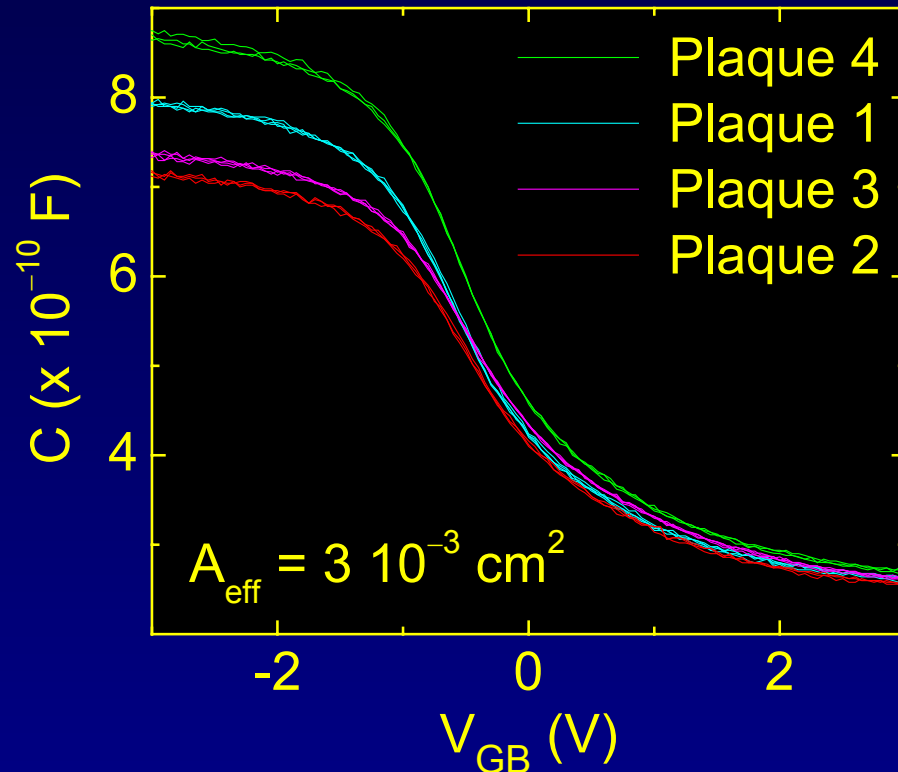
- Modification du simulateur de mémoires Flash
- Prise en compte de la taille et de la densité des nano-cristaux



➤ Bon comportement qualitatif du simulateur

☹ Aucune plaque sans nodule ➡ impossible de calibrer le modèle

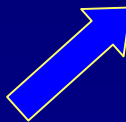

□ Études expérimentales



$$t_{ox1} = 5.5 \text{ nm} \quad t_{ox2} = 8 \text{ nm}$$

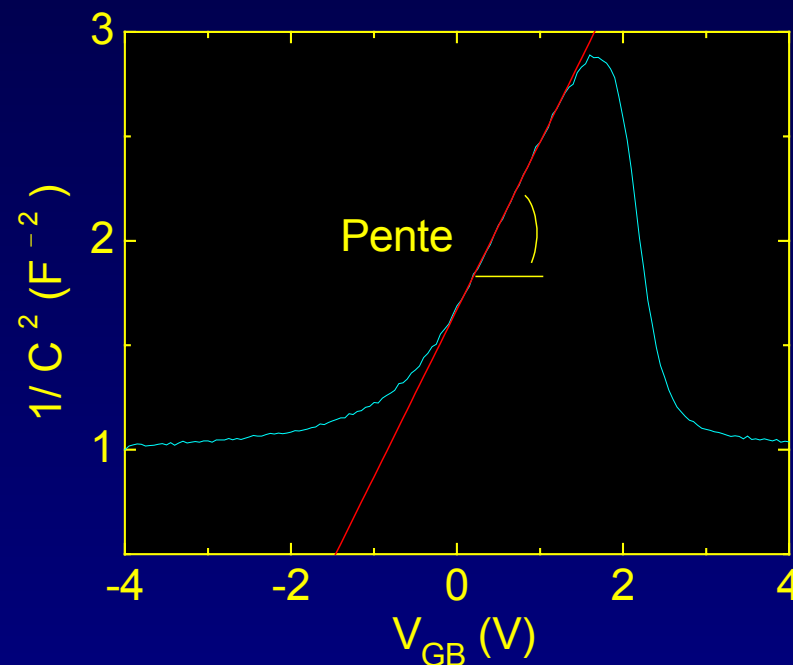
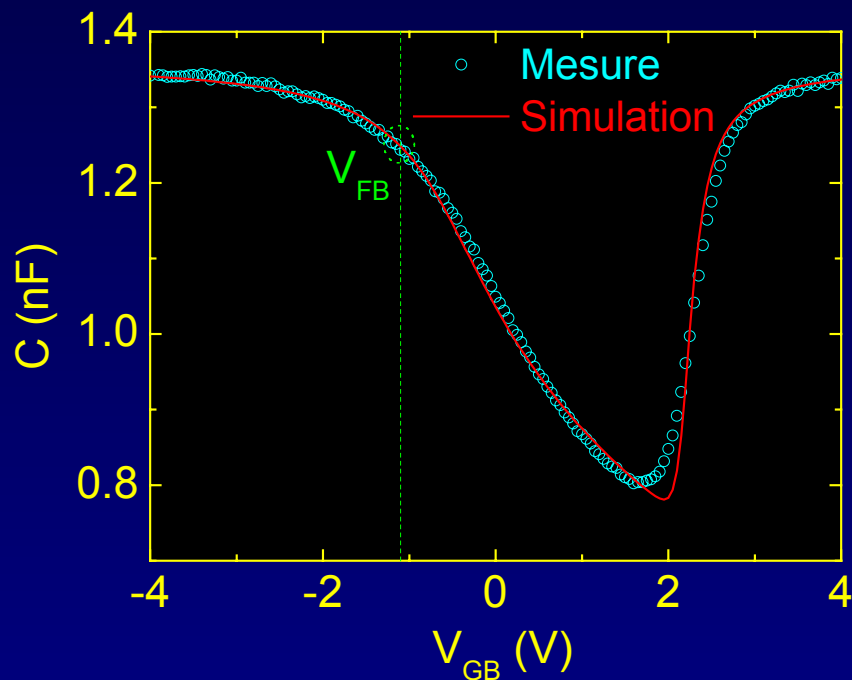
IEDM 2003

Demi-plaques	Ddot (nm)	Ndot (10^{11} cm^{-2})
1	4.5	16
2	5.5	9.6
3	8.5	4
4	10	2.8



 $R_{eff} \approx \text{constant}$

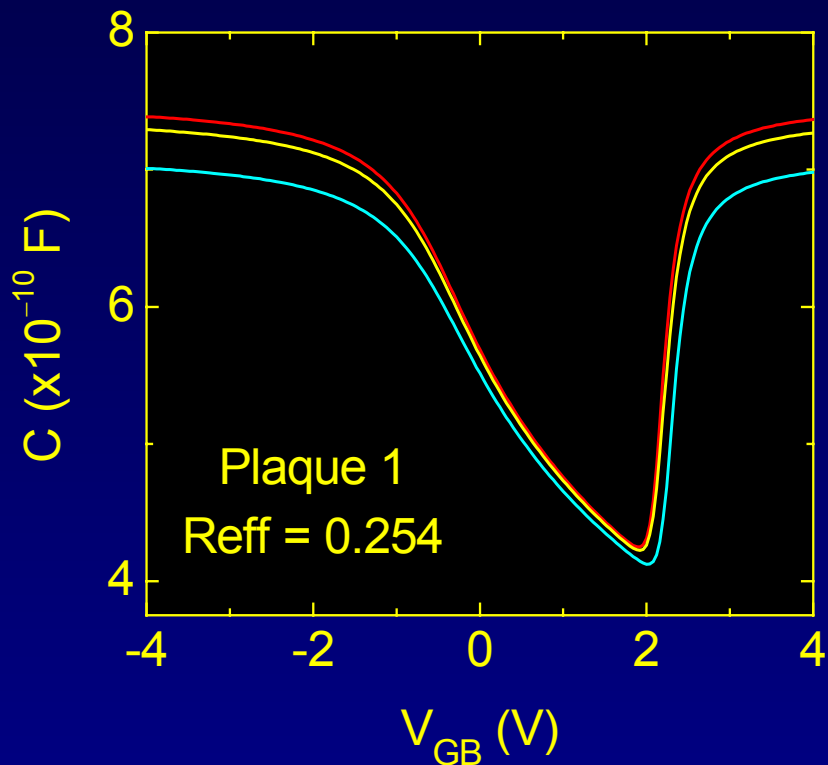
- Bonne uniformité des demi-plaques
- Position de la courbe de la plaque 1 ?

Extraction des paramètres : mesure C-V



Demi-plaques	D_{Dot} (nm)	N_{Dot} ($10^{11} / cm^2$)	N_A ($10^{24} m^{-3}$)	t_{ox} (nm)	V_{FB} (V)
1	4.5	16	1.29	12.4	- 1.1 V
2	5.5	9.6	1.32	13.76	
3	8.5	4	1.33	13.32	
4	10	2.8	1.27	11.3	

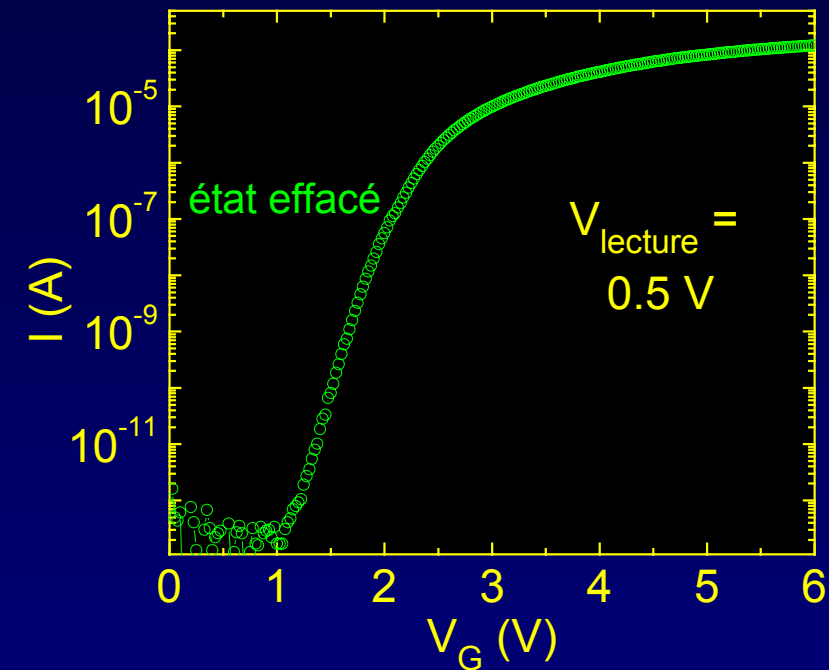
□ Influence du paramètre R_{eff}



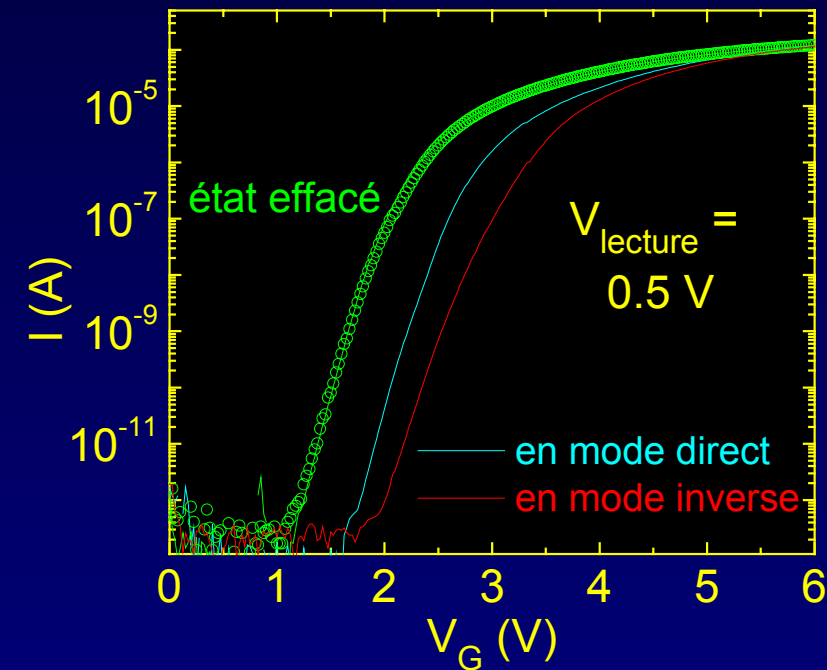
— sans nodule ($t_{ox} = t_{ox1} + t_{ox2}$)

— avec des dots entre t_{ox1} et t_{ox2}

— 1 couche de silicium
entre t_{ox1} et t_{ox2}



- Fonctionnement 2 bits
 - Lecture état effacé



➤ Fonctionnement 2 bits

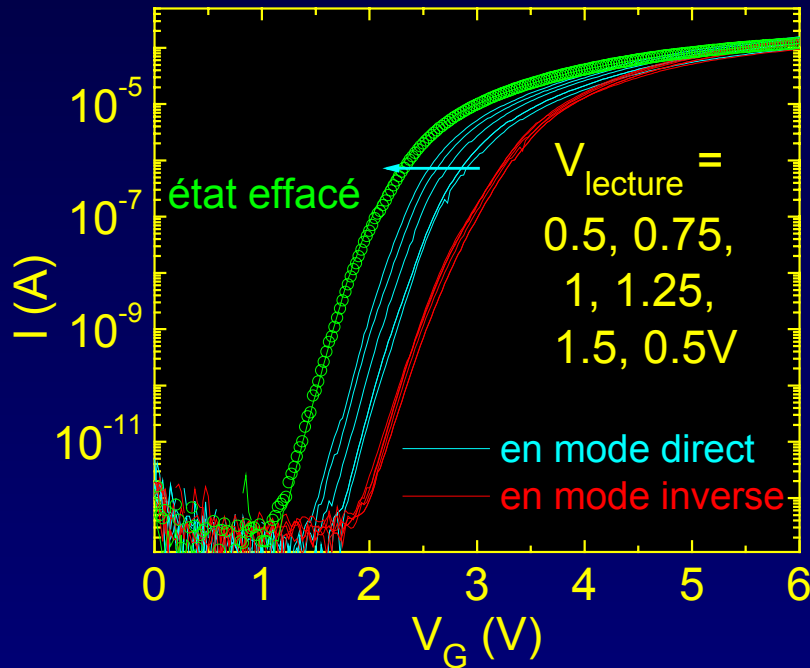
- Lecture état effacé
- Écriture : $V_G = 8$ V et $V_D = 3.5$ V
- Lecture : mode direct et inverse

Décalage plus important
en mode de lecture inverse

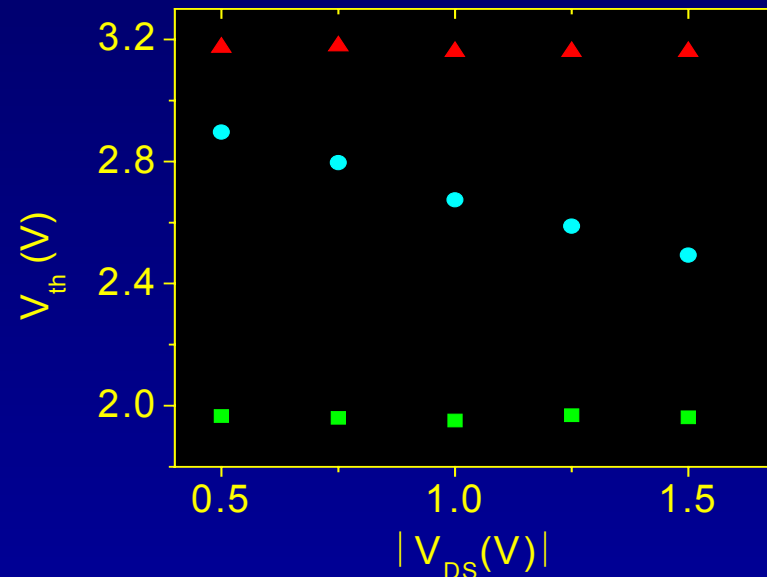
➤ Fonctionnement 2 bits

- Lecture état effacé
- Écriture : $V_G = 8V$ et $V_D = 3.5V$
- Lecture : mode direct et inverse

Décalage plus important en mode de lecture inverse



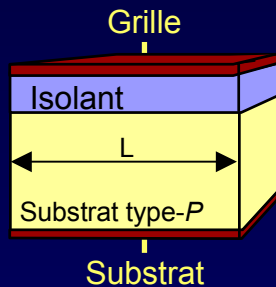
DIBL



Lecture mode inverse

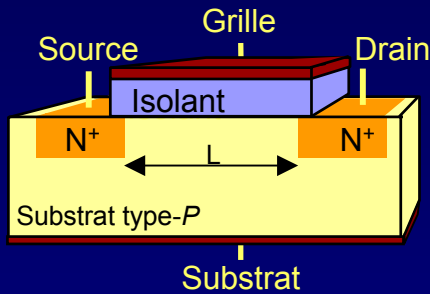
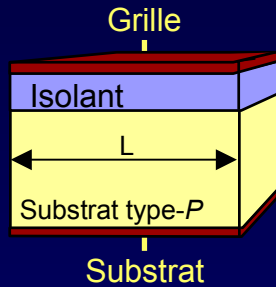
Lecture mode direct

Cellule effacée



- poly-désertion
- non uniformité de N_A
- non uniformité de t_{ox}
- non uniformité de Q_{ox}

Créer des modèles
pour tenir compte de
leur influence



- poly-désertion
- non uniformité de N_A
- non uniformité de t_{ox}
- non uniformité de Q_{ox}

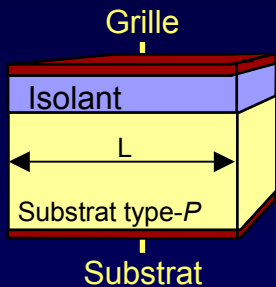
Créer des modèles
pour tenir compte de
leur influence

- Approche segmentée
- Résistances d'accès
- Dopage de substrat
- Amincissement de t_{ox} localisé

Dégradation des
caractéristiques
électriques

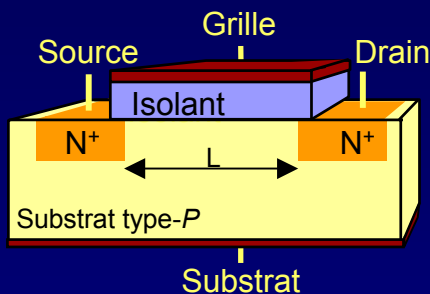
Outils pour l'étude des dispositifs MEMOIRES
au sein du L2MP

Conclusions



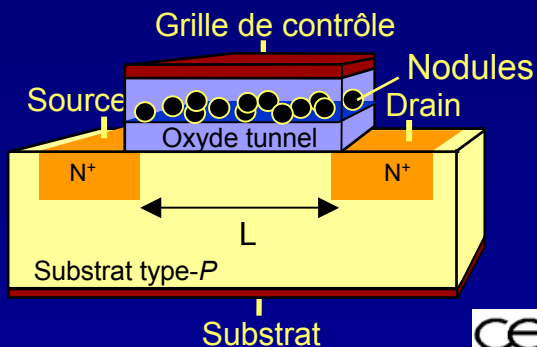
- poly-désertion
- non uniformité de N_A
- non uniformité de t_{ox}
- non uniformité de Q_{ox}

Créer des modèles pour tenir compte de leur influence



- Approche segmentée
- Résistances d'accès
- Dopage de substrat
- Amincissement de t_{ox} localisé

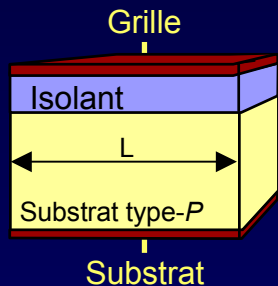
Dégradation des caractéristiques électriques



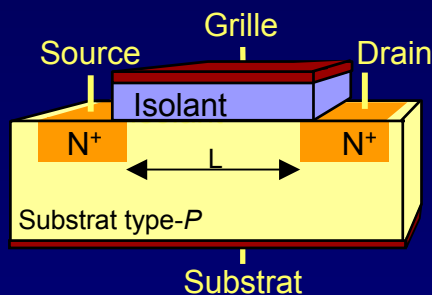
- Caractérisations électriques
- Modification des modèles des structures MOS
- Modélisation de la phase d'écriture

Variations des paramètres clefs

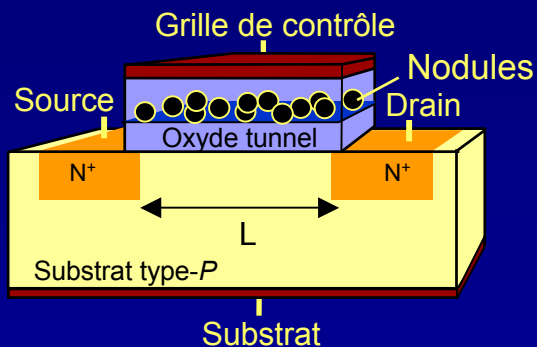
Limitation dues aux effets canaux courts



- Loi de variation de $Q_{ox} = F(t_{stress}, V_{stress})$
- Étude avec des matériaux high κ



- Stress électriques : Variation de V_{th} et I_D
- Étude des rugosités de surface
- TMOS segmenté : effets canaux courts



- Calibration du modèle : Nouvelles structures de test
- Effets canaux courts
- Fuites entre nano-cristaux
- Étude en température