



Dominique FLEURY

mercredi 2 Décembre 2009

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU
TRANSPORT DANS LES TRANSISTORS DE DIMENSION DÉCA-
NANOMÉTRIQUE DES TECHNOLOGIES CMOS SUB-45NM**



Thèse préparée à l'école doctorale EEATS de l'INP Grenoble

Directeur de thèse: G. GHIBAUDO (IMEP-LAHC)

Encadrants: A. CROS (STMicroelectronics) et K. ROMANJEK (ex NXP)

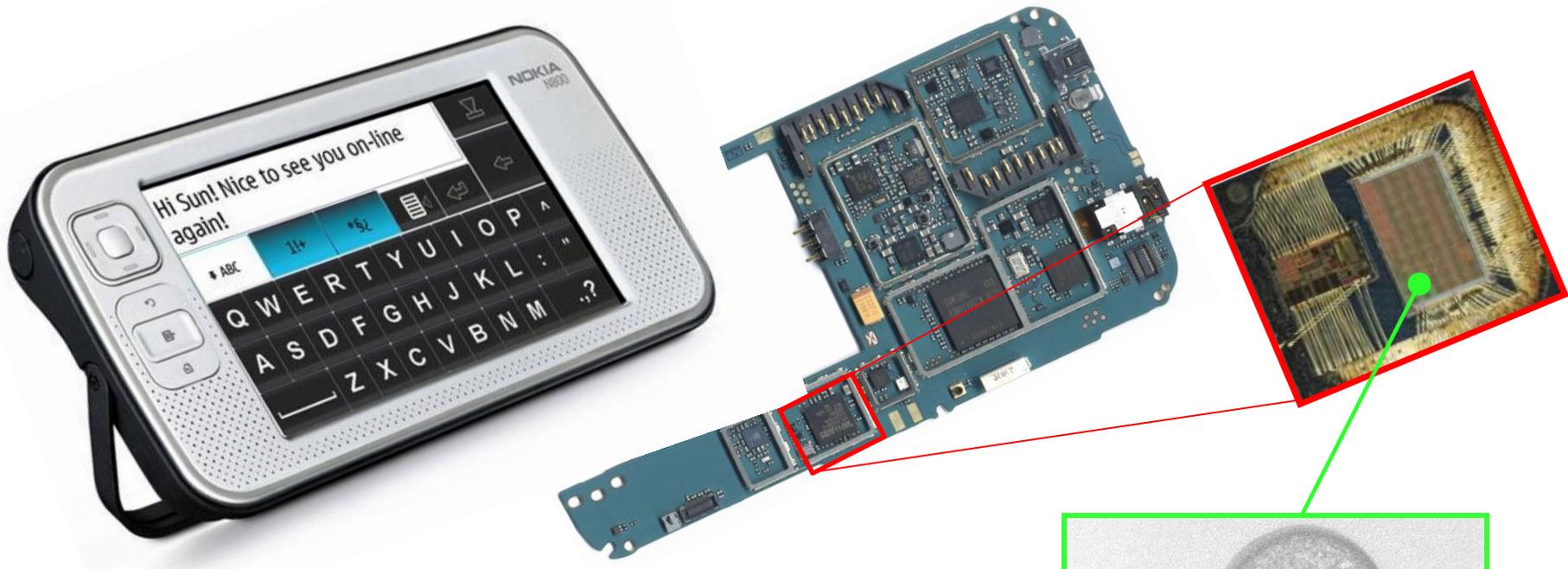
Les sujets abordés dans le manuscrit:

- Fonctionnement du transistor MOS
- Etude théorique du transport dans le canal
- Les méthodologies d'extraction de paramètres électriques sur les transistors MOS
- La modélisation et la caractérisation de la capacité MOS
- Etude expérimentale du transport dans le MOSFET

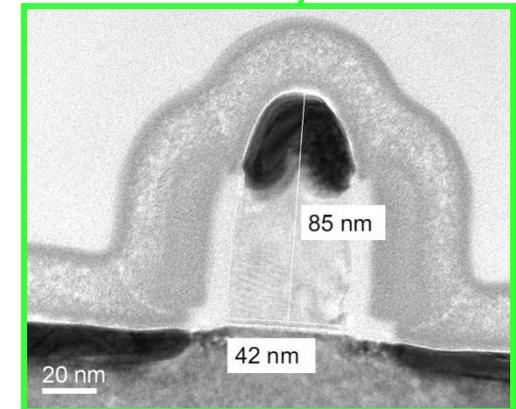
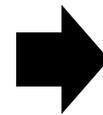
sujets traités dans cette présentation

INTRODUCTION AU TRANSISTOR MOS

Du produit au dispositif élémentaire:

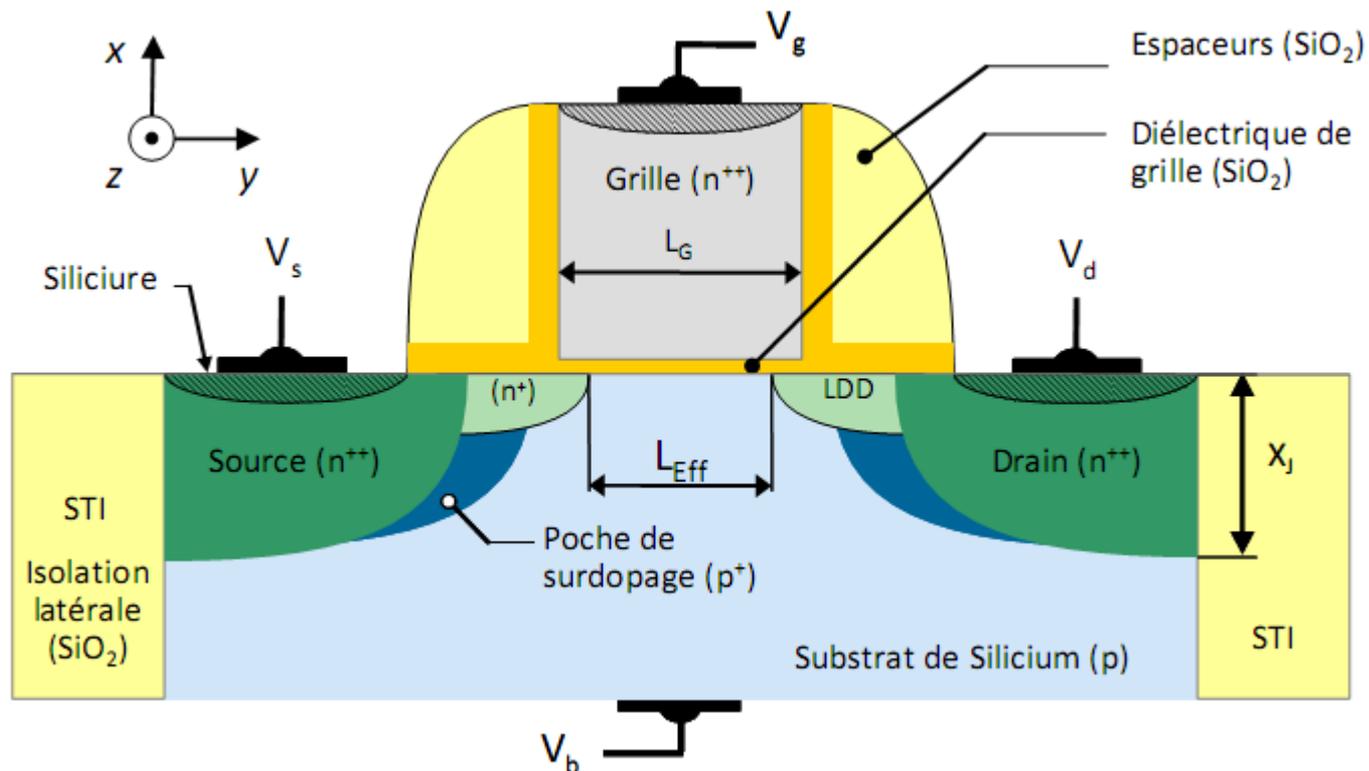


vue en coupe d'un transistor MOS

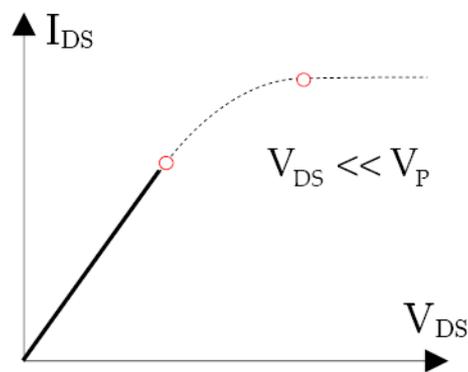
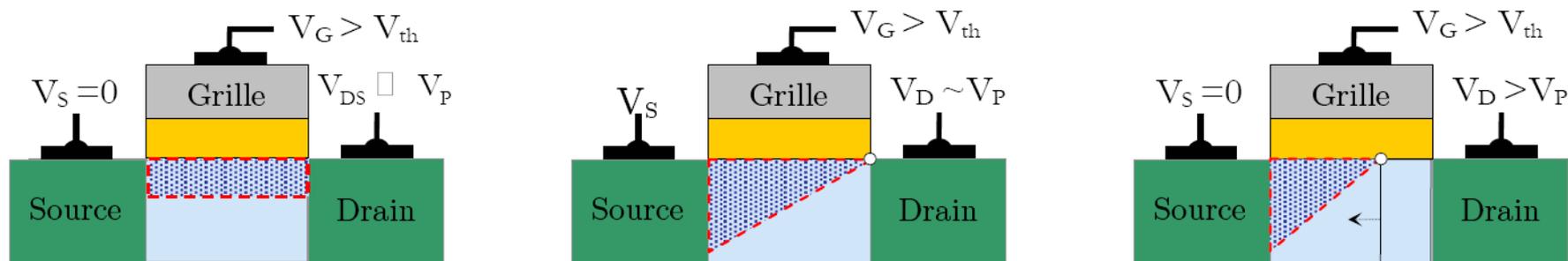


• Principe de fonctionnement du transistor MOS

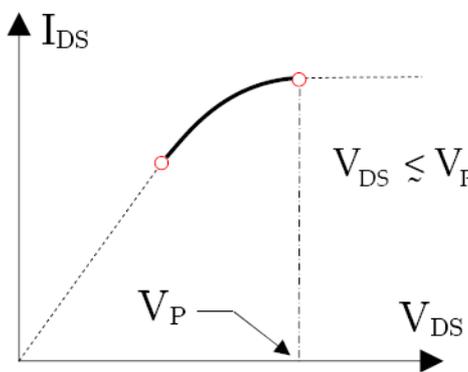
- La tension de grille (V_{gs}) contrôle la charge dans le canal
- La tension source-drain (V_{ds}) permet la circulation de ces charges \rightarrow courant de drain I_d .



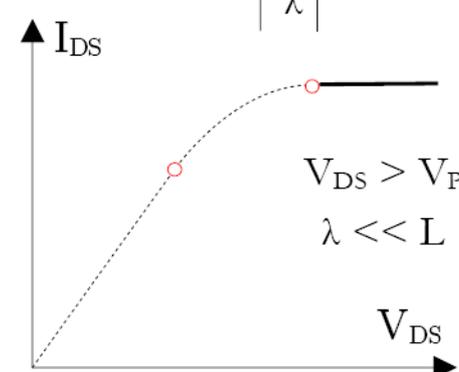
- La caractéristique courant-tension du transistor MOS



Régime linéaire



Zone de raccordement



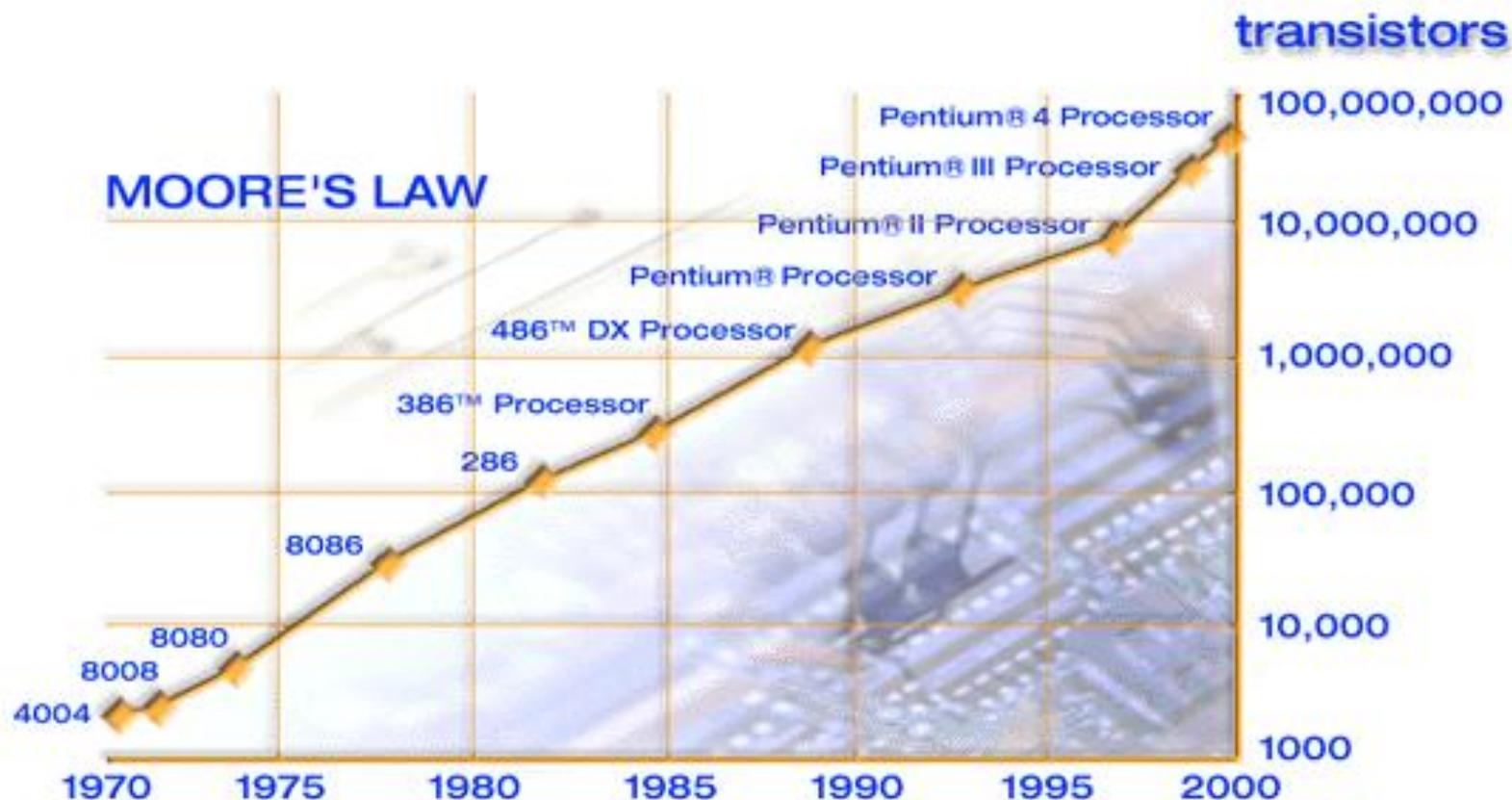
Régime de saturation

$$I_{DS} \approx \mu_n C_{Ox} \frac{W}{L} (V_G - V_{th}) V_{DS}$$

$$I_{DS} = \mu_n C_{Ox} \frac{W}{L} \left[(V_G - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$I_{DS} = I_{Dsat} \frac{L}{L - \lambda(V_{DS})}$$

- La réduction d'échelle: « loi » de Moore
 - La densité d'intégration double tous les 2 ans !



- **La réduction d'échelle: « loi » de Moore**
 - La densité d'intégration double tous les 2 ans !
- **MAIS: la miniaturisation des transistors entraîne aussi des problèmes:**
 - Apparition des **effets de canaux courts** (perte du contrôle électrostatique de la grille)
 - Les **capacités parasites** deviennent prédominantes
 - Le **transport** (la mobilité) est dégradé

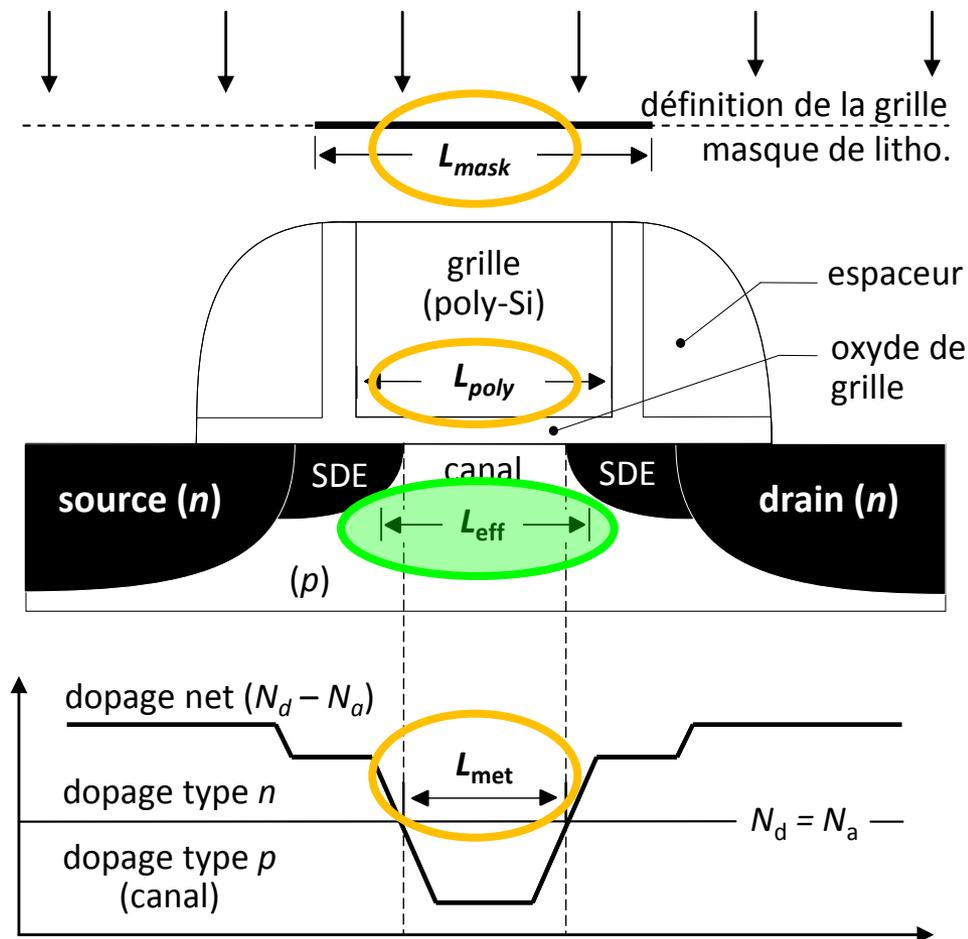


Les performances sont en deçà des prévisions !

AMÉLIORATIONS APPORTÉES À LA MESURE DE LA LONGUEUR EFFECTIVE



- Les différentes longueurs dans le transistor MOS



L_{mask} : Longueur sur le masque de lithographie

≠

L_{poly} : Longueur réelle de la grille (après gravure)

≠

L_{met} : Longueur métallurgique (profil de dopage)

≠

L_{eff} : Longueur effective du canal d'inversion

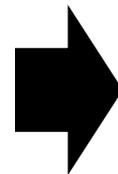
La longueur effective de canal (L_{eff}) est CELLE qui gouverne les **CRITÈRES DE PERFORMANCE**:

- le courant de drain I_d (transport, champ électrique)
- les effets de canaux courts (DIBL, CSE)
- la durée de vie du dispositif (fiabilité HCI)

L_{eff} doit être mesurée précisément !



La longueur effective n'est pas mesurable directement (microscopie, AFM)



La caractérisation électrique est indispensable !

L'état de l'art des méthodes d'extraction de L_{eff} :

- basées sur les mesures de courant ex: $R_{\text{tot}}(L)$
 - Ne prennent pas en compte la dégradation de mobilité qui apparaît sur les transistors courts
- basées sur les mesures capacitives (C_{gc} , C_{gb}):
 - Ne prennent pas en compte les capacités parasites



Une méthodologie ADAPTEE AUX TRANSISTORS COURTS EST NECESSAIRE !

La problématique de cette étude

IDEE: la réponse capacitive de la couche d'inversion est proportionnelle à L_{eff}



ÉTAT DE L'ART

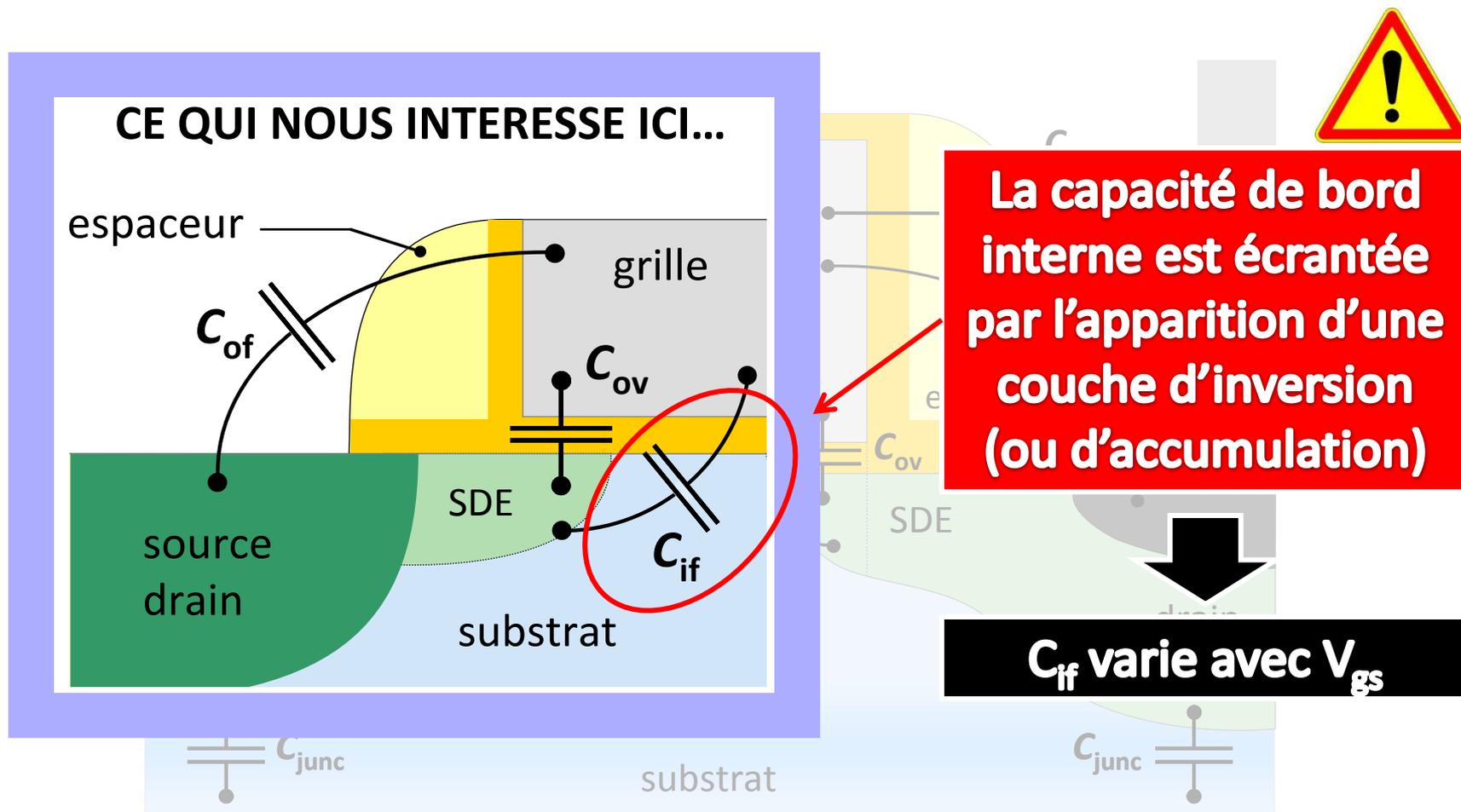
SOLUTION: utiliser la réponse capacitive grille-canal pour mesurer L_{eff}

PROBLEME: les capacités parasites faussent le résultat. Elle doivent être comprises et corrigées !

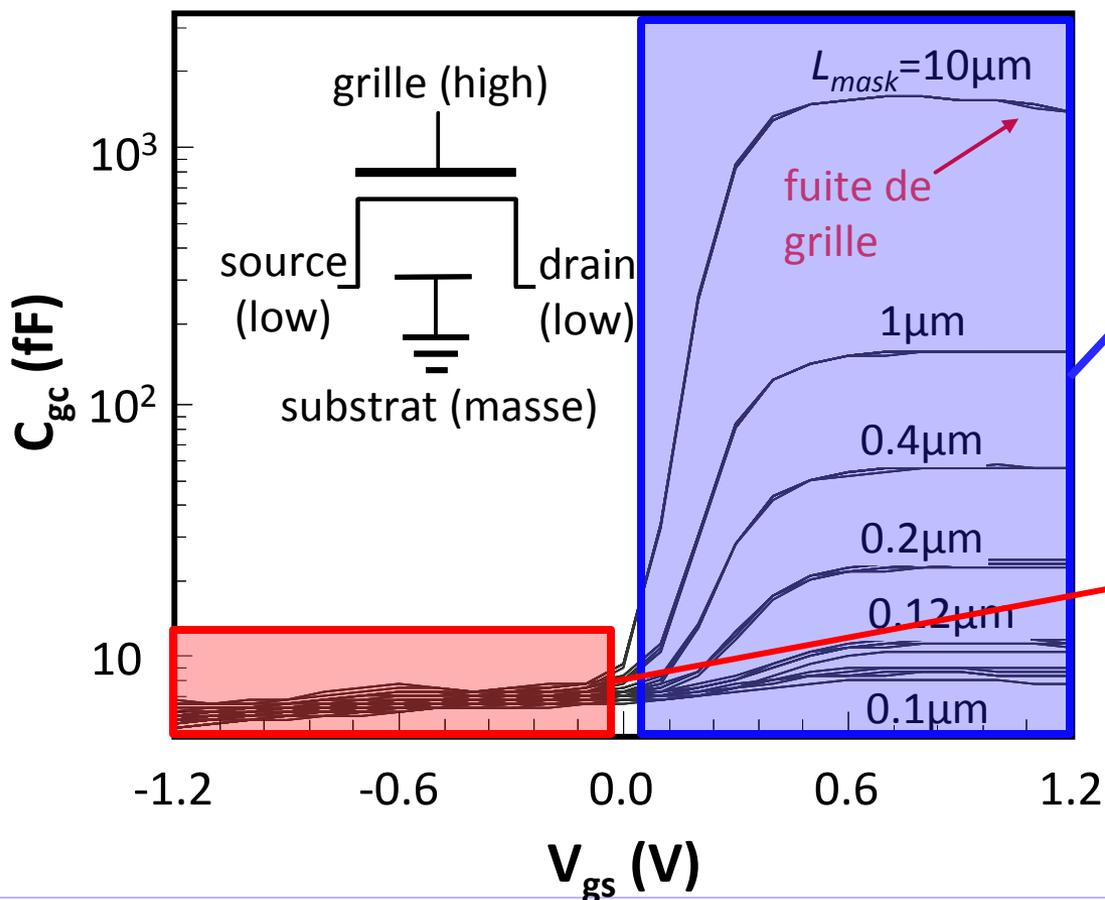
CE
TAVAIL



- Les capacités parasites propres au transistor MOS



- La réponse capacitive grille-canal (C_{gc})



Niveau parasite du même ordre de grandeur que la réponse sur les transistors courts

Capacités parasites

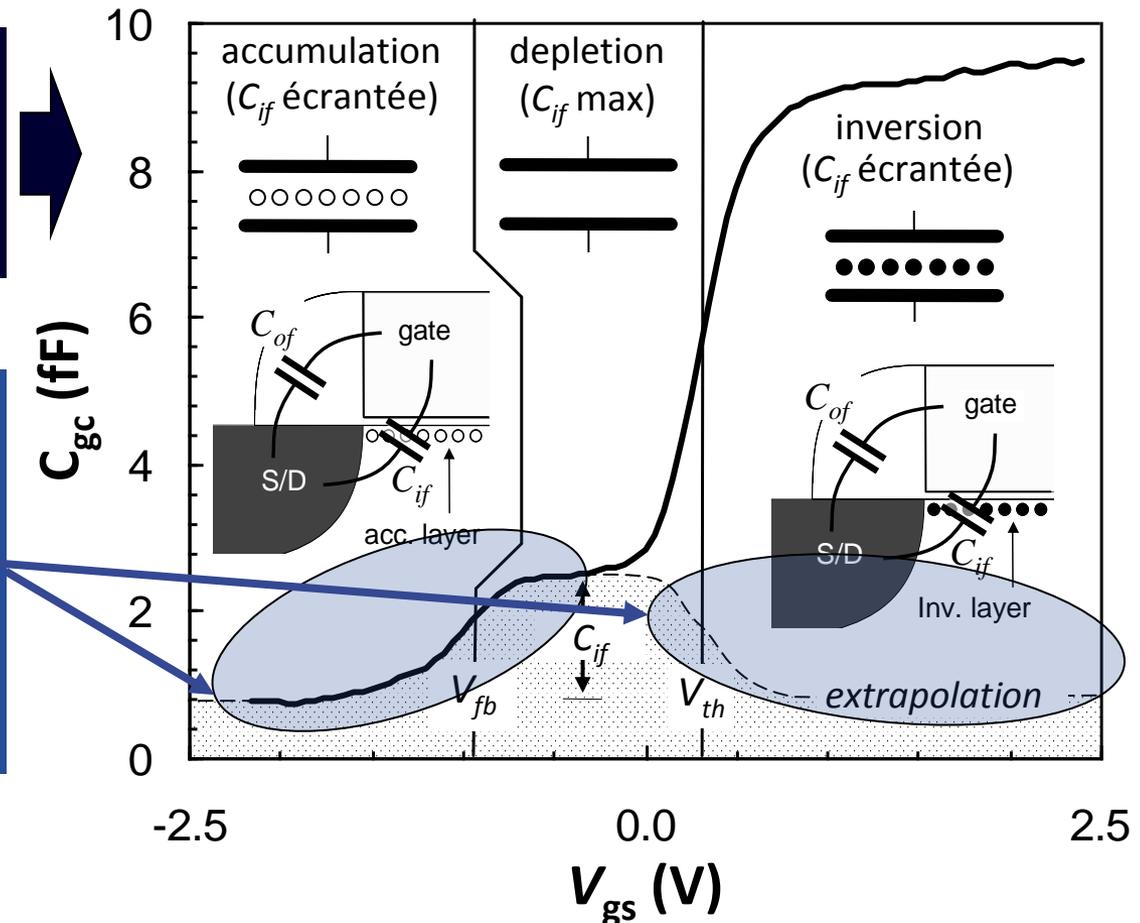


C'est le problème !

- Mieux comprendre la capacité de bord interne en utilisant des structures sans recouvrement ($C_{ov}=0$)

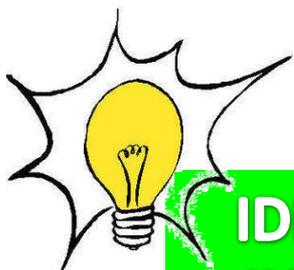
$C_{ov}=0$: $C_{if}(V_{gs})$ la seule capacité parasite qui dépend de V_{gs} !

C_{if} est écrantée par les charges d'accumulation. Par extrapolation: C_{if} sera écrantée en régime d'inversion



- Comment modéliser la capacité de bord interne ?

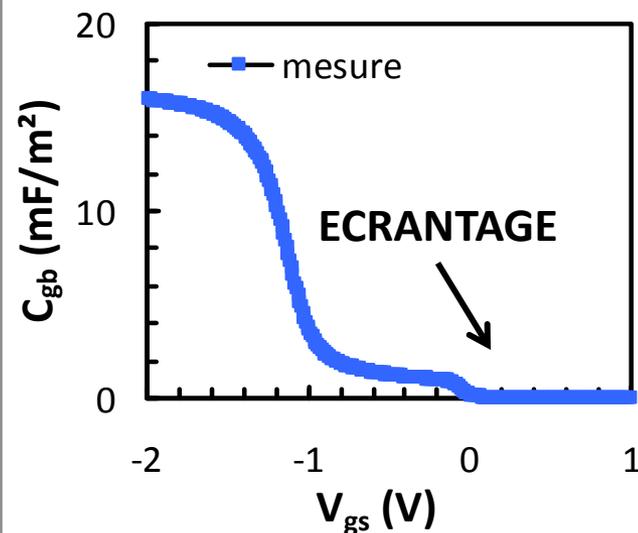
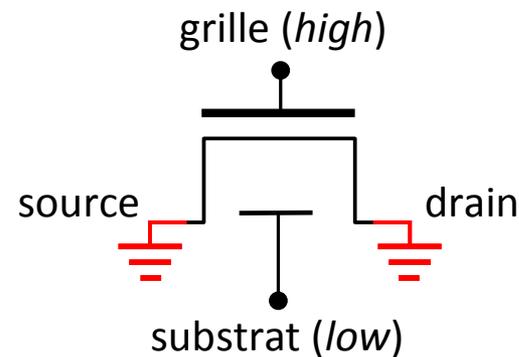
PROBLEME : comment modéliser l'écrantage de C_{ff} ?



IDÉE : utiliser le phénomène d'écrantage de la capacité de désertion, visible sur la réponse grille-substrat C_{gb}

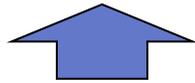


grille-substrat $C_{gb}(V_{gs})$

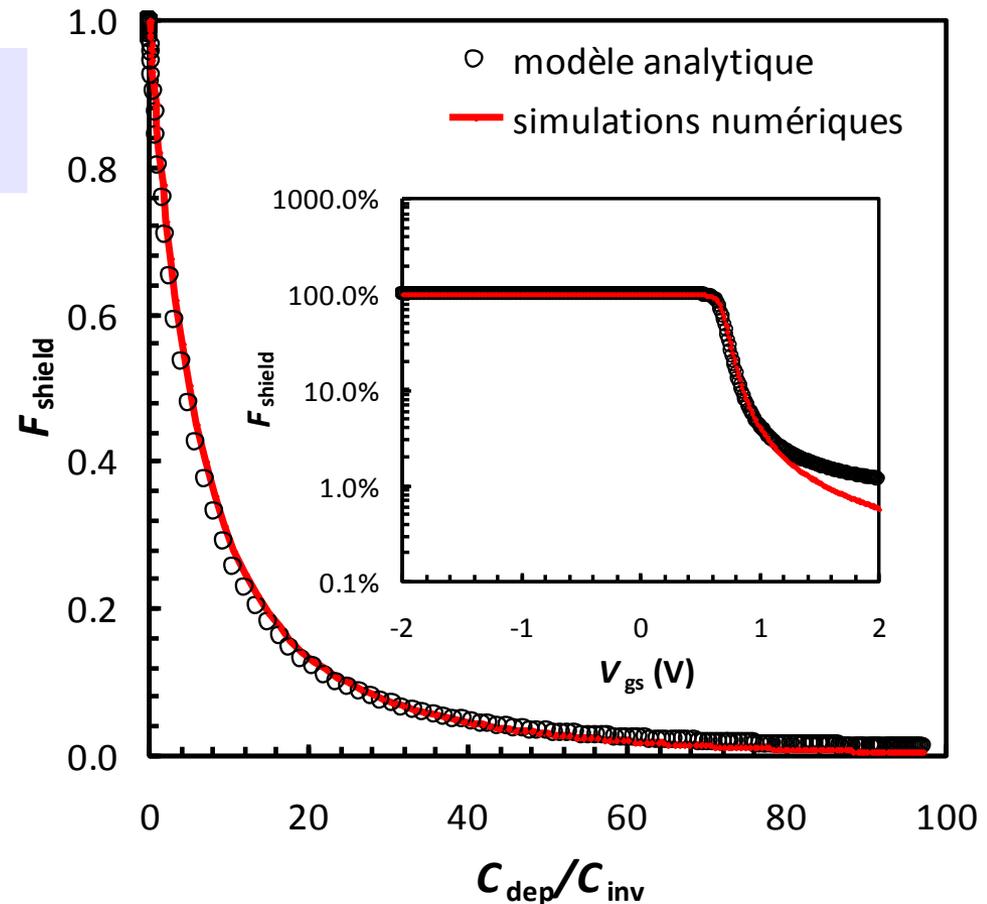


- **Modélisation du phénomène d'écrantage dans $C_{gb}(V_{gs})$**
 - Définition d'une fonction d'écrantrage F_{shield} (**nouveau**)

$$F_{shield}(C, C_s) = \frac{(C_{ox})^2}{(C_{ox} + C_s)^2 + C \cdot (C_s)}$$



Modélise l'influence de l'écrantage d'une capacité C par une capacité C_s , dans un transistor MOS ayant une capacité d'oxyde C_{ox} .

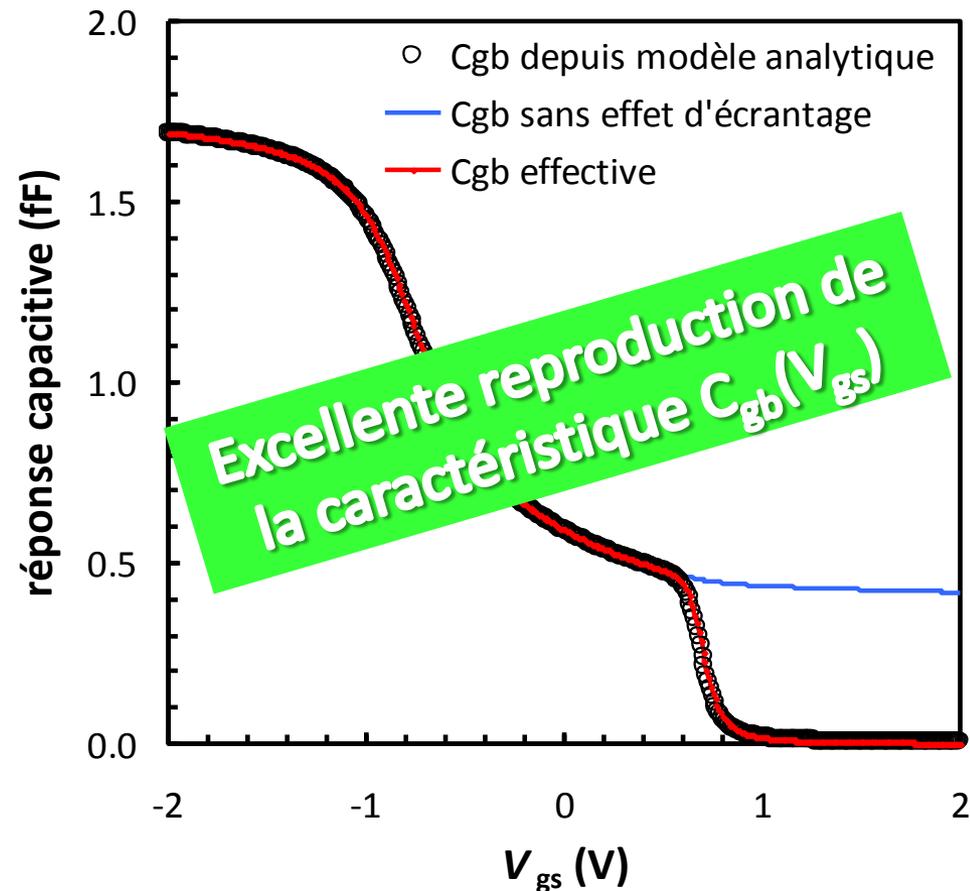


- **Modélisation du phénomène d'écrantage dans $C_{gb}(V_{gs})$**
 - Définition d'une fonction d'écrantrage F_{shield} (**nouveau**)

$$F_{shield}(C, C_s) = \frac{(C_{ox})^2}{(C_{ox} + C_s)^2 + C \cdot (C_s)}$$



**APPLICATION À LA
MODÉLISATION DE
 $C_{IF}(V_{GS})$?**



- Modélisation de la capacité de bord interne: $C_{if}(V_{gs})$

Calcul électrostatique:
valeur maximale de C_{if}

$$C_{if}(V_{fb}) = \frac{\epsilon_{ox}}{\beta} \ln \left[1 + \frac{X_j \sin(\beta)}{t_{ox}} \right], \quad \beta = \frac{\pi \epsilon_{ox}}{2 \epsilon_{Si}}$$

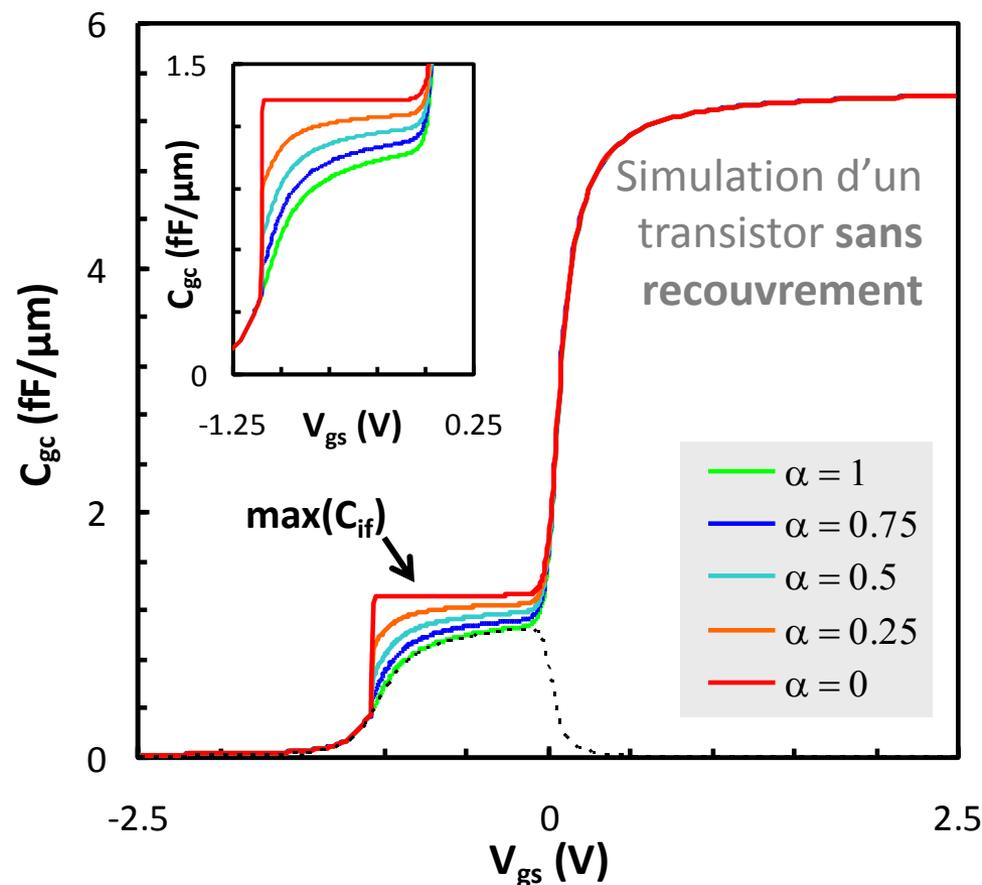


Fonction d'écrantage

$$C_{if}(V_{gs}) = C_{if,max} \times F_{shield}(C_{if,max}, C_s)$$

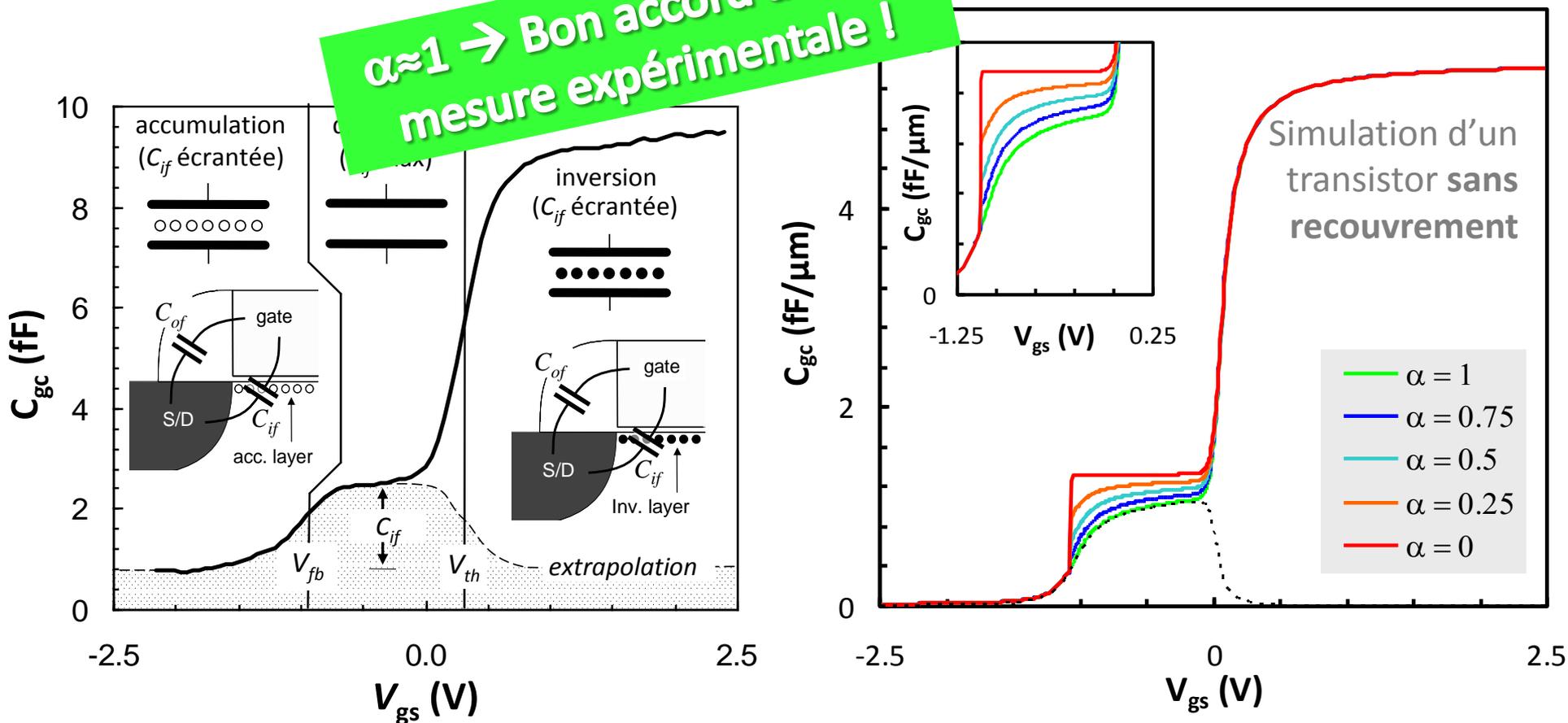


α : facteur de pondération
de la capacité de désertion



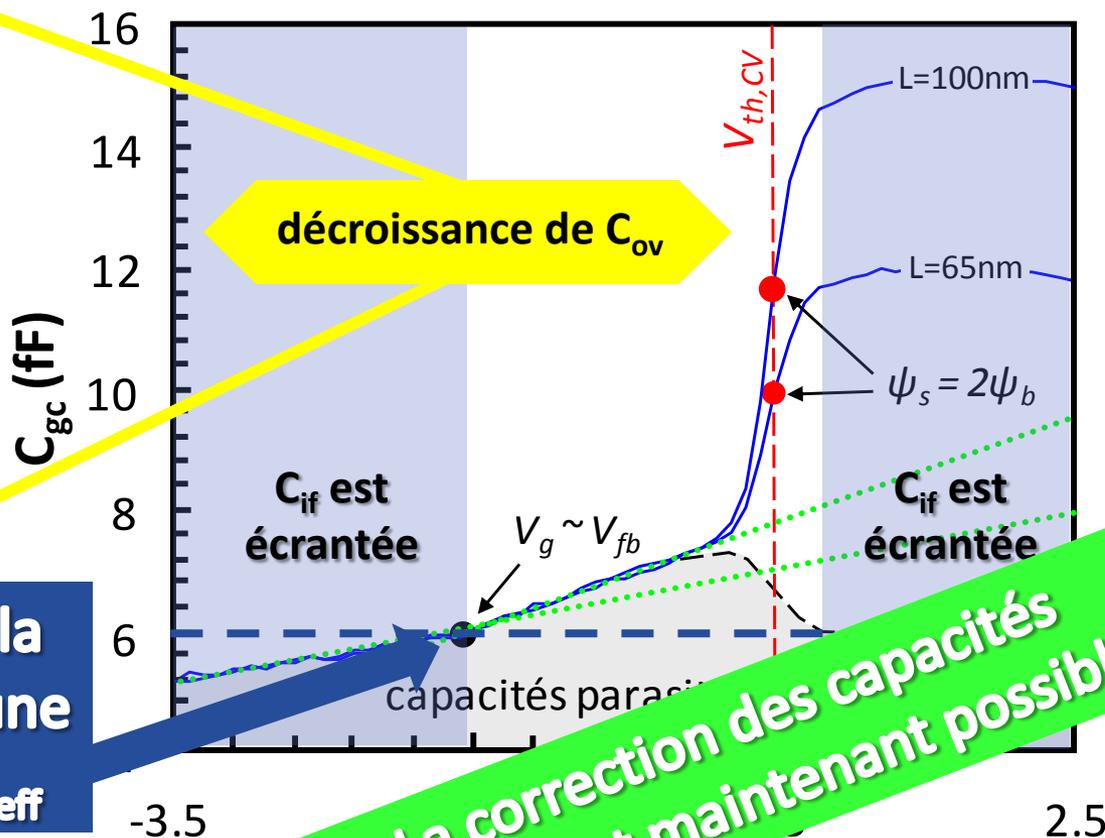
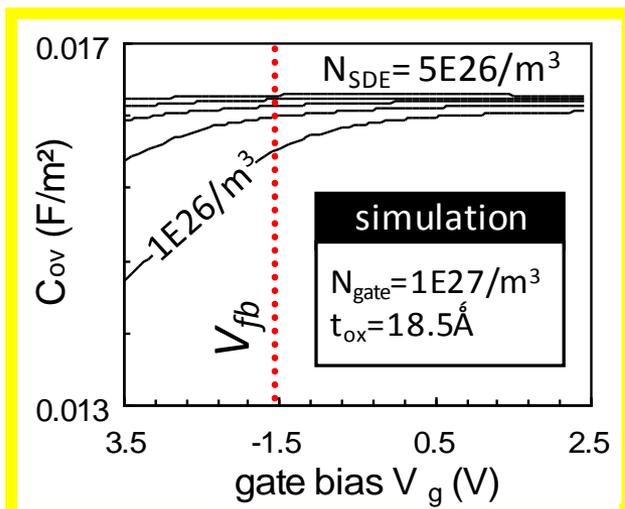
• Modélisation de la capacité de bord interne: $C_{if}(V_{gs})$

$\alpha \approx 1 \rightarrow$ Bon accord avec la mesure expérimentale !



Simulation d'un transistor sans recouvrement

- Le travail effectué sur les capacités parasites nous permet de comprendre l'allure d'une mesure $C_{gc}(V_{gs})$

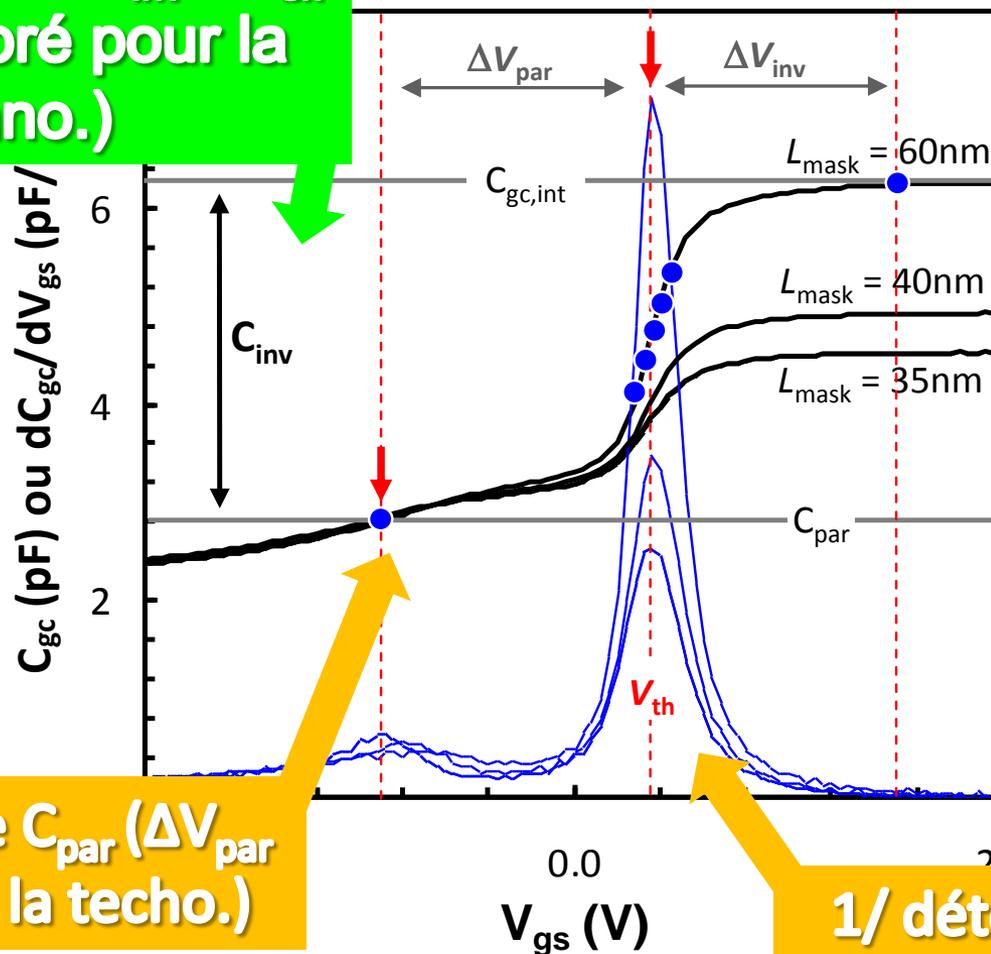


La valeur à corriger sur la mesure pour retrouver une proportionnalité avec L_{eff}

La correction des capacités parasites est maintenant possible !

- Implémentation sous forme de test automatique:

3/ extraction de $C_{inv} \propto L_{eff}$
(ΔV_{inv} calibré pour la techno.)



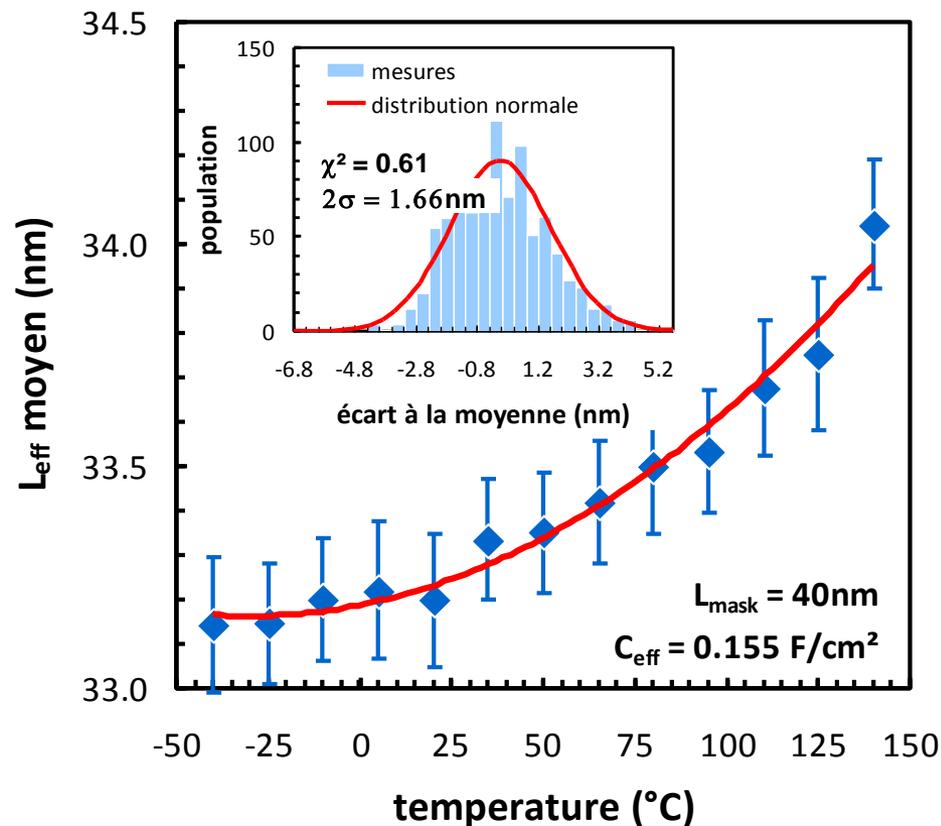
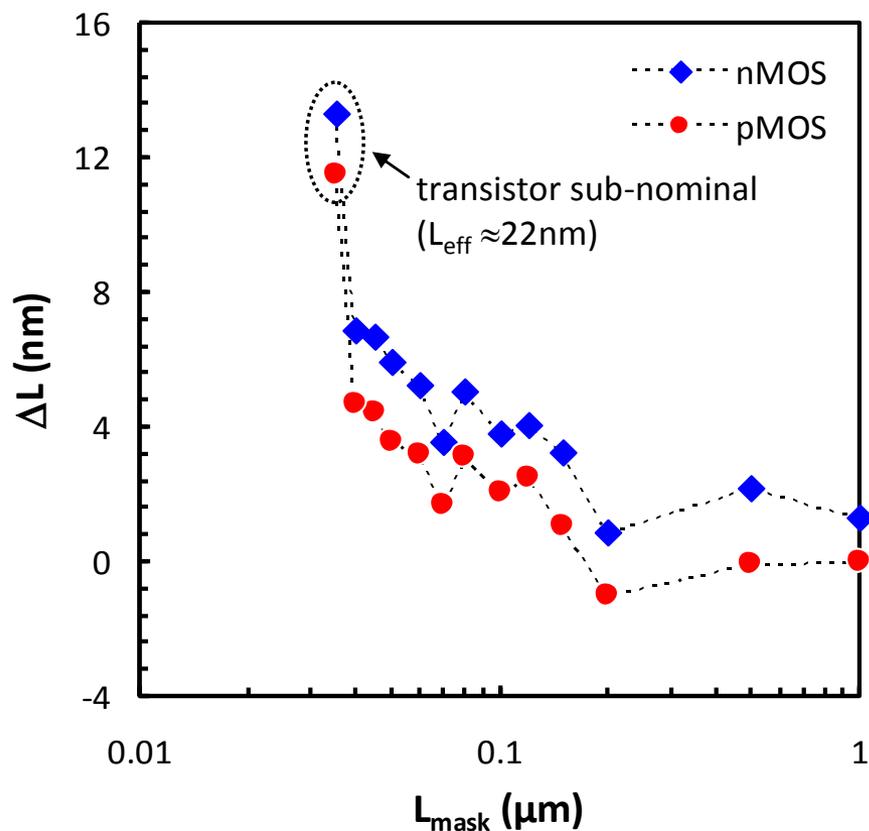
2/ mesure de C_{par} (ΔV_{par} calibré pour la techno.)

1/ détection de V_{th}

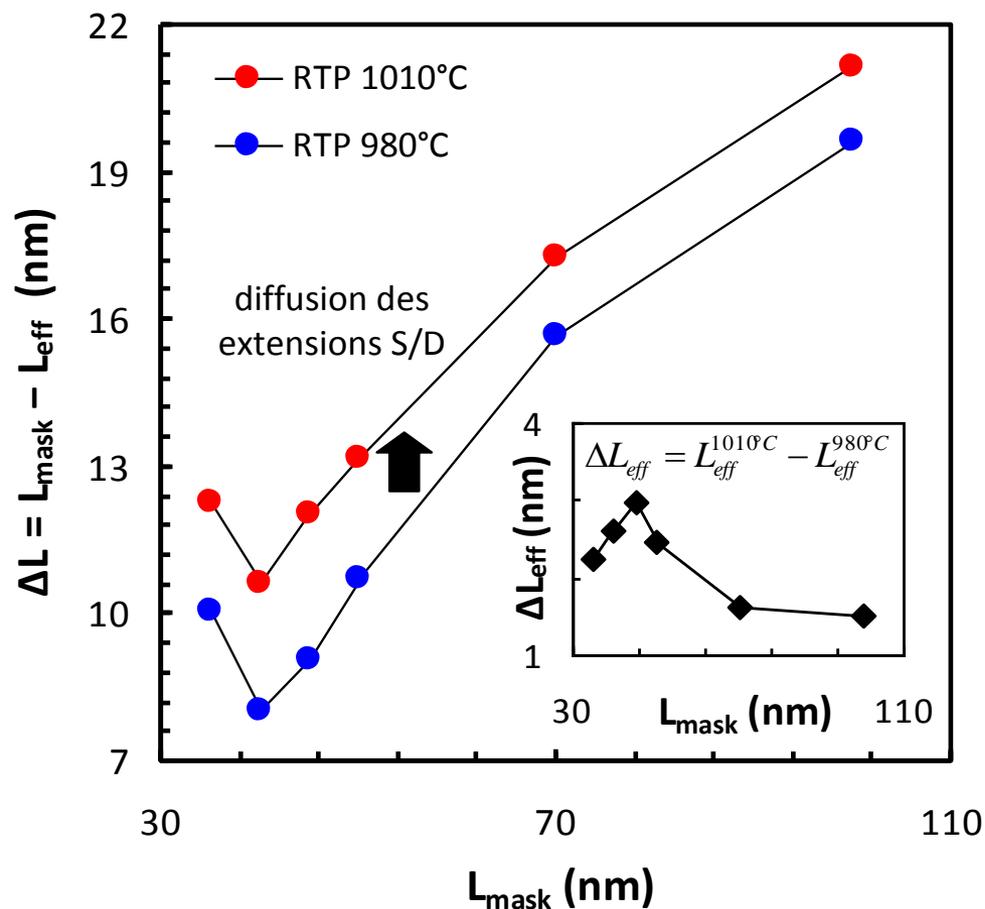
Technologie
CMOS 45nm
-
déploiement
sous forme de
test en ligne

- Mesures précises de L_{eff} :

- Précision de l'ordre de $\pm 1\text{nm}$ sur des transistors $L_{\text{eff}} < 100\text{nm}$
- Corrélation avec les études en fiabilité (durée de vie HCI)



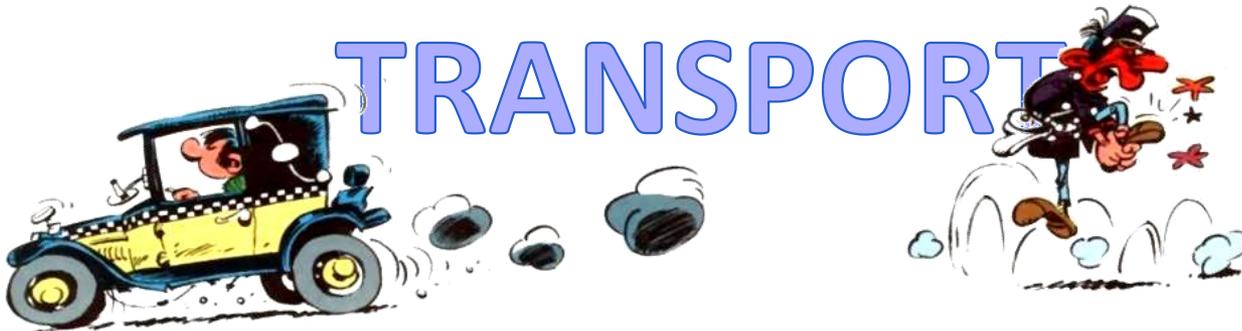
- Exemple: mise en évidence de la diffusion des extensions S/D:



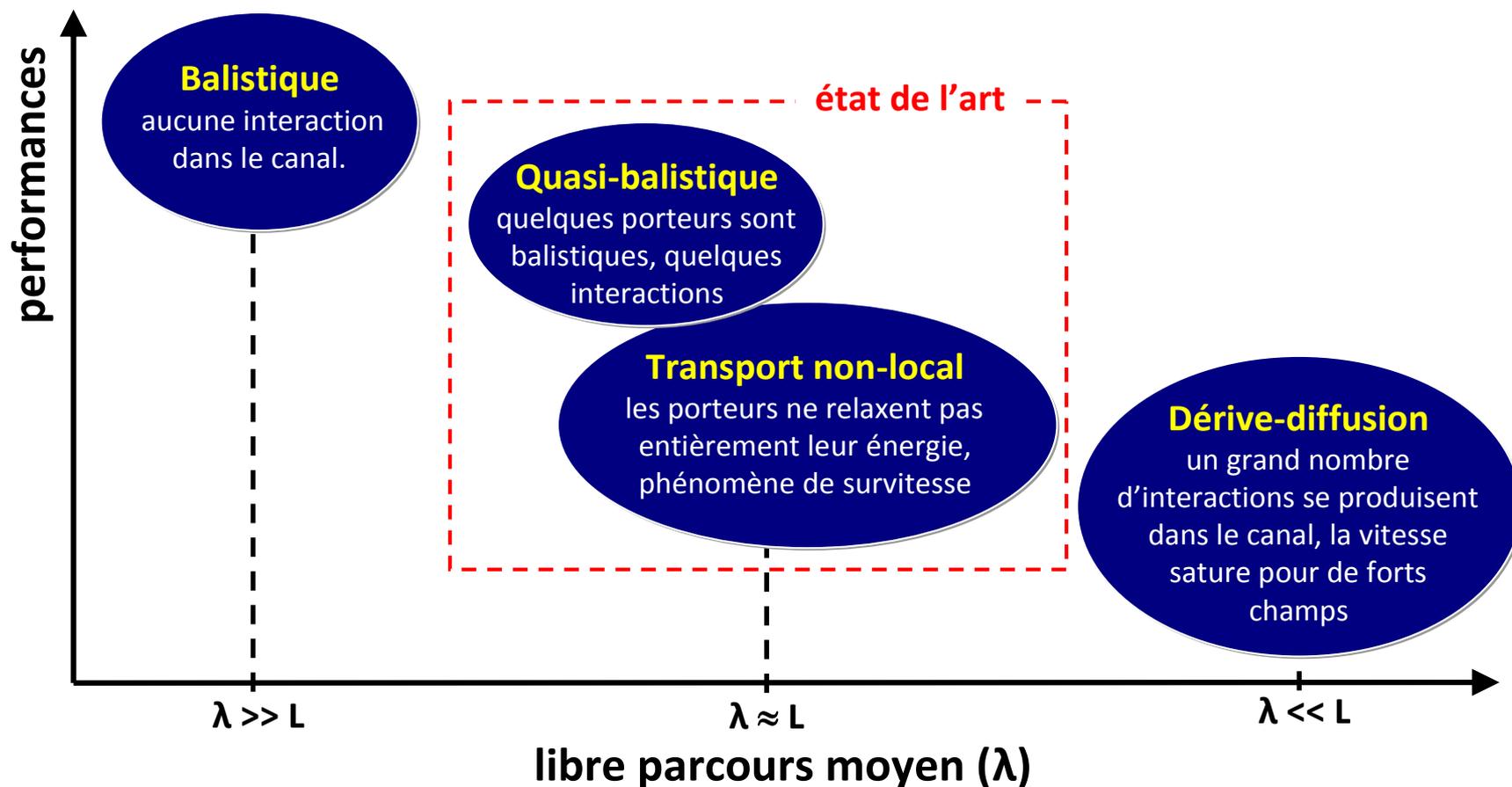
Les conclusions de cette partie:

- ❑ Une meilleure compréhension des capacités parasites a permis de concevoir une méthodologie de mesure de L_{eff} **plus robuste (résultats précis et fiables sur transistors courts)**.
- ❑ L'automatisation de la mesure devient possible (transfert sous forme de test en ligne) pour permettre un suivi de L_{eff} au cours du développement de la technologie.
- ❑ Ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude des propriétés de transport sur des transistors courts : **mobilité, balisticité...**

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU TRANSPORT



- Le libre parcours moyen: un point de départ à l'unification des différentes théories de transport:



« En physique, la mobilité d'un électron relie sa vitesse au champ électrique, dans un solide ou dans un gaz »

source: Wikipédia

Relation linéaire entre vitesse de dérive et champ

$$v_d = \mu_0 \mathcal{E}_y$$

Mobilité à bas champ

Champ électrique

Temps de relaxation en moment

$$\mu_0 = \frac{e \cdot \tau_m}{m^*}$$

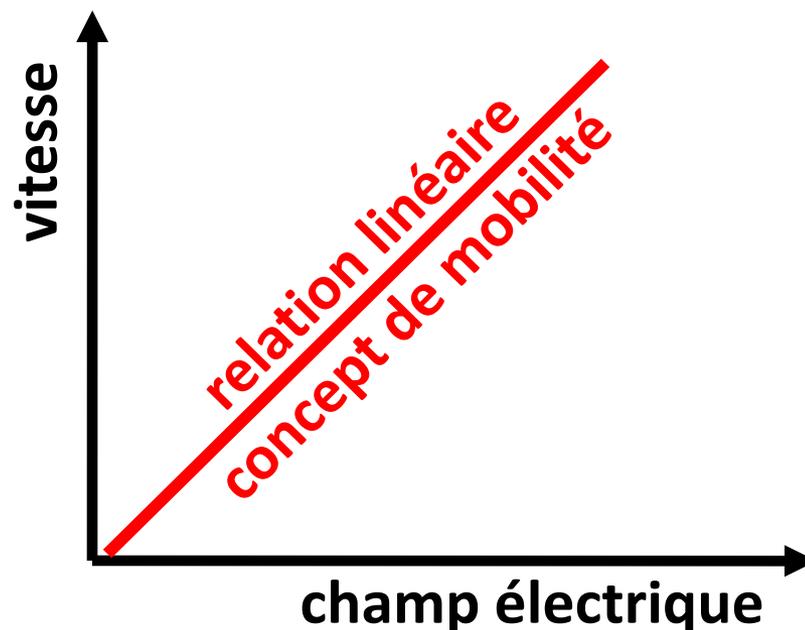
masse effective

« En physique, la mobilité d'un électron relie sa vitesse au champ électrique, dans un solide ou dans un gaz »

source: Wikipédia



**La notion de mobilité n'est valable que lorsque les collisions sont nombreuses et de nature élastique
C'EST LA LOI D'OHM !**



- Les centres de diffusion quasi-élastiques:
 - Les phonons acoustiques: μ_{ph}
 - Les centres chargés (interaction de Coulomb): μ_{cb}
 - La rugosité de surface: μ_{SR}
 - Les centres non chargés (dislocation, interstitiels): μ_N
- Les centres de diffusion inélastiques
 - Les phonons optiques (v_{sat})
 - Provoquent **UNE DEVIATION A LA LOI D'OHM**

Relation de Matthiessen

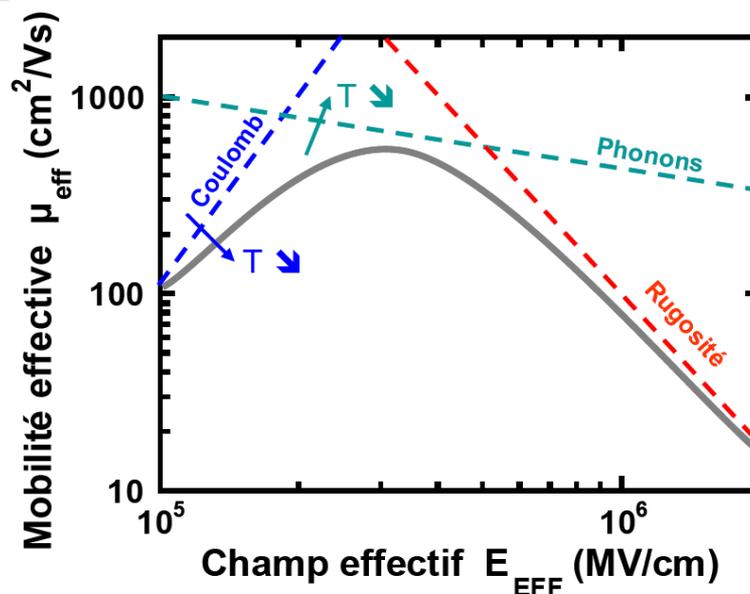
- **La mobilité effective du canal:**

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \sum_s \frac{1}{\mu_s}$$

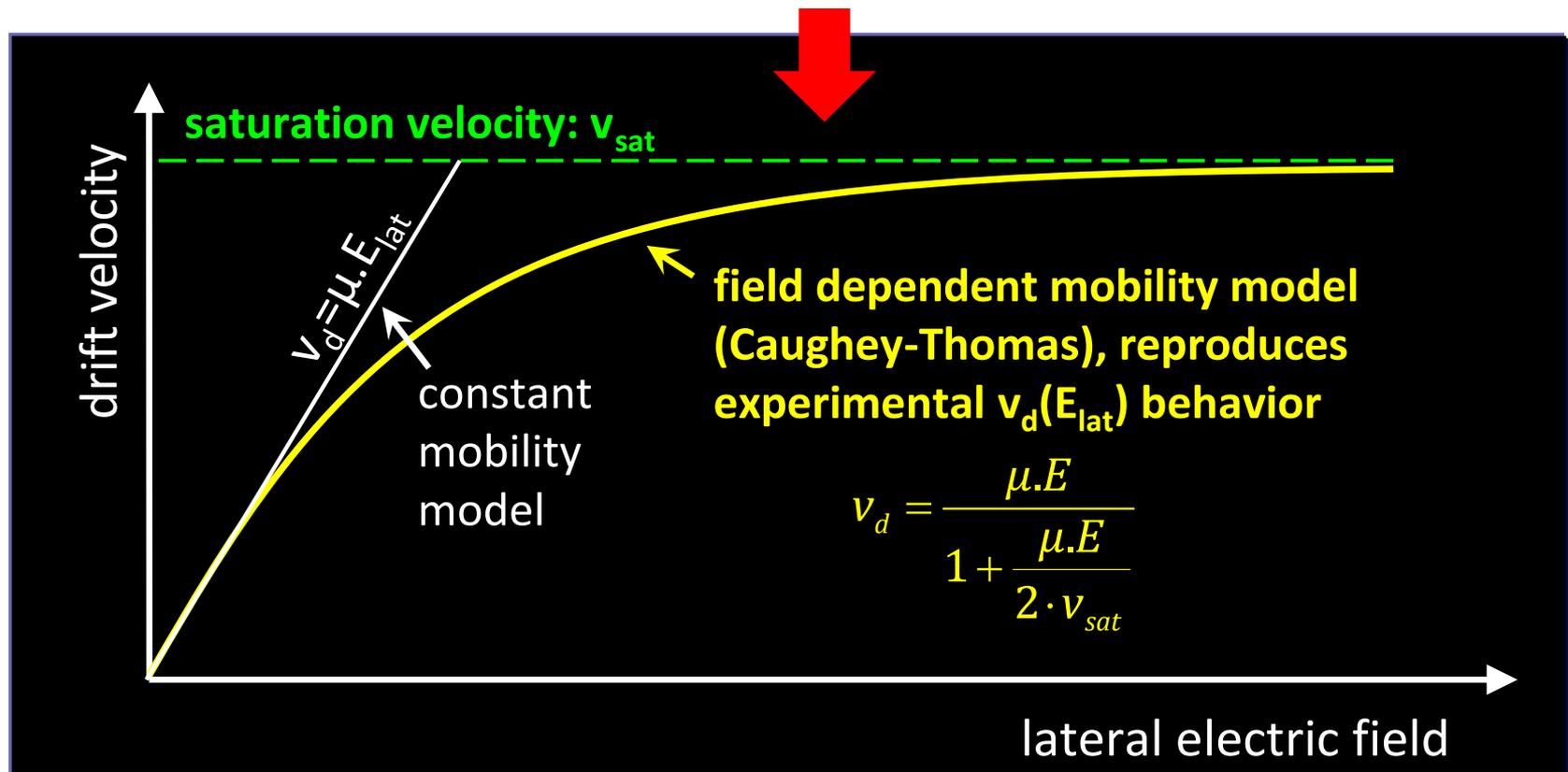
- Les signatures en champ et en température...

Type d'interaction	dépendance champ/dopage	dépendance T
Coulomb (μ_{cb}) [Jeon89, Sze81]	$1/N_I$	$T^{1-1.5}$
Rugosité de surface (μ_{sr})	ϵ_{eff}^{-1} (e) ϵ_{eff}^{-2} (h)	$T^{0.5}$
Phonons acoustiques (μ_{ph})	$\epsilon_{eff}^{-1/3}$	$T^{-3/2}$
Phonons optiques (μ_{opt})	$\epsilon_{eff}^{-1/b}, 3 \leq b \leq 6$	$T^{-a}, 1 \leq a \leq 3/2$
Défauts neutres (μ_N) [Kiréev75, Sclar56]	$1/N_N$	T^0

Possibilité d'identifier les mécanismes par leur signature en température ou en champ !



- **Le concept de vitesse de saturation (v_{sat})**
 - Collisions inélastiques \rightarrow déviation de la loi d'Ohm
 - **La vitesse sature à fort champ**



Courant de drain / Performances

Régime linéaire
($V_{ds} \ll V_{gs} - V_{th}$)
champ faible

Régime de saturation
($V_{ds} \gg V_{gs} - V_{th}$)
champ fort

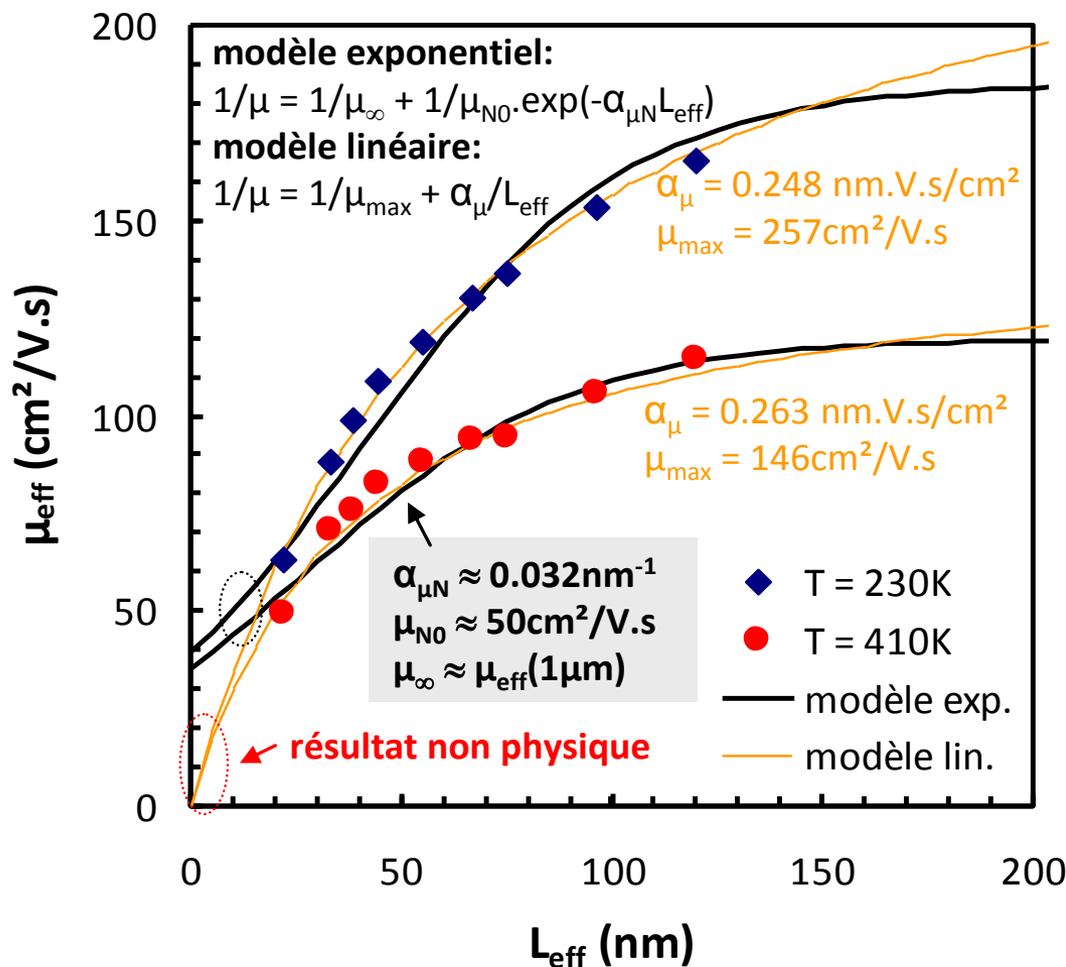
concept de mobilité

Incertitudes:

- validité de la mobilité
- ballisticité
- vitesse de saturation ?

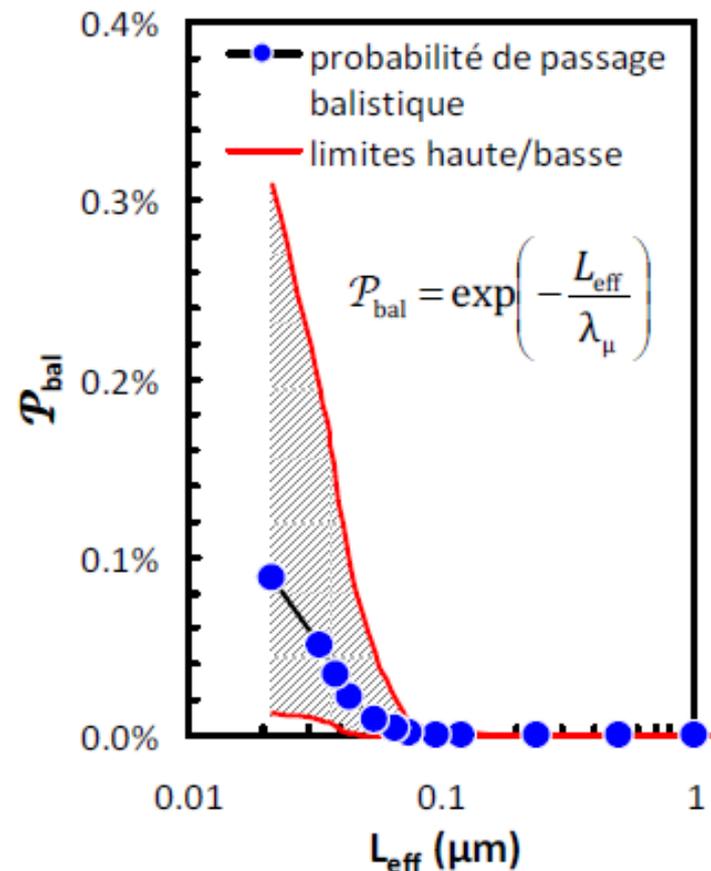
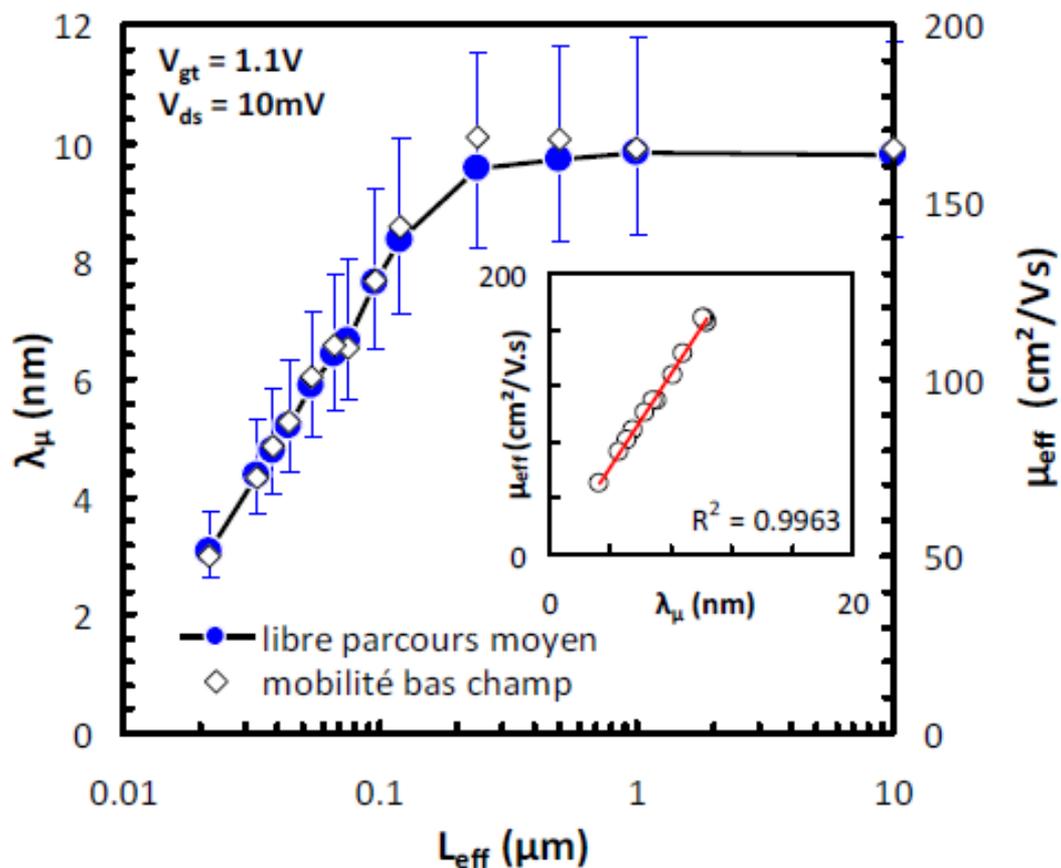
Les propriétés du régime linéaire sont-elles transposables au régime de saturation ?

- Une chute de mobilité prononcée sur les canaux courts



La chute de mobilité est bien modélisée par l'hypothèse de collisions avec des défauts neutres (profil exponentiel)

- La valeur du libre parcours moyen est contradictoire avec l'hypothèse de la quasi-balisticité !

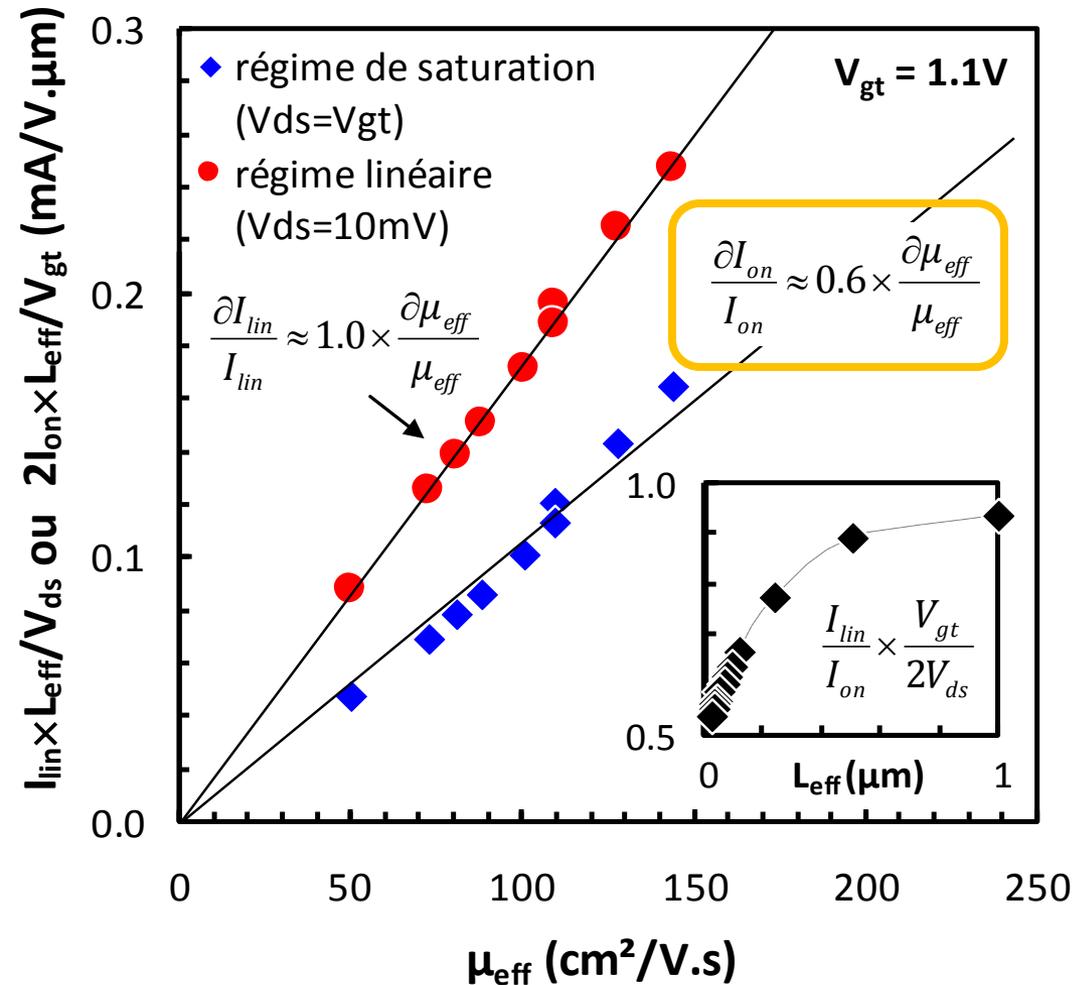


- Mise en évidence d'une saturation de vitesse

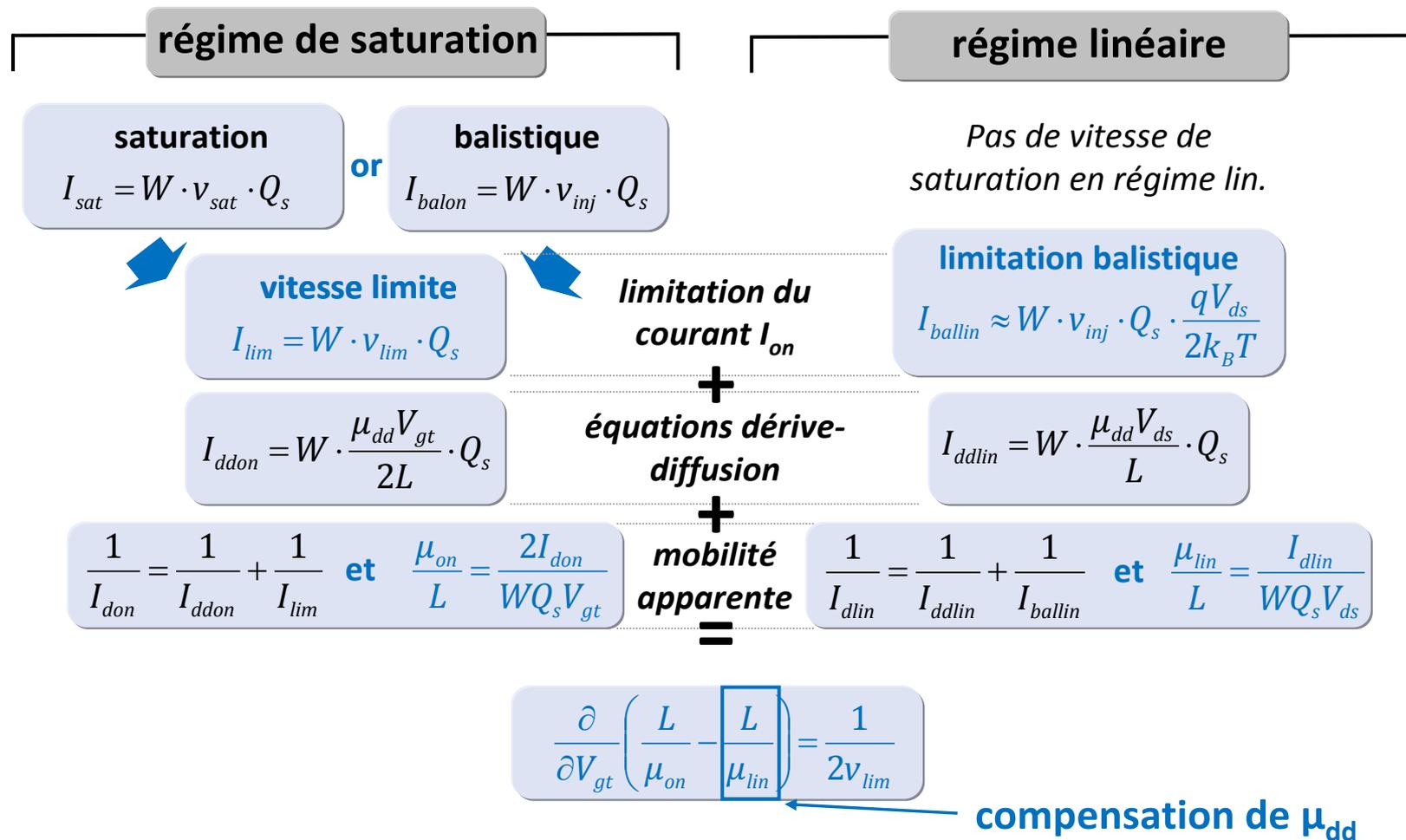
Le concept de mobilité perd sa validité à fort champ: la mobilité perd de l'influence sur le courant !

vitesse de saturation ou quasi-balisticité ?

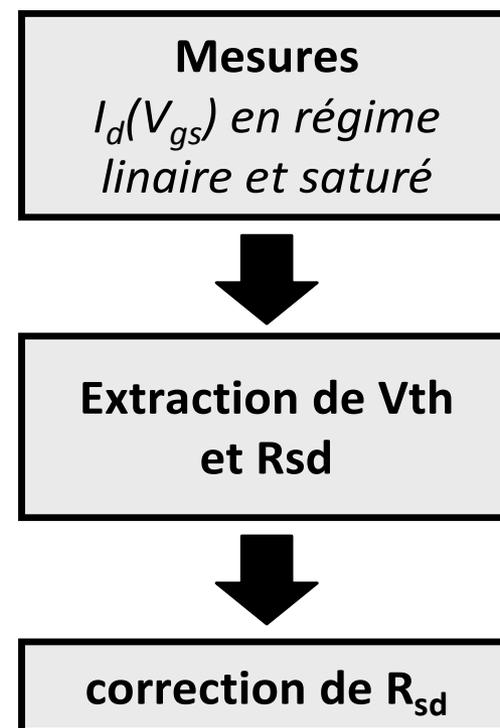
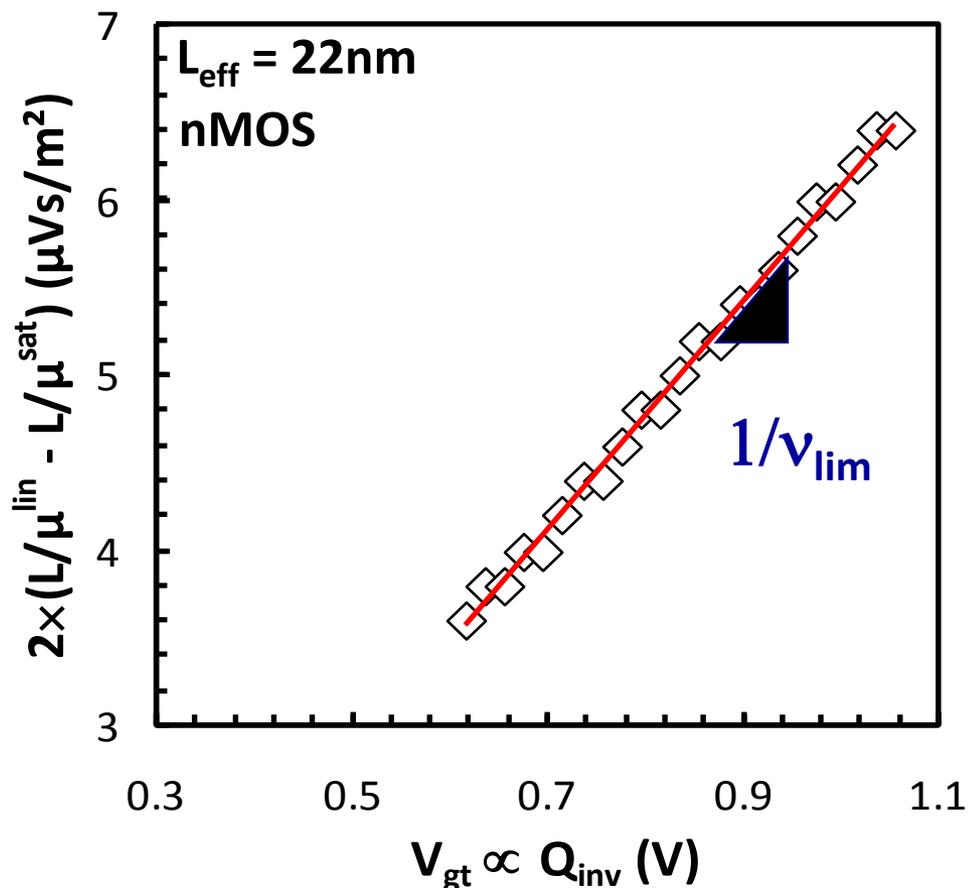
Besoin d'une nouvelle méthodologie



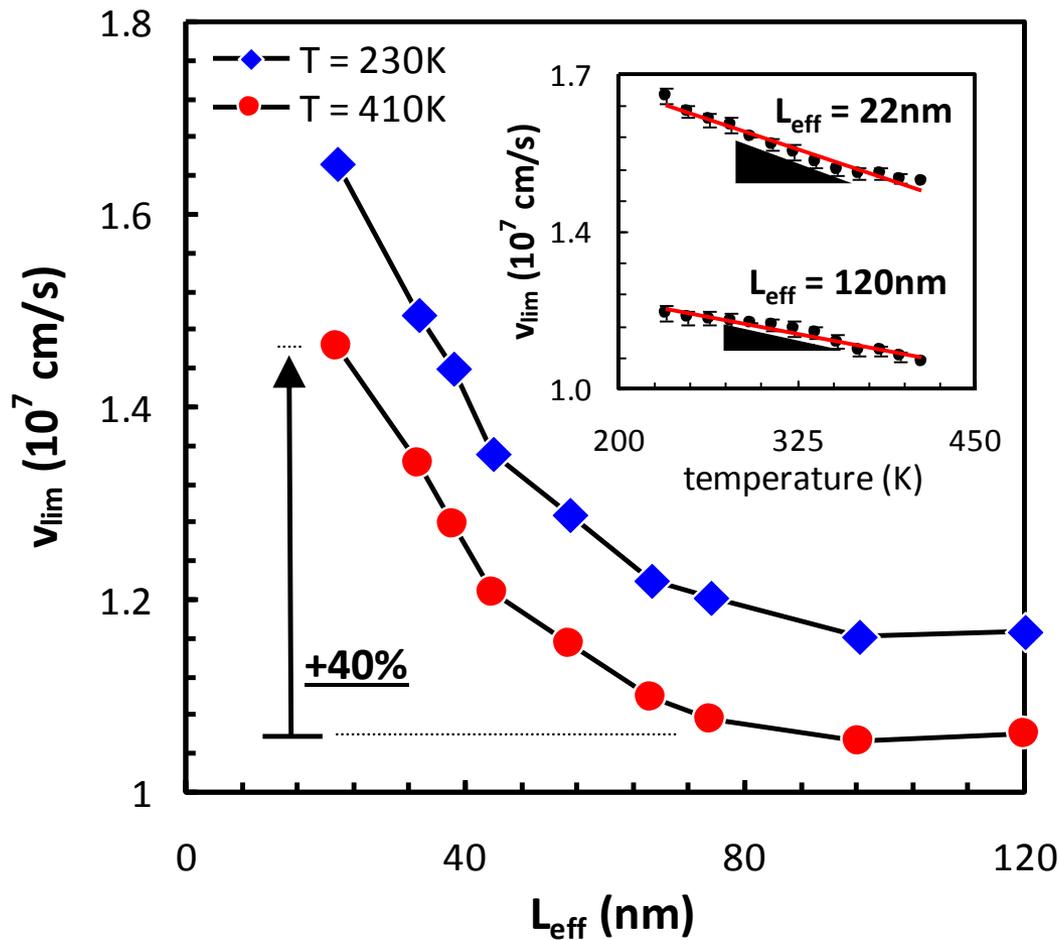
• Construction d'une nouvelle méthode d'extraction



- Un protocole d'extraction « simple »:

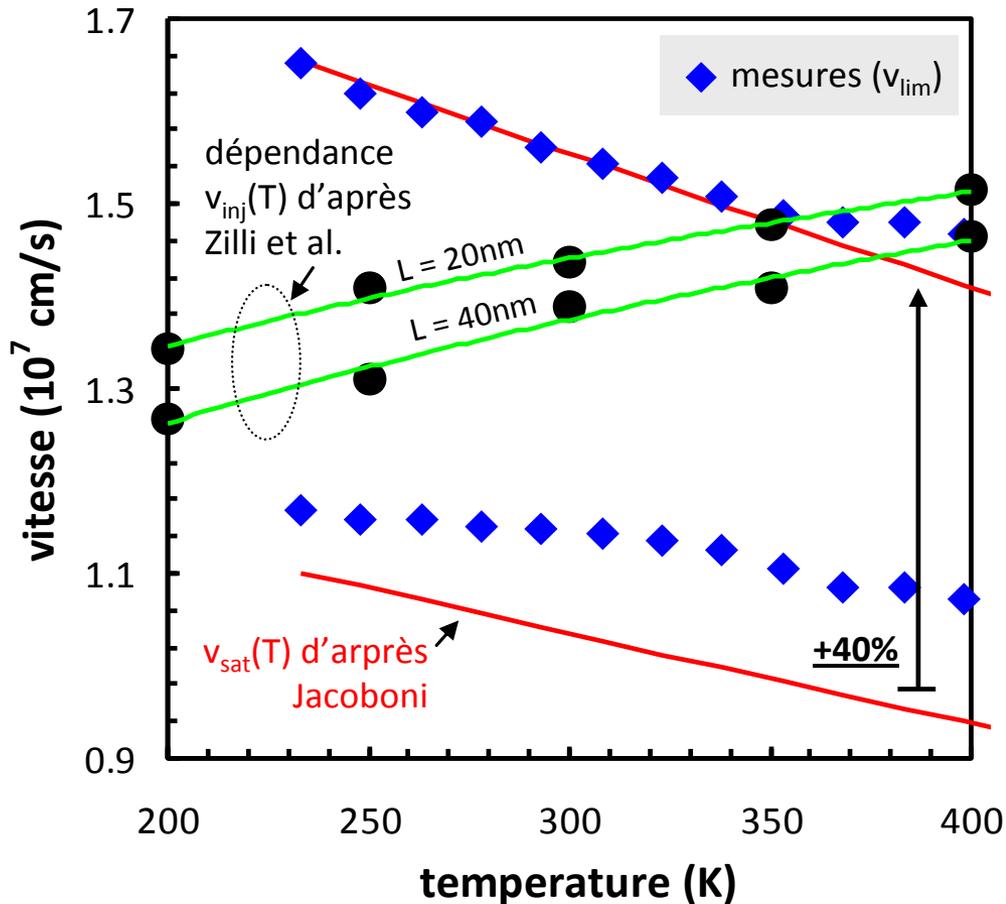


- Extraction de v_{lim} en fonction de L_{eff}



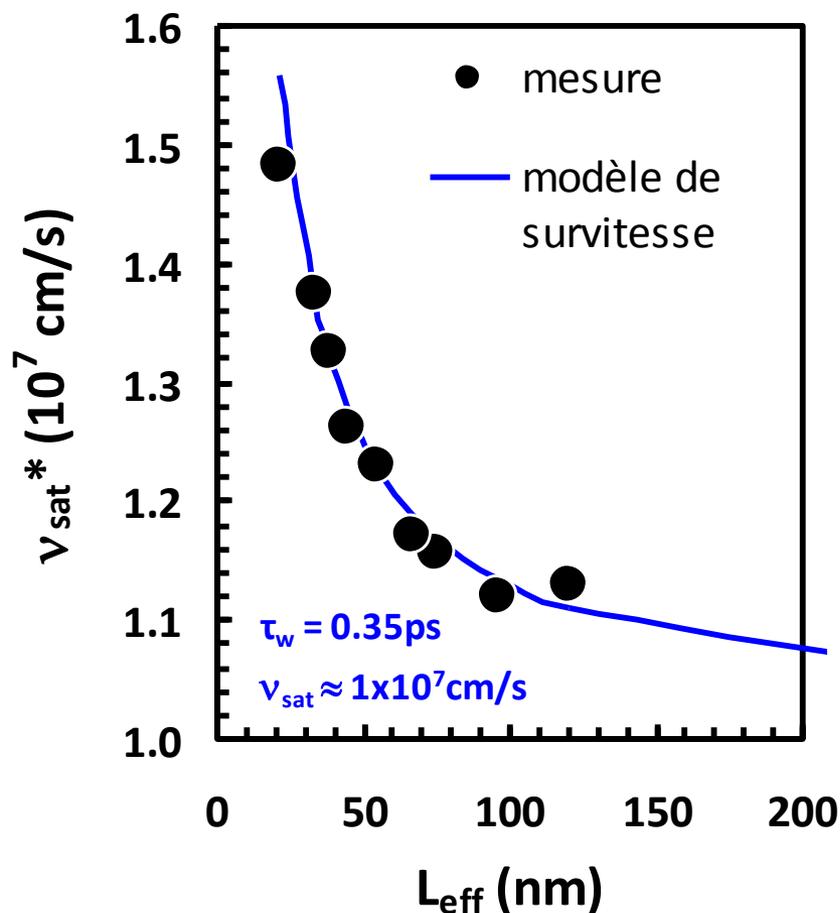
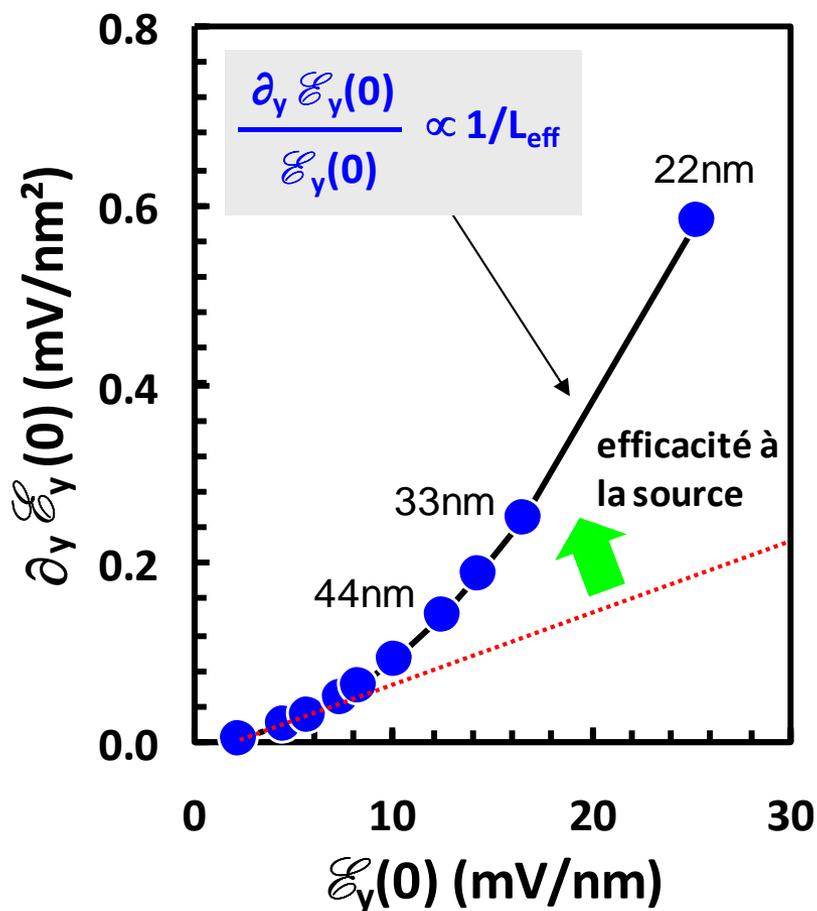
L'augmentation de 40% pourrait résulter des contraintes mécaniques

- Identification du mécanisme de transport grâce à la signature en température:

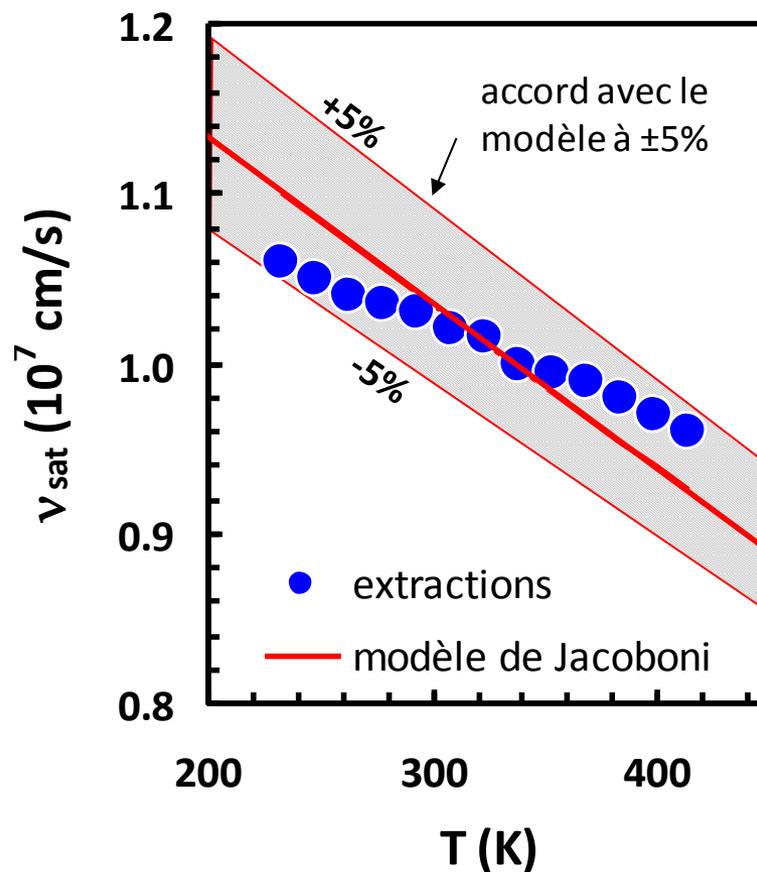
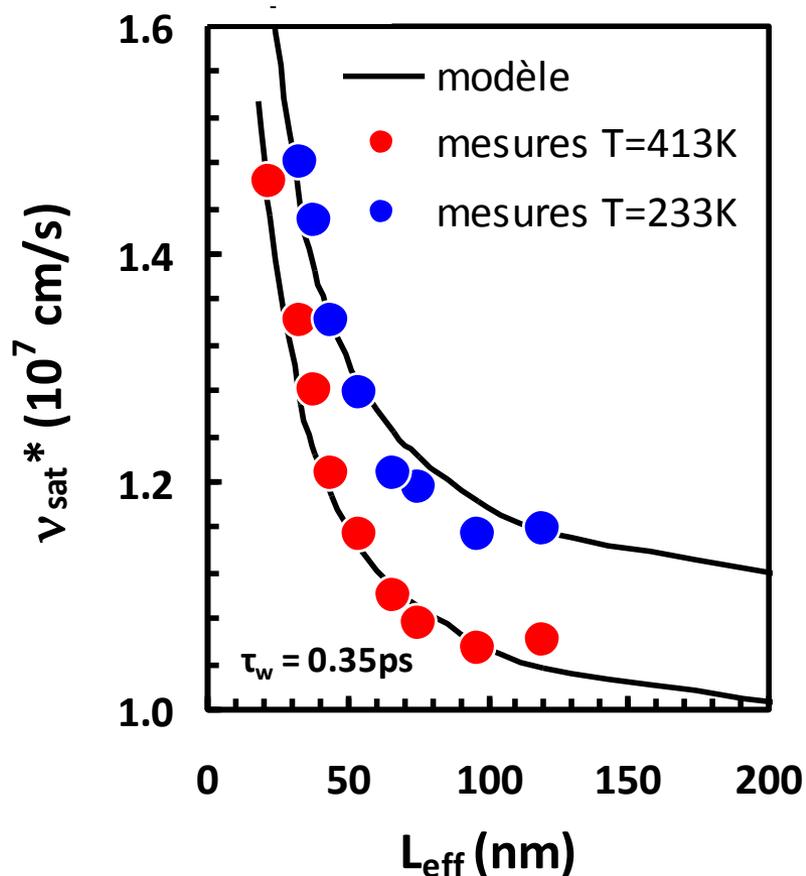


L'allure de v_{lim} semble résulter de multiples collisions dans le canal

Explication des résultats par la théorie de la survitesse



- La théorie de la survitesse permet d'expliquer le comportement de v_{lim} en température et en L_{eff} .



- Les nouveautés de la méthode
 - Utilisation du concept de mobilité apparente
 - Utilisation des régimes linéaires et de saturation simultanément
 - **Concept de vitesse limite v_{lim}**
- Les avantages de la nouvelle extraction
 - **La nature de v_{lim} n'est pas présupposée**
 - La mesure de μ_{dd}/L_{eff} n'est pas nécessaire
 - Mesures rapides (courants) permettant une bonne statistique

- Conclusion concernant le transport ...

**la limitation de vitesse semble résulter
d'un phénomène qui s'apparente à la
vitesse de saturation couplé avec un
phénomène de survitesse prononcé sur les
canaux courts**

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- **Conception de nouvelles méthodologies d'extraction**
 - Amélioration de l'extraction de la longueur effective de canal grâce à une meilleure compréhension des capacités parasites
 - Extraction des paramètres du courant (fonction ξ , extraction sous le seuil)
 - Extraction des résistances séries: méthode $R_{\text{tot}}(1/\beta)$
- **Mise en évidence expérimentale du rôle des mécanismes de collision dans les canaux courts**
- **Perspectives:**
 - Application de l'extraction v_{lim} sur d'autres technologies
 - Extraction de la résistance série sur une seule longueur
 - Trouver les leviers qui permettent une balisticité effective ?

Merci !



MERCI POUR VOTRE
ATTENTION !



Pot de thèse: Bâtiment IMEP
Salle Belledonne (1^{er} étage)
(accès par passerelle)



soutenance

La route du pot de thèse !