

# MODELISATION DU TRANSPORT QUASI-BALISTIQUE POUR LA SIMULATION DE CIRCUITS A BASE DE NANO-TRANSISTORS MULTIGRILLES



*Im2np*



**leti**

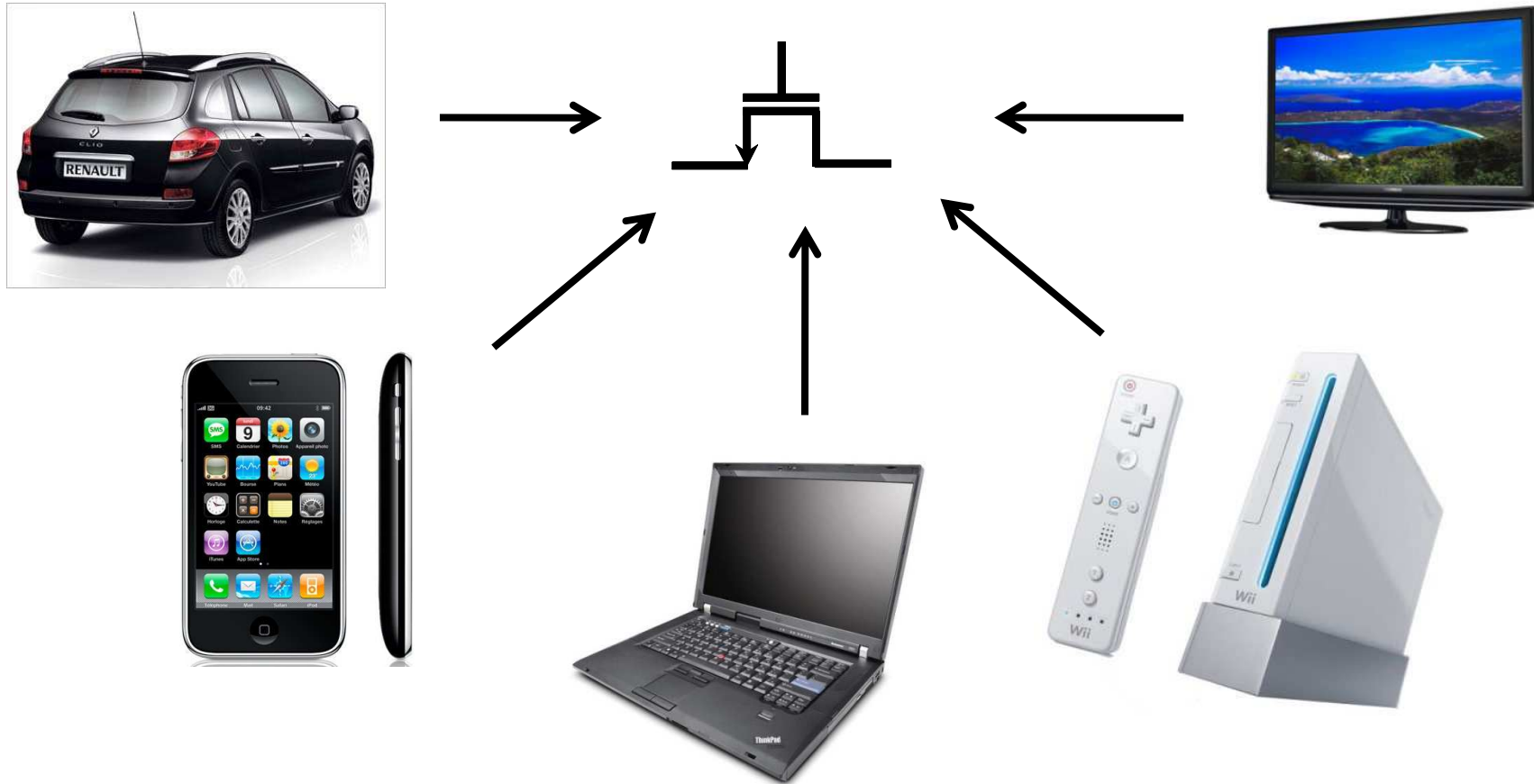


*Sébastien MARTINIE*

**Directeur de thèse : Jean-Luc AUTRAN**

**Co-encadrants : Daniela MUNTEANU et Gilles LE CARVAL**

## Le transistor : une révolution industrielle et culturelle ?!



**Introduction**

Modélisation semi-classique du transport  
 Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique  
 Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique  
 Conclusion

**Le transistor : une révolution industrielle et culturelle**

Du concept au transistor MOSFET  
 Le transistor d'un point de vue système

**1660:**  
 « Royal Society »

**1699:**  
 « l'académie des sciences »

XVII<sup>ème</sup>

XIX<sup>ème</sup>

XX<sup>ème</sup>



**1925: Bell Labs**



**1939: CNRS**



**1945: CEA**

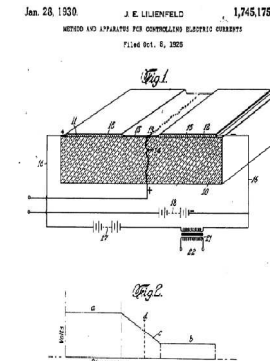


**1958: NASA**



**1967: LETI**

**Im2np 2008: IM2NP**



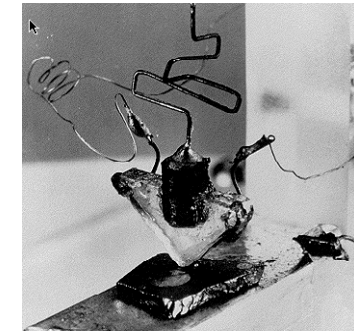
**1904:** Diode de J.A. Fleming



**1906:** Triode de L. De Forest

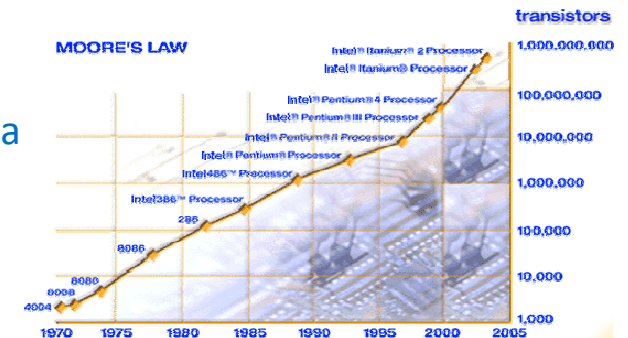
**1928:** Principe du FET de J. E. Lilienfeld

**1947:** Invention du transistor bipolaire par J. Bardeen, W. Brattain et W. Shockley.



**1958:** Circuits intégrés par J. Kilby.

**1965:** Enoncé de la loi de Moore



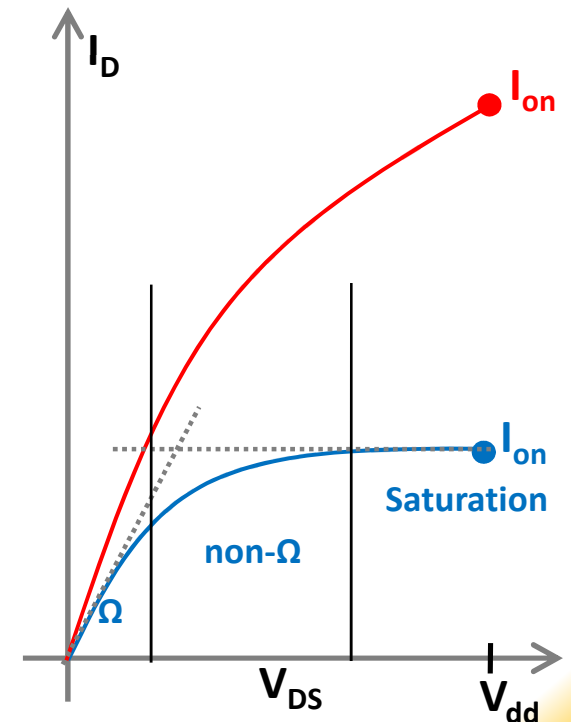
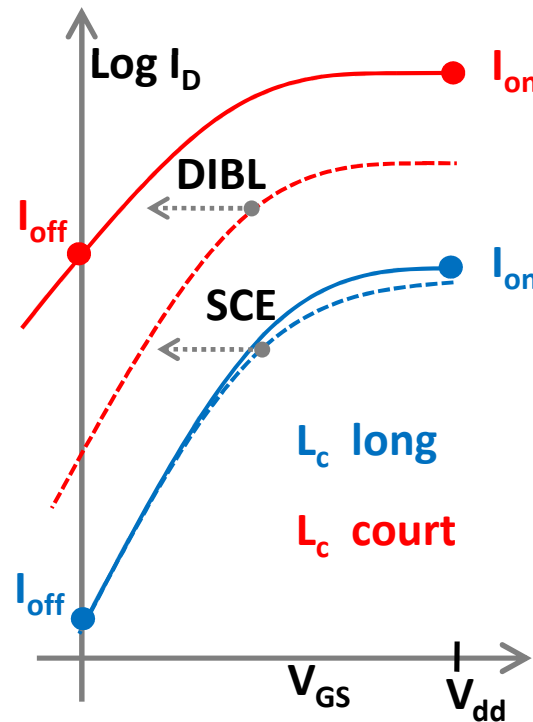
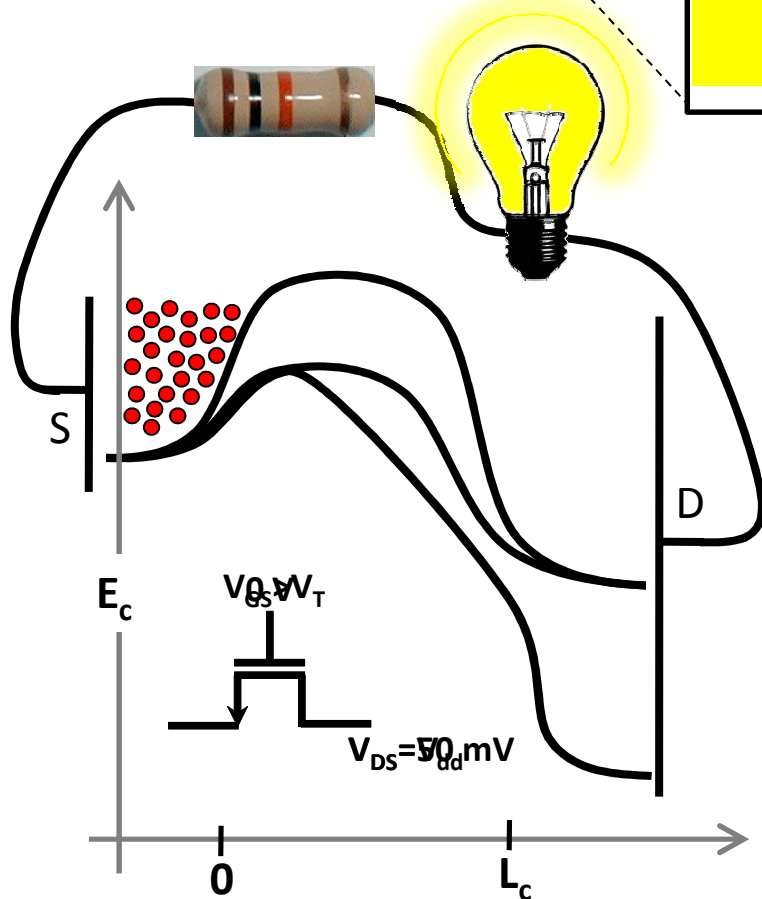
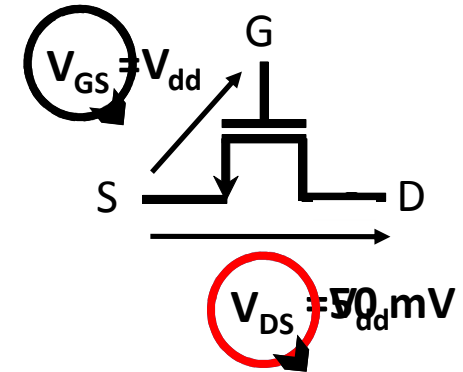
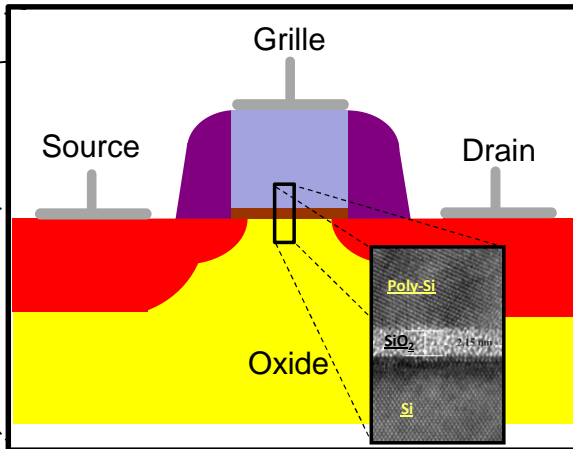
**Introduction**

Modélisation semi-classique du transport  
 Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique  
 Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique  
 Conclusion

Le transistor : une révolution industrielle et culturelle

**Du concept au transistor MOSFET**

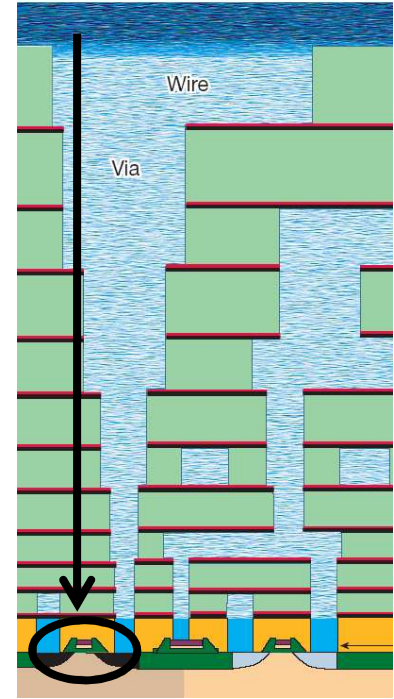
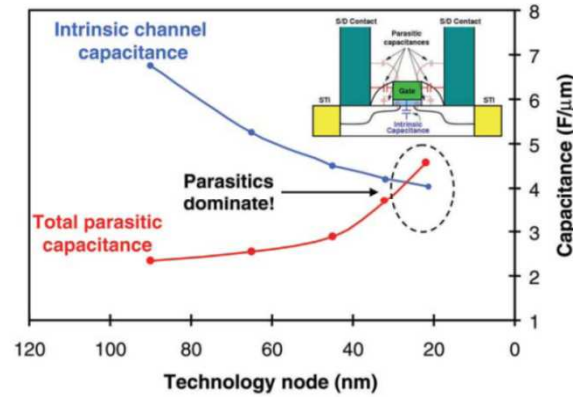
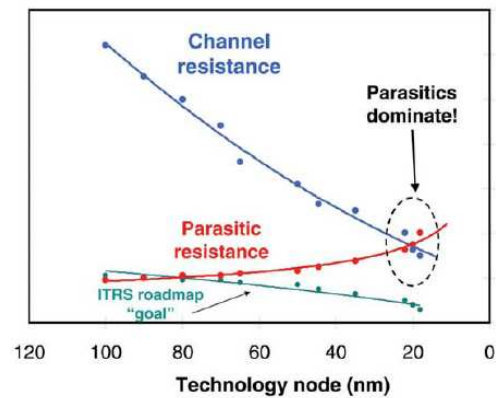
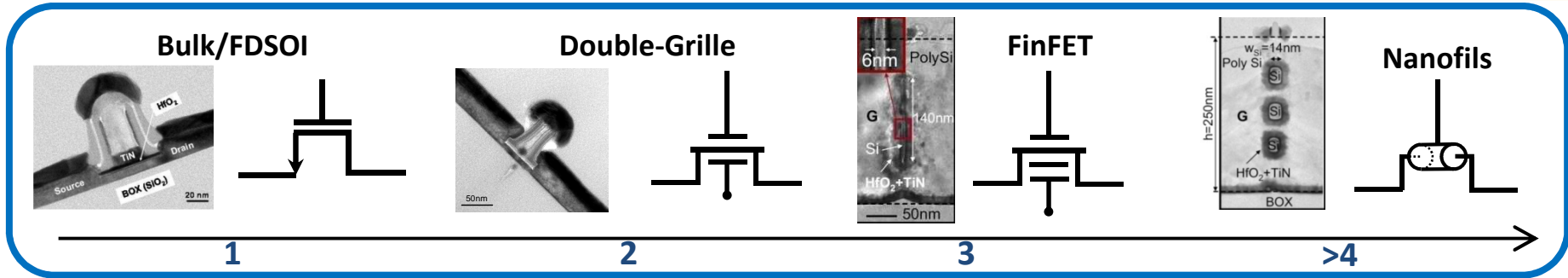
Le transistor d'un point de vue système



**Introduction**

Modélisation semi-classique du transport  
 Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique  
 Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique  
 Conclusion

Le transistor : une révolution industrielle et culturelle  
 Du concept au transistor MOSFET  
 Le transistor d'un point de vue système



**Modélisation**

$$\frac{\partial}{\partial t} f + \mathbf{v}_g \cdot \nabla_r f + \frac{\mathbf{F}}{\hbar} \cdot \nabla_k f = \left( \frac{\partial}{\partial t} f \right)_{coll}$$

$$R = \frac{L_{kT}}{\lambda + L_{kT}}$$

**Simulation au niveau dispositif**

**Simulation au niveau circuit**

**Quantifier/expliquer l'impact du transport (quasi-)ballistique du dispositif à l'élément de circuit**

# PLAN

## I) Introduction

- I.1) Le transistor : une révolution industrielle et culturelle
- I.2) Du concept au transistor MOSFET
- I.3) Le transistor d'un point de vue système

## II) Modélisation semi-classique du transport

- II.1) Vision simple du transport électronique
- II.2) Equation de Transport de Boltzmann semi-classique
- II.3) Formalisme de la méthode des moments
- II.4) Formalisme de la méthode des flux
- II.5) Coefficient de réflexion

## III) Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique

- III.1) Approche macroscopique du transport ballistique
- III.2) Mise en évidence du transport (quasi-)ballistique
- III.3) Impact du transport ballistique au niveau circuit
- III.4) Bilan avantages, résultats, limitations et perspectives

## IV) Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique

- IV.1) Méthodologie générale
- IV.2) Modélisation analytique de la tension de seuil du transistor Double-Grille
- IV.3) Modélisation analytique du coefficient de réflexion
- IV.4) Modélisation analytique du transistor Double-Grille (quasi-)ballistique
- IV.5) Du transistor Double-Grille au transistor nanofil
- IV.6) Bilan avantages, résultats, limitations et perspectives

## V) Conclusion

- V.1) Bilan général
- V.2) Perspectives

### Transport diffusif



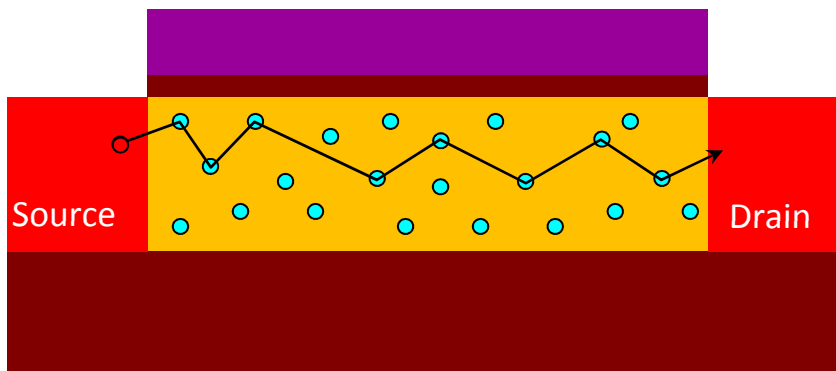
### Transport quasi-ballistique



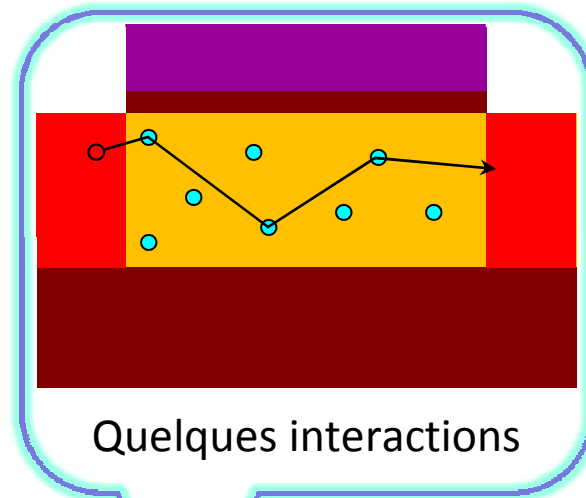
### Transport ballistique



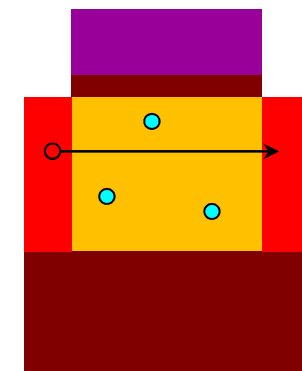
Vers des dimensions nanométriques



Beaucoup d'interactions



Quelques interactions

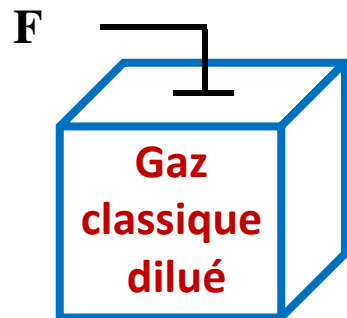


Pas d'interaction

● Impuretés      ● Electrons

**La principale difficulté est d'avoir une modélisation compacte unifiée qui relie le transport diffusif au transport ballistique.**





- Les collisions redistribuent l'énergie des porteurs.
- Collisions binaires, instantanées et localisées.
- Les trajectoires sont décrites par la mécanique classique.
- Les interactions sont décrites par la mécanique quantique.

La probabilité de trouver des électrons dans le volume de l'espace réel et de l'espace réciproque à un instant t est:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \cdot d\mathbf{r} \cdot d\mathbf{p}$$

$$n = \frac{1}{\Omega_{V_k}} \int f \cdot d^3k$$

$$\mathbf{v}_{moy} = \frac{1}{n \cdot \Omega_{V_k}} \int \mathbf{v}_g \cdot f \cdot d^3k$$

$$w = \frac{1}{n \cdot \Omega_{V_k}} \int \epsilon \cdot f \cdot d^3k$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n \cdot \Omega_{V_k}} \int \mathbf{v}_g \cdot \epsilon \cdot f \cdot d^3k$$

La différentielle totale de la fonction par rapport au temps [Kiréev]:

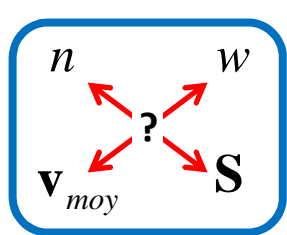
$$\frac{d}{dt} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \frac{\partial}{\partial t} f + \mathbf{v}_g \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f + \mathbf{F}_T \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f = 0$$

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{F}_{int} + \mathbf{F}$$

L'Equation de Transport de Boltzmann (ETB) semi-classique [Pottier] [Kiréev]:

$$\frac{\partial}{\partial t} f + \mathbf{v}_g \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f + \frac{\mathbf{F}}{\hbar} \cdot \nabla_{\mathbf{k}} f = \left( \frac{\partial}{\partial t} f \right)_{coll}$$





**Formalisme de la méthode des moments**

$$\int \text{ETB} \quad \int v_g \text{ETB} \quad \int \epsilon \text{ETB}$$

La fonction de distribution est décrite par une Maxwellienne déplacée

**Dérive-Diffusion (équation d'ordre 0 et 1)**

$$\begin{cases} q \cdot \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla_r \cdot \mathbf{J}_n = -q \cdot R_{net} \\ \mathbf{J}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla_r n + q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} D_n = \mu_n \cdot \frac{k_B \cdot T_L}{q} \\ \mu_n = \frac{q \cdot \tau_m}{m^*} \end{cases}$$

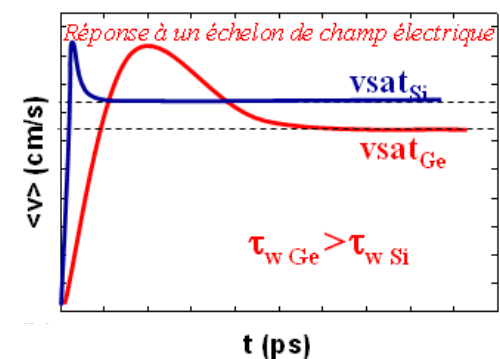
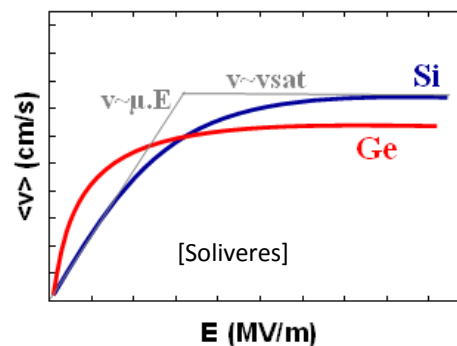
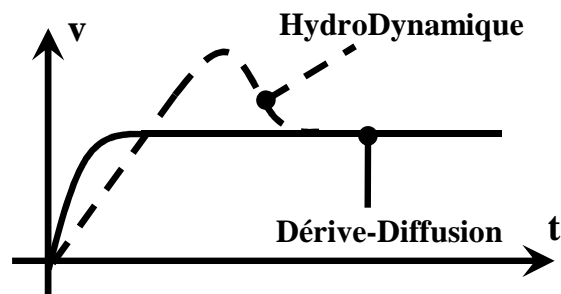
Relation de fermeture sur le moment ordre 2:  $w = \frac{3}{2} \cdot k_B T_L$  et  $T_n = T_L$

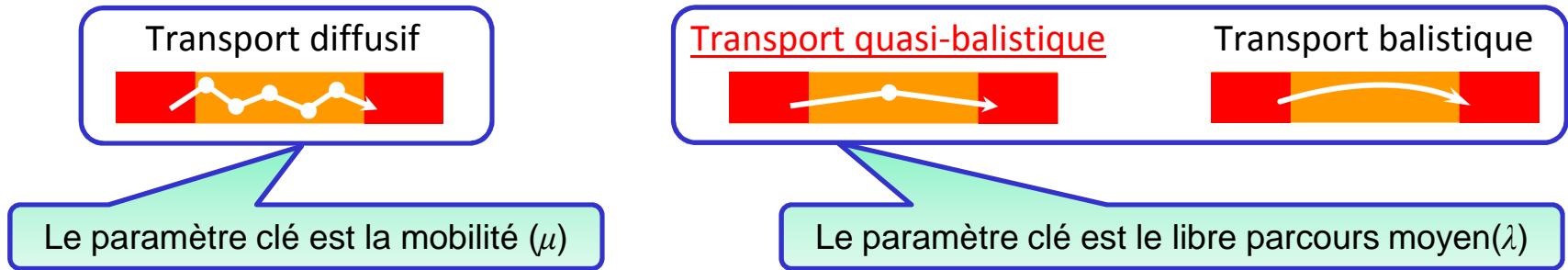
**Hydrodynamique (équation d'ordre 0, 1 et 2)**

$$\begin{cases} q \cdot \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla_r \cdot \mathbf{J}_n = -q \cdot R_{net} \\ \mathbf{J}_n = \mu_n \cdot k_B \left( \nabla_r (n \cdot T_n) + \frac{q}{k_B} \cdot \mathbf{E} \cdot n \right) - \tau_m \cdot \frac{d\mathbf{J}_n}{dt} \\ \frac{3 \cdot k_B}{2} \cdot \frac{\partial (n \cdot T_n)}{\partial t} + \nabla_r (n \cdot \mathbf{S}) - \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_n = -\frac{3 \cdot k_B}{2} \cdot \frac{n \cdot (T_n - T_L)}{\tau_\epsilon} \end{cases}$$

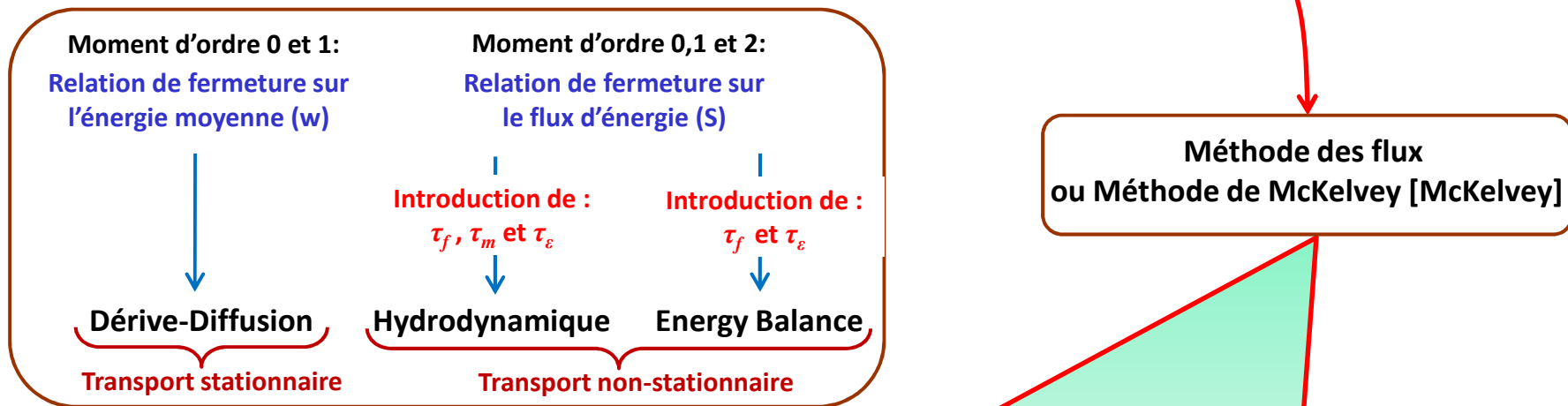
La relation de fermeture sur le moment d'ordre 3:  $n \cdot \mathbf{S} = -\frac{5 \cdot k_B \cdot T_n}{2 \cdot q} \cdot \mathbf{J}_n + n \cdot \mathbf{Q}$

Q est un terme empirique donné par la loi de Fourier

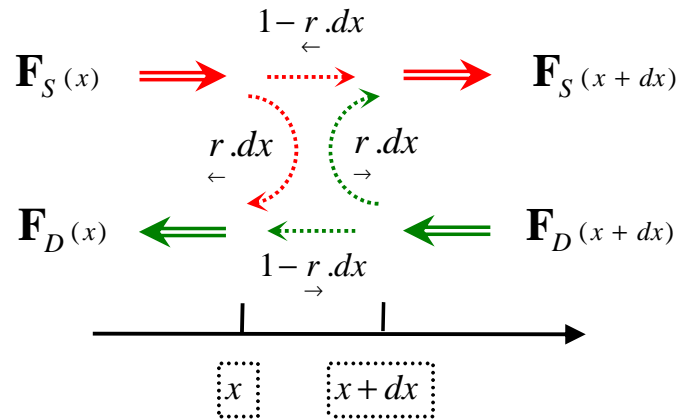




**Equation de Transport de Boltzmann**



“the flux method [...] applicable [...] physical thickness [...] order [...] scattering- [...] -free-path lengths”.  
 McKelvey et al.  
**Notre modèle est basé sur ce formalisme !!!**



**Hypothèses:**

- Semiconducteur non dégénéré.
- **Champ électrique non-constant.**
- Aucune génération/recombinaison.

**Relation sur les flux:**

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{F}_D(x)}{dx} = r \cdot \mathbf{F}_D(x) - r \cdot \mathbf{F}_S(x) \\ \frac{d\mathbf{F}_S(x)}{dx} = r \cdot \mathbf{F}_D(x) - r \cdot \mathbf{F}_S(x) \end{cases}$$

**Solution générale [Pulver]:**

$$R(x) = 1 - \frac{1}{1 + \left( \int_0^x r \cdot e^{-\int_0^{x'} (r-r) \cdot dx'} \cdot dx \right) \cdot e^{\int_0^x (r-r) \cdot dx}}$$

**Solution analytique [McKelvey] pour un champ électrique constant :**

$$R = \frac{r}{\sqrt{r^2 - r \cdot r} \cdot \coth\left(x \cdot \sqrt{r^2 - r \cdot r}\right) + r} \quad \text{avec} \quad r = \frac{r + r}{2}$$

**L'ETB en régime permanent (unidimensionnel) [Rhew]:**

$$v_x \cdot \frac{\partial f}{\partial x} - q \cdot E \cdot \frac{\partial f}{\partial p_x} = \left( \frac{\partial}{\partial t} f \right)_{coll} \quad (I)$$

$$\frac{\partial \langle v_x \rangle}{\partial x} - q \cdot E \cdot \frac{\partial}{\partial p_x} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{F}_D}{\partial x} - q \cdot E \cdot \langle v_{th} \cdot f \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \rangle$$

Par analogie :

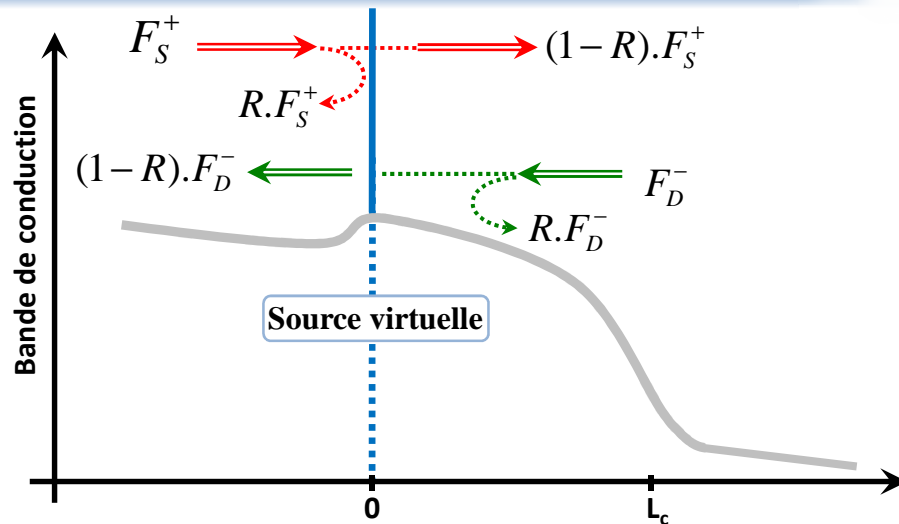
$$\frac{d\mathbf{F}_D(x)}{dx} - (r - r) \cdot \mathbf{F}_D(x) = -r \cdot \mathbf{F}_t(x)$$

$$\Rightarrow \frac{d\mathbf{F}_D(x)}{dx} + \frac{q \cdot E_x}{k_B \cdot T_L} \cdot \mathbf{F}_D(x) = \frac{\mathbf{F}_t(x)}{\lambda}$$

La fonction de distribution est une maxwellienne déplacée donc:  $\frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{k_B \cdot T_L}$

Pour un nMOS:  $r = \lambda^{-1}$  et  $r = \lambda^{-1} - \frac{q \cdot E_x}{k_B \cdot T_L}$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} f \right)_{coll} \Big|_{v_-} = -\frac{n}{\tau} = -\frac{\mathbf{F}_t(x)}{\lambda} \quad \text{avec} \quad \lambda = v_x \cdot \tau$$



Les expressions de la charge d'inversion et du courant sont:

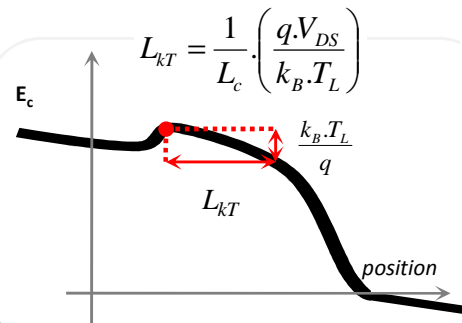
$$Q_{inv} = \frac{q}{v_{th}} \cdot (F_S^- + F_S^+) \quad \text{et} \quad I_D = q \cdot W \cdot (F_S^+ - F_S^-)$$

En introduisant la notion de coefficient de réflexion:

$$I_D = W \cdot Q_{inv} \cdot v_{th} \cdot \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \cdot \left( \frac{1 - \frac{F_D^-}{F_S^+}}{1 + \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \cdot \frac{F_D^-}{F_S^+}} \right)$$

Pour un champ constant ( $E=V_{DS}/L_c$ ) [McKelvey] [Martinie]:

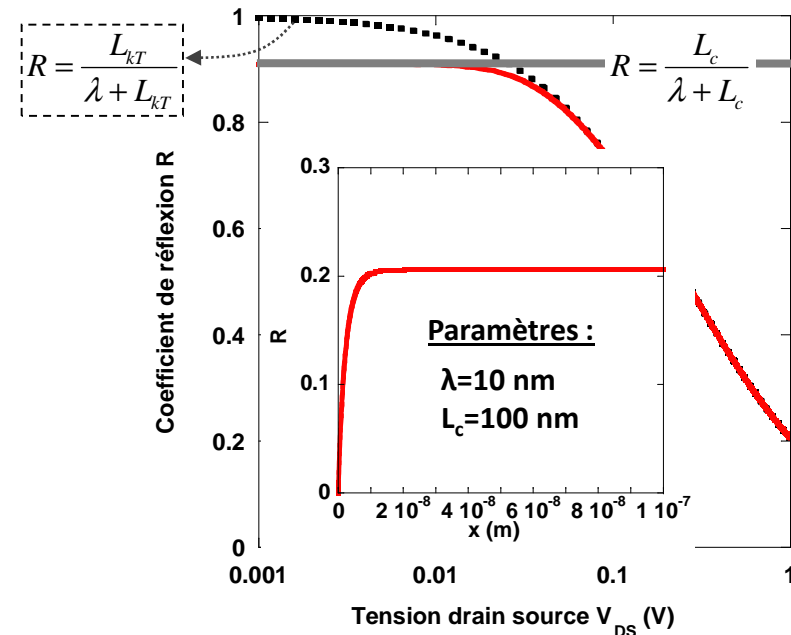
$$R = R = \frac{\lambda^{-1}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \left( \frac{q \cdot V_{DS}}{k_B \cdot T_L} \right) \cdot \left( 1 + \coth \left( \frac{x}{2} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \frac{q \cdot V_{DS}}{k_B \cdot T_L} \right) \right) + \lambda^{-1}}$$



En introduisant la notion de « kT-Layer » [Lundstrom]:

$$E \ll \quad R = \frac{L_c}{\lambda + L_c}$$

$$E \gg \quad R = \frac{L_{kT}}{\lambda + L_{kT}}$$



# PLAN

## I) Introduction

- I.1) Le transistor : une révolution industrielle et culturelle
- I.2) Du concept au transistor MOSFET
- I.3) Le transistor d'un point de vue système

## II) Modélisation semi-classique du transport

- II.1) Vision simple du transport électronique
- II.2) Equation de Transport de Boltzmann semi-classique
- II.3) Formalisme de la méthode des moments
- II.4) Formalisme de la méthode des flux
- II.5) Coefficient de réflexion

## III) Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique

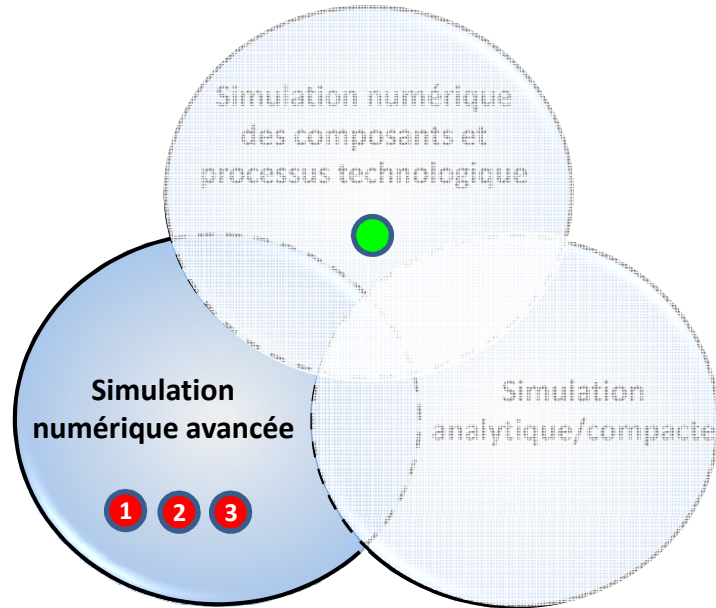
- III.1) Approche macroscopique du transport ballistique
- III.2) Mise en évidence du transport (quasi-)ballistique
- III.3) Impact du transport ballistique au niveau circuit
- III.4) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

## IV) Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique

- IV.1) Méthodologie générale
- IV.2) Modélisation analytique de la tension de seuil du transistor Double-Grille
- IV.3) Modélisation analytique du coefficient de réflexion
- IV.4) Modélisation analytique du transistor Double-Grille (quasi-)ballistique
- IV.5) Du transistor Double-Grille au transistor nanofil
- IV.6) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

## V) Conclusion

- V.1) Bilan général
- V.2) Perspectives



Position du problème:  
Simuler du transport (quasi-)ballistique numériquement du dispositif au circuit.

Solution:  
Modifier la loi de mobilité (C-Interpreter) en intégrant la notion de mobilité quasi-ballistique

1

Approche transport quantique :

- Formalisme des fonctions de Green [Delerue].
- Résolution de type Monte Carlo [Saint-Martin].
- Equation de Transport de Wigner [Querlioz].
- Monte Carlo avec correction quantique [Jaud].

2

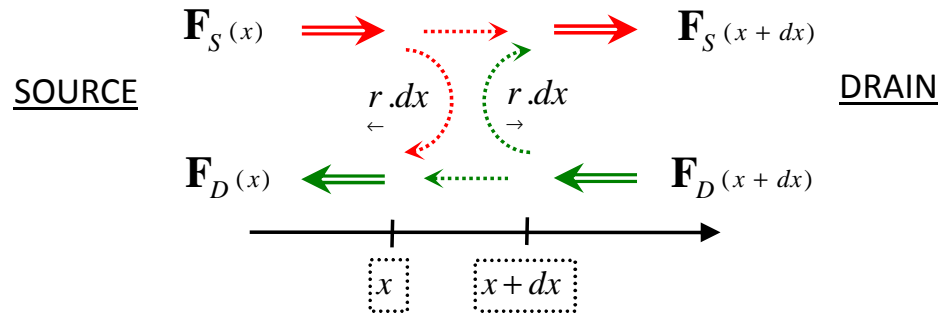
Approche particulière :

3

Approche de Natori pour la simulation du transport quantique [Munteanu]

**Ces approches:**

- sont très physiques.
- sont complémentaires pour l'étude du transport.
- sont très gourmandes en temps de calcul.
- ne peuvent pas être utilisées pour adresser la simulation d'éléments de circuit.



$$(1) \frac{d\mathbf{F}_D(x)}{dx} = r_{\rightarrow} \cdot \mathbf{F}_D(x) - r_{\leftarrow} \cdot \mathbf{F}_S(x)$$

$$(2) \frac{d\mathbf{F}_S(x)}{dx} = r_{\rightarrow} \cdot \mathbf{F}_D(x) - r_{\leftarrow} \cdot \mathbf{F}_S(x)$$

En ajoutant and soustrayant les équations (1-2):

Par analogie avec le modèle Dérive-Diffusion :

$$\mathbf{J}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla_r n + q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \mathbf{E}$$

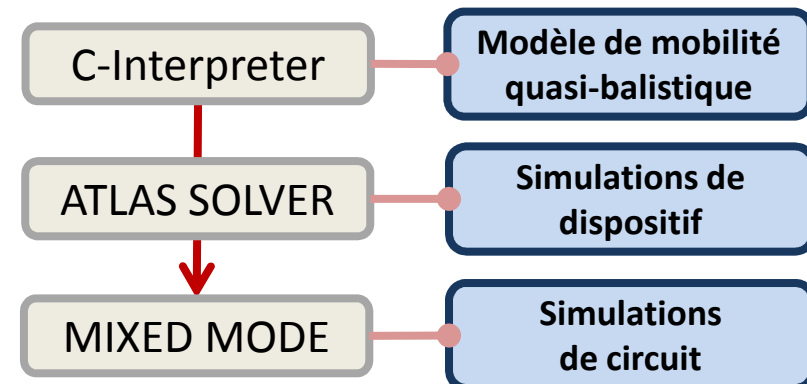
$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F}_t = \left( \begin{array}{cc} r_{\leftarrow} & r_{\rightarrow} \\ r_{\rightarrow} & r_{\leftarrow} \end{array} \right) \cdot v_{th} \cdot n + \frac{v_{th}}{r_{\rightarrow} r_{\leftarrow}} \cdot \frac{dn}{dx} \\ \frac{d\mathbf{F}_t}{dx} = \frac{d(\mathbf{F}_D - \mathbf{F}_S)}{dx} = 0 \end{array} \right.$$

Pour un transistor nMOSFET [Rhew] [Pulver] :

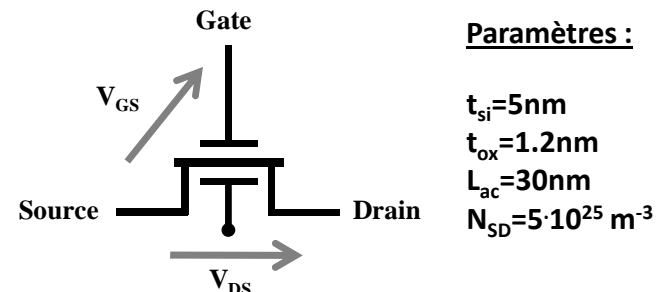
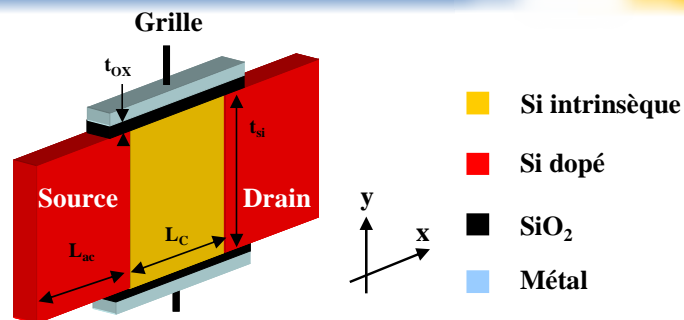
$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k \cdot T}{q} \Rightarrow \mu_{qb} = \frac{v_{th}}{2 \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{k_b \cdot T_L}{q} + |E(x)|}$$

Avec :  $r_{\leftarrow} = \lambda^{-1}$  ;  $r_{\rightarrow} = \lambda^{-1} - \frac{q \cdot E(x)}{k \cdot T}$

**Algorithme d'implémentation [Martinie]:**

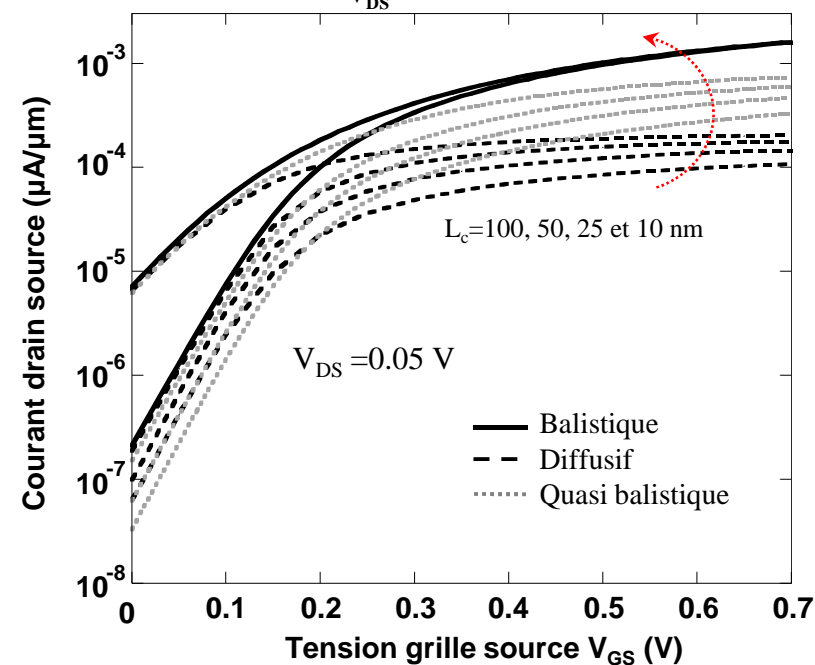
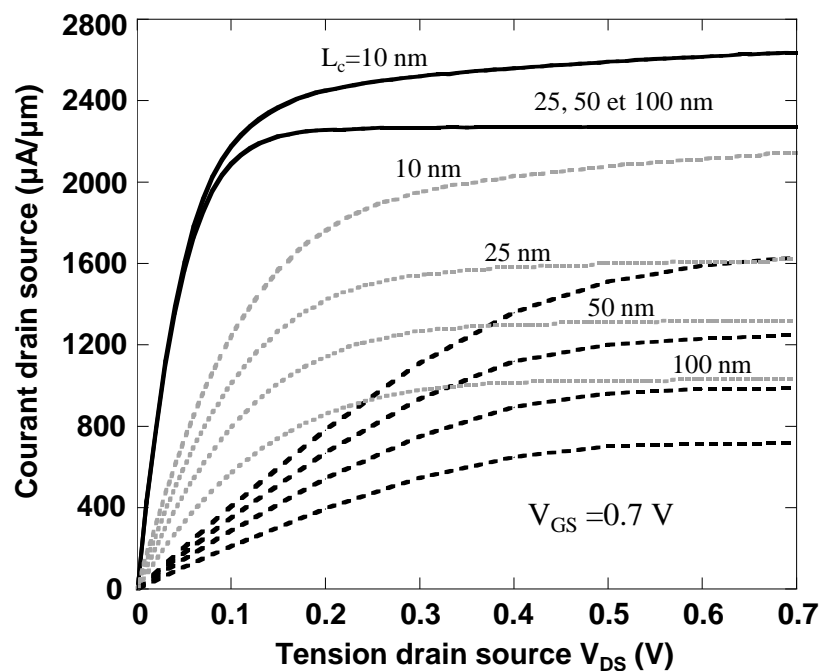




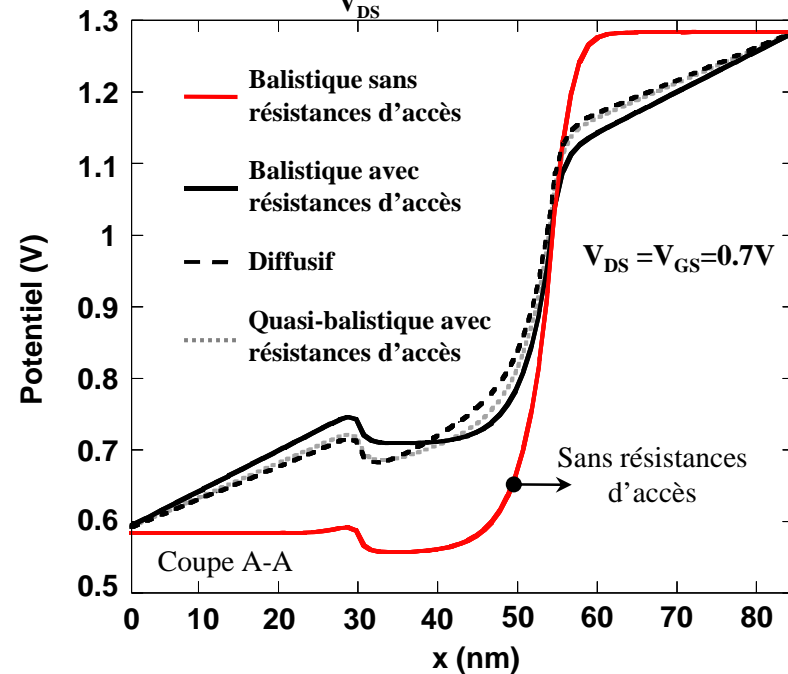
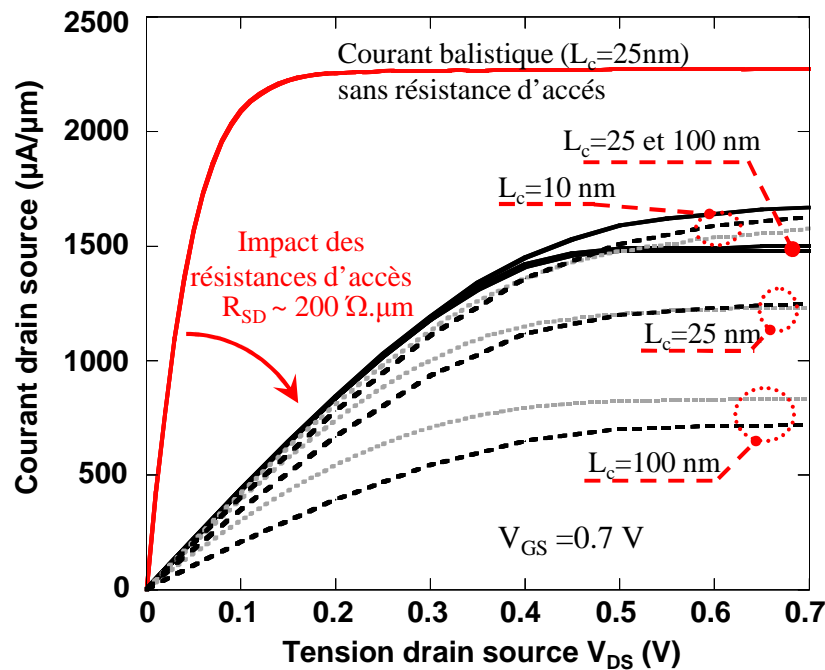
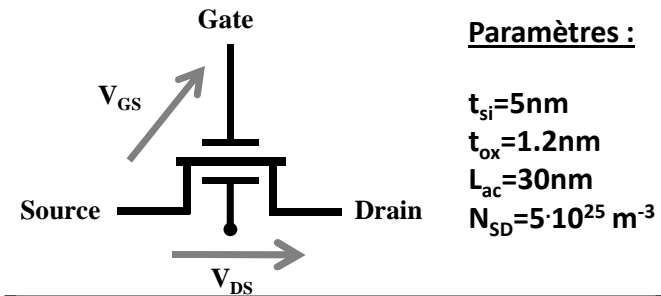
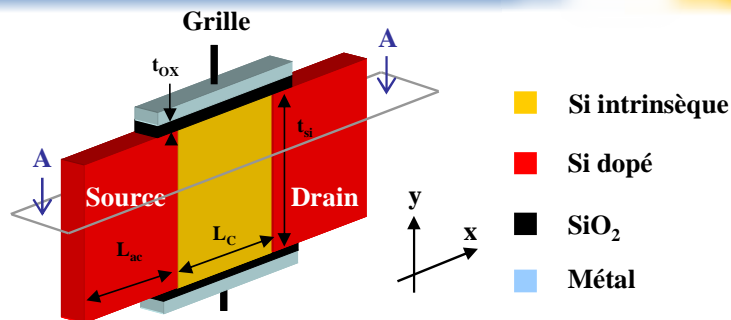


**Paramètres :**

t<sub>si</sub>=5nm  
 t<sub>ox</sub>=1.2nm  
 L<sub>ac</sub>=30nm  
 N<sub>SD</sub>=5·10<sup>25</sup> m<sup>-3</sup>

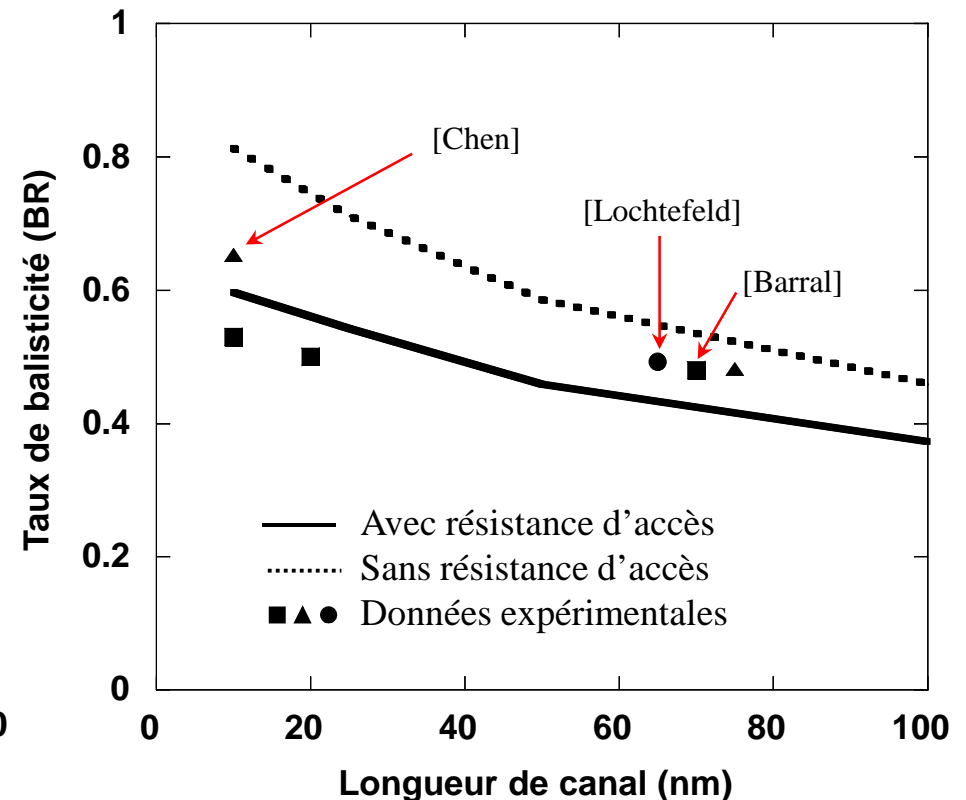
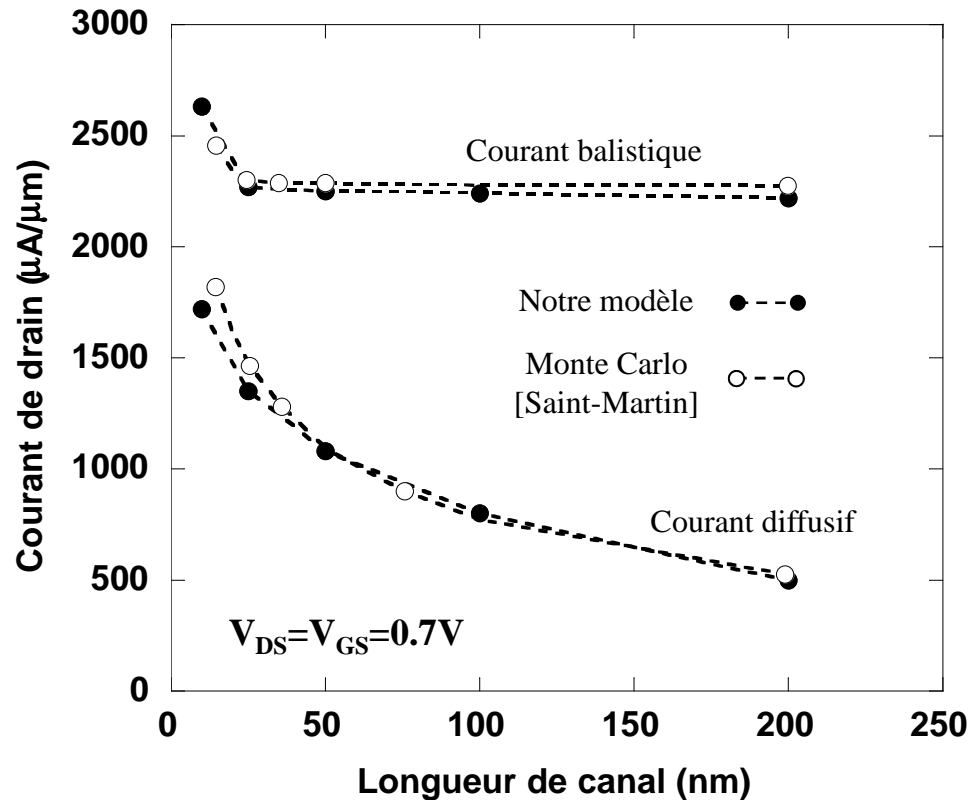


**Le courant balistique n'évolue pas en fonction de la longueur de canal  
 sauf en présence d'effets canaux courts [Natori] [Lundstrom]**



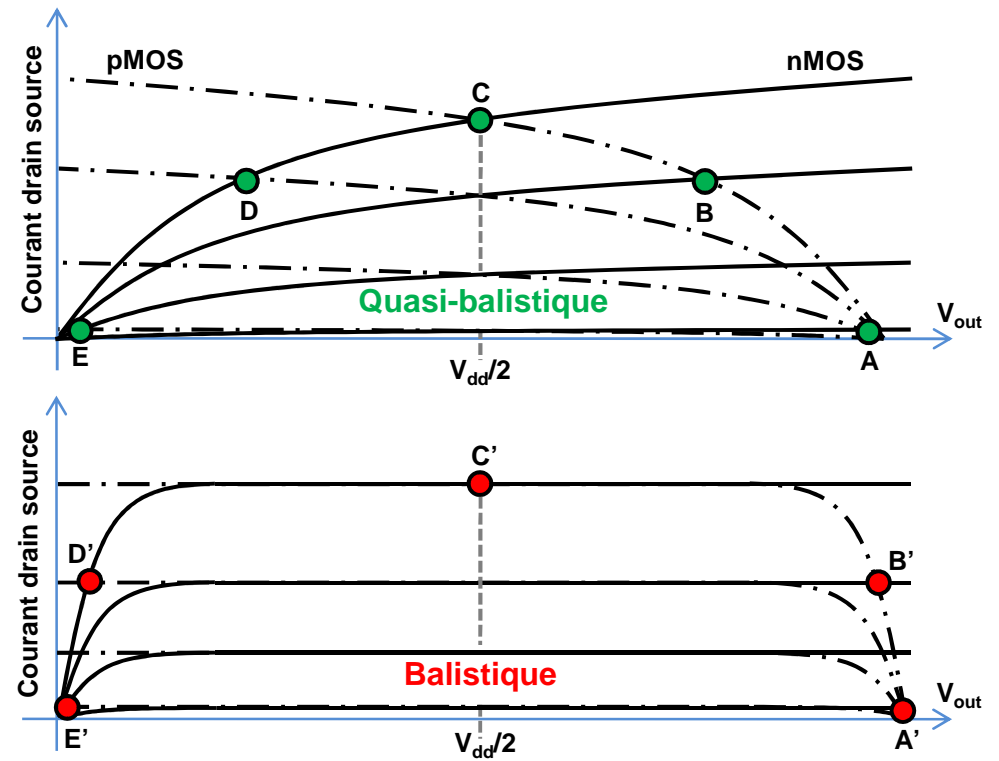
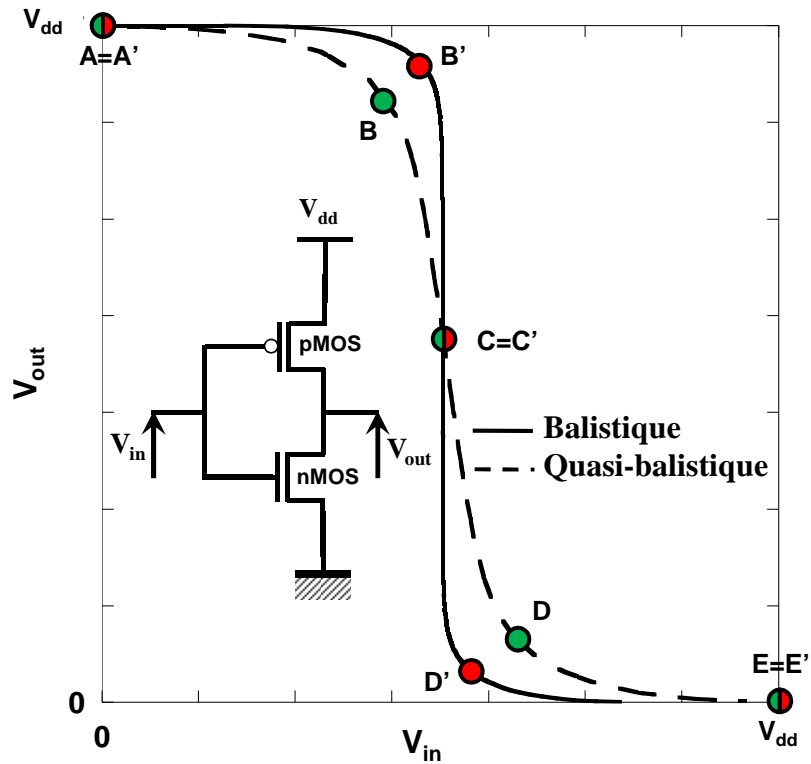
-Les résistances d'accès ont un impact important sur le courant.

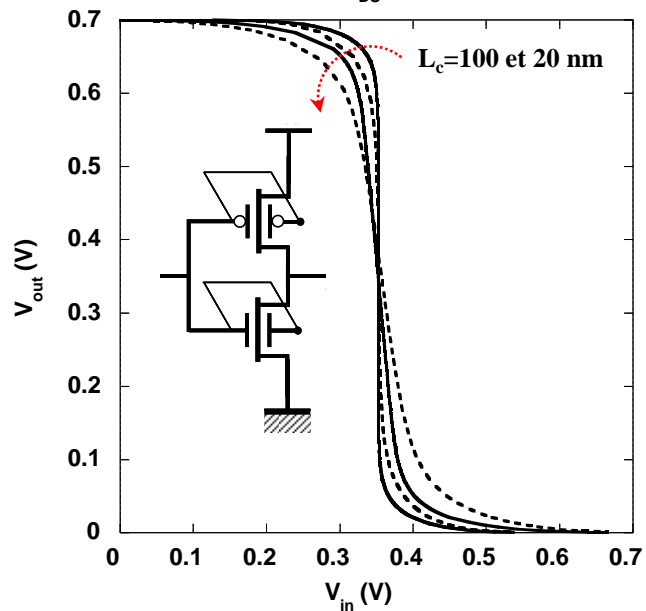
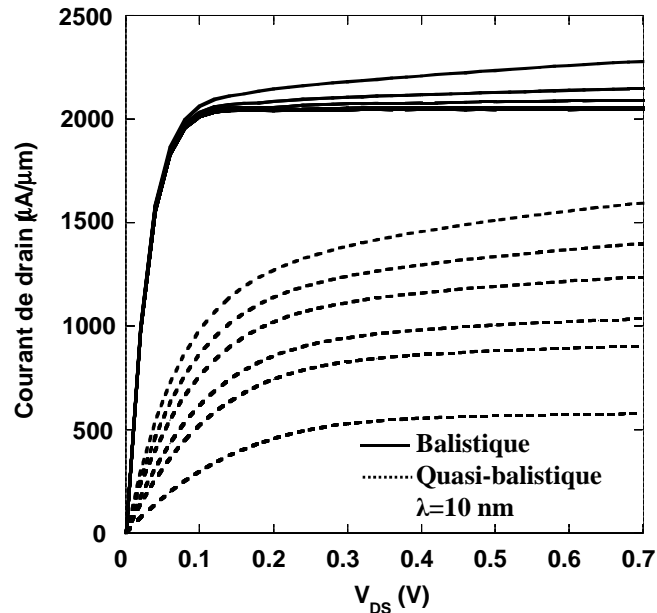
- En considérant les résistances d'accès, il est difficile de distinguer clairement le type de transport pour de petites longueurs de canal (ici  $L_c=10 \text{ nm}$ ).



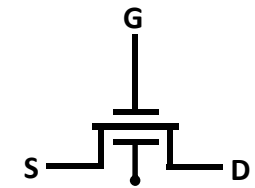
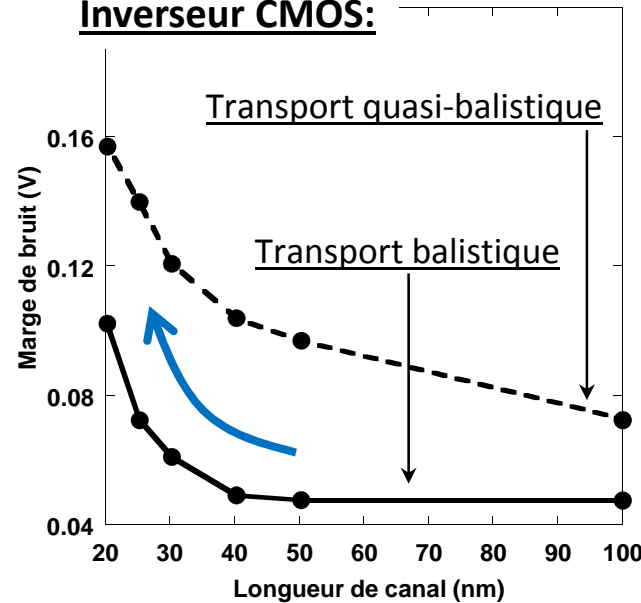
- Notre approche est une description macroscopique du transport (quasi-)balistique.
- Ces simulations ont un temps de calcul similaire au cas Dérive-Diffusion.
- Un travail plus amont portant sur l'analyse de la vitesse des électrons le long du canal entre notre modèle et la simulation Monte Carlo pourrait être abordé.

### Inverseur CMOS:





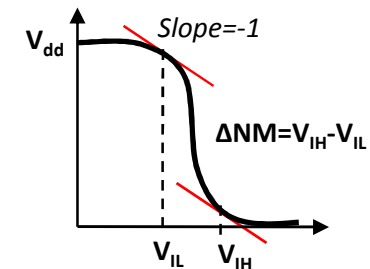
**Inverseur CMOS:**



**Paramètres :**

$t_{si}=10$  nm  
 $t_{ox}=1.2$  nm

**Marge de bruit (NM) :**

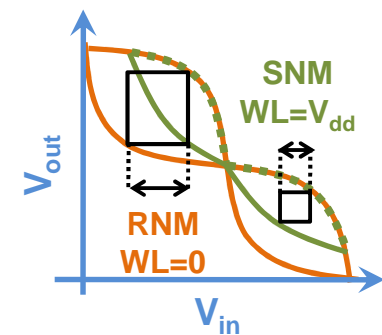
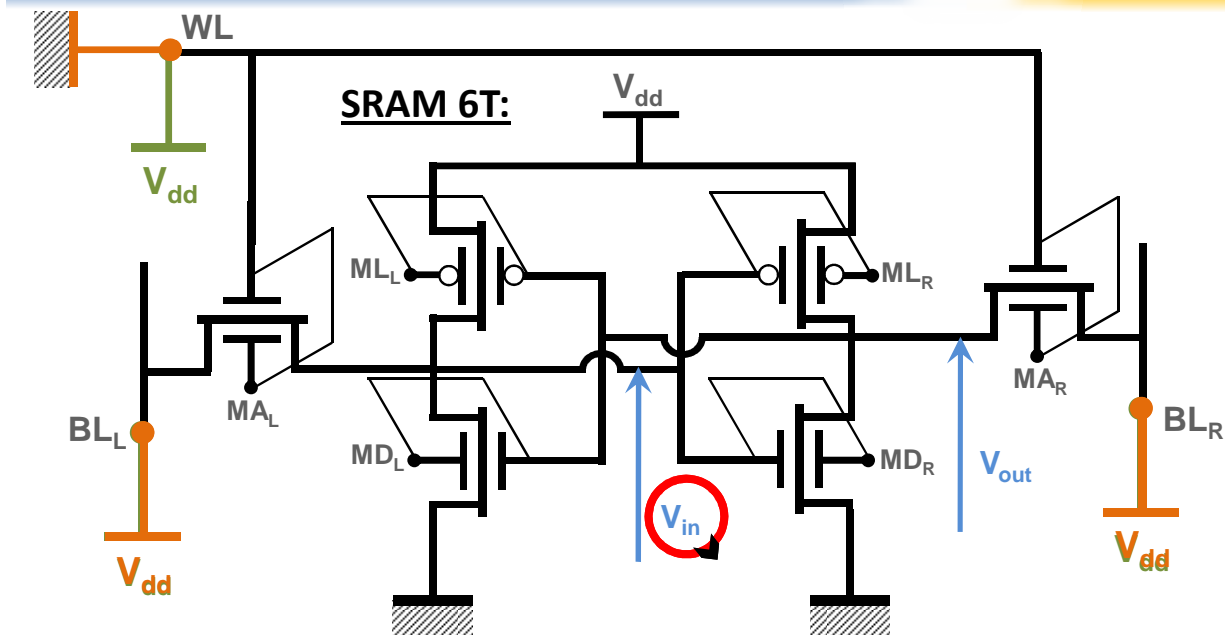


- $L_c=100$  nm
- $L_c=50$  nm
- $L_c=40$  nm
- $L_c=30$  nm
- $L_c=25$  nm
- $L_c=20$  nm

- Le transport balistique améliore la caractéristique de transfert.

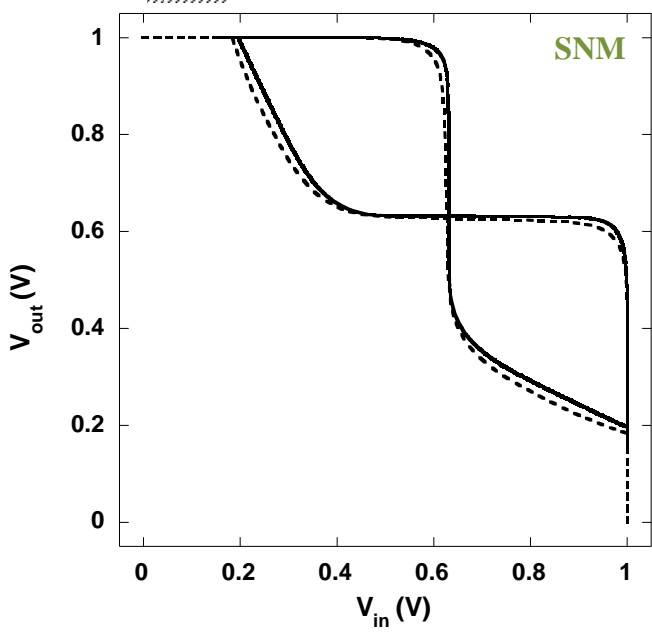
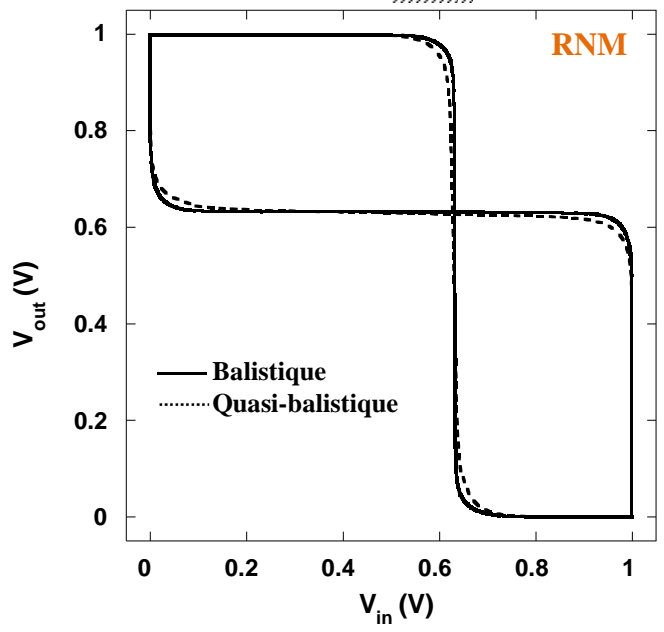
- Les effets de canal court détériorent la marge de bruit.

**Impact des effets de canal court**



**Paramètres :**

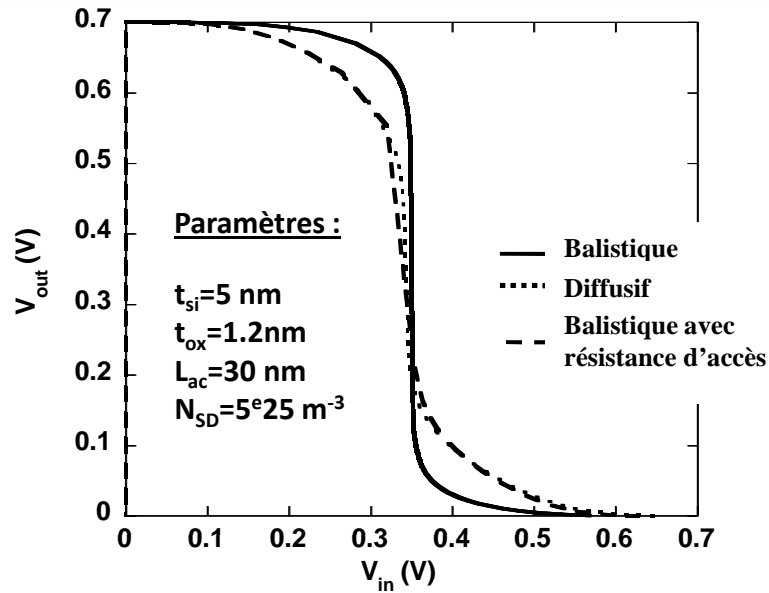
$t_{si}=10\text{ nm}$   
 $t_{ox}=1.2\text{ nm}$



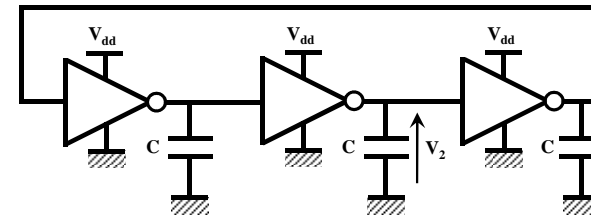
**RNM:** Quasi-balistique : 358 mV  
 Balistique : 366 mV

**SNM:** Quasi-balistique : 261 mV  
 Balistique : 263 mV

**- L'impact du transport balistique est très faible.**

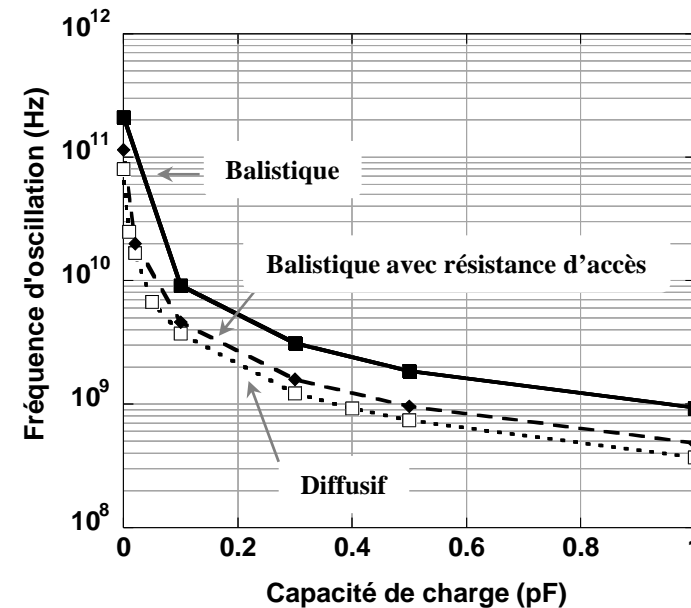
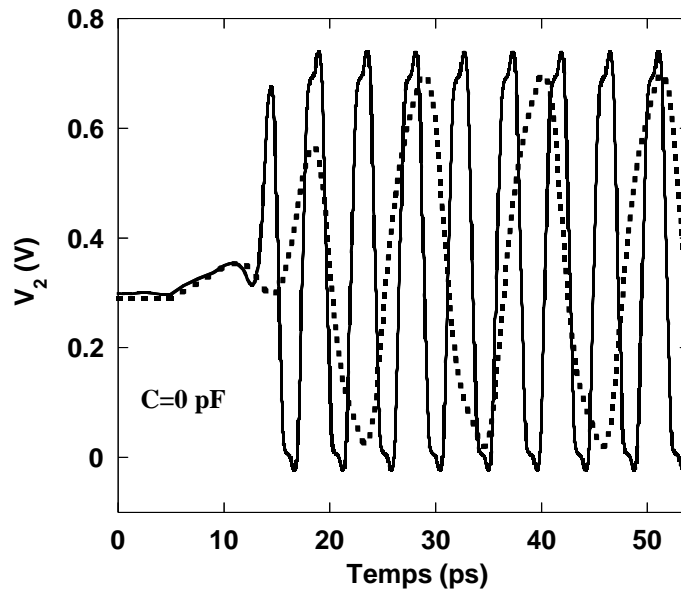


### Oscillateur en anneau:

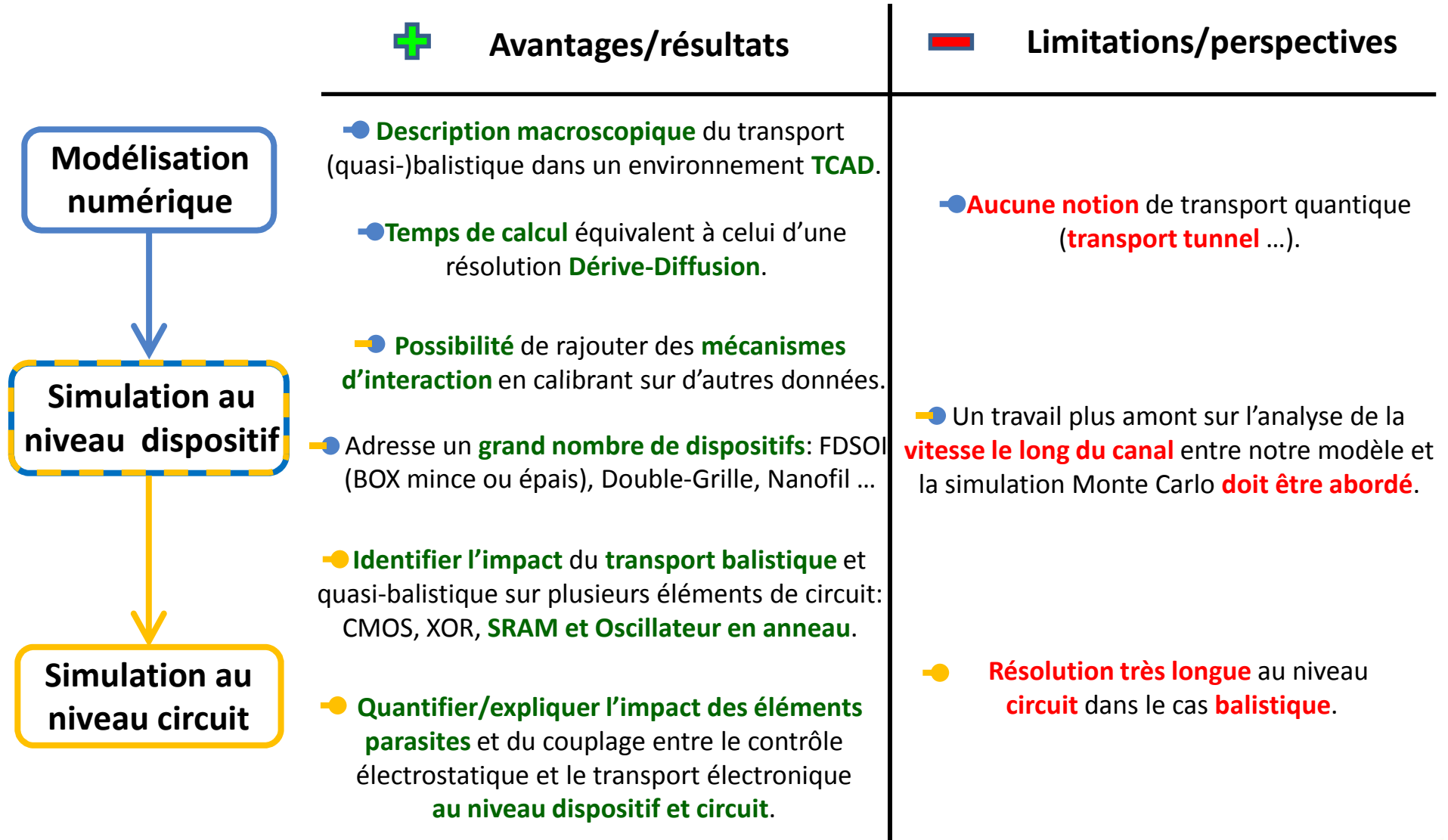


- On constate une augmentation de la fréquence dans le cas balistique par rapport au cas diffusif.

- La résistance d'accès réduit, voire élimine, tout le gain que l'on pourrait attendre sur la commutation et le temps de propagation de l'inverseur.







# PLAN

## III) Introduction

- III.1) Le transistor : une révolution industrielle et culturelle
- III.2) Du concept au transistor MOSFET
- III.3) Le transistor d'un point de vue système

## II) Modélisation semi-classique du transport

- II.1) Vision simple du transport électronique
- II.2) Equation de Transport de Boltzmann semi-classique
- II.3) Formalisme de la méthode des moments
- II.4) Formalisme de la méthode des flux
- II.5) Coefficient de réflexion

## III) Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique

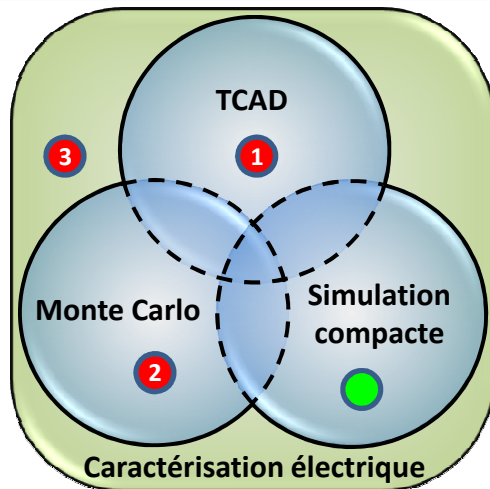
- III.1) Approche macroscopique du transport ballistique
- III.2) Mise en évidence de transport (quasi-)ballistique
- III.3) Impact du transport ballistique au niveau circuit
- III.4) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

## IV) Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique

- IV.1) Méthodologie générale
- IV.2) Modélisation analytique de la tension de seuil du transistor Double-Grille
- IV.3) Modélisation analytique du coefficient de réflexion
- IV.4) Modélisation analytique du transistor Double-Grille (quasi-)ballistique
- IV.5) Du transistor Double-Grille au transistor nanofil
- IV.6) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

## V) Conclusion

- V.1) Bilan générale
- V.2) Perspectives



Différentes modélisations compactes ont été développées : PSP, BSIM, EKV ...

Position du problème:

Modéliser analytiquement le transport (quasi-)ballistique en tenant compte: confinement quantique, SCE/DIBL ...



Solution:

Le formalisme de la méthode des flux.

- 1 Comparé/validé avec l'approche mobilité (quasi-)ballistique.
- 2 Comparé/validé avec des modélisations plus « physiques ».
- 3 Comparé/validé avec des caractérisations électriques.

Introduction des effets de canal court et du confinement quantique.

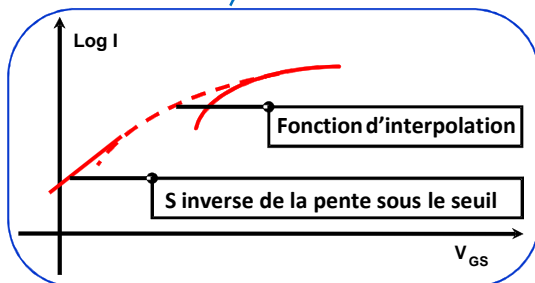
$$V_T = V_{th} + \Delta V_T$$

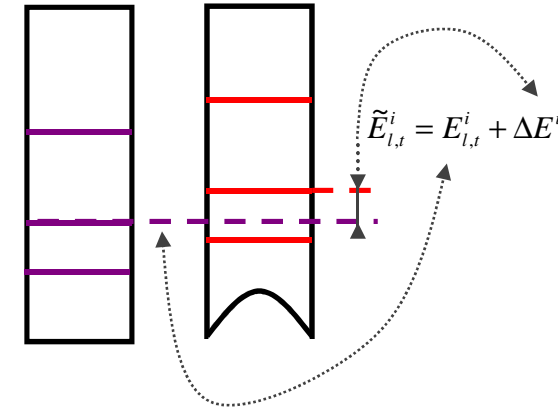
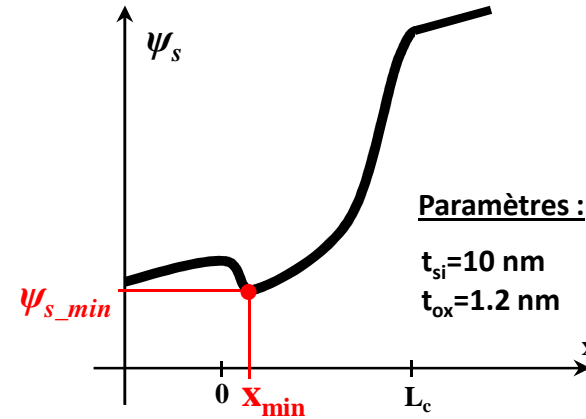
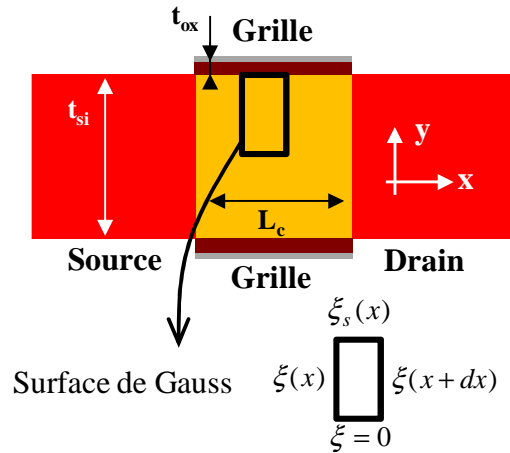
La fonction de Fermi est analytique [Selberherr] [Rahman].

Introduction du couplage entre électrostatique et transport électronique.

$$R(x) = \frac{\lambda^{-1}}{\frac{1}{2L'} \left( \frac{qV_{DS}}{kT} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left[ 1 + \coth \left( \frac{x}{2L'} \left( \frac{qV_{DS}}{kT} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right) \right] + \lambda^{-1}}$$

$$I_D = C_G \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot \frac{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_F)}{\ln(1 + e^{\eta_F})} \cdot v_{th} \cdot \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \cdot \frac{1 - \frac{\mathfrak{F}_{1/2} \left( \eta_F - \frac{qV_{DS}}{k_B T_L} \right)}{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_F)}}{\ln \left( 1 + e^{\frac{\eta_F - \frac{qV_{DS}}{k_B T_L}}{1 + e^{\eta_F}}} \right)} \cdot \left( 1 + \frac{(1-R)}{(1+R)} \cdot \frac{\ln \left( 1 + e^{\frac{\eta_F - \frac{qV_{DS}}{k_B T_L}}{1 + e^{\eta_F}}} \right)}{\ln(1 + e^{\eta_F})} \right)$$





**Effet de canal court [Autran] [Munteanu] [Martinie]:**

Potentiel minimum:

$$\frac{d\psi_s}{dx} = 0 \text{ pour } x_{\min} = \frac{1}{2\gamma} \cdot \ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right)$$

$$\psi_{s \min}(x = x_{\min}) = 2 \cdot \sqrt{K_1 \cdot K_2} - K_3 / \gamma^2$$

Variation de la tension de seuil et de la pente sous le seuil due aux effets de canal court :

$$\Delta V_T = 2 \cdot \sqrt{K_1 \cdot K_2} \quad \text{et} \quad S = \frac{k_B \cdot T_L}{q} \cdot \ln(10) \cdot \left(\frac{d\psi_s(x_{\min})}{dV_{GS}}\right)^{-1}$$

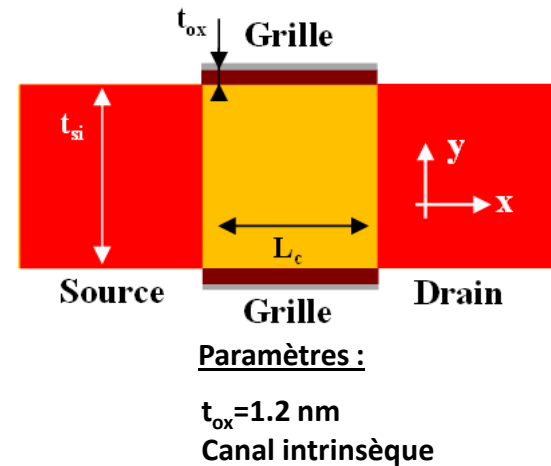
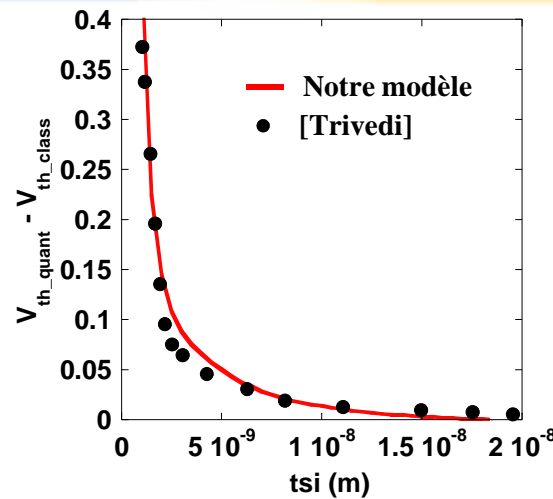
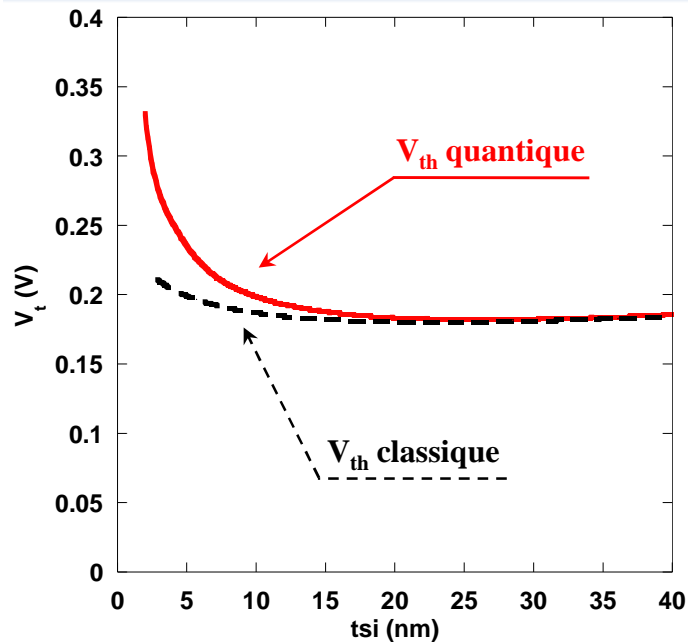
**Tension de seuil canal long avec confinement quantique [Autran] [Munteanu]:**

Simplification de la charge quantique:

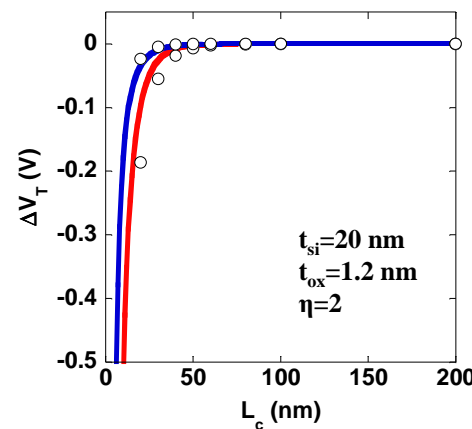
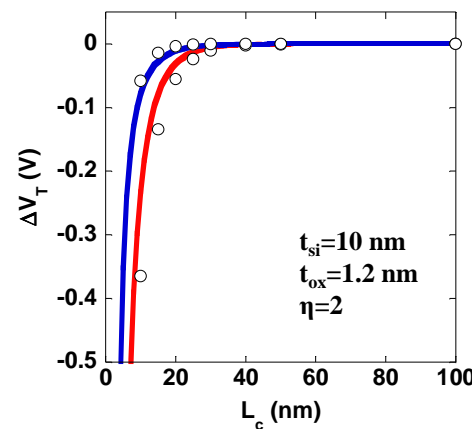
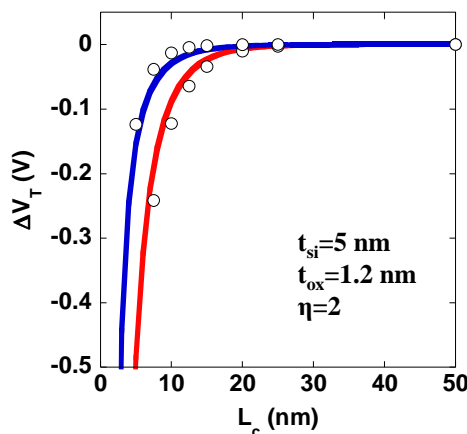
$$Q_{iq} = \frac{q \cdot k_B \cdot T_L}{\pi \cdot \hbar^2} \sum_{l,t} \sum_i m_{2D}^{l,t} \cdot g_{l,t} \cdot \ln\left(1 + e^{-\frac{q}{k_B \cdot T_L} \left(\tilde{E}_{l,t}^i + \frac{E_g}{2} - \psi_s\right)}\right)$$

$$Q_{iq} \approx Q^* \cdot e^{-\frac{q \cdot \psi_s}{k_B \cdot T_L}} \text{ avec } Q^* = \frac{q \cdot k_B \cdot T_L}{\pi \cdot \hbar^2} \sum_{l,t} \sum_i m_{2D}^{l,t} \cdot g_{l,t} \cdot e^{-\frac{q}{k_B \cdot T_L} \left(\tilde{E}_{l,t}^i + \frac{E_g}{2}\right)}$$

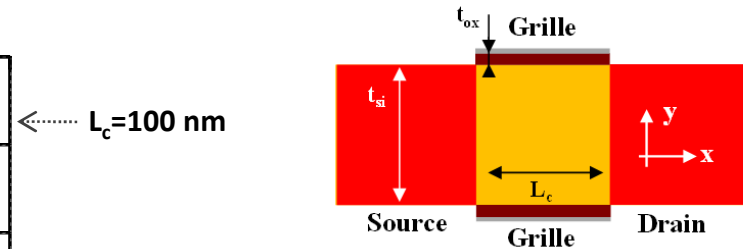
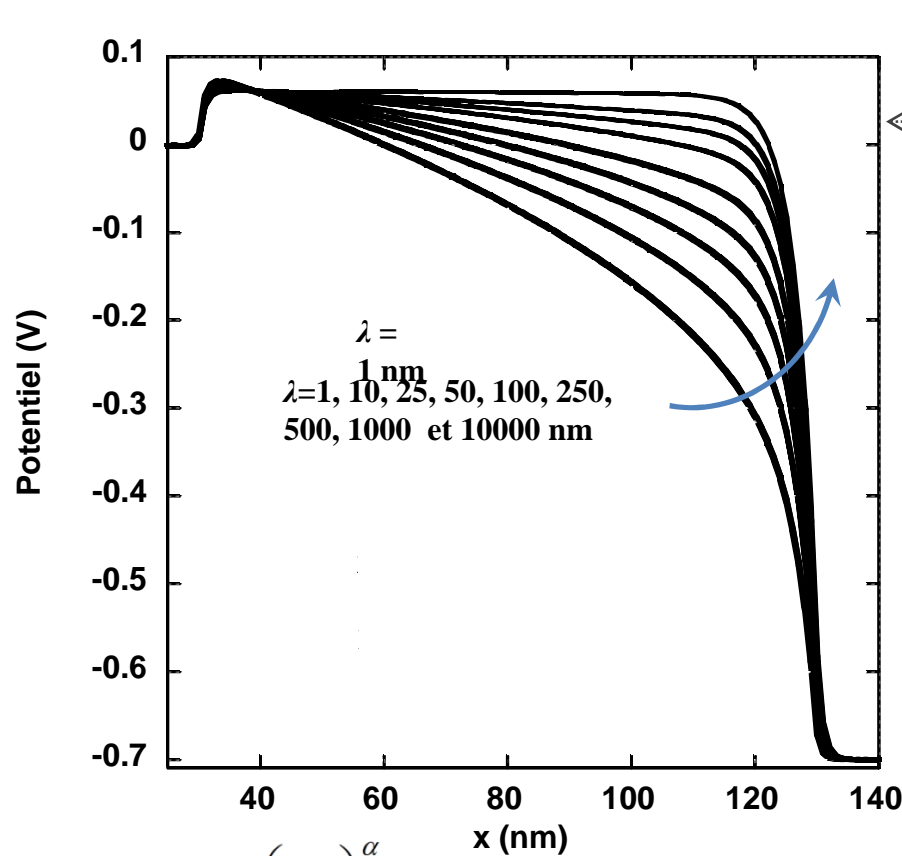
Potentiel de surface avec les effets de confinement :  $\psi_{sq} = \frac{k_B \cdot T_L}{q} \cdot \ln\left(\frac{Q_{ith}}{Q^*}\right)$



- Cette approche unifiée de la tension de seuil permet d'avoir un modèle analytique complet décrivant conjointement les effets de canal court et le confinement quantique.

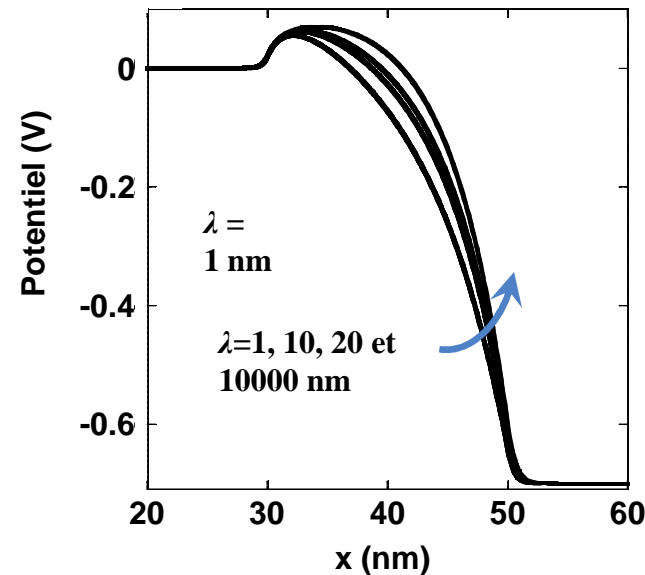


- Notre modèle:  $V_{DS}=0.05V$
- Notre modèle:  $V_{DS}=0.7 V$
- Simulations numériques



**Paramètres :**

- $t_{si}=10 \text{ nm}$
- $t_{ox}=1.2 \text{ nm}$
- $V_{GS}=0.7 \text{ V}$
- $V_{DS}=0.7 \text{ V}$

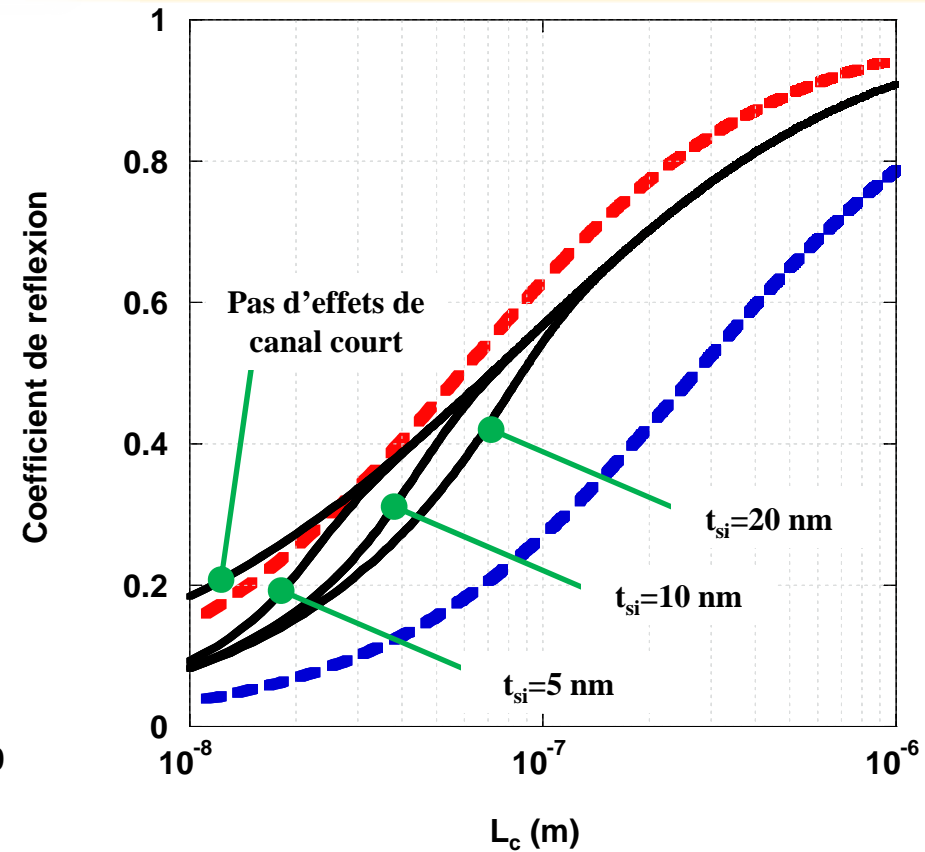
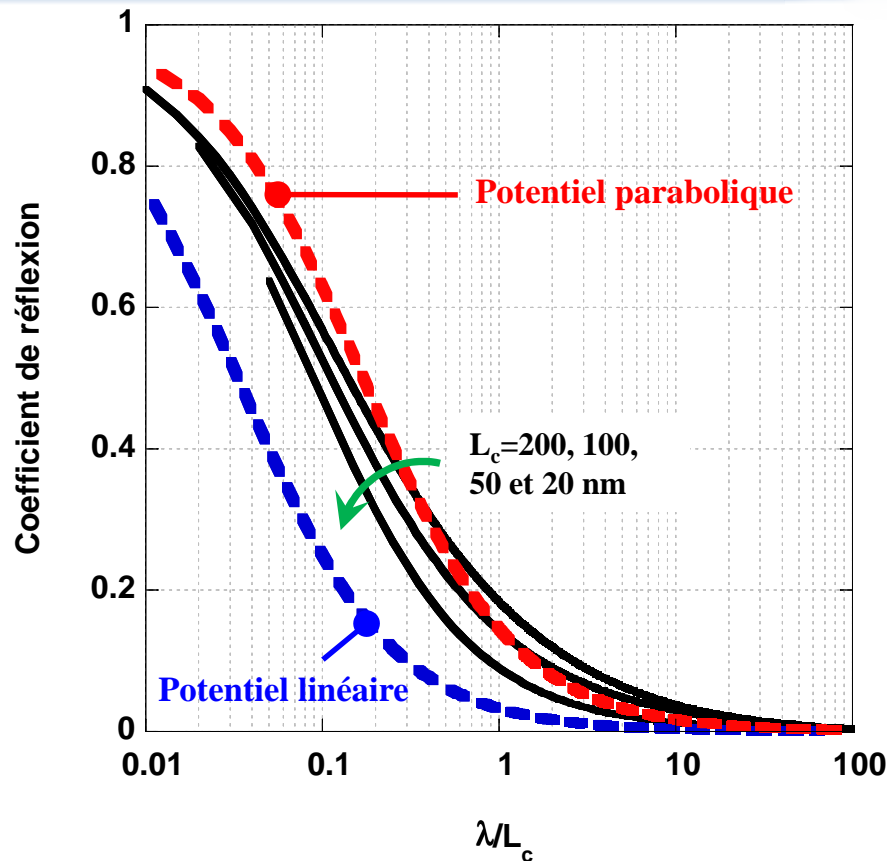


— [Martinie]

$$V_{(x)} = V_{DS} \cdot \left( \frac{x}{L_c} \right)^\alpha$$

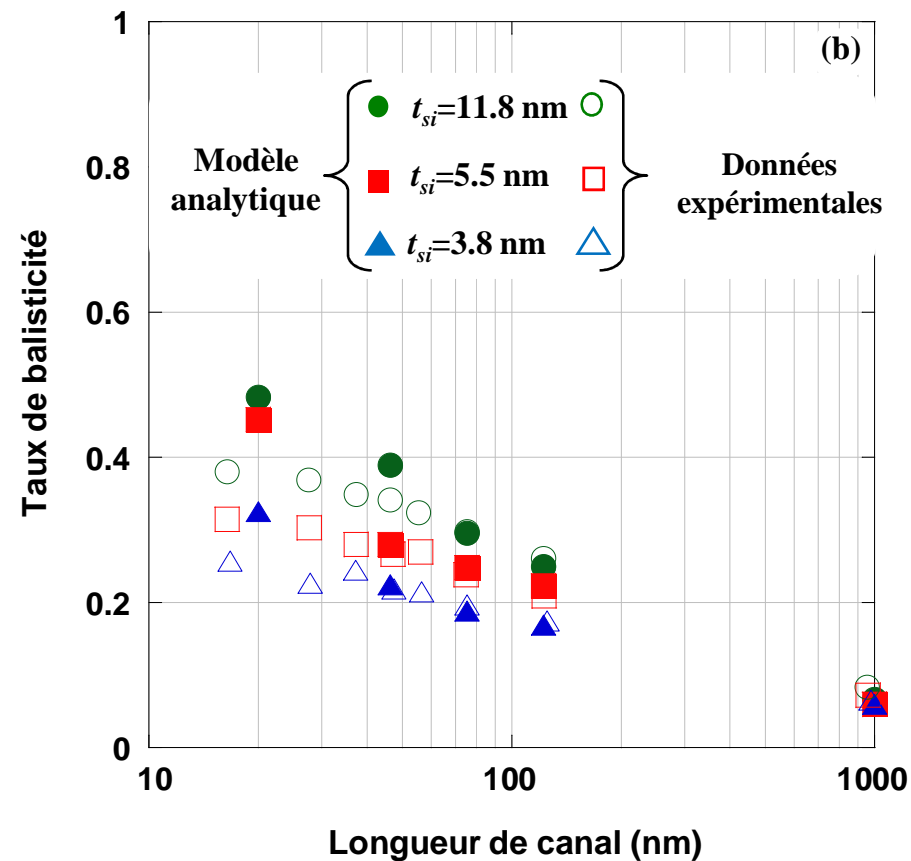
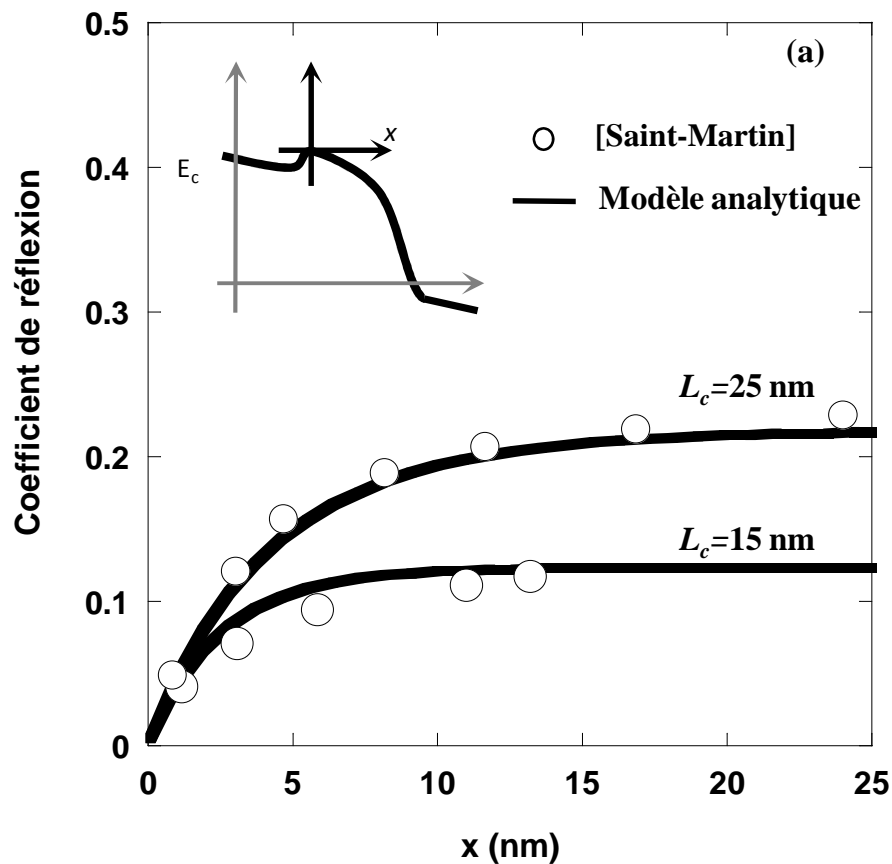
$$\alpha = 1.4 + \left( \frac{1}{1 + e^{-\frac{L_c - 4 \cdot t_{si}}{t_{si}}}} \right) \cdot \left( \frac{\lambda}{L_c} \right)^{0.5}$$

- La forme du potentiel en présence d'effets de canal court est quasiment équivalente au cas d'un canal diffusif.
- L'évolution du paramètre  $\alpha$  dépend fortement du ratio  $\lambda/L_c$ .
- Dans le cas d'un transport diffusif canal long,  $\alpha$  est égal à 3/2 [Rahman].



- Les modèles classiques [Lundstrom] [Chen] surestiment ou sous-estiment la rétrodiffusion dans le canal.
- La diminution non négligeable du coefficient de réflexion en fonction du  $t_{si}$  traduit l'influence des effets de canal court.





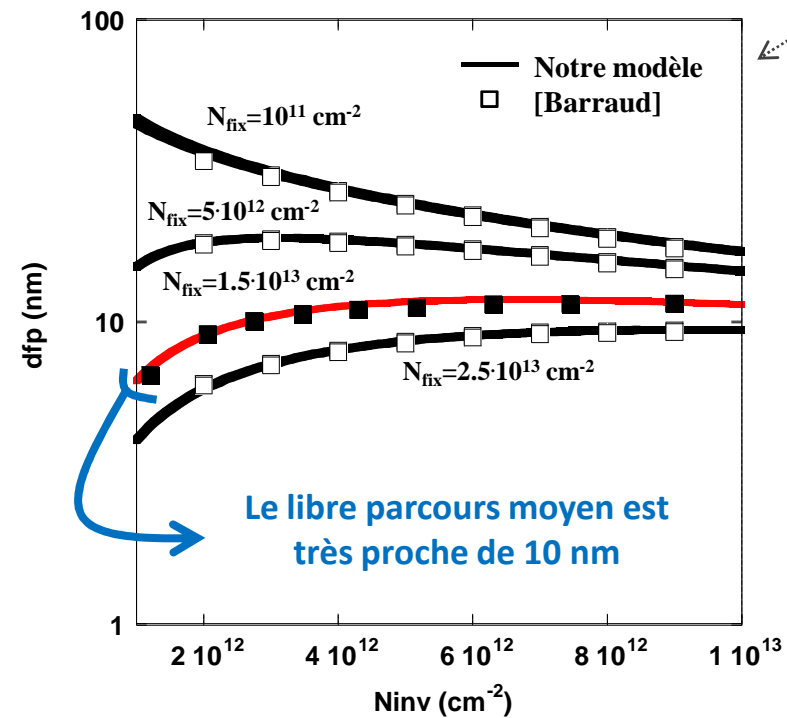
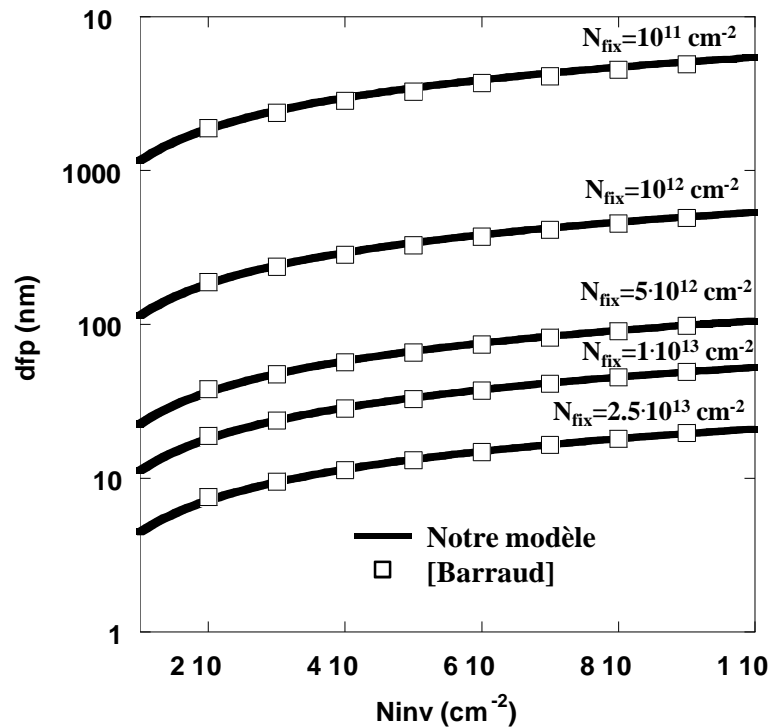
**-Le bon accord entre notre modèle et Monte Carlo/données expérimentales est une première étape vers une validation plus quantitative.**

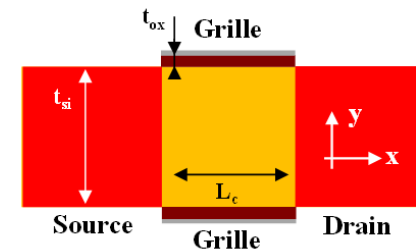
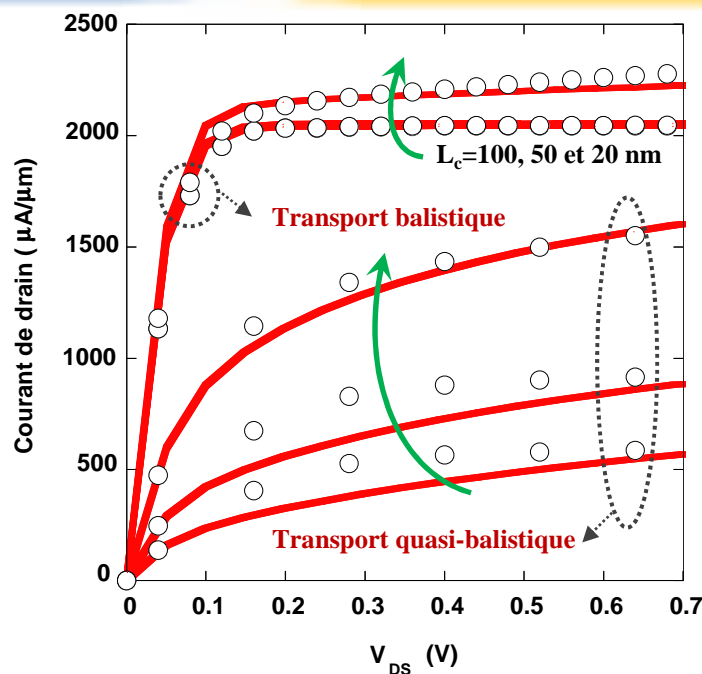
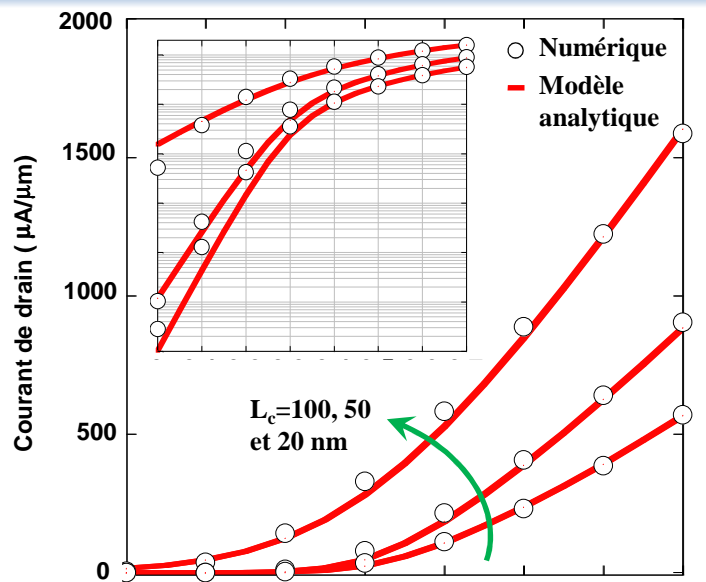
**- Les incertitudes entre le modèle et les données expérimentales sont dues à des phénomènes d'interaction mal pris en compte.**

**Nous modélisons les interactions avec une fonction semblable à la règle de Matthiessen :**

$$R_{(x)} = \frac{\lambda^{-1}}{\frac{1}{2.L'} \cdot \left(\frac{q.V_{DS}}{k.T}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left[ 1 + \coth\left(\frac{x}{2.L'} \cdot \left(\frac{q.V_{DS}}{k.T}\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right) \right] + \lambda^{-1}}$$

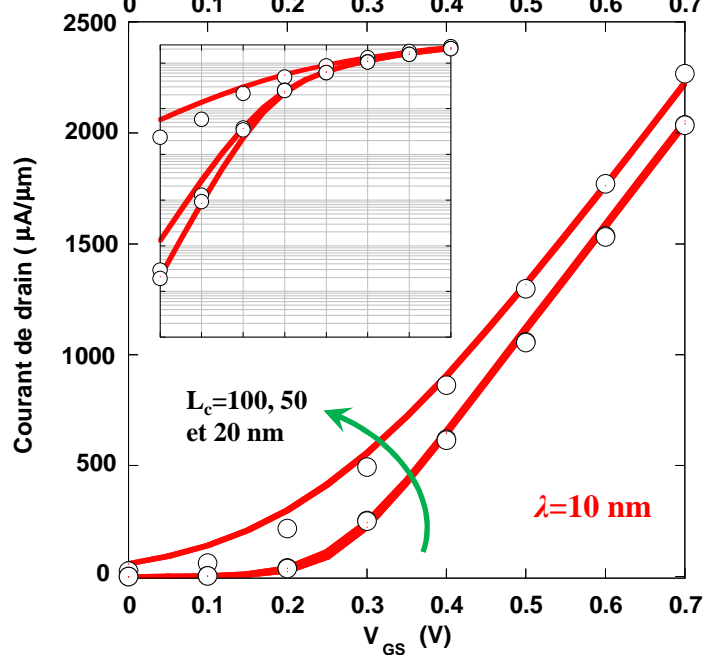
$$dfp_{tot} = \frac{2.k.T/q.v_{inj}}{\left[ \left( \frac{\mu_{Orcs}}{\left(E_{eff} / \gamma_1 (q.N_{fix})^{\gamma_2}\right)^{\theta_{rcs}}}\right)^{-1} + \left(\frac{\mu_{OPh}}{E_{eff}^{\theta_{Ph}}}\right)^{-1} + \left(\frac{\mu_{OSr}}{E_{eff}^{\theta_{sr}}}\right)^{-1} \right]}$$



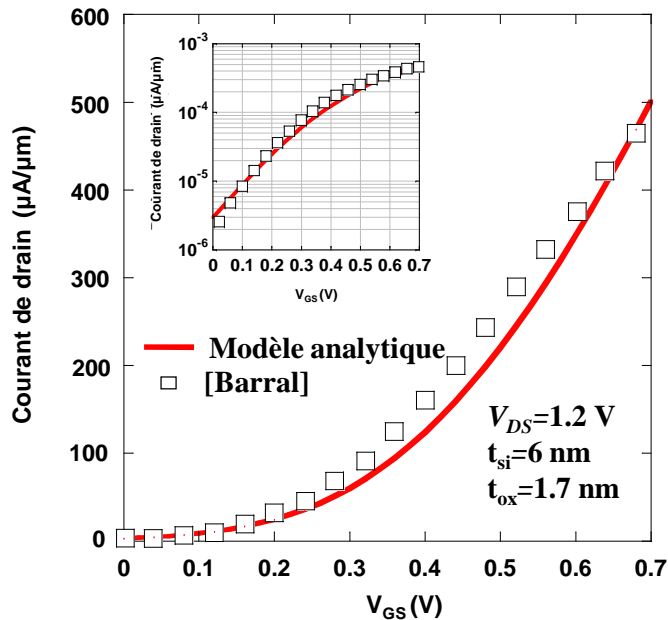
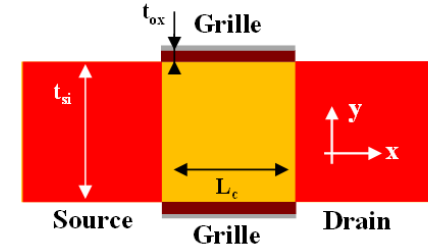
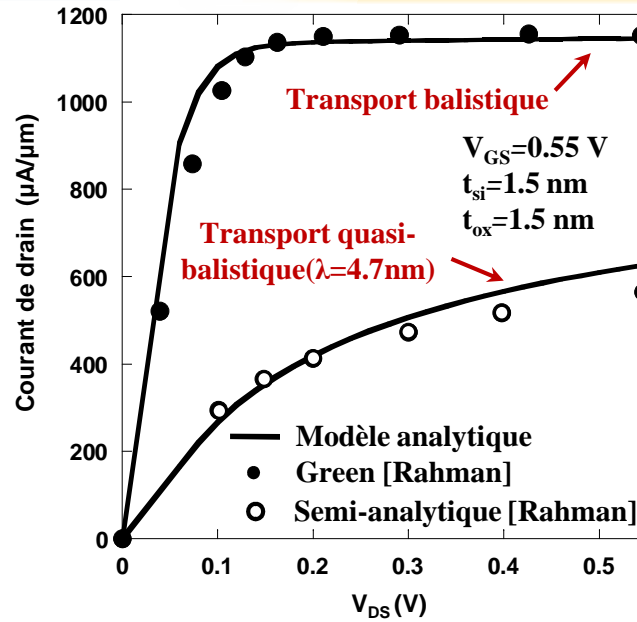
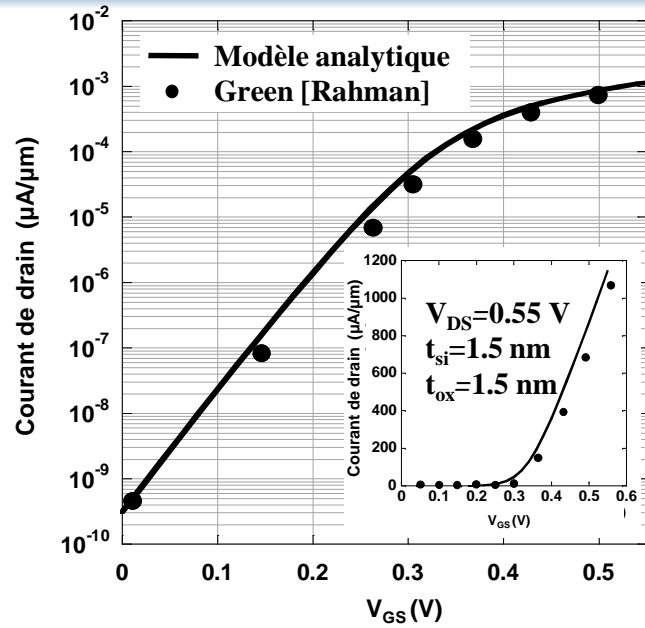


**Paramètres :**

- $t_{si} = 10$  nm
- $t_{ox} = 1.2$  nm
- $V_{GS} = 0.7$  V
- $V_{DS} = 0.7$  V

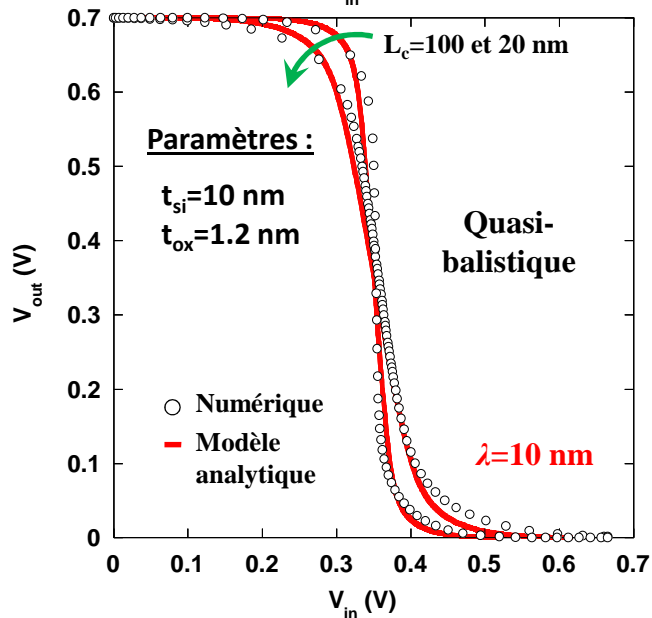
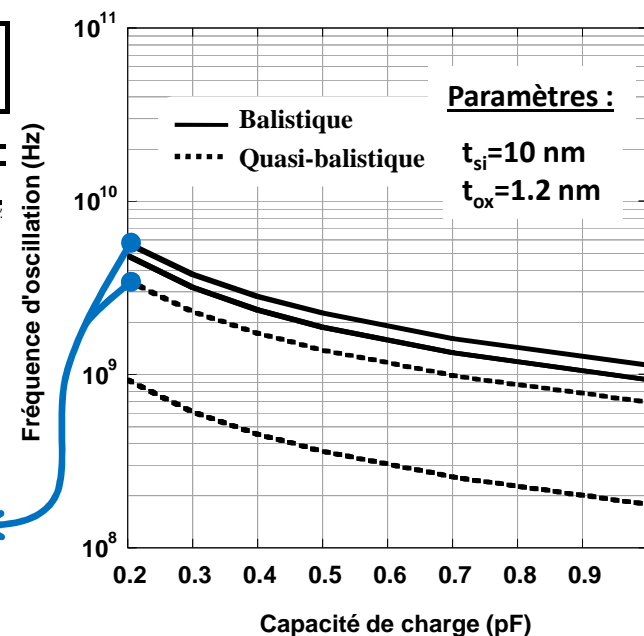
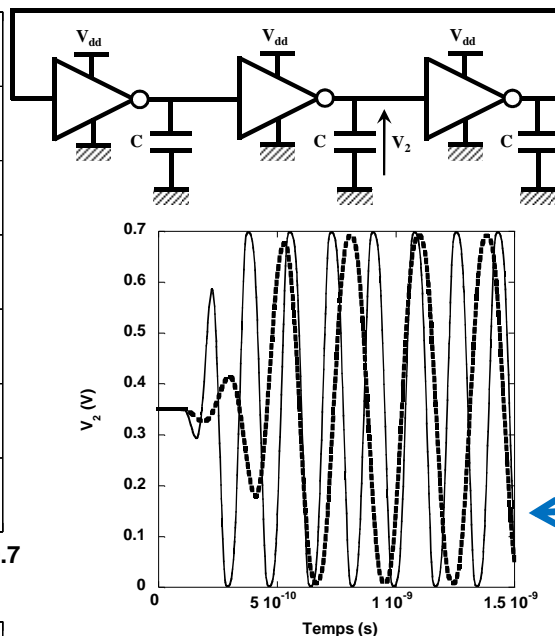
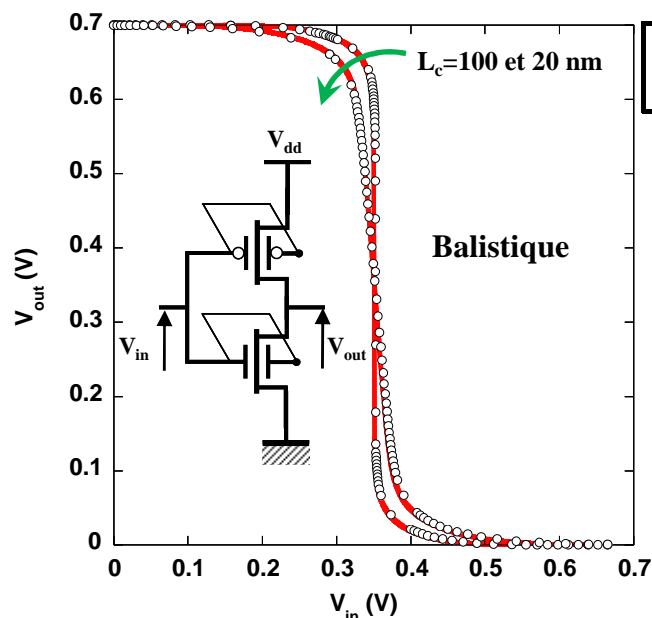


- Nos résultats montrent une bonne concordance entre notre modèle et les simulations numériques [Martinie].

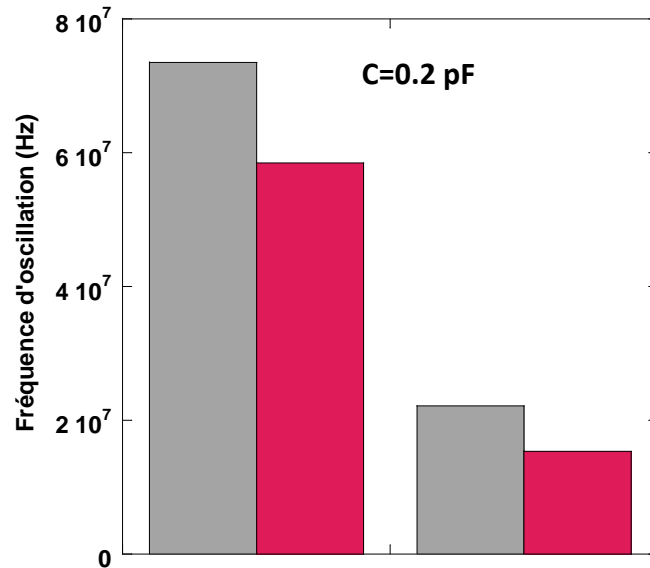
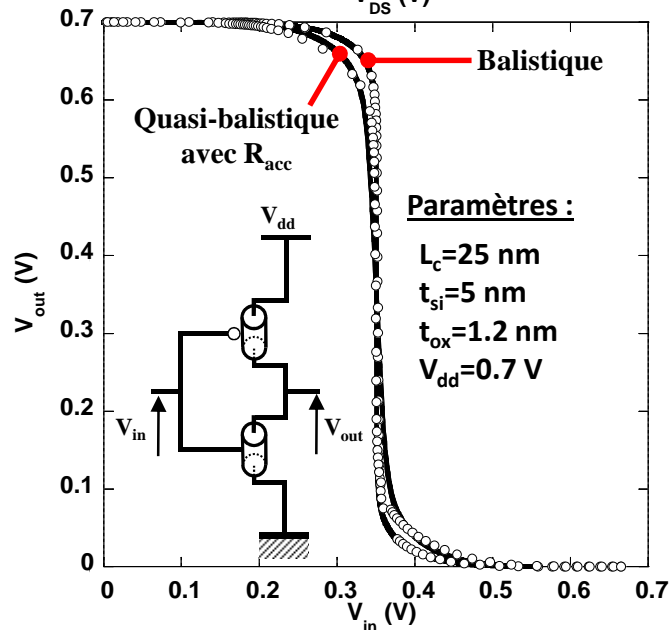
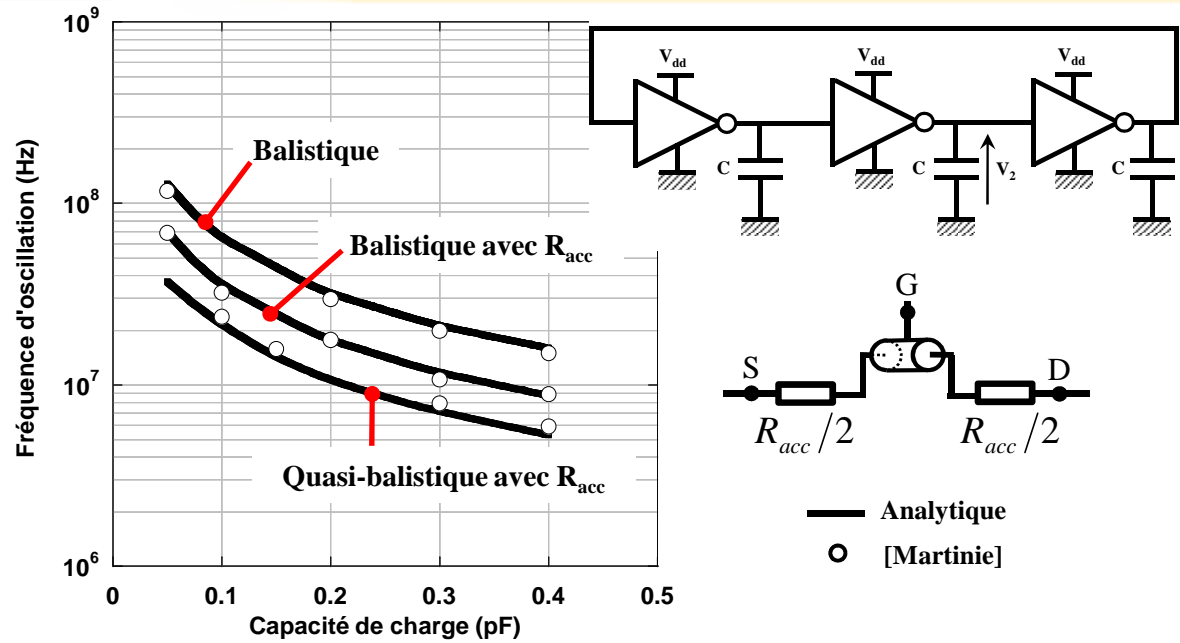
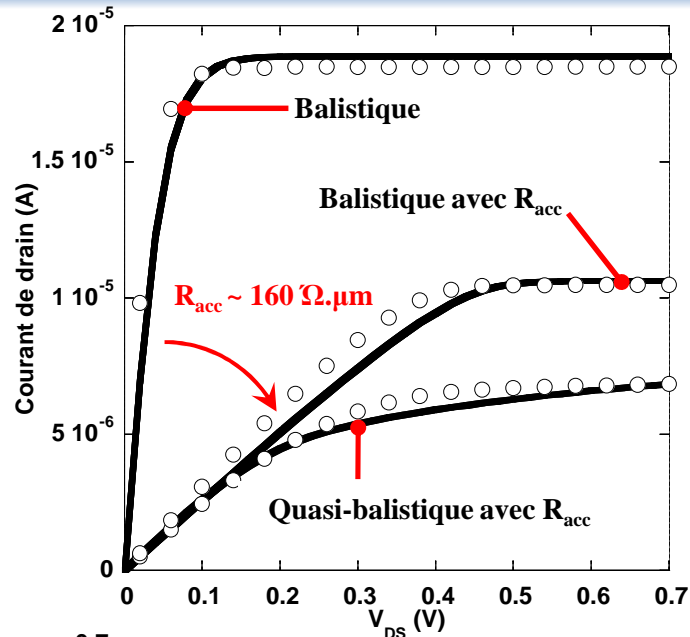


- Nos résultats montrent une bonne concordance entre notre modèle et les simulations numériques.

- Le bon accord entre l'approche analytique et les simulations numériques/données expérimentales résulte de la description précise du coefficient de réflexion



- La caractéristique de transfert est améliorée dans le cas balistique, mais dégradée par les effets de canal court.
- L'écart entre la fréquence balistique et quasi-balistique est réduit lorsque les effets de canal court apparaissent, puisque le contrôle électrostatique prédomine sur le transport [Martinié].



**Transport balistique**  
 +  
**Confinement quantique**  
 +  
**Transport quasi-balistique**  
 +  
**Résistances d'accès**



## Avantages/résultats



## Limitations/perspectives



- Une modélisation de la **tension de seuil** couplant les **effets de canal court** et le **confinement quantique**.
- **Méthodologie** de **calibration** du **libre parcours moyen** permettant d'introduire les phénomènes d'interactions existants dans les **transistors ultimes**.
- Une **approche semi-empirique** du **R** prenant **en compte** les conditions d'**électrostatiques**.
- **Simuler/comparer/valider** les modélisations du transistor **Double-Grille** et à **nanofil**.
- **Identifier l'impact** du **transport (quasi-)ballistique** et du confinement sur des éléments de circuit: CMOS et **Oscillateur en anneau**.

- **Aucune notion** de transport quantique (**transport tunnel** ...).
- Modélisation de la **vitesse d'injection** dans le cas du transistor à **nanofil**.
- L'analyse de **l'impact de la structure de bande** sur le courant.
- Simulation de plus d'architectures : **SRAM** ...

# PLAN

## I) Introduction

- I.1) Le transistor : une révolution industrielle et culturelle
- I.2) Du concept au transistor MOSFET
- I.3) Le transistor d'un point de vue système

## II) Modélisation semi-classique du transport

- II.1) Vision simple du transport électronique
- II.2) Equation de Transport de Boltzmann semi-classique
- II.3) Formalisme de la méthode des moments
- II.4) Formalisme de la méthode des flux
- II.5) Coefficient de réflexion

## III) Simulation numérique de circuits en régime (quasi-)ballistique

- III.1) Approche macroscopique du transport ballistique
- III.2) Mise en évidence du transport (quasi-)ballistique
- III.3) Impact du transport ballistique au niveau circuit
- III.4) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

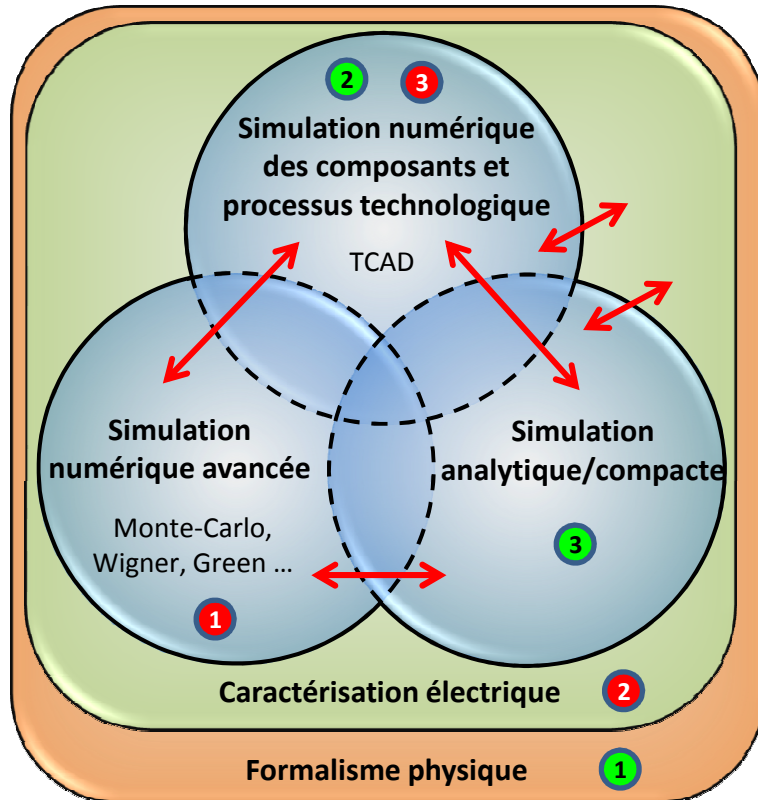
## IV) Modélisation analytique de transistors multigrilles (quasi-)ballistique

- IV.1) Méthodologie générale
- IV.2) Modélisation analytique de la tension de seuil du transistor Double-Grille
- IV.3) Modélisation analytique du coefficient de réflexion
- IV.4) Modélisation analytique du transistor Double-Grille (quasi-)ballistique
- IV.5) Du transistor Double-Grille au transistor nanofil
- IV.6) Bilan: avantages, résultats, limitations et perspectives

## V) Conclusion

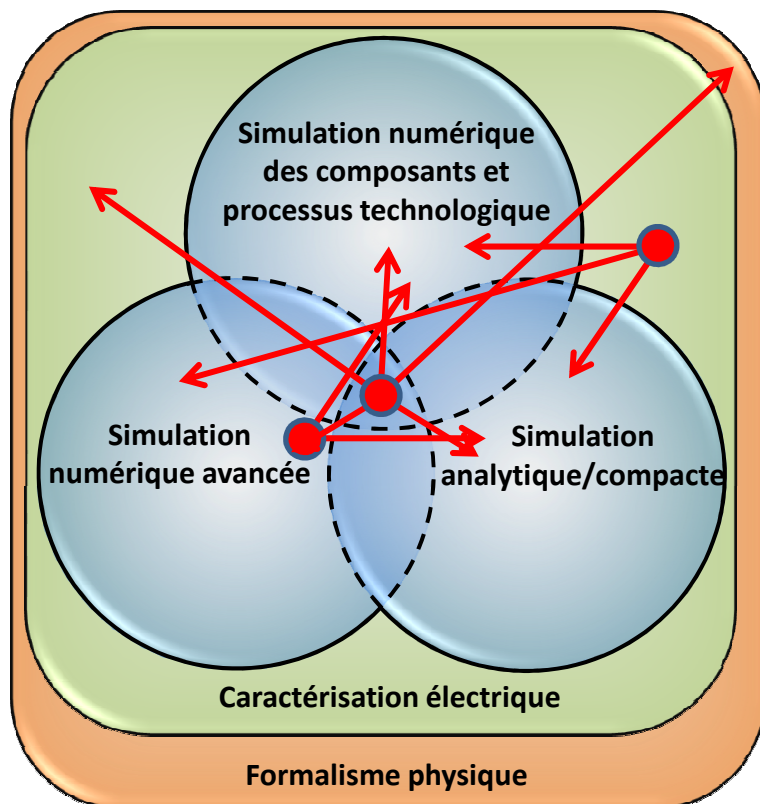
- V.1) Bilan général
- V.2) Perspectives





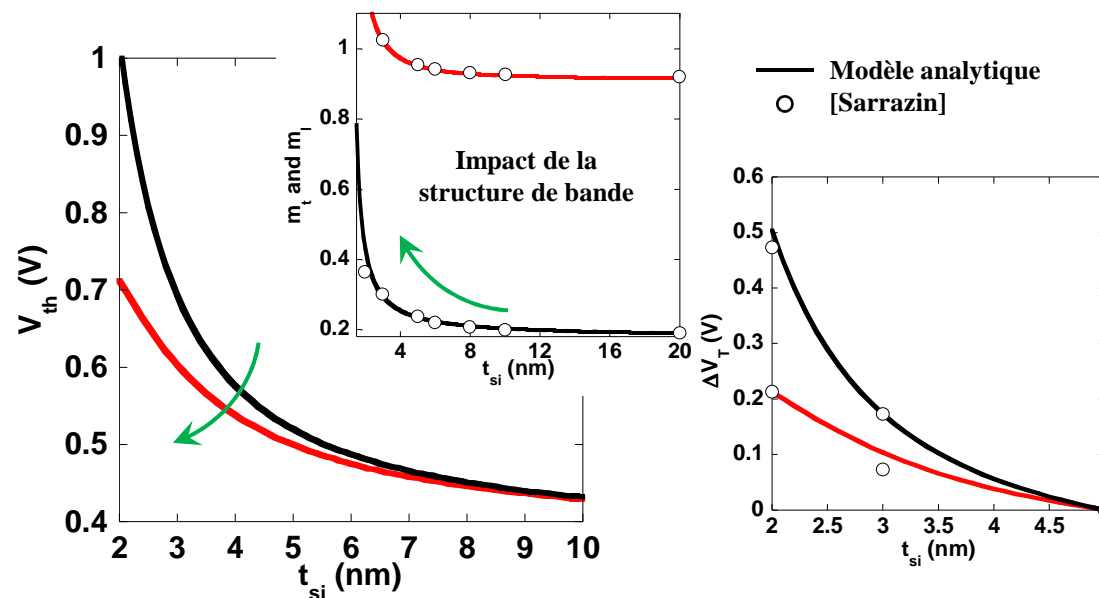
- 1 **Analyse/synthèse** des formalismes de la méthode des moments et de la **méthode des flux**.
  - 2 Développé une **modélisation** macroscopique du transport **(quasi-)ballistique** dans un environnement **TCAD**.
  - 3 Développé une **modélisation analytique** pour le transistor **Double-Grille** et commencé à mettre en place un modèle pour le transistor à **nanofil**.
- 1 Dans la mesure du possible, nous avons **comparé** et **validé** nos modèles avec d'**autre approches**: données expérimentales, Monte Carlo, TCAD ...
  - 2
  - 3

**Quantifier/expliquer l'impact du transport (quasi-)ballistique du dispositif à l'élément de circuit**



Modélisation des effets de **basse dimensionnalité**  
 (impact de la structure de bande):  
**vitesse injection, tension de seuil, transport tunnel...**

Introduction en **modélisation analytique** des phénomènes  
 de transport quantique



**Impact/modélisation** au niveau **circuit** de la raideur des **profils de jonction** [Sakamoto] et des **contraintes mécaniques** [Wang].

**Impact/modélisation** du **bruit** dans les dispositifs à **nanofil** [Roy].

# Merci de Votre attention

**Merci beaucoup à Daniela Munteanu pour son aide, sa patience, son efficacité, sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de ces trois années.**

**Un grand merci à Gilles Le Carval et Jean-Luc Autran pour leur conseil et leur aide précieuse.**

**Merci à mon « mentor » Sébastien Soliveres.**

## **Merci à tous mes amis et collègues (LETI, IM2NP et ST):**

Cyril Ailliot, Jean-Charles Barbe, Vincent Barral, Sylvain Barraud, Emilie Bernard, Corine Bestory, Marc Bescond, Blanca Biel, Philippe Blaise, Marc Bocquet, Germain Bossu, Arnaud Bournel, Rachid Bouchakour, Olivier Bonno, Fabien Boulanger, Estelle Brague, Sébastien Brainis, Lionel Cadix, Patrick Calenzo, Nicolas Cavassilas, Jean Coignus, Michael Collonge, Bastien Cousin, Olga Cueto, Francois De Crecy, Ken-Ji Delarosa, Damien Deleruyelle, Olivier Demolliens, Phillippe Dollfus, Erwan Dornel, Carmelo D'Agostino, Cecilia Dupré, Julien Dura, Elodie Ebrard, Claire Fenouillet-Beranger, Alexandre Ferron, Fabien Fontaine, Daniel Girardeau, Brice Grandchamp, Christiane Horoyan, Karim Huet, Jean-Luc Huguenin, Louis Hutin, Marie-Anne Jaud, Stephane Koffel, Romain Laffont, Younes Lamrani, Hadrien Lepage, Cyrille Leroyer, Patrick Martin, Pascal Masson, Jean-Paul Mazellier, Vincent Mazzochi, Mathieu Moreau, Frederic Mayer, Fabienne Micheline, Yves Morand, Jean-Philippe Noel, Etienne Nowak, Clement Pichot, Pierre-Yves Prodhomme, Thierry Poiroux, Jean-Michel Portal, Jeremy Postel-Pellerin, Jean-François Proth, Sophie Puget, Vincent Quenette, Jean-René Raguet, Marina Reyboz, Pierrette Rivallin, Veronique Robert, Maxime Rousseau, Olivier Rozeau, Lamine Samsom, Emmanuelle Sarrazin, Pascal Sheiblin, Julien Singer, Olivier Thomas, Deborah Teboul, Benoit Thouy, François Triozon, Sylvain Vedraine, Maud Vinet, Ilyes Zahi ...

**Merci +++ à ma famille: Maman, Papa, Nico, Papy, Mamy T., Mamy P., Mamy C., Grand-mère, Henri, Monique, Tonton, Yolande, Christophe, Stéphane ...**