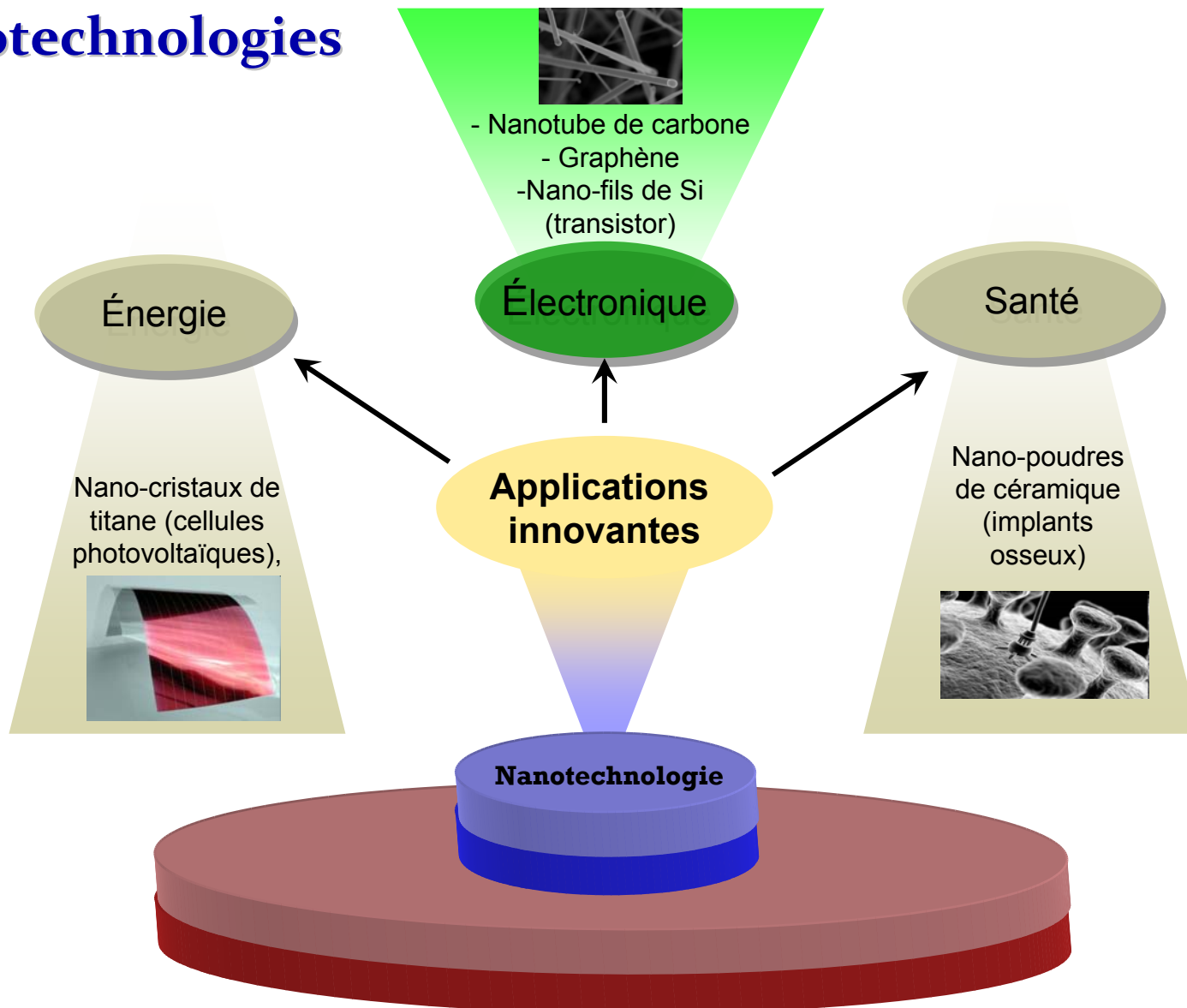


Modélisation compacte des transistors à nanotube de carbone à contacts Schottky et applications aux circuits numériques

Montassar Najari

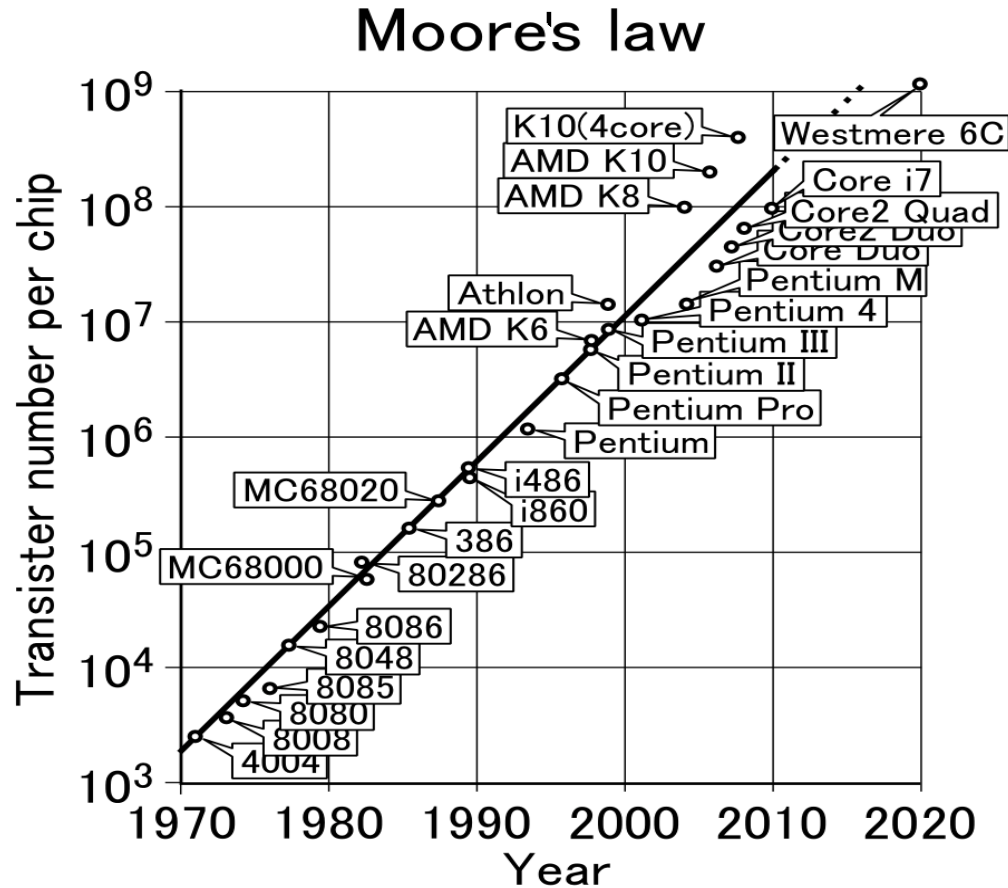
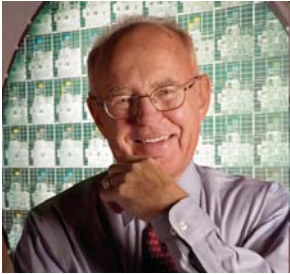
Contexte du travail de recherche

Nanotechnologies



Contexte du travail de recherche

Loi de G. Moore : perspective



"Moore's Law Will End in 10-15 Years..."

Gordon Moore (2007)

👉 Limites économiques

👉 Limites physiques

Contexte du travail de recherche

Calendrier prévisionnel d'intégration des matériaux émergents

Application	Ge & III-V	Carbon Nanotubes and other Metal Nanotubes	Nanowires	Graphene	Oxide Nanoparticles	Metal Nanoparticles	Novel Macromolecules	Self Assembled Materials	Complex Metal Oxides	Spin Materials (Fe, Co, Mn, Ni, etc.)
Process Materials	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Yellow	Blue	Black	Black
Lithography	Black	Black	Black	Black	Yellow	Black	Yellow	Blue	Black	Black
Device: Memory	Cyan	Blue	Blue	Blue	Black	Black	Blue	Black	Cyan	MRAM
Device: Logic	Cyan	Blue	Blue	Blue	Black	Black	Blue	Black	Cyan	Black
Interconnect	Cyan	Cyan	Blue	Blue	Black	Black	Cyan	Cyan	Black	Black
Packaging	Black	Yellow	Cyan	Cyan	Yellow	Yellow	Cyan	Yellow	Cyan	Black
LEGEND										
Earliest Potential Insertion		Current Apps		3-5 yrs	5-10 yrs	10-15 yrs	15+ yrs	Not on the Roadmap		

Étape de recherche fondamentale  Modélisation compacte

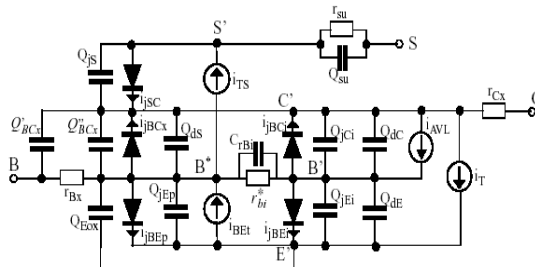
Contexte du travail de recherche

Modélisation compacte

Technologie

Conception

Comportement Physique



Fonction

Intégrabilité

Flux de processus d'intégration

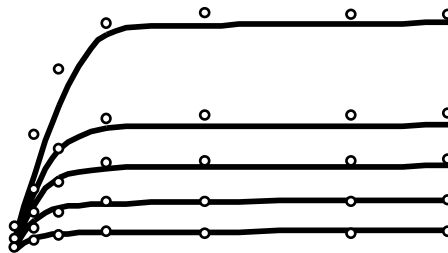
Performances

Effets parasites

Domaine d'application

Dispersion technologique

Fiabilité



- Précision dans la prédiction des caractéristiques électriques,
- Stabilité des modèles compacts pour une meilleure convergence,
- Portabilité (C, VerilogA, VHDL-AMS...)

Contexte du travail de recherche

Collaboration et concurrence internationale

□ National français

→ Lancement en 2000 de la Centrale de Technologie Universitaire (CTU) IEF-MINERVE :
7 grandes centrales de micro et nanotechnologies du CNRS et du CEA

IEMN (Lille)	LETI
IEF (Orsay)	PTA (Grenoble)
LPN (Marcoussis)	LAAS (Toulouse)
FEMTO-ST (Besançon)	

□ International

→ Alliance IBM : ST.micro, Toshiba, AMD (2007)

→ Alliance NanoVLSI (2006)

Caltech's Kavli Nanoscience Institute
(KNI) Californie, USA

CEA/LETI – Minatec, Grenoble, France

→ Coopération RFnano

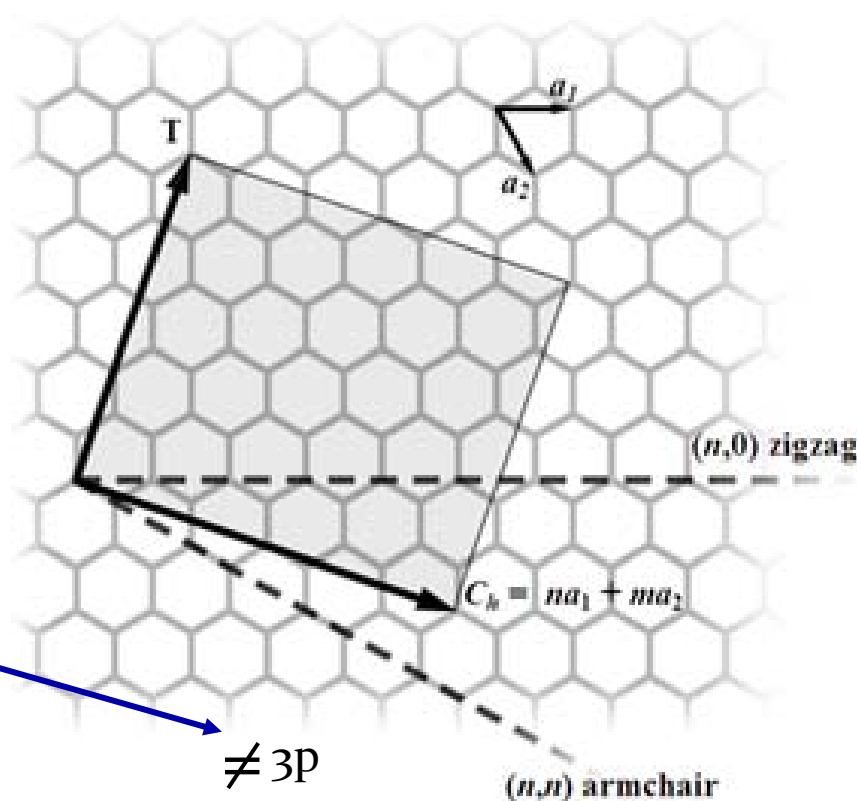
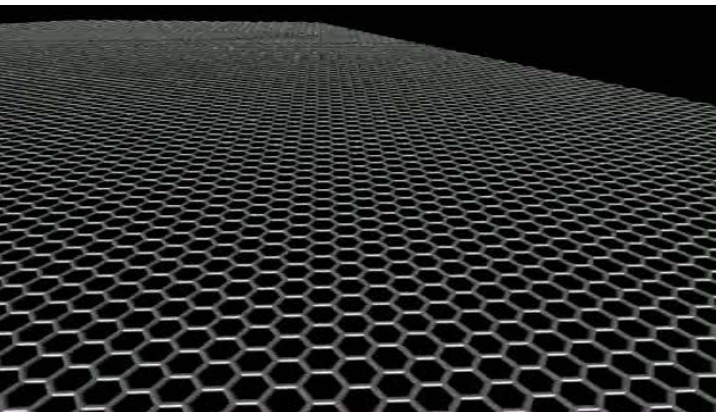
• Modélisation compacte des transistors à nanotube de carbone

- Université de Stanford
- Université de Southampton
- Université d'Arizona

Plan de la Présentation

- 1 Le transistor à nanotube de carbone CNTFET
- 2 Modélisation compacte du SB-CNTFET
- 3 Applications aux circuits numériques
- 4 Conclusions & Perspectives

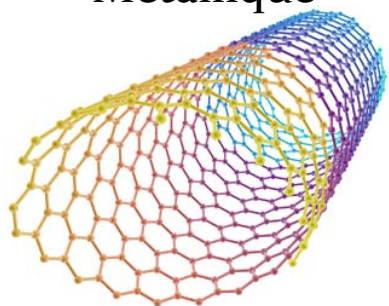
Les nanotubes de carbone



Vecteur chiralité : $\vec{C}_k = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$

Paramètres de chiralité : $(n - m)$

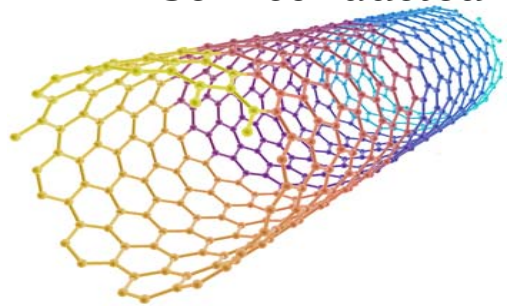
0
Métallique



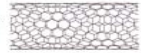
(10,10) nanotube
(armchair)



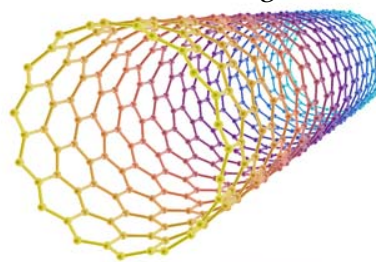
3P
Semiconducteur



(7,10) nanotube
(chiral)



$\neq 3P$
faible E_g



(0,10) nanotube
(zig-zag)



Transistors à nanotube de carbone (CNTFET)

□ Nanotubes de carbone comme canal des transistors (grille avant)

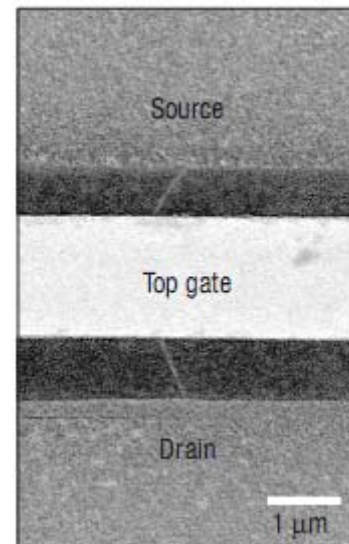
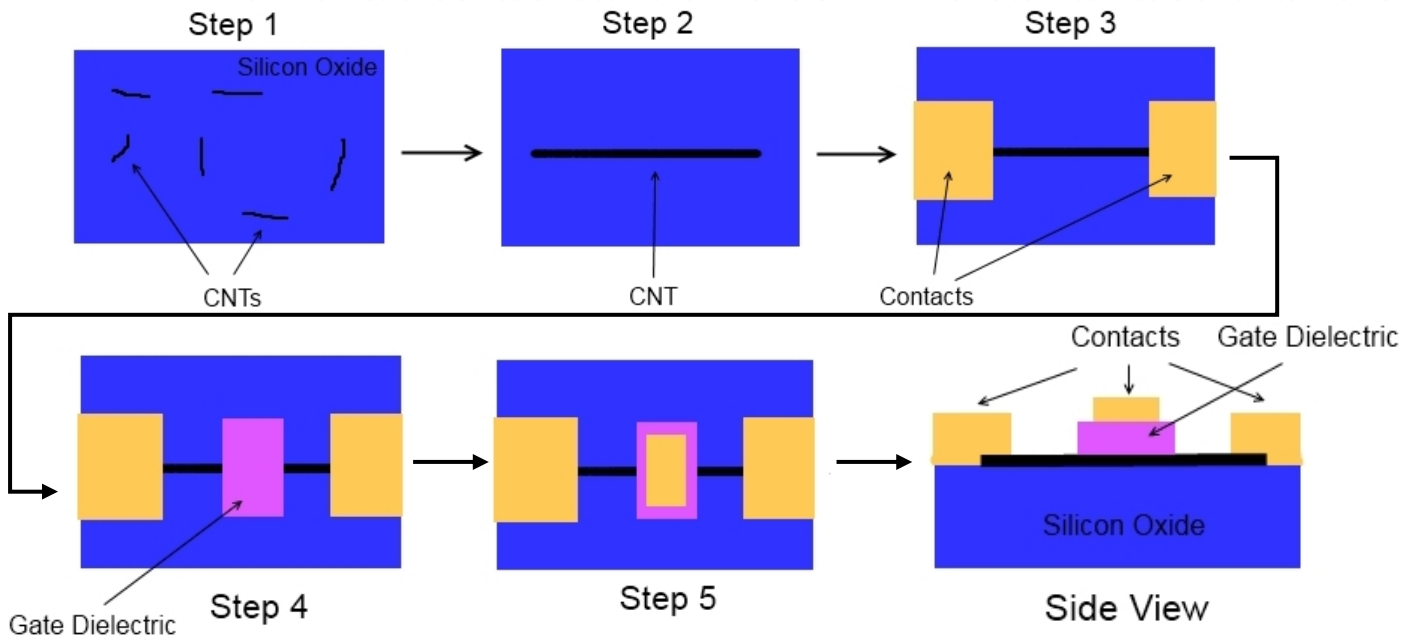


Photo MEB - IBM 2007

Configuration coaxiale

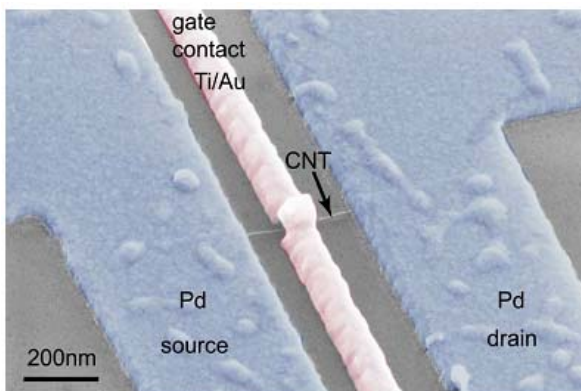
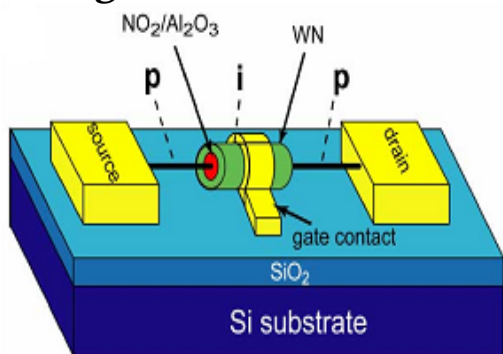
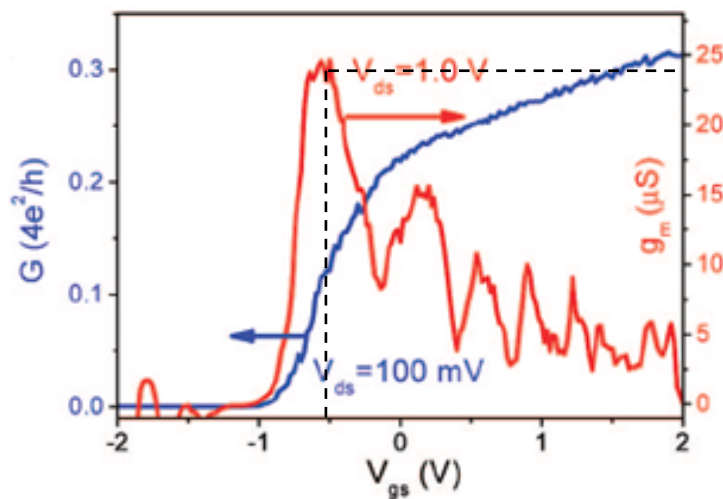
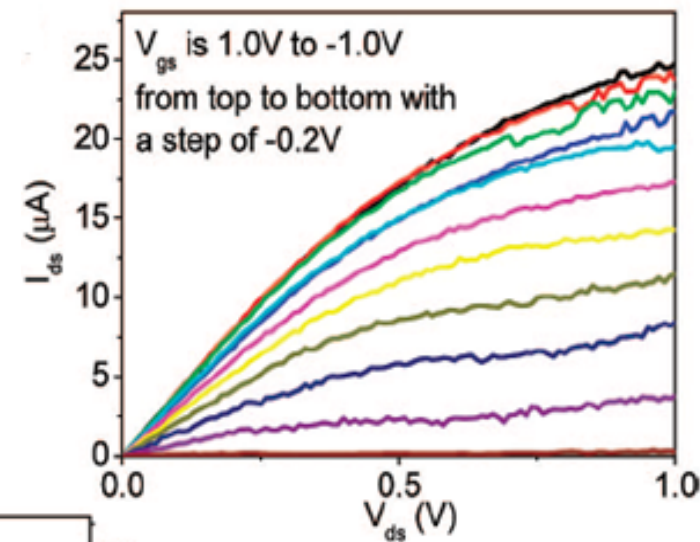
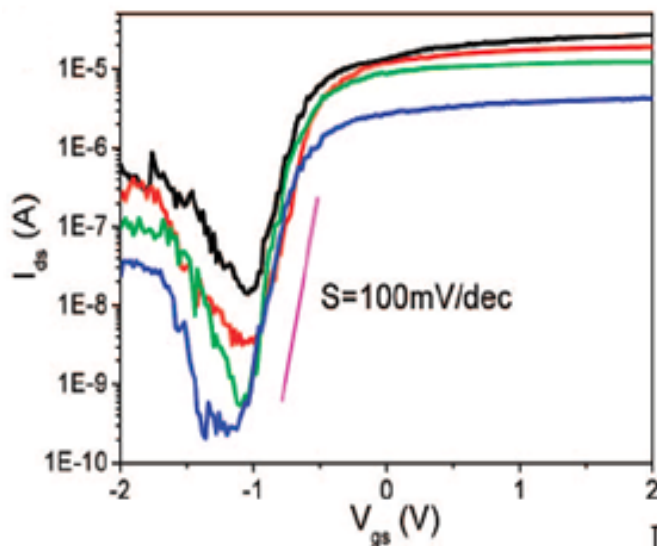


Photo MEB - IBM 2008

Performances des CNTFETs

□ Performances DC

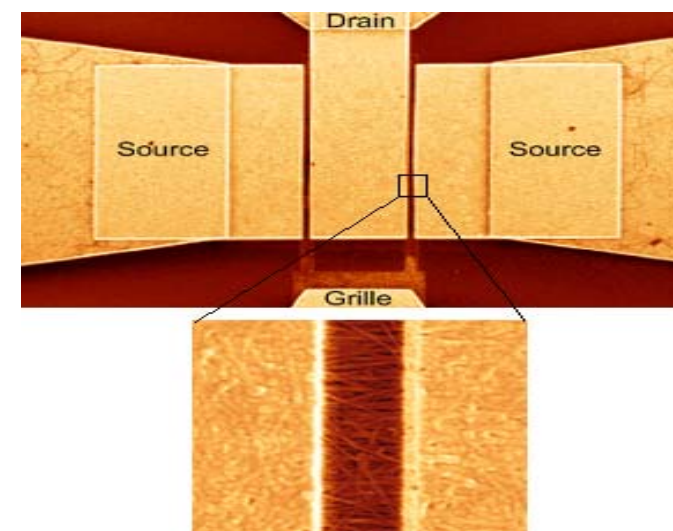
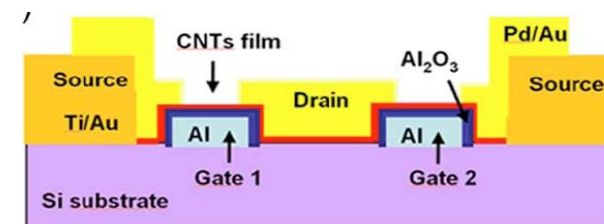
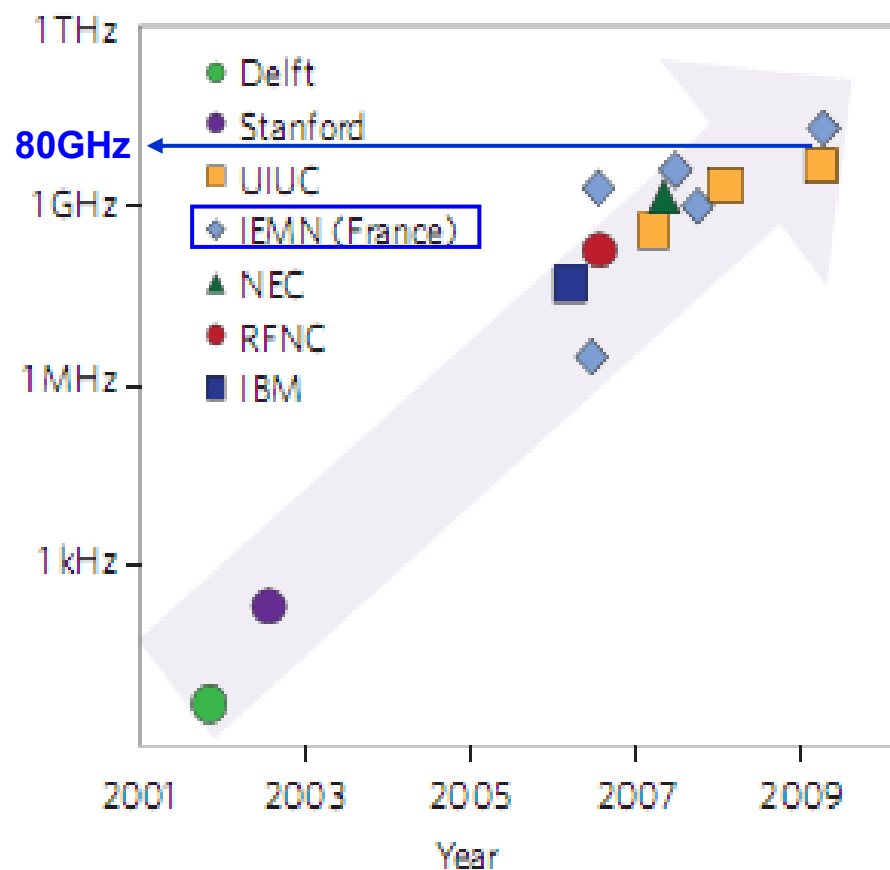
n-CNTFET (longueur canal 120nm et diamètre NCT 1,5 nm)



Z. Zhang et al. Nano Letters, (8) 2008.

Performances des CNTFETs

□ Performances dynamiques



Limitations des CNTFETs

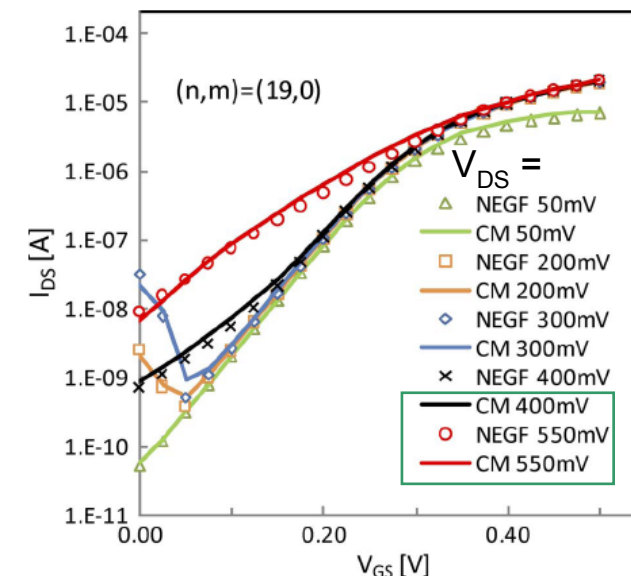
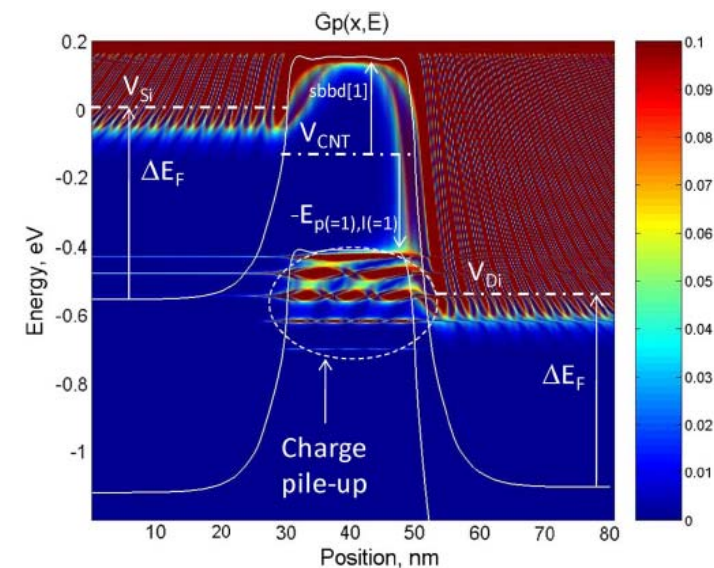
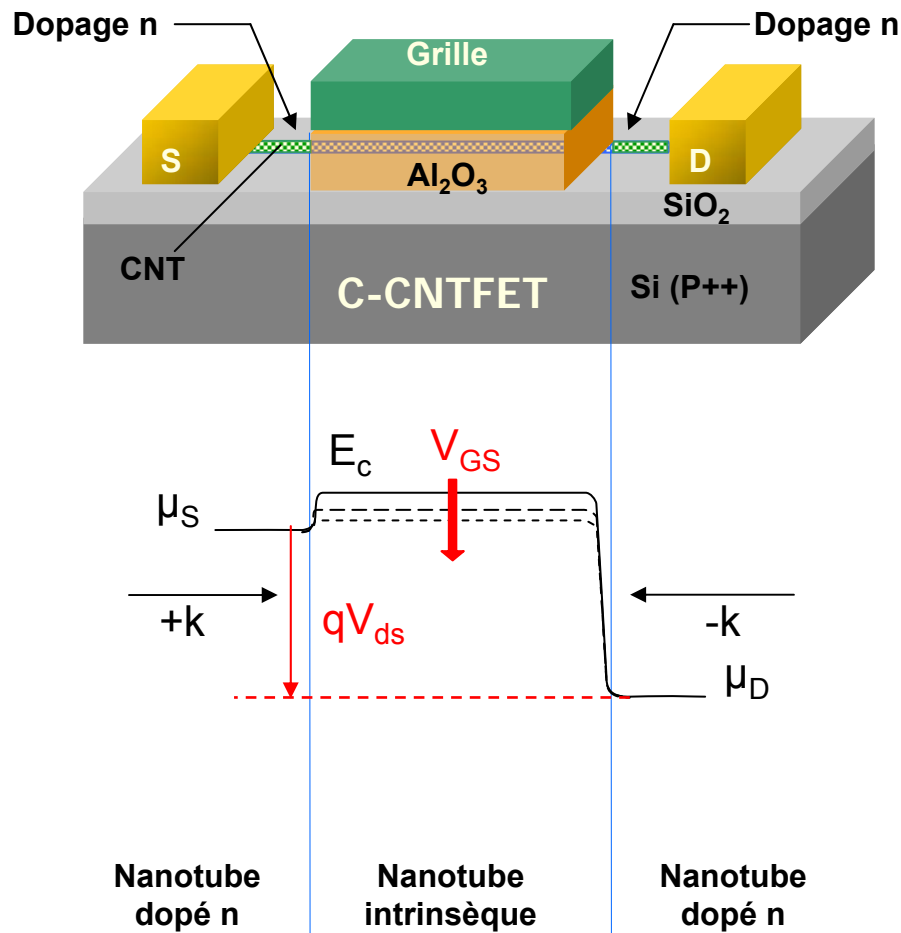
□ Limitations technologiques

Défis technologiques	Performances requises	Situation actuelle	Solutions possibles	États
Alignement et positionnement des CNTs	Fonctionnalité des circuits logiques	Architecture robuste à base d'un réseau de CNTs plus ou moins alignés [Patil 08]	Résolu	Résolu
% des CNTs métalliques (en croissance ou en solution)	Fuite ou marge de bruit : < 0,01 % → Suppression des CNTs métalliques	Tri des CNTs en solution: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 5 % métallique [Le mieux 08] ▪ 1% métallique [Engel 08] 	Contrôle plus précis de la chiralité des CNTs	Non résolu
Dopage des CNTs	Performances de la logique complémentaire	Dopage P: <ul style="list-style-type: none"> ▪ (OA) [Chen 05] Dopage N: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydrazine [Chen 05] ▪ Potassium [Javey 05] 	Dopage contrôlé et stable dans l'air	En cours
Interface métal/CNT de la source et du drain dans les CNTFETs	Performances de la logique complémentaire	Type P: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Palladium [Kim 05] Type N: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Scandium [Zhang 07] 	Stabilité dans l'air	En cours

Limitations des CNTFETs

Limitations intrinsèques :

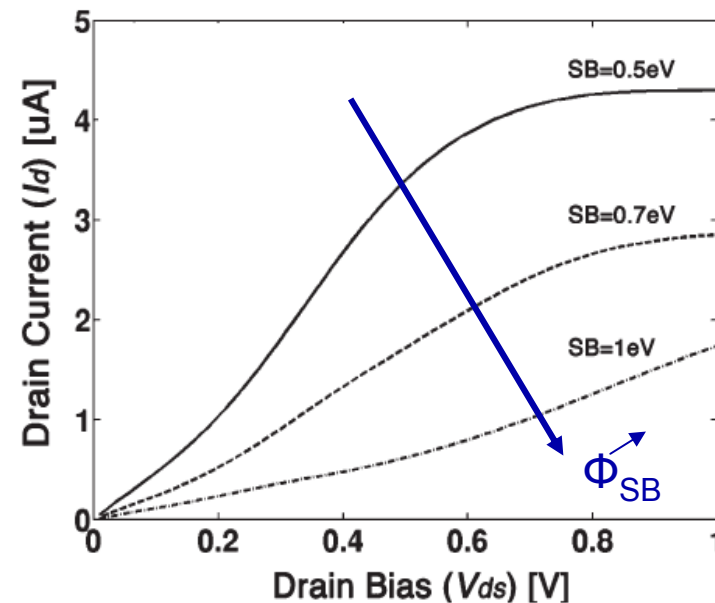
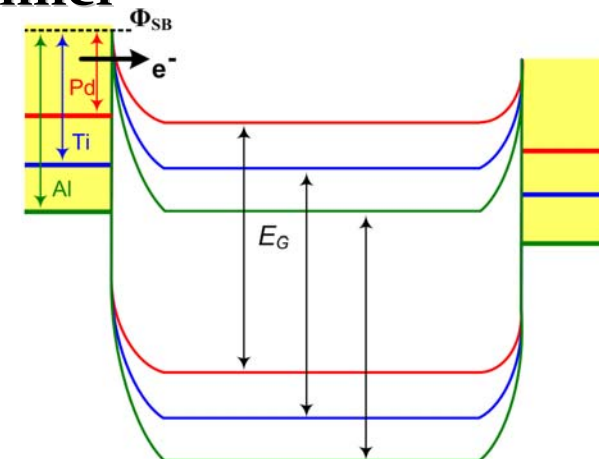
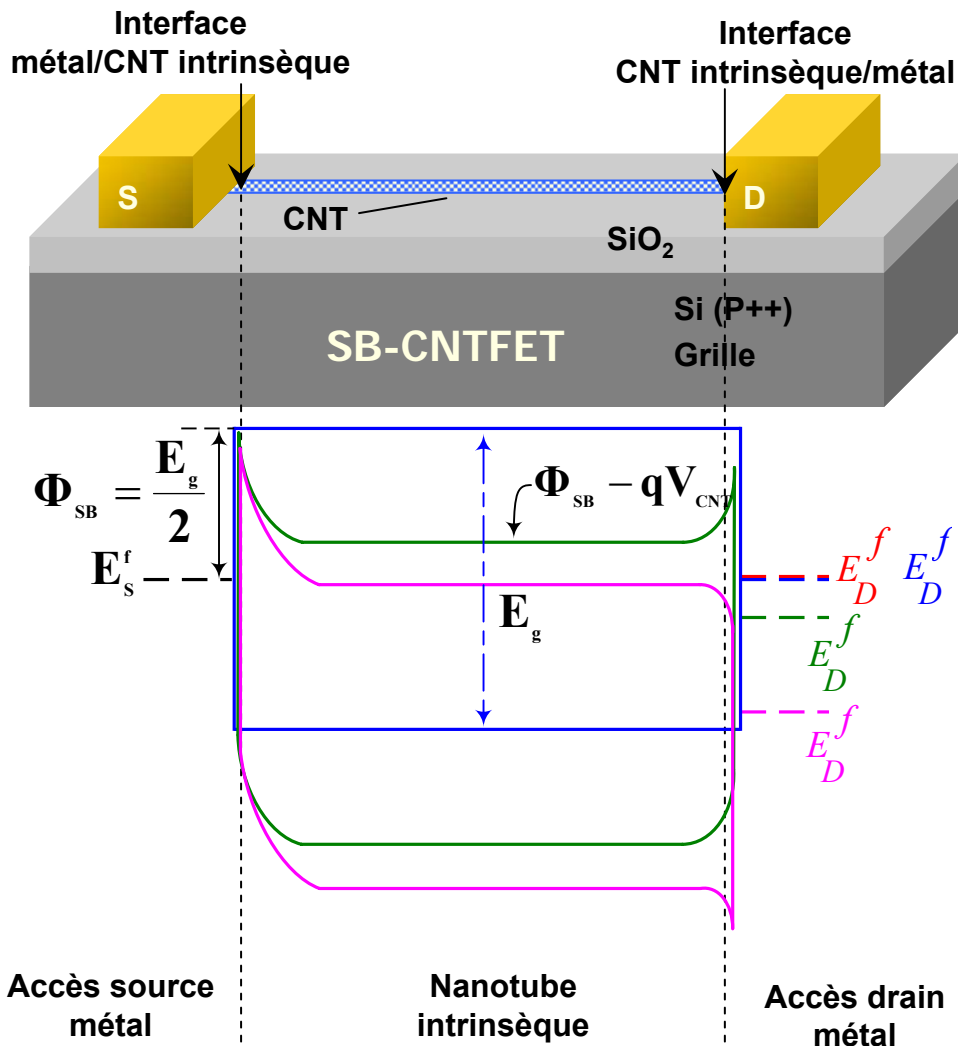
1- Cas du C-CNTFET : effet tunnel inter-bandes



Limitations des CNTFETs

□ Limitations intrinsèques : effet tunnel

2- Cas du SB-CNTFET : effet tunnel intra-bandes

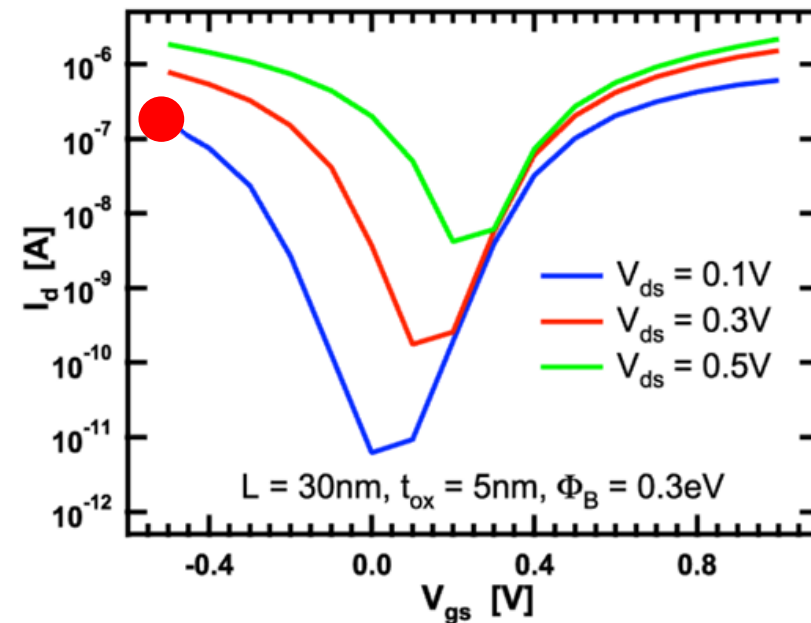
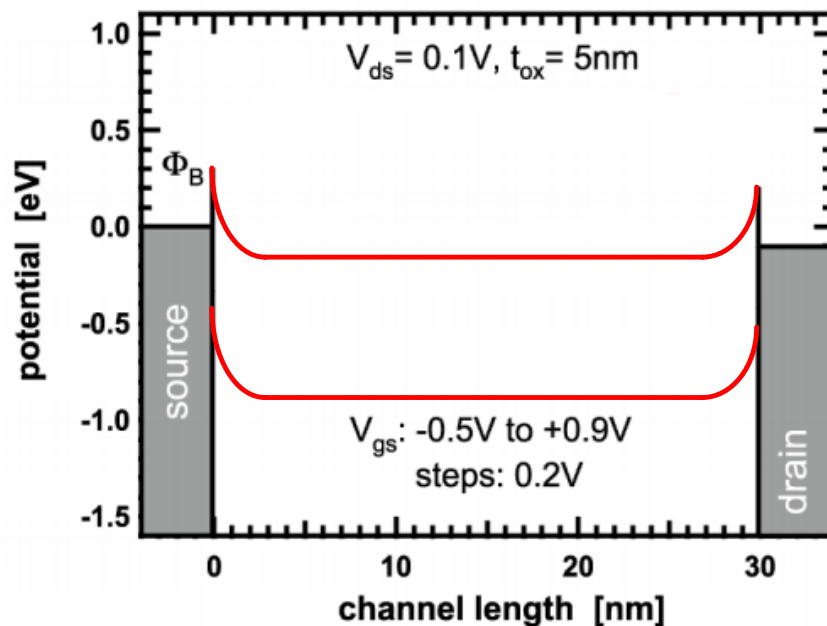


J. Knoch et al. PSS-a, (205) 2008

Plan de la Présentation

- 1 Le transistor à nanotube de carbone CNTFET
- 2 Modélisation compacte du SB-CNTFET
- 3 Applications aux circuits numériques
- 4 Conclusions & Perspectives

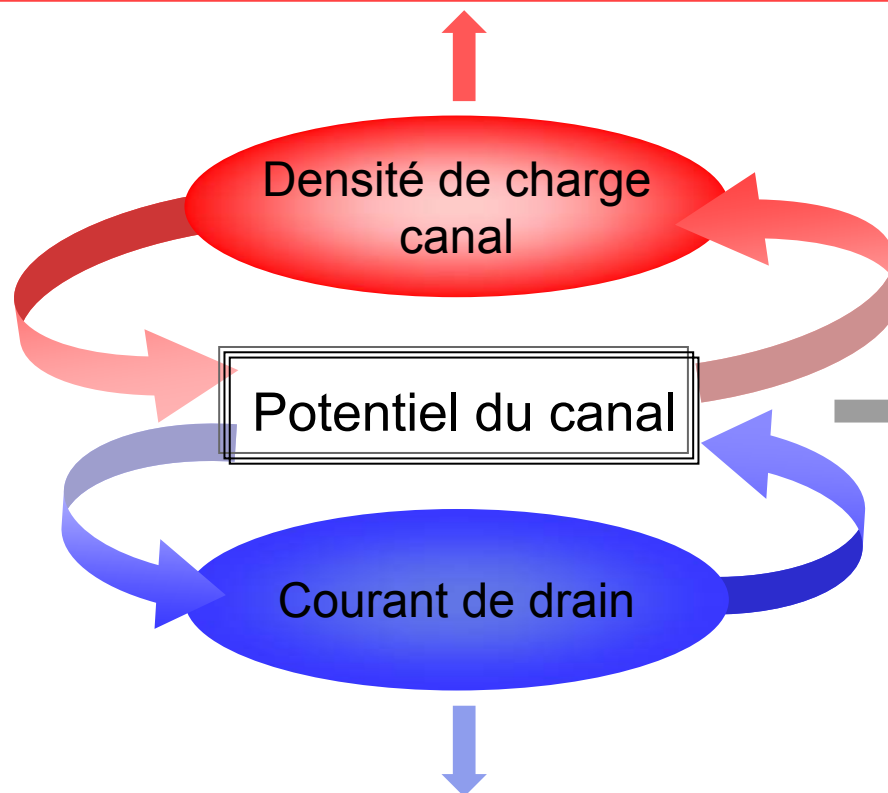
Commutation dans le SB-CNTFET



La commutation est assurée par la modulation des barrières Schottky source et drain.

Modèle numérique de base

$$Q = \frac{2Mq}{h} \sum_p \int_{sbbd[p]+X}^Y T_T(E) [f_S(E) + f_D(E)] D(E) dE$$



$$V_{CNT} \approx V_{GS} - \frac{Q}{C_{ox}}$$

$$I_D = \frac{4e}{h} \sum_p \int_{E_p}^{\infty} T_T(E) [f_S(E) - f_D(E)] dE$$

Fonction de transmission $T_T(E)$

□ Méthode Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB)

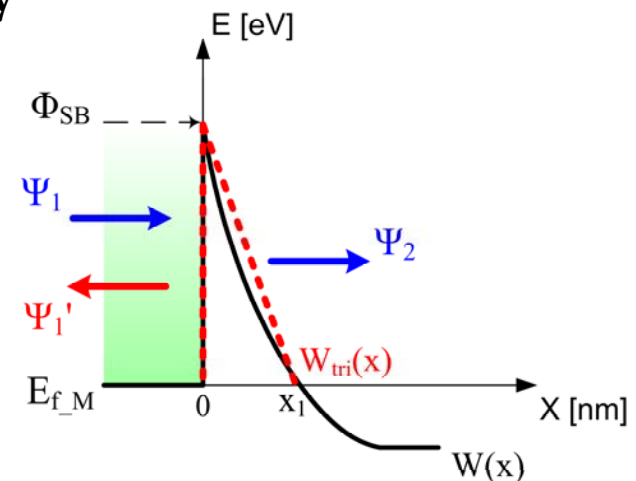
- Équation de Schrödinger indépendante du temps et unidimensionnelle

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + W(x) - E \right) \Psi(x) = 0$$

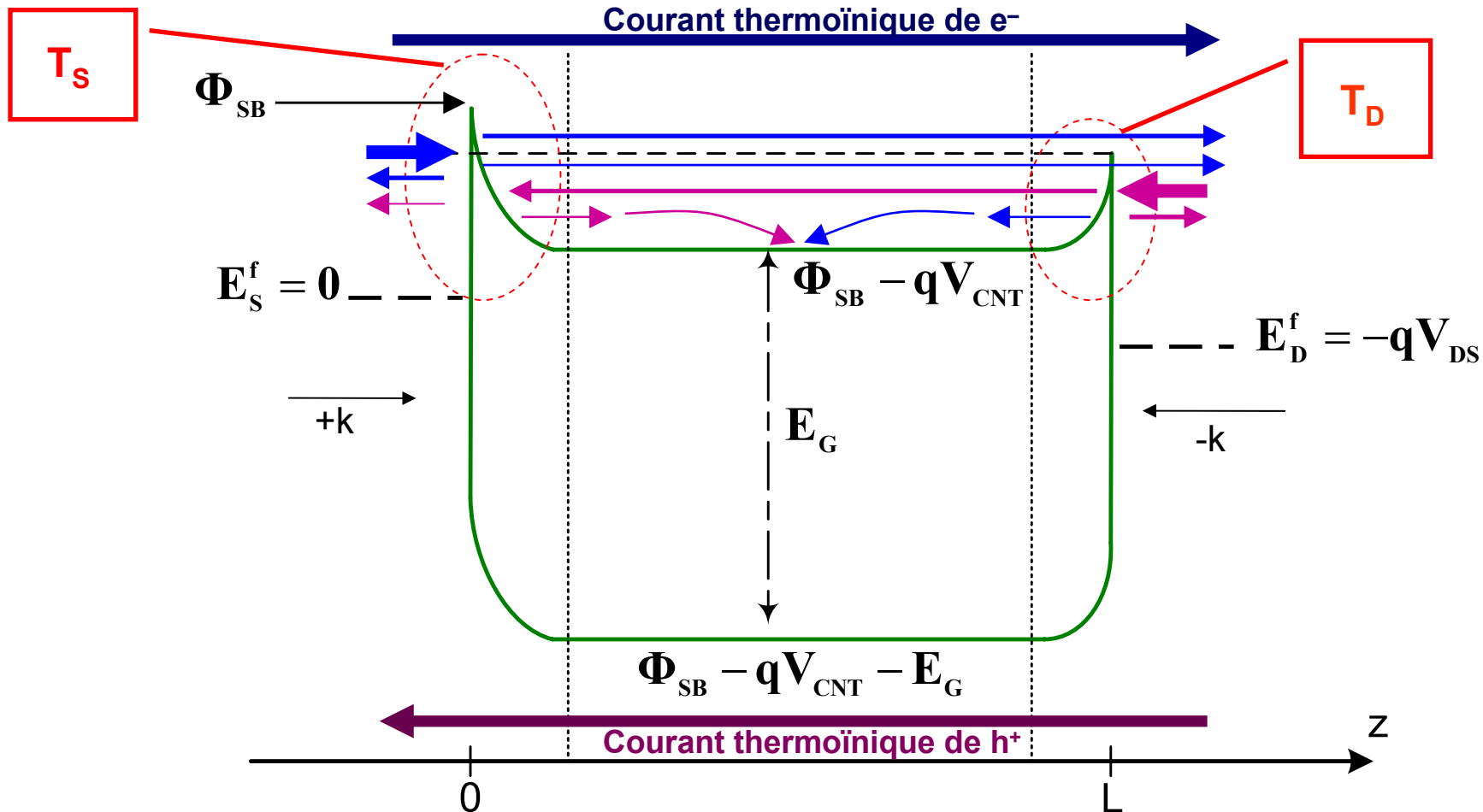
→ Fonction de transmission : $T(E) = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m^* (W(x) - E)} dx \right)$

- Approximation triangulaire de la barrière Schottky

$$T(E) = \exp\left(-4 \frac{\sqrt{2m^*}}{3\hbar q E_{\text{elec}}} (\Phi_{SB} - E)^{3/2} \right)$$



Fonction de transmission $T_T(E)$



$$T_T(E) = \frac{T_S(E) \cdot T_D(E)}{T_S(E) + T_D(E) - T_S(E) \cdot T_D(E)}$$

Fonction de transmission $T_T(E)$

Bias condition

$$\begin{aligned} V_{GS} &\neq 0 \ \& \ V_{DS} \neq 0 \\ V_{GS} &> V_{DS} \end{aligned}$$

$$I_{tunnel} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} (T_T(E) \cdot f_S(E) - T_T(E) \cdot f_D(E)) dE$$

Méthode WKB n'est alors plus adaptée dans le contexte d'un modèle compact !

Source Contribution

$$I_{tunnel_S} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} (T_T(E) f_S(E)) dE$$

Drain Contribution

$$I_{tunnel_D} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB} - qV_{DS}} (T_T(E) f_D(E)) dE$$

Low V_{GS}

High V_{GS}

Low V_{GS}

High V_{GS}

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} \text{Taylor} (T_{global}(E), E = 0, 1) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)} dE$$

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB} - qV_{DS}} \text{Taylor} (T_{global}(E), E = -qV_{DS}, 1) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)} dE$$

Low Energy

High Energy

Low Energy

High Energy

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\Delta_S} \text{Taylor} (T_{global}(E), E = \phi_{SB} - qV_{GS}, 4) dE$$

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\Delta_D} \text{Taylor} (T_{global}(E), E = \phi_{SB} - qV_{GS}, 4) dE$$

$$\int_{\Delta_D}^{\phi_{SB}} \text{Taylor} (T_{global}(E), E = -qV_{DS}, 1) \times \text{Taylor} (f_S(E), E = -qV_{DS}, 1) dE$$

Notion de barrière Schottky effective

- Equation de Poisson :

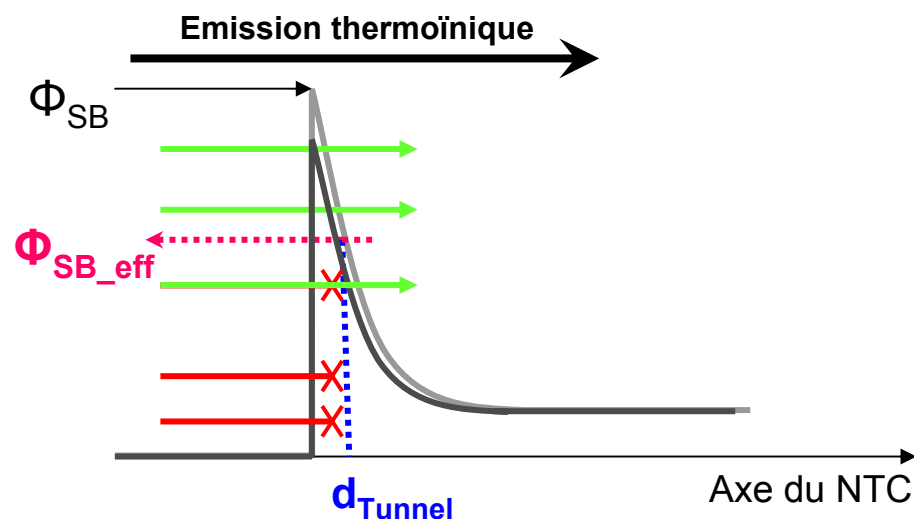
$$\frac{\partial^2 \Phi_f(x)}{\partial x^2} - \frac{\Phi_f(x) - \Phi_g - \Phi_{bi}}{\lambda^2} = -\frac{e(\rho \pm N)}{\epsilon_0 \epsilon_{nt}}$$

- Potentiel de canal :

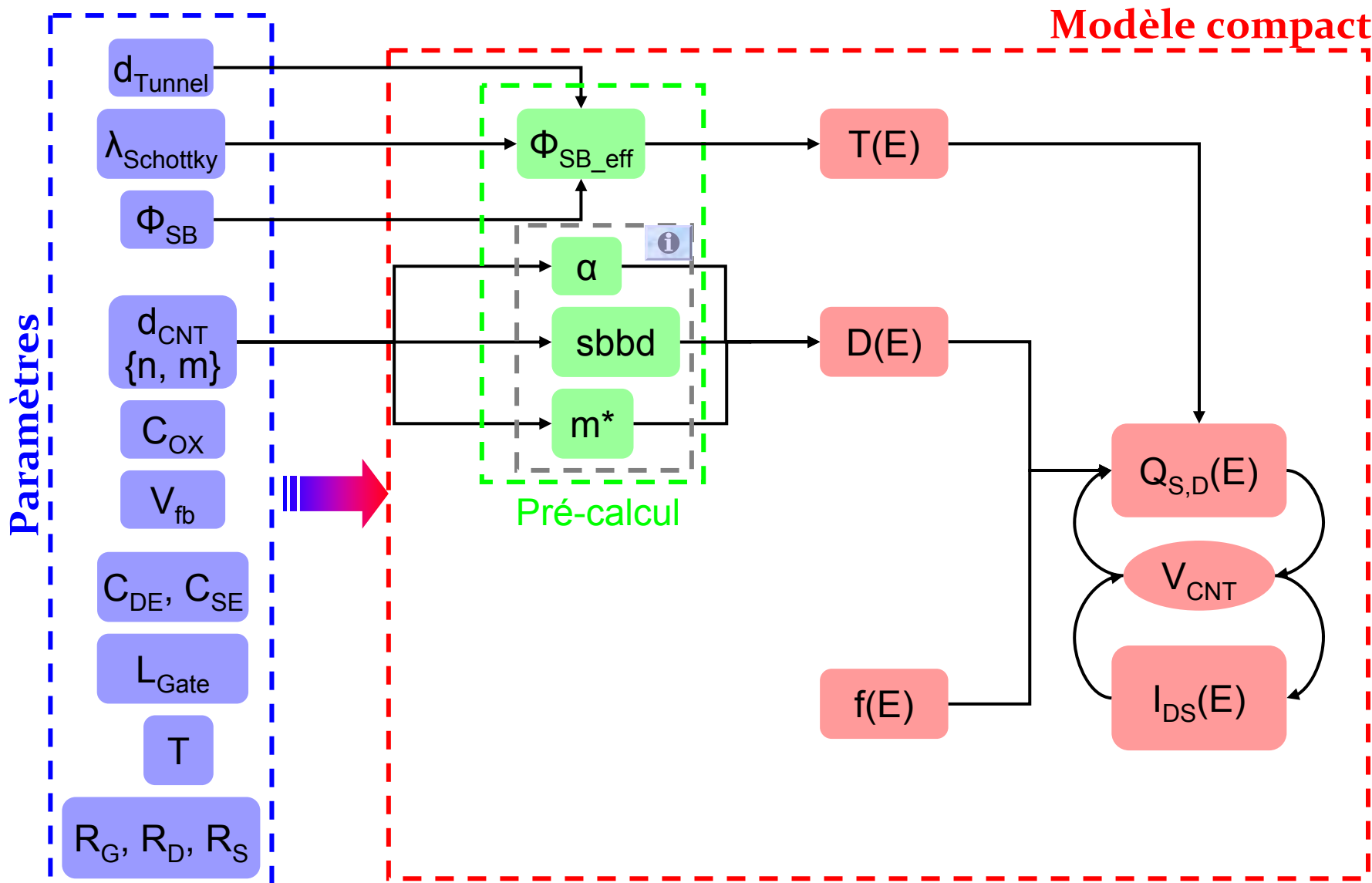
$$\Phi_f^0 \approx 2\sqrt{-\left(\Phi_{bi} + \Phi_g\right)\left(\Phi_d - \left(\Phi_{bi} + \Phi_g\right)\right)} \exp\left(-L/2\lambda\right) + \Phi_g - \Phi_{bi}$$

→ dans le cas des SB-CNTFETs :

$$\Phi_{SB_S,D}^{eff} = \left(\Phi_{SB} - \left(sbbd_{[p]} - eV_{CNT} + V_{S,D}\right)\right) \exp\left(-\frac{d_{tunnel}}{\lambda_{Schottky}}\right) + \left(sbbd_{[p]} - eV_{CNT} + V_{S,D}\right)$$



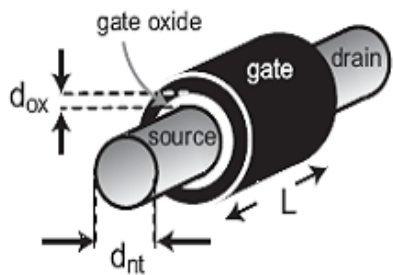
Le modèle compact



Longueur caractéristique de la barrière Schottky : $\lambda_{Schottky}$

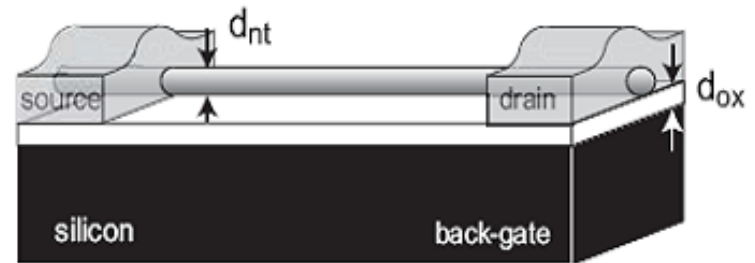
 $\lambda_{Schottky}$

Configuration coaxiale



$$\lambda_{Schottky} = \sqrt{\varepsilon_{nt} d_{nt}^2 \ln \left(1 + \left(2 \frac{d_{ox}}{d_{nt}} \right) \right) / (8 \varepsilon_{OX})}$$

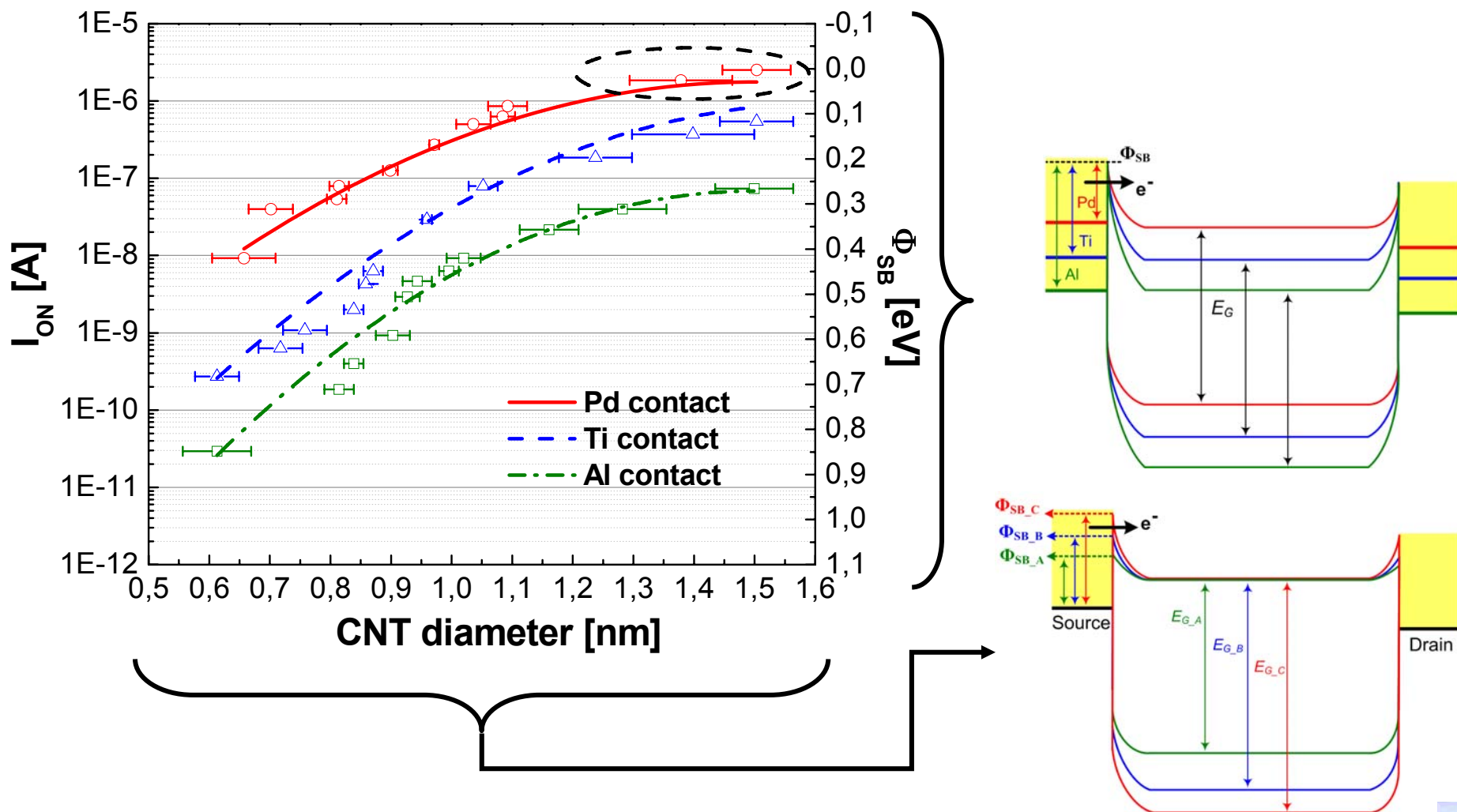
Configuration plan



$$\lambda_{Schottky} = \sqrt{(\varepsilon_{nt} / \varepsilon_{OX}) d_{nt} d_{OX}}$$



Hauteur de barrière Schottky initiale : Φ_{SB}



Modèle numérique de G. Pennington : $\text{sbbd}_{[p]}$, $m^*_{[p]}$, $\alpha_{[p]}$

❖ Bas de sous bande d'énergie $\text{sbbd}_{[p]}$

$$\text{sbbd}_{[1]}(n) = \frac{\pi\gamma}{\sqrt{3n}},$$

$$\text{sbbd}_{[2]}(n) = 2\text{sbbd}_{[1]}(n) \left(1 + \frac{\text{gcd}(n+1;3) - \text{gcd}(n-1;3)}{3n} \right)$$

$$\text{sbbd}_{[3]}(n) = 4\text{sbbd}_{[1]}(n) \left(1 + \frac{2\text{gcd}(n+1;3) - 3\text{gcd}(n-1;3)}{4n} \right)$$

❖ Masse effective $m^*_{[p]}$

$$m^*_{[1]}(n) = \frac{3m_e}{n\gamma} \left(1 - 0,0044n + \frac{\text{gcd}(n+1;3) - \text{gcd}(n-1;3)}{n} \right),$$

$$m^*_{[2]}(n) = m^*_{[1]}(n) \left(\frac{m^*_{[2]}(n)}{m^*_{[1]}(n)} + \frac{5}{n} \left[\frac{m^*_{[2]}(n)}{m^*_{[1]}(n)} [\text{gcd}(n-1;3) - 1] - [\text{gcd}(n+1;3) - 1] \right] \right)$$

$$m^*_{[3]}(n) = m^*_{[1]}(n) \left(\frac{m^*_{[3]}(n)}{m^*_{[1]}(n)} + \frac{5}{n} \left[\frac{m^*_{[3]}(n)}{m^*_{[1]}(n)} [\text{gcd}(n-1;3) - 1] - [\text{gcd}(n+1;3) - 1] \right] \right)$$

❖ Facteur de non-parabolicité $\alpha_{[p]}$

$$\alpha_{[1]}(n) = \frac{3}{2\gamma} (0,3n - 1)$$

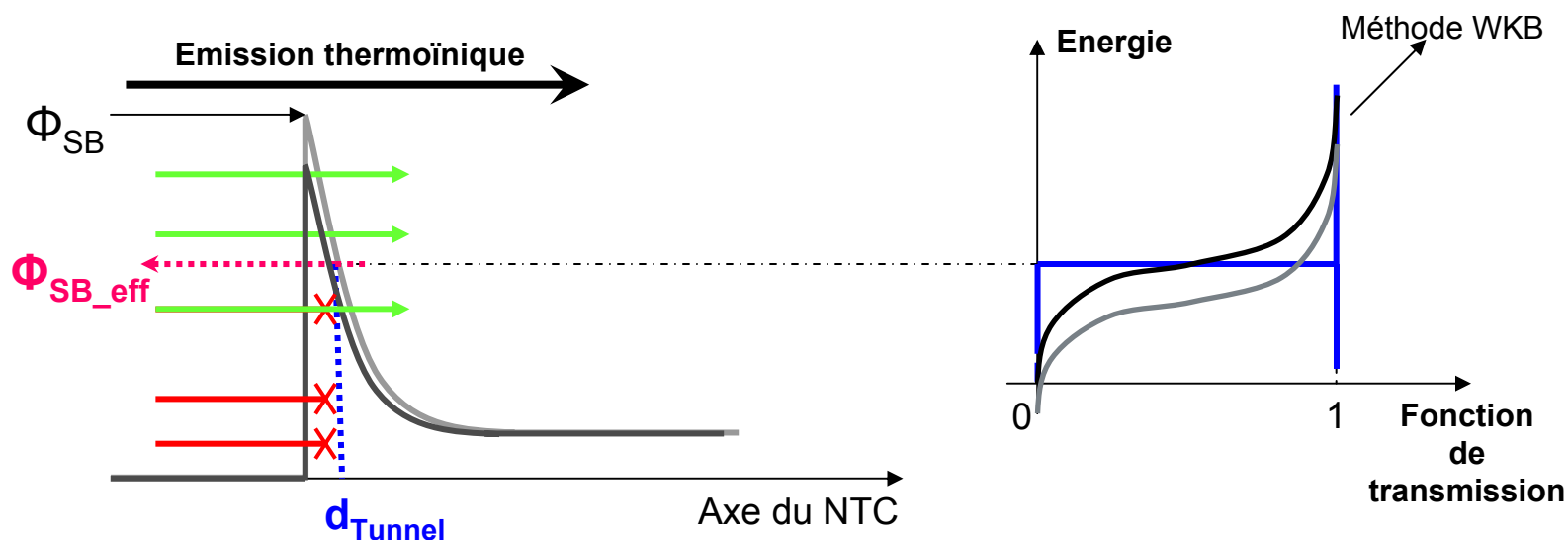
$$\alpha_{[2]}(n) = \frac{3}{2\gamma} (0,3n - 1)$$

$$\alpha_{[2]}(n) = \frac{3n^2}{300\gamma}$$



Fonction de transmission : $T(E)$

$$\Phi_{SB_{S,D}}^{eff} = \left(\Phi_{SB} - (sbbd_{[p]} - eV_{CNT} + V_{S,D}) \right) \exp\left(-\frac{d_{tunnel}}{\lambda_{Schottky}} \right) + (sbbd_{[p]} - eV_{CNT} + V_{S,D})$$

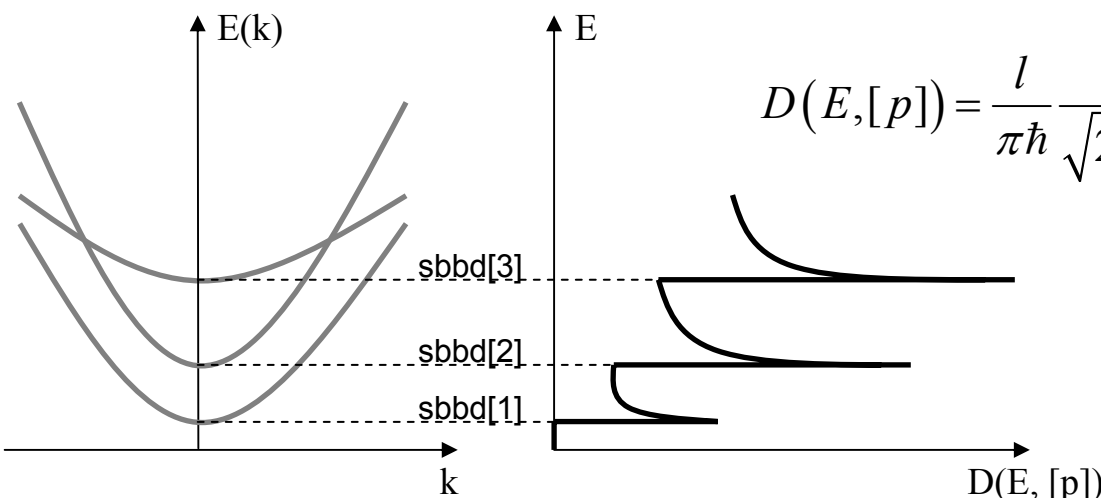


Densité d'états des porteurs : $D(E)$

Relation de dispersion d'énergie :

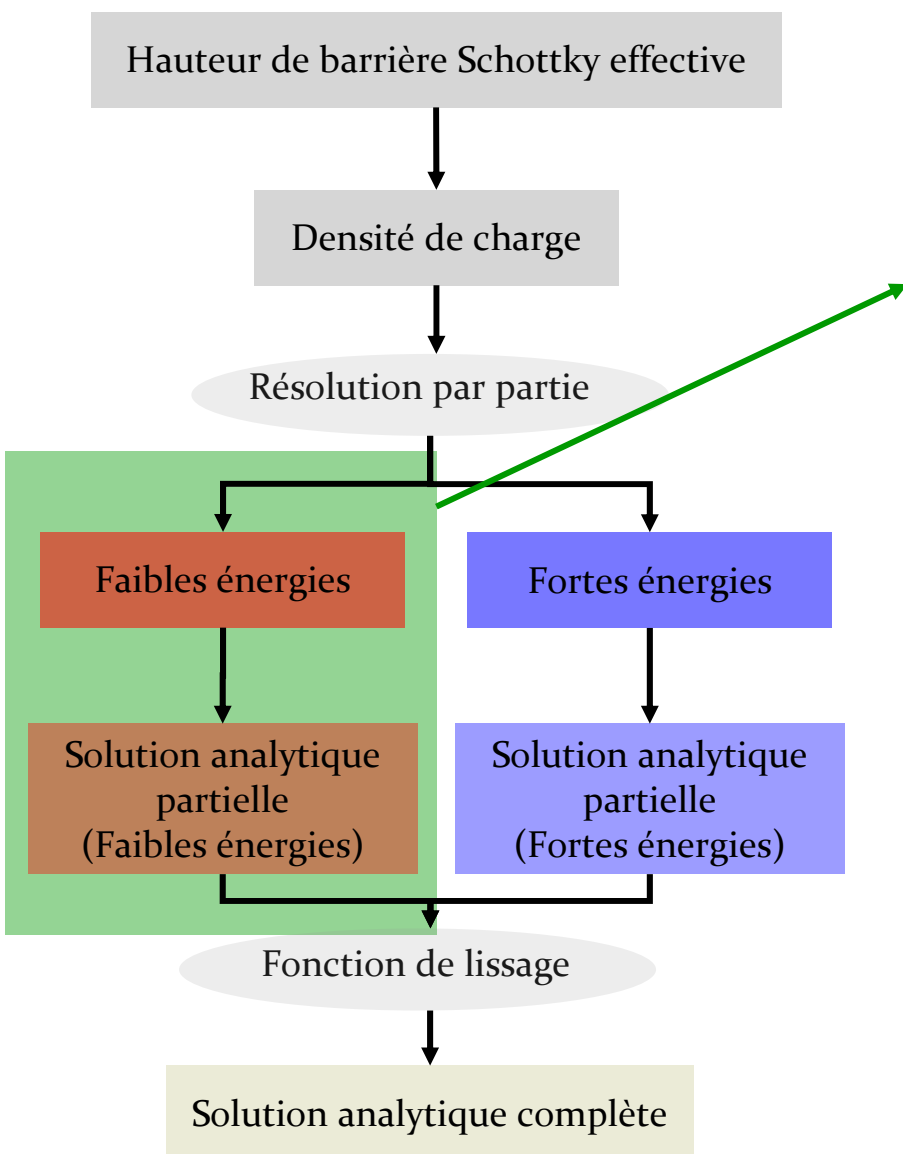
$$(E - sbbd[p]) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*[p]}$$

$$(E - sbbd[p])(1 + \alpha[p](E - sbbd[p])) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*[p]}$$



$$D(E, [p]) = \frac{l}{\pi \hbar} \frac{\sqrt{m[p]^*} (1 + 2\alpha[p](E - sbbd[p]))}{\sqrt{2(E - sbbd[p])(1 + \alpha[p](E - sbbd[p]))}}$$

Formulation analytique de la densité de charge



Faibles énergies (de v_{BL} à Δ)

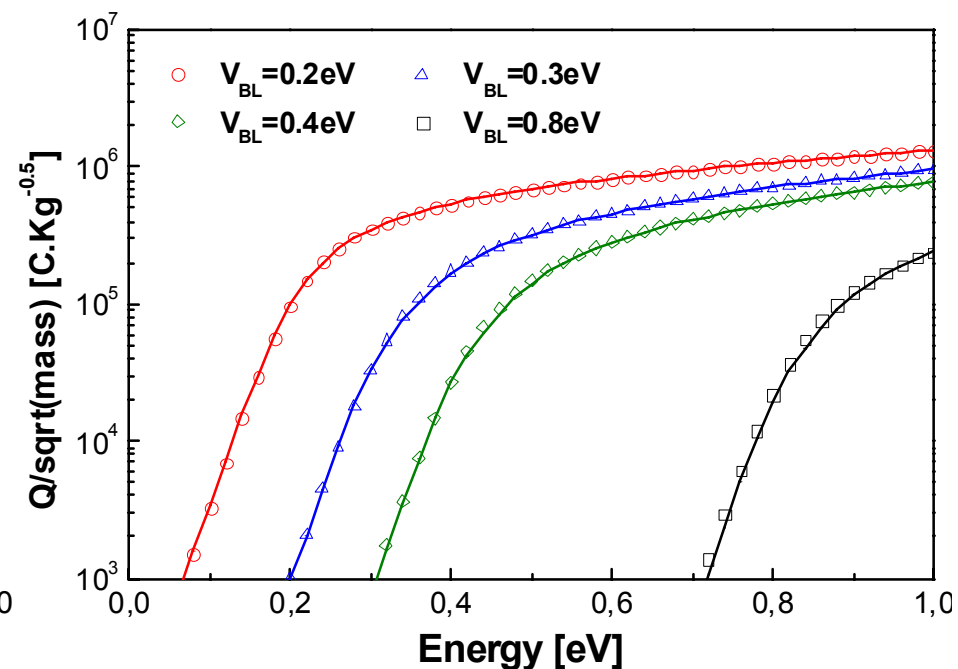
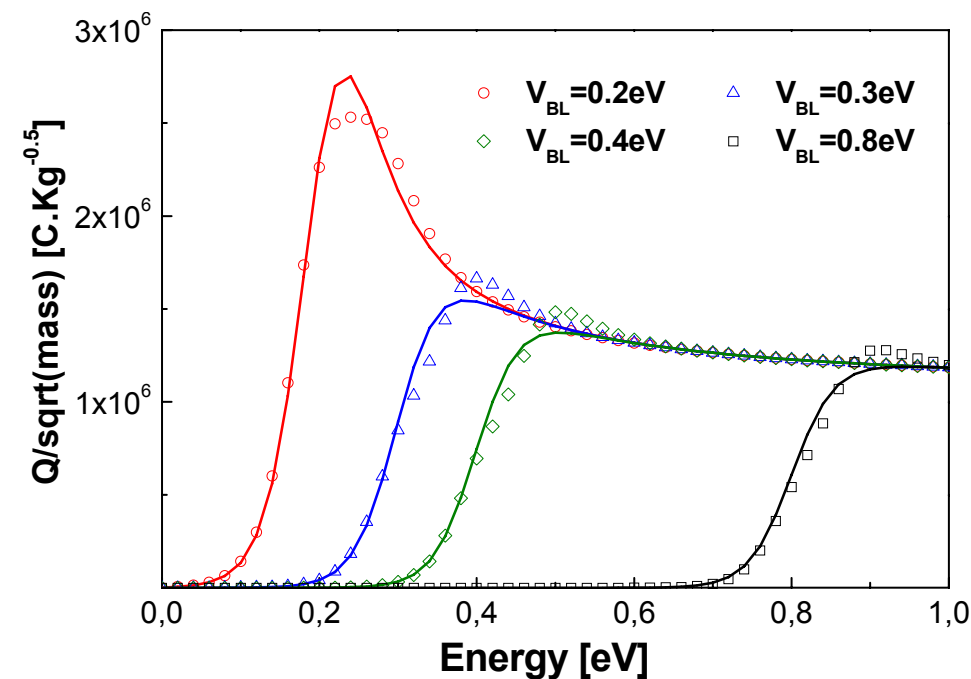
Distribution de Fermi $f(E)$

$$f(E) \approx b'_0 + b_1(E - V_{BL})$$

Densité d'états $D(E)$

$$D(E) = \frac{l}{\pi \hbar} \frac{\sqrt{m[p]^*} (1 + 2\alpha[p](E - sbbd[p]))}{\sqrt{(E - sbbd[p])(1 + \alpha[p](E - sbbd[p]))}}$$

Formulation analytique de la densité de charge



— Résultats analytiques
 \circ Résultats numériques

➔ Approche validée



Formulation du courant de drain

Equation de "Landauer" (canal 1D et transport balistique):

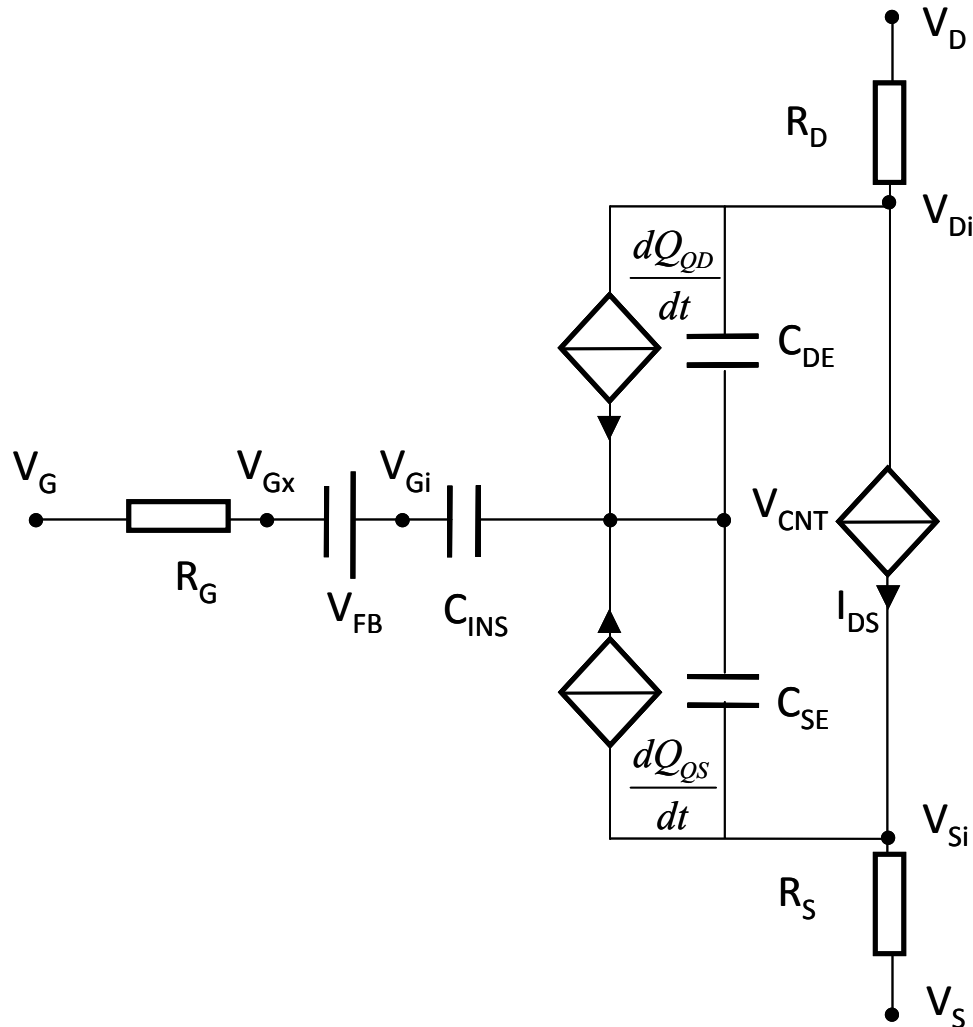
$$I_{DS} = \frac{2e}{h} M \sum_{p=1}^{nb} \sum_{bands} \left[\int_{\Phi_{SB}^{eff}}^{\infty} f_S(E) dE - \int_{\Phi_{SB}^{eff}}^{\infty} f_D(E) dE \right]$$

$$I_{DS} = \frac{4e}{h} \sum_{p=1}^{nb} \sum_{sbbd} \left[\int_{\Phi_{SB}^{eff}}^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - e(V_{CNT} - V_S)}{k_B T}\right)} dE - \int_{\Phi_{SB}^{eff}}^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - e(V_{CNT} - V_D)}{k_B T}\right)} dE \right]$$

☞ Forme intégrable $\int \frac{dE}{1 + b \exp \frac{E}{k_B T}} = k_B T \left[\frac{E}{k_B T} - \ln \left(1 + b \exp \frac{E}{k_B T} \right) \right] = k_B T \left[-\ln \left(\exp \frac{-E}{k_B T} + b \right) \right]$

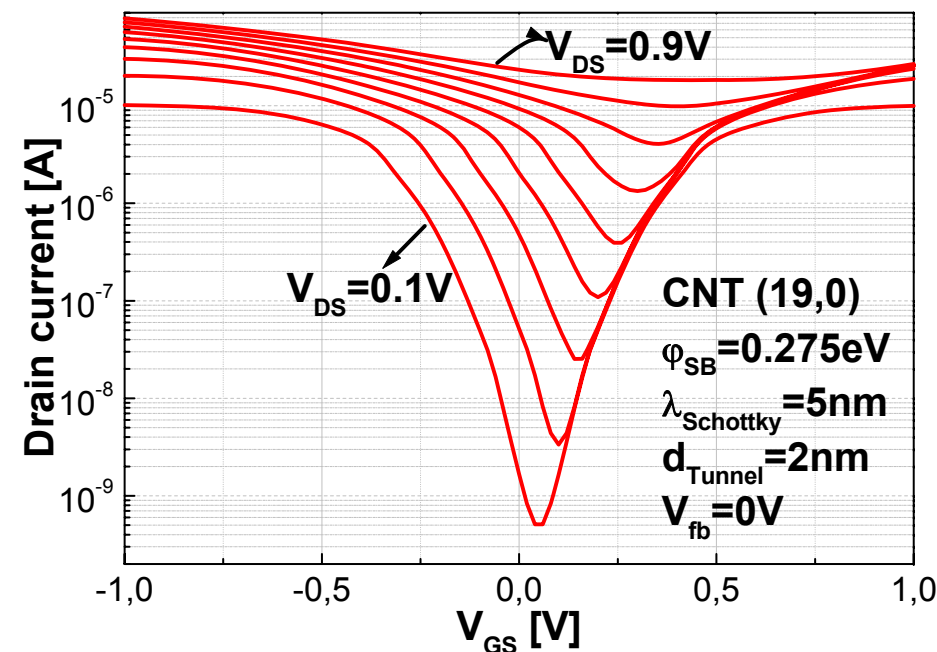
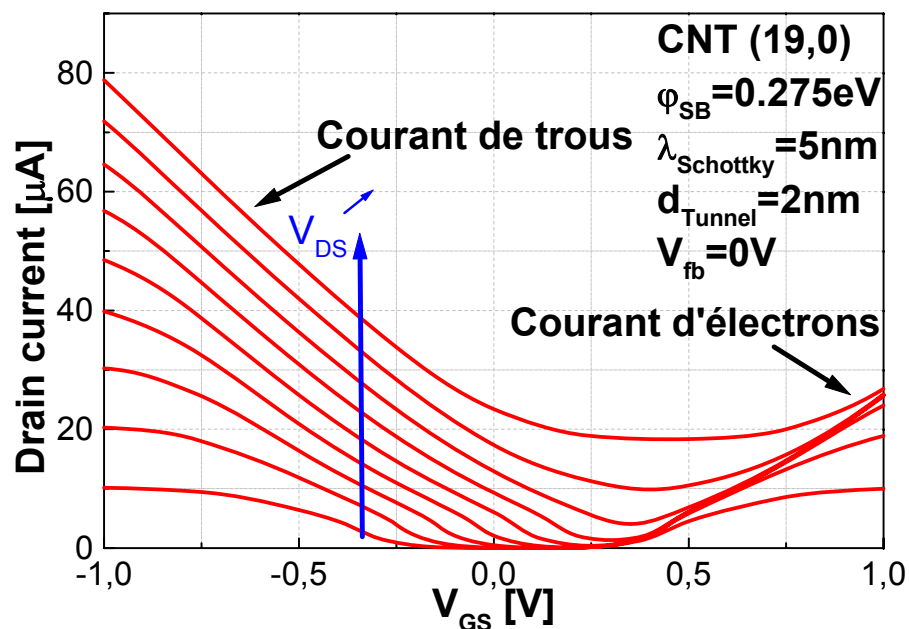
$$I = \frac{4ek_B T}{h} \sum_{p=1}^{nb} \sum_{sbbd} \left[\ln \left(1 + \exp \frac{eV_S + \Phi_{SB_S}^{eff} - sbbd_{[p]}}{k_B T} \right) - \ln \left(1 + \exp \frac{eV_D + \Phi_{SB_D}^{eff} - sbbd_{[p]}}{k_B T} \right) \right]$$

Le circuit électrique équivalent



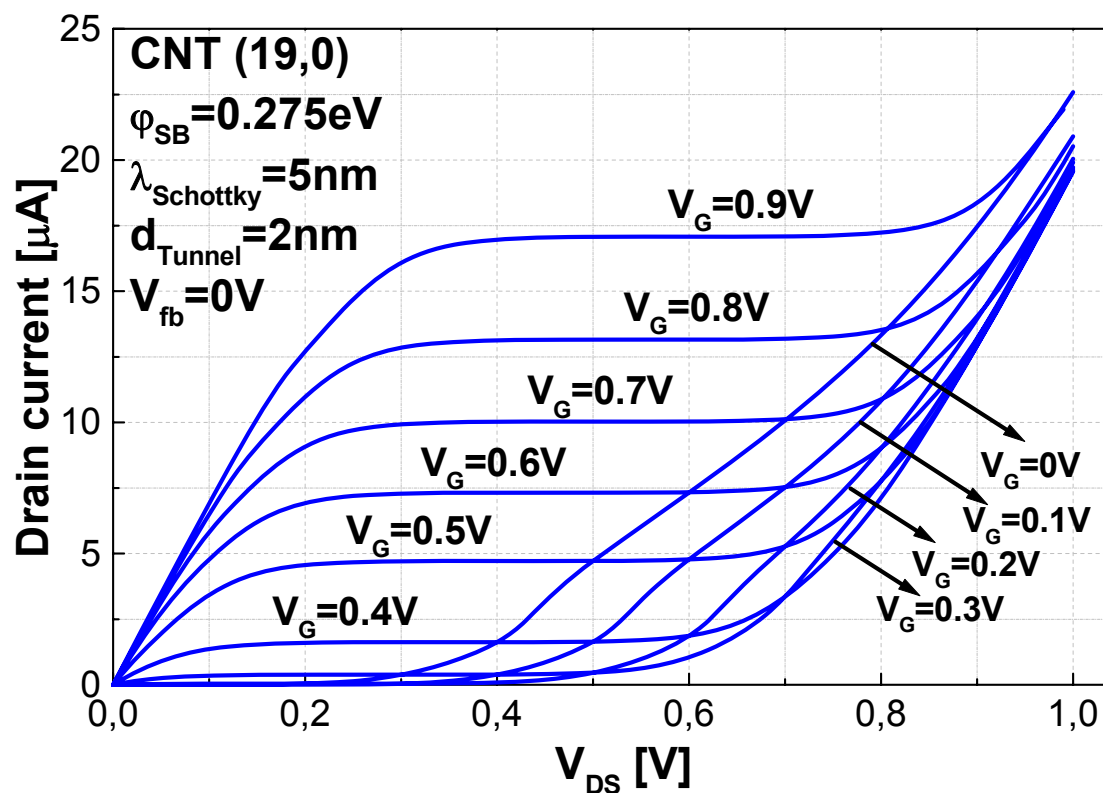
Caractéristiques courant – Tension

$$I_{DS} = f(V_{GS})$$



Caractéristiques courant – Tension

$$I_{DS} = f(V_{DS})$$

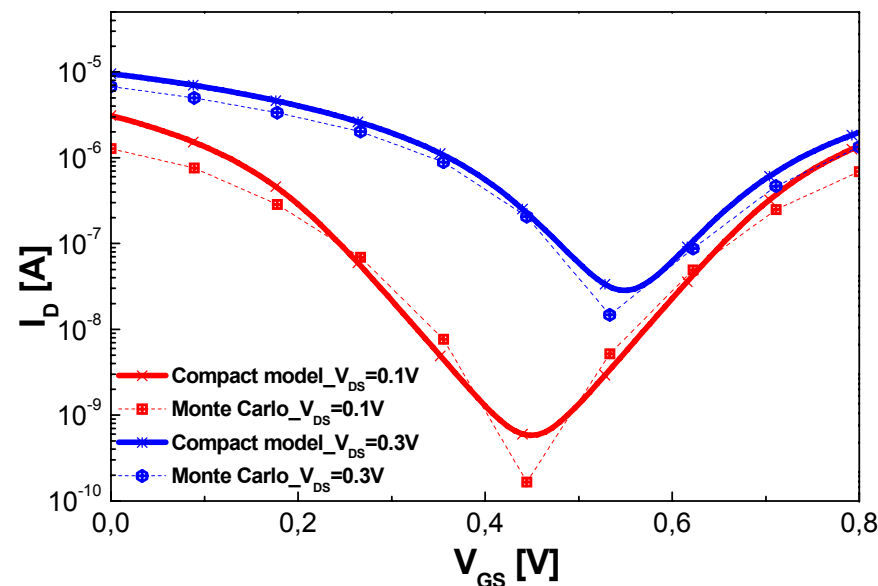
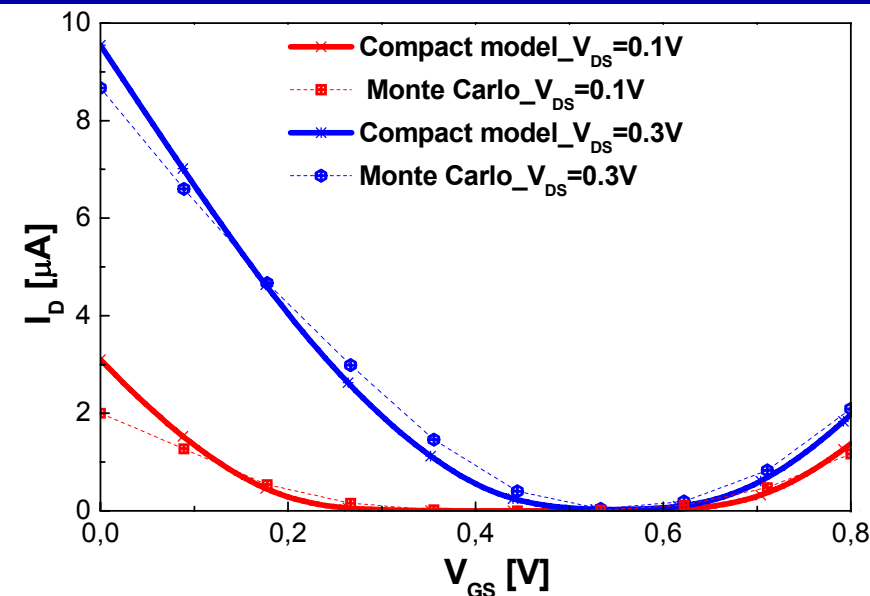


Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Param.	Réf.	Modèle compact	Monte-Carlo
Chiralité (n,m) & diamètre		(19, 0) 1.48 nm	(19, 0)
$\lambda_{\text{Schottky}}$		2 nm	--
d_{Tunnel}		4.125 nm	--
Φ_{SB}		275 meV	275 meV
L_{gate}		100 nm	100 nm
V_{fb}		398 mV	--
C_{INS}		79 pF/m	79 pF/m
$R_G/R_S/R_D$		0 Ω	0 Ω
C_{DE}		0	0
C_{SE}		0	0

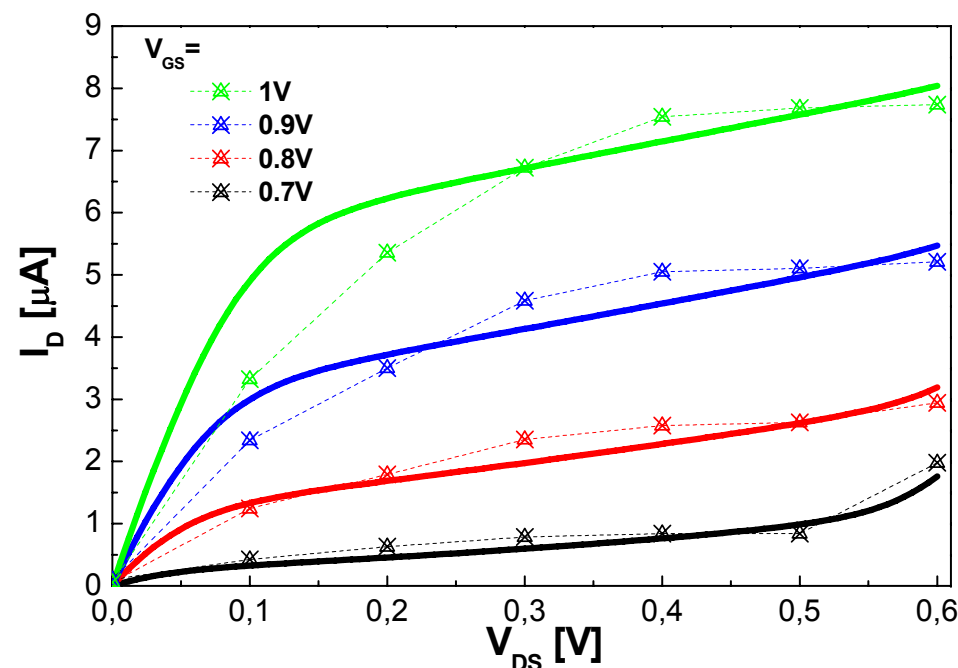
Simulation Monte-Carlo
rés. statique de éq. Boltzman couplée
avec éq. Poisson.

source : (IEF-Orsay)



Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Param. \ Réf.	Modèle compact	Monte-Carlo
Chiralité (n,m) & diamètre	(19, 0) 1.48 nm	(19, 0)
$\lambda_{\text{Schottky}}$	2 nm	--
d_{Tunnel}	4.125 nm	--
Φ_{SB}	275 meV	275 meV
L_{gate}	100 nm	100 nm
V_{fb}	398 mV	--
C_{INS}	79 pF/m	79 pF/m
$R_G/R_S/R_D$	0 Ω	0 Ω
C_{DE}	0	0
C_{SE}	0	0



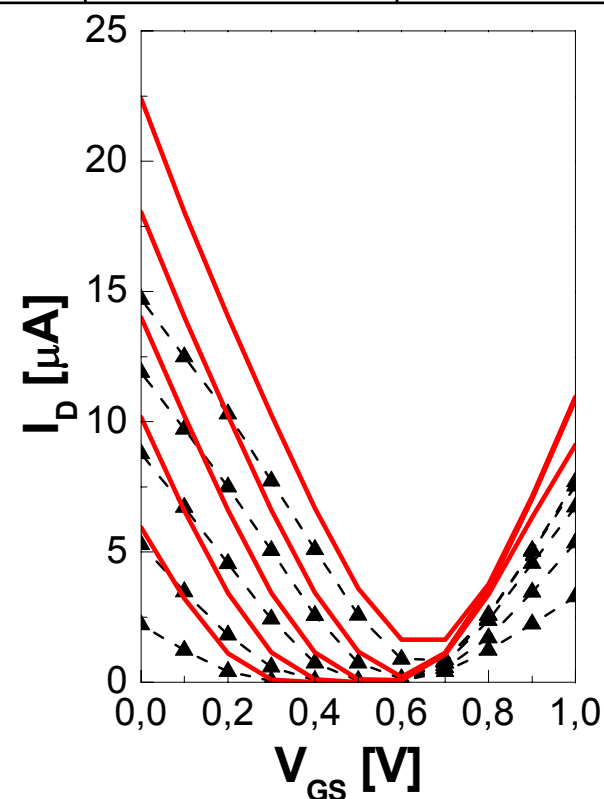
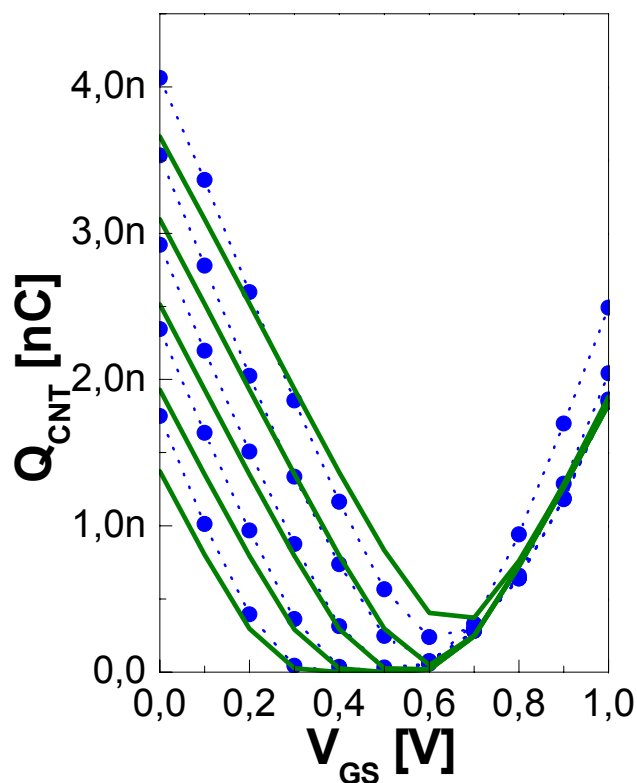
Simulation Monte-Carlo
rés. statique de éq. Boltzman couplée
avec éq. Poisson.

Source : (IEF-Orsay)

Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Comparaison avec différentes configurations de transistor SB-CNTFET

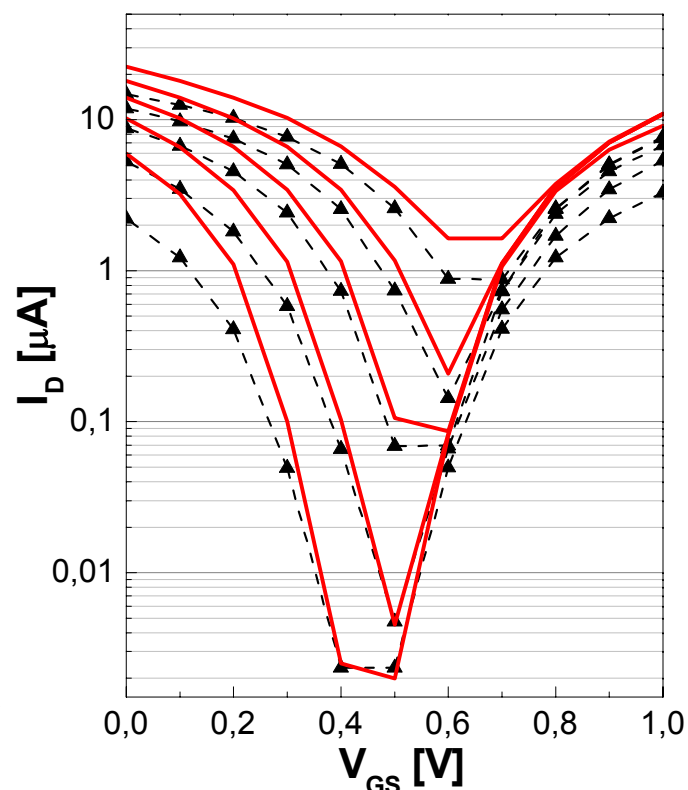
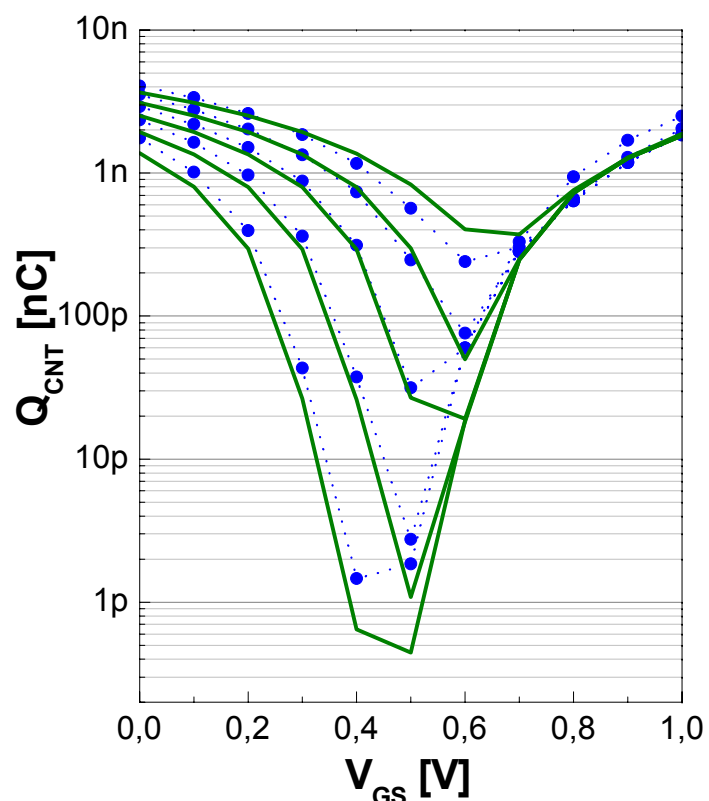
Configurations	I	II	III	IV
Φ_{SB}	275meV	100meV	1meV	275meV
L_{gate}	100nm	100nm	100nm	25nm



Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Comparaison avec différentes configurations de transistor SB-CNTFET

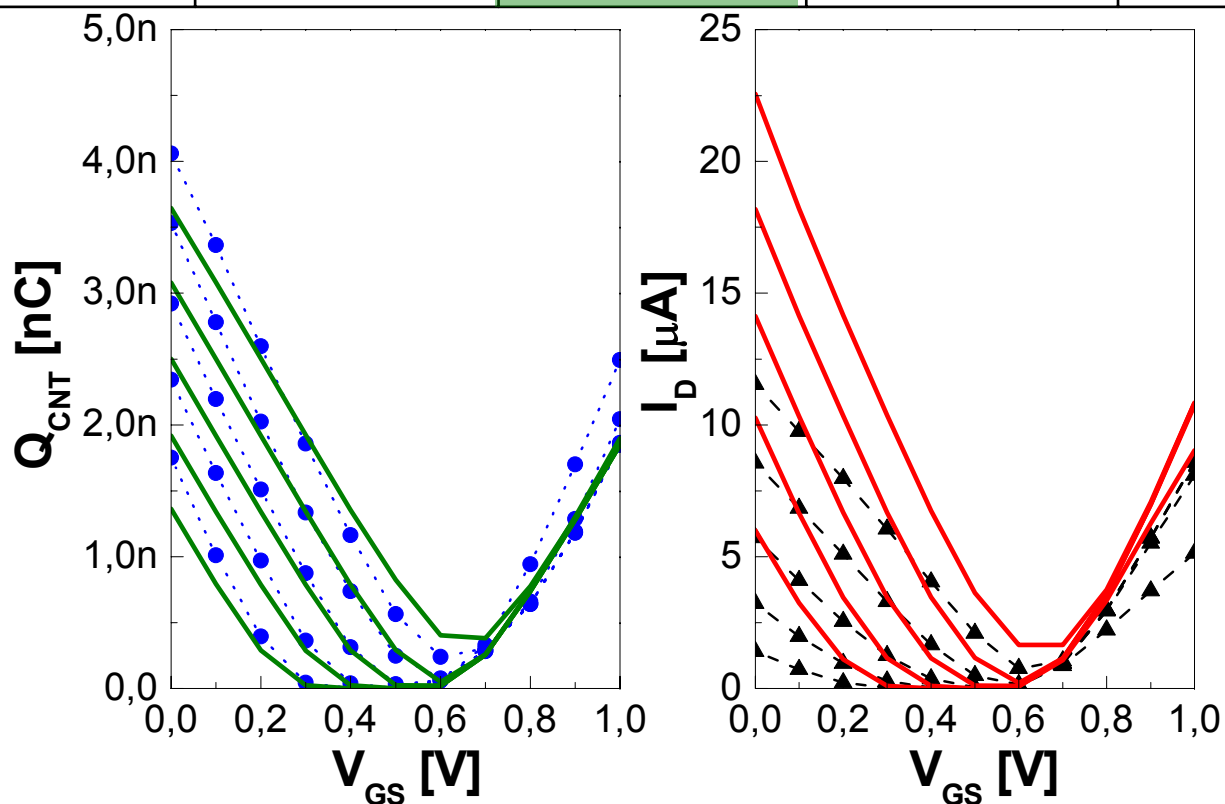
Configurations	I	II	III	IV
Φ_{SB}	275meV	100meV	1meV	275meV
L_{gate}	100nm	100nm	100nm	25nm



Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Comparaison avec différentes configurations de transistor SB-CNTFET

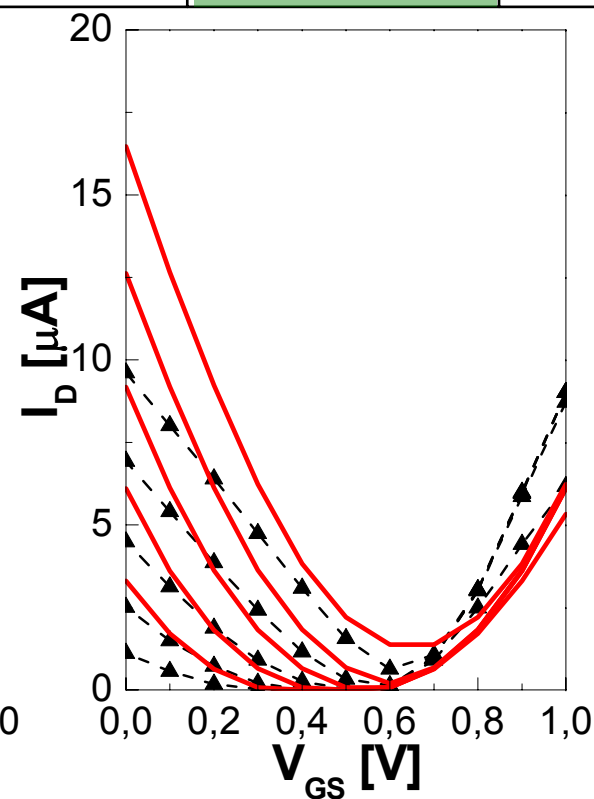
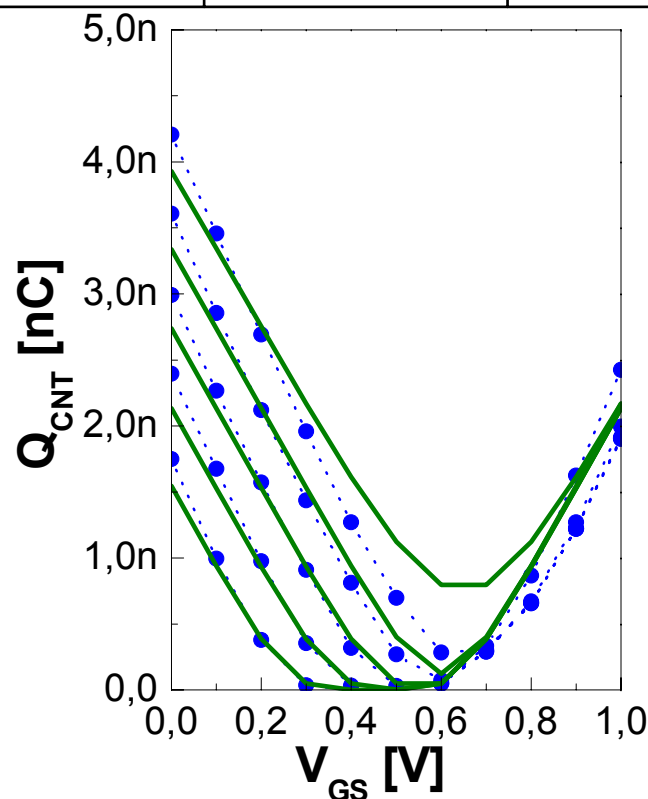
Configurations	I	II	III	IV
Φ_{SB}	275meV	100meV	1meV	275meV
L_{gate}	100nm	100nm	100nm	25nm



Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

Comparaison avec différentes configurations de transistor SB-CNTFET

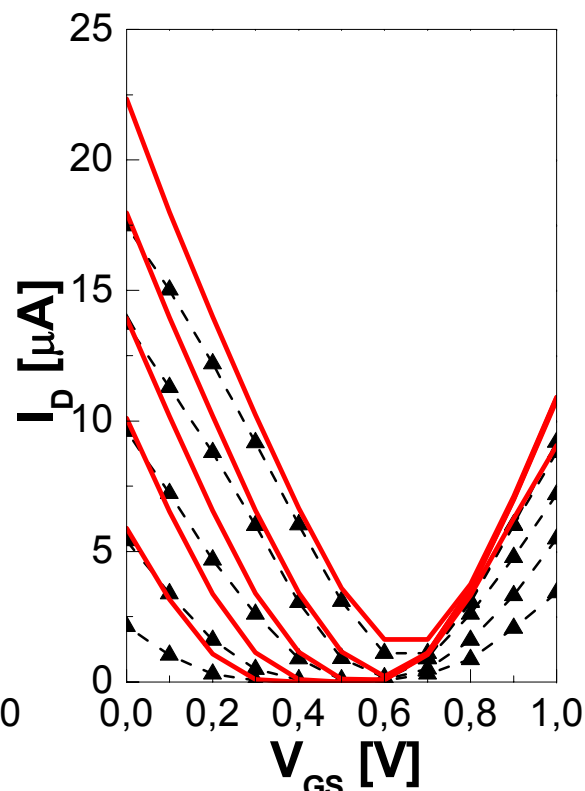
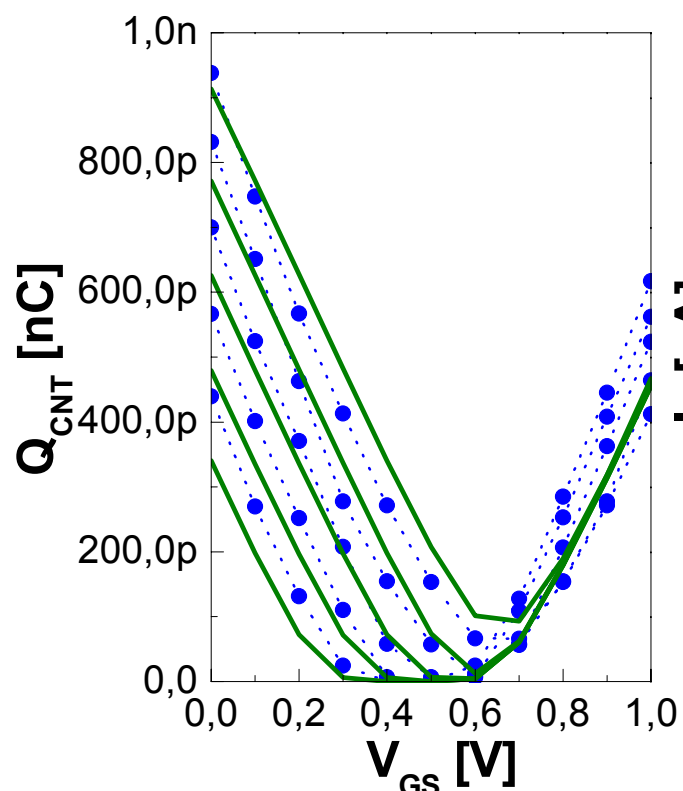
Configurations	I	II	III	IV
Φ_{SB}	275meV	100meV	1meV	275meV
L_{gate}	100nm	100nm	100nm	25nm



Comparaison avec sim. Monte-Carlo (M.C)

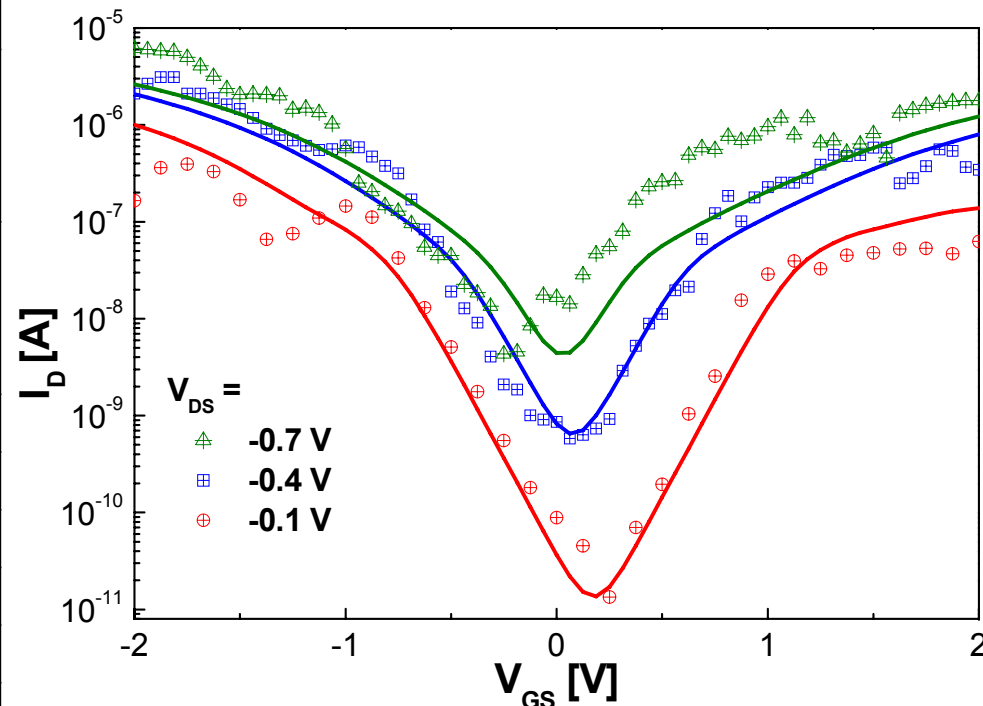
Comparaison avec différentes configurations de transistor SB-CNTFET

Configurations	I	II	III	IV
Φ_{SB}	275meV	100meV	1meV	275meV
L_{gate}	100nm	100nm	100nm	25nm



Comparaison avec les données expérimentales

Référence / Paramètres	Compact model	Données expérimentales
chiralité//diamètre	(14,0) // 1.09 nm	-- / 1.1 nm
Métal / Φ_{SB}	110 meV (Val. théorique) 114.3 meV (Val. utilisée)	Contact en Ti
t_{ox} and ϵ_r // C_{INS}	-- // 64.49 pF/m (Val. théorique) -- // 72.72 pF/m (Val. utilisée)	10 nm and 3.9// --
L_{gate}	300 nm	300 nm
d_{Tunnel}	2.7 nm	---
$\lambda_{Schottky}$	5.8 nm	---
V_{fb}	224 mV	---
R_S	13.72 k Ω	---
R_D	73.61 k Ω	---
C_{DE}	34.51 aF/m	---
C_{SE}	33.73 aF/m	---



Etude d'influence des paramètres du modèle

Etude d'influence des paramètres matériaux et géométriques :

- hauteur de la barrière Schottky (Φ_{SB}),
- diamètre du nanotube (d_{CNT}),
- capacité de la couche d'oxyde (C_{INS}).

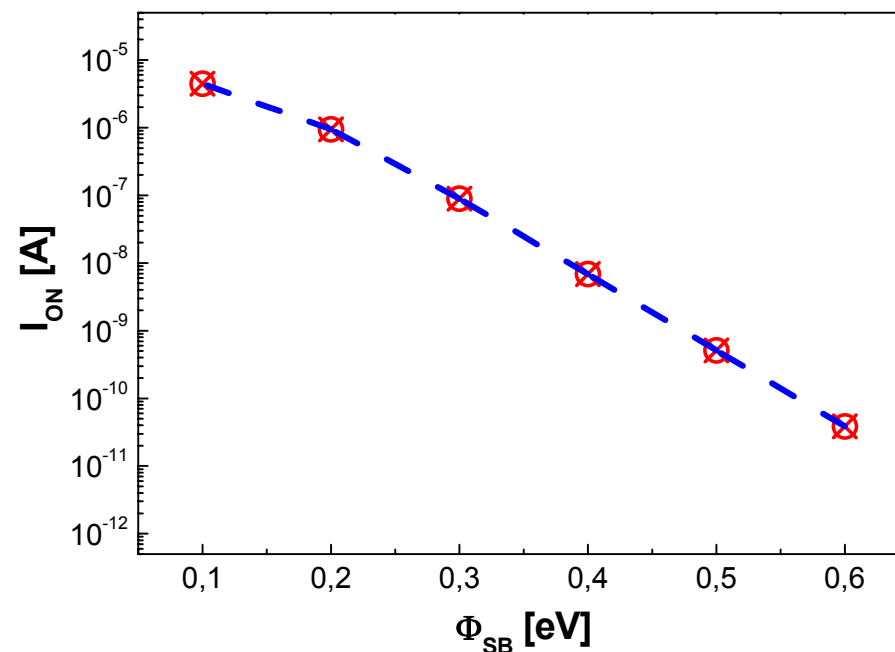
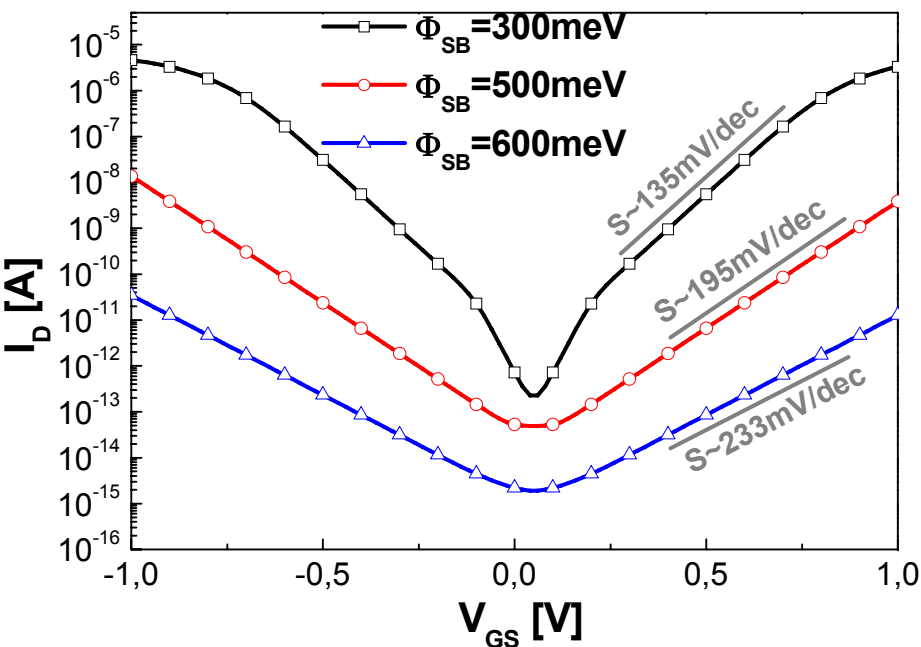
sur les performances du SB-CNTFET :

- statiques (I_{on}/I_{off})
- dynamique (fréquence de transition f_T)

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances statiques

Hauteur de la barrière Schottky (Φ_{SB})

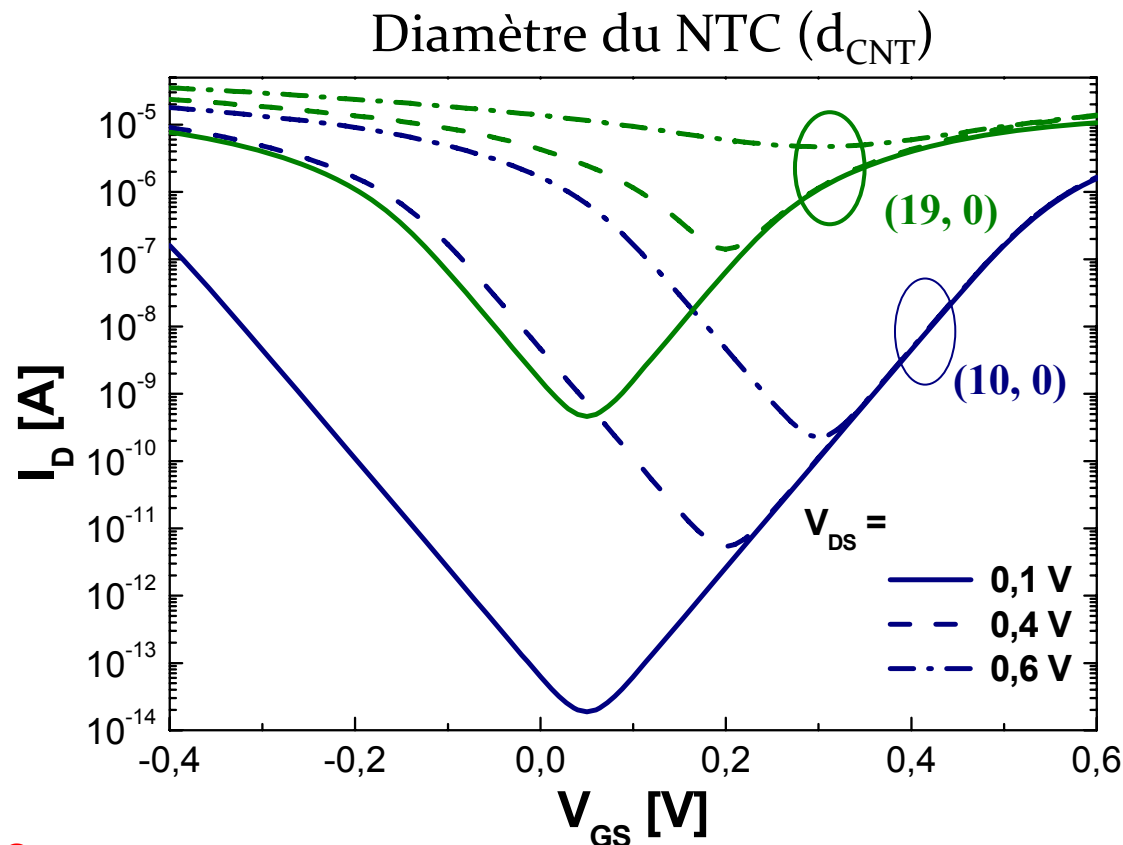


Conclusion 1:

Le courant I_{on} se dégrade exponentiellement lorsque la hauteur de la barrière Schottky est plus élevée.

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances statiques



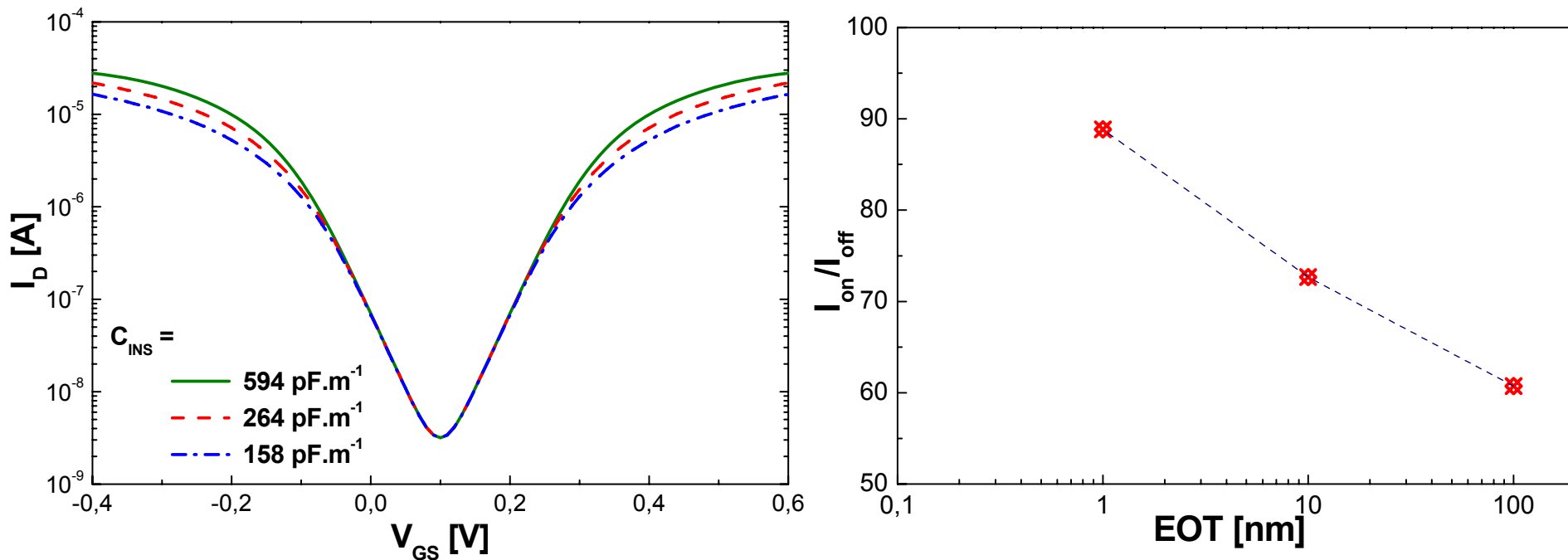
Conclusion 2 :

Le courant I_{off} croit avec les plus grands diamètres c.-à-d. les plus faibles gaps.

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances statiques

Capacité de l'oxyde (C_{INS})



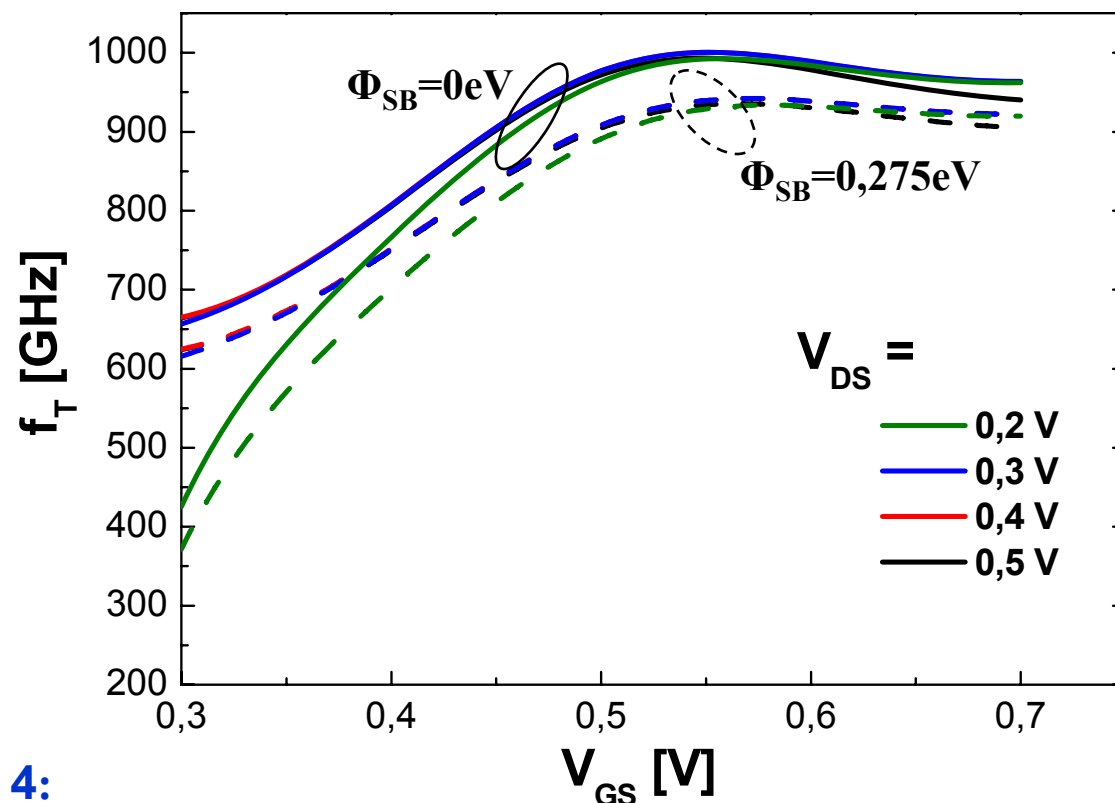
Conclusion 3 :

Une amélioration de la commande de la grille est observée pour les plus faibles EOT

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances dynamiques

Hauteur de la barrière Schottky (Φ_{SB})



Conclusion 4:

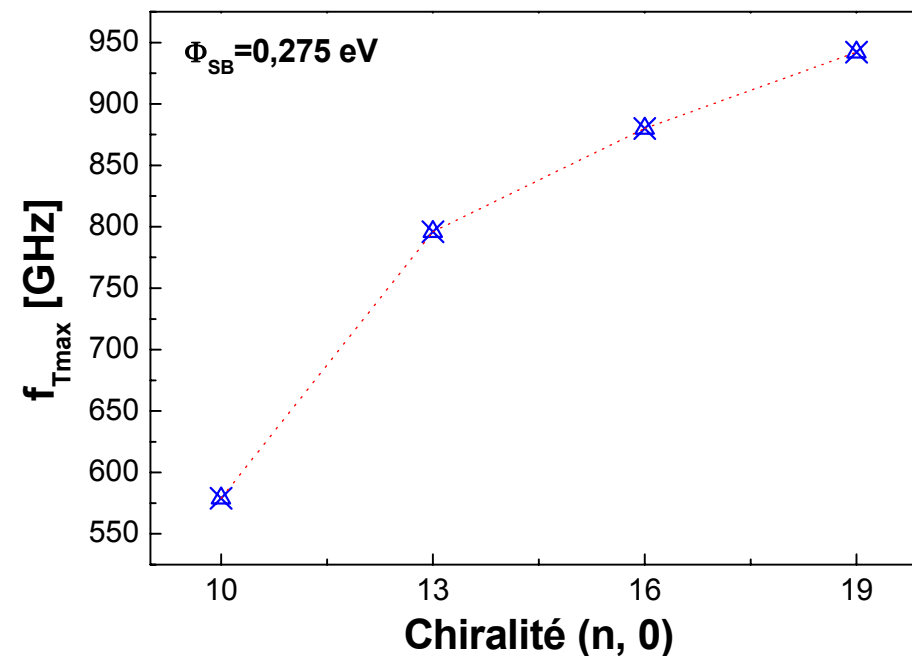
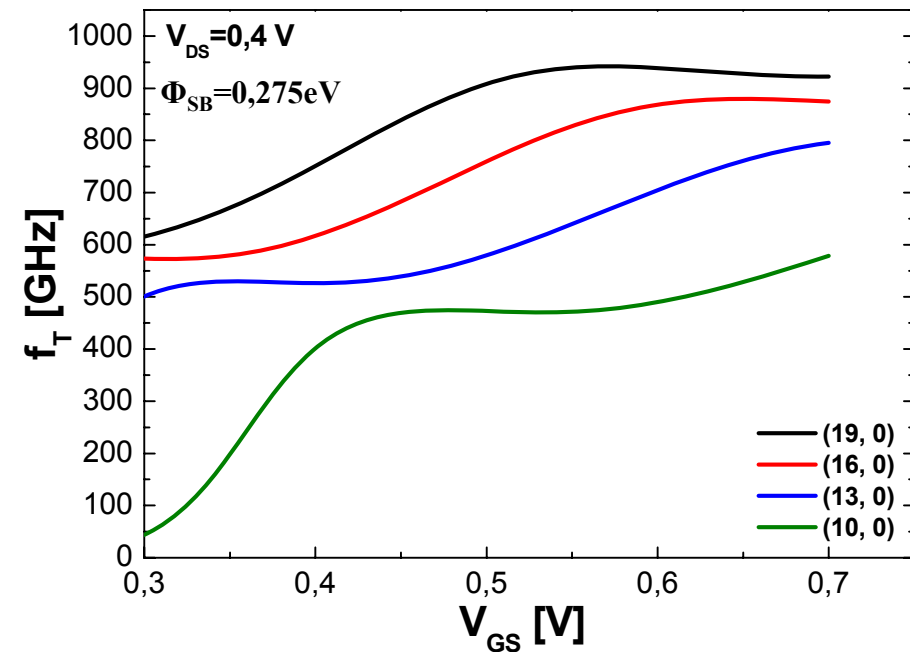
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$$

Une augmentation de la hauteur de la barrière Schottky résulte en une dégradation de la transconductance et ainsi de la fréquence de transition f_t

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances dynamiques

Diamètre du NTC (d_{CNT})



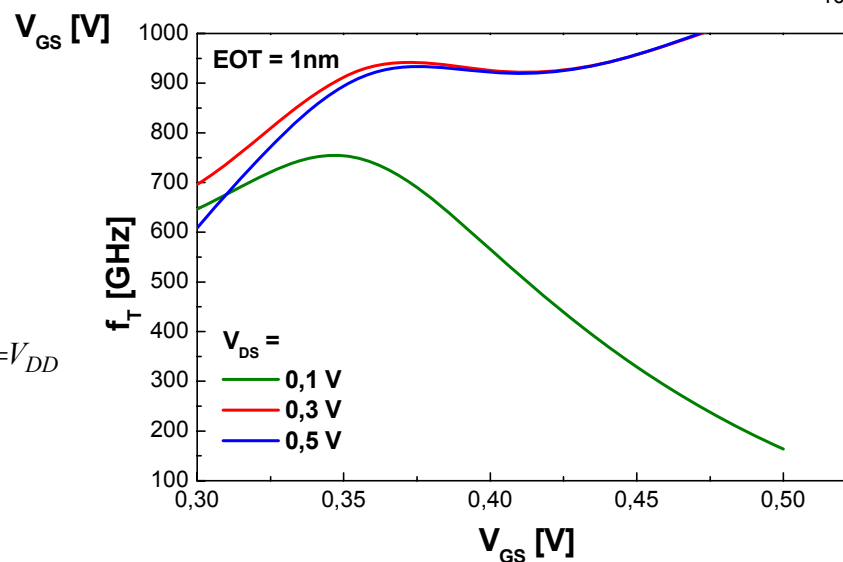
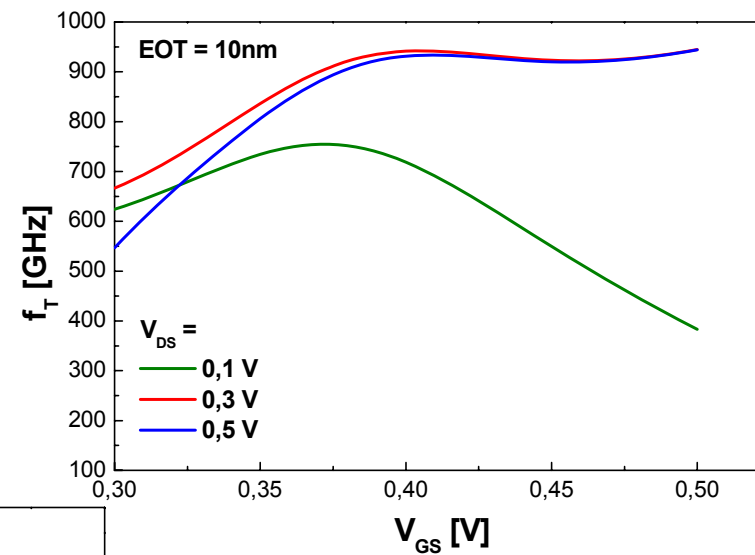
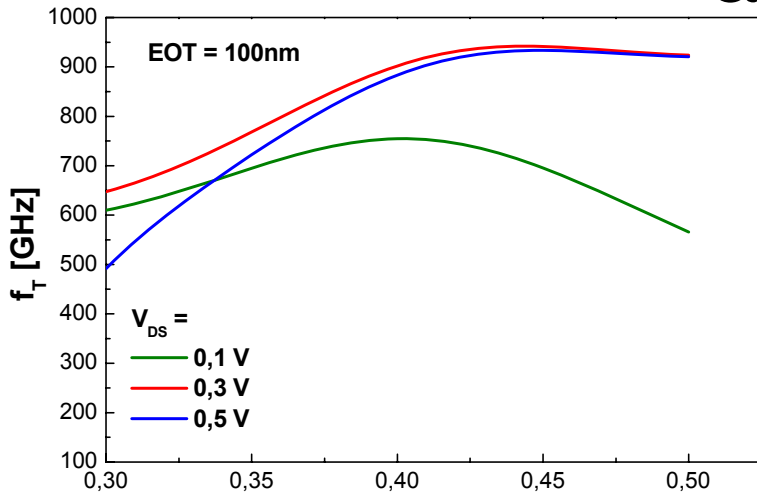
Conclusion 5:

Les meilleures fréquences de transition sont observées pour les plus forts diamètres des nanotubes c.-à-d. les plus faibles gaps

Etude d'influence des paramètres du modèle

Performances dynamiques

Capacité de l'oxyde (C_{INS})



Conclusion 6:

Les performances dynamiques atteignent un maximum à partir d'une certaine valeur optimale de EOT

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_g} \Big|_{V_{DS}=V_{DD}}$$

Etude d'influence des paramètres du modèle

Conclusion 2 (en statique):

Le courant I_{off} croit avec les plus grands diamètres c.-à-d. les plus faibles gaps.

Conclusion 5 (en dynamique):

Les meilleures fréquences de transition sont observées pour les plus forts diamètres des nanotubes c.-à-d. les plus faibles gaps

 **Choix du diamètre du nanotube pour assurer les meilleures performances statiques et dynamiques**

- ❖ Faibles diamètres → numérique (meilleur $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$)
- ❖ Forts diamètres → analogique (f_T élevée)

Plan de la Présentation

- ① Le transistor à nanotube de carbone CNTFET
- ② Modélisation compacte du SB-CNTFET
- ③ Applications aux circuits numériques
- ④ Conclusions & Perspectives

Applications aux circuits numériques

Code en VerilogA simulé sous Spectre (Cadence ver. 5)

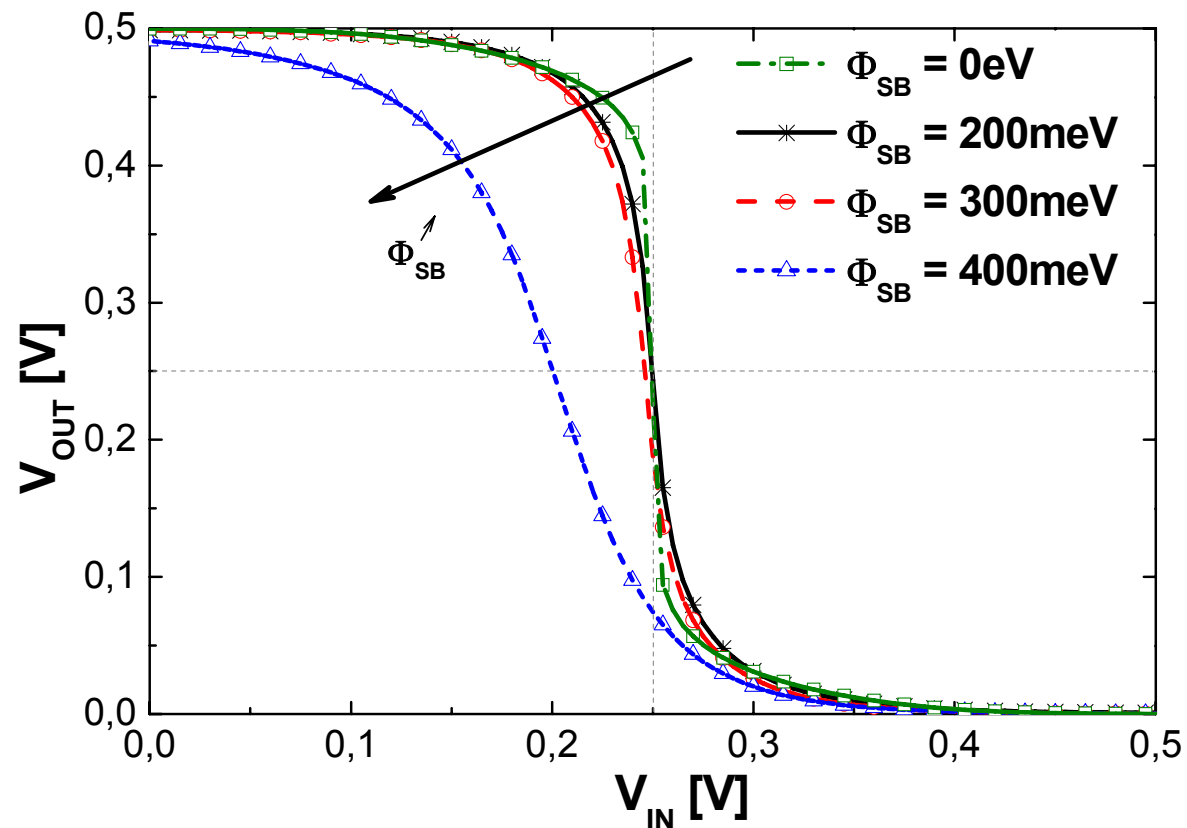
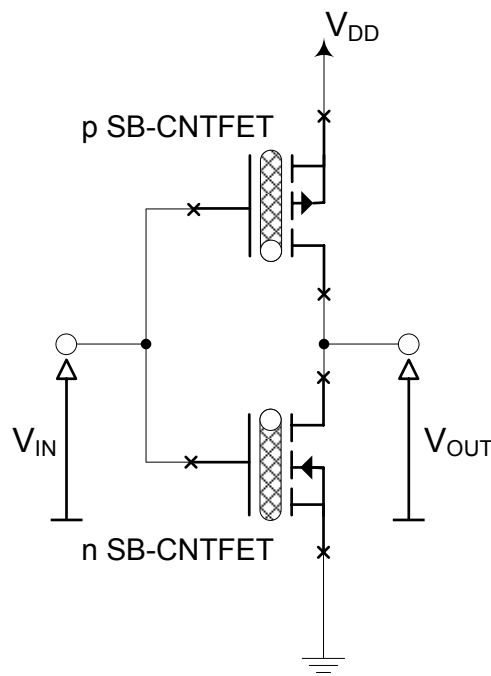
- **Inverseur logique**
- **Oscillateur en anneau à 5 étages**
- **Cellules mémoires statiques :**
 - **6T-SRAM**
 - **4T-SRAM**

$$(n, m) = (19, 0)$$

$$L_{\text{gate}} = 100 \text{ nm}$$

$$C_{\text{INS}} = 69 \text{ pF/m}$$

Inverseur logique



$$(n, m) = (19, 0),$$

$$L_{\text{gate}} = 100 \text{ nm},$$

$$V_{\text{fb}} = +V_{\text{dd}}/2 \text{ (transistor N)},$$

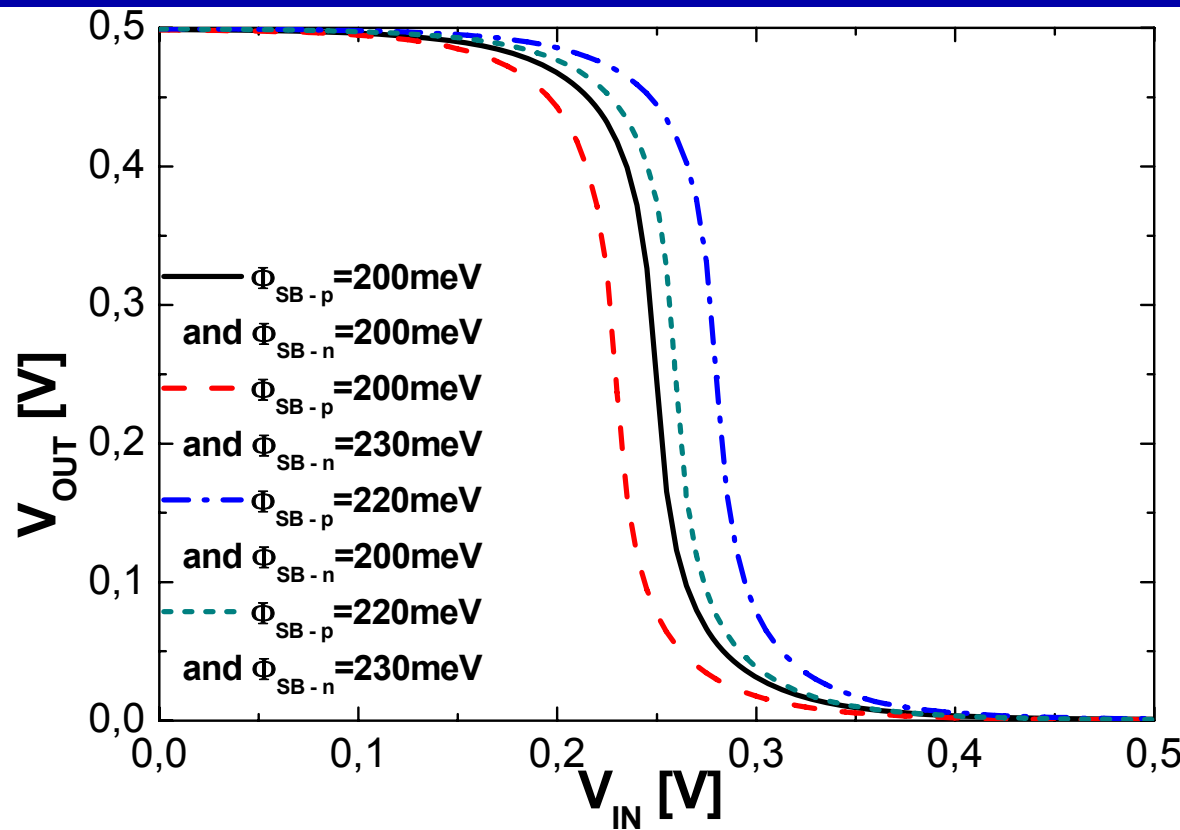
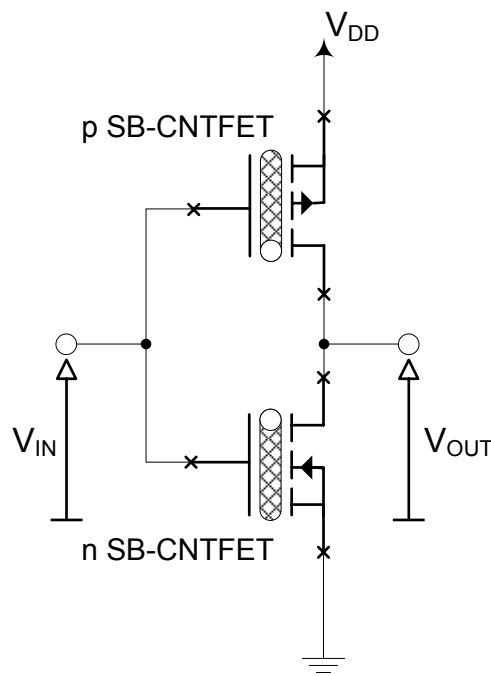
$$V_{\text{fb}} = -V_{\text{dd}}/2 \text{ (transistor P)},$$

$$C_{\text{INS}} = 69 \text{ pF/m}$$

(10nm d'épaisseur d'oxyde avec $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3,9$)

**Dégradation des SNM pour
des hauteurs de barrière
Schottky élevées**

Inverseur logique



$$(n, m) = (19, 0),$$

$$L_{\text{gate}} = 100 \text{ nm},$$

$$V_{\text{fb}} = +V_{\text{dd}}/2 \text{ (transistor N)},$$

$$V_{\text{fb}} = -V_{\text{dd}}/2 \text{ (transistor P)},$$

$$C_{\text{INS}} = 69 \text{ pF/m}$$

(10nm d'épaisseur d'oxyde avec $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3,9$)

Dégradation des SNM pour une dissymétrie dans les barrières Schottky S/D

Inverseur logique

➤ Inverseur logique

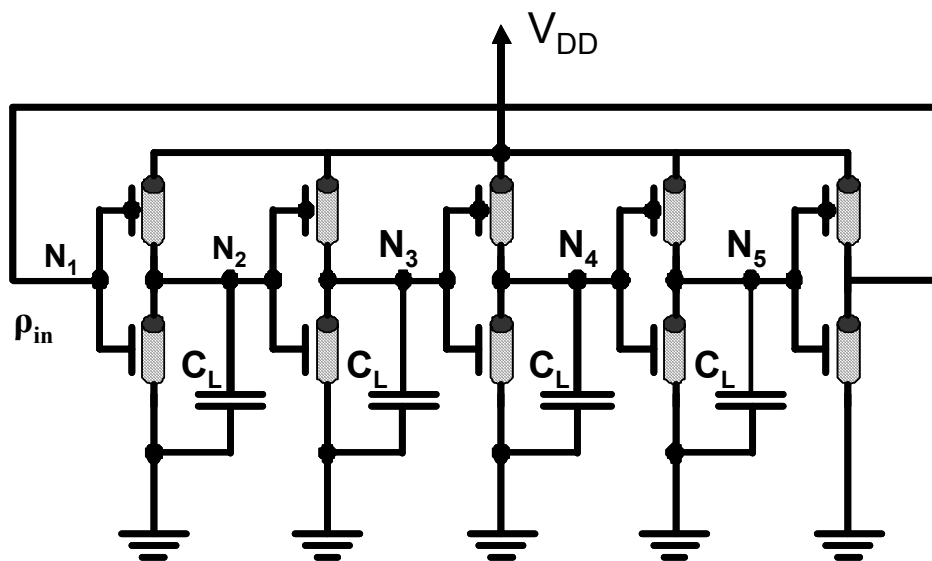


Convergence du modèle en régime continu



Vérifier l'influence de la barrière Schottky sur les marges du bruit

Oscillateur en anneau à 5 étages



$$(n, m) = (19, 0),$$

$$L_{gate} = 100 \text{ nm},$$

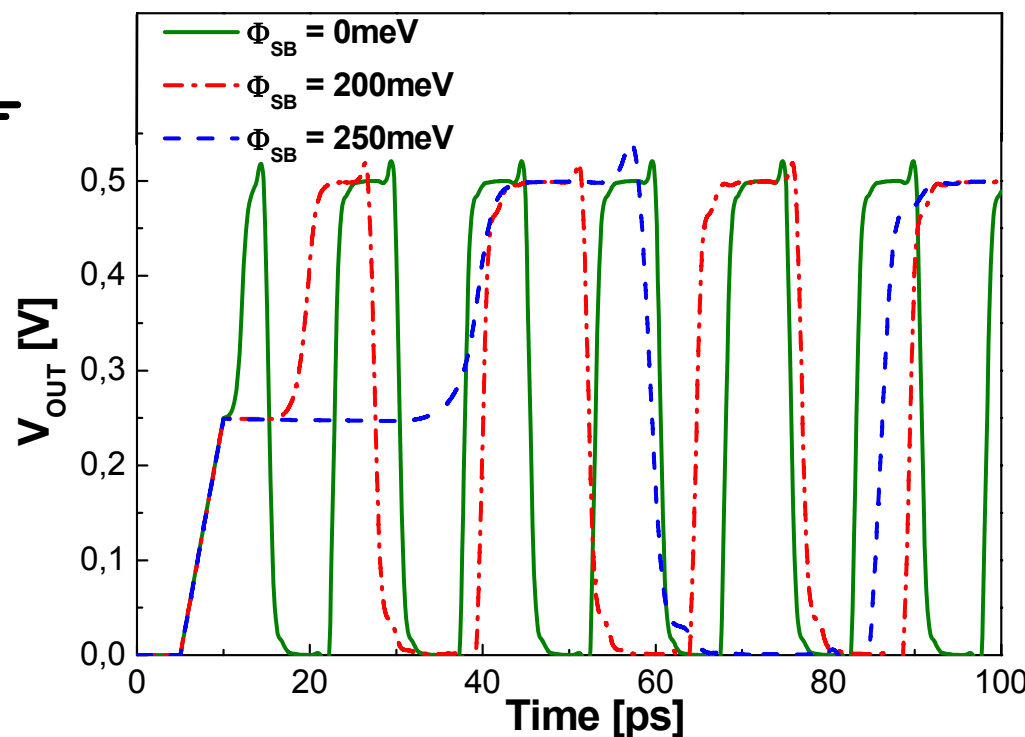
$$V_{fb} = +V_{dd}/2 \text{ (transistor N),}$$

$$V_{fb} = -V_{dd}/2 \text{ (transistor P),}$$

$$C_{INS} = 69 \text{ pF/m}$$

(10nm d'épaisseur d'oxyde avec $\epsilon_{SiO_2} = 3,9$)

**Dégradation de la
fréquence d'oscillation
pour des hauteurs de
barrières élevées**



Oscillateur en anneau à 5 étages

✦ Inverseur logique



Convergence du modèle en régime continu



Vérifier l'influence de la barrière Schottky sur les marges du bruit

✦ Oscillateur en anneau à 5 étages



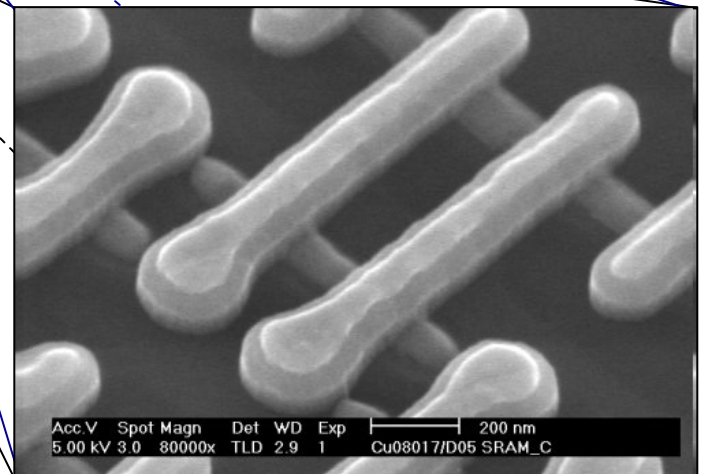
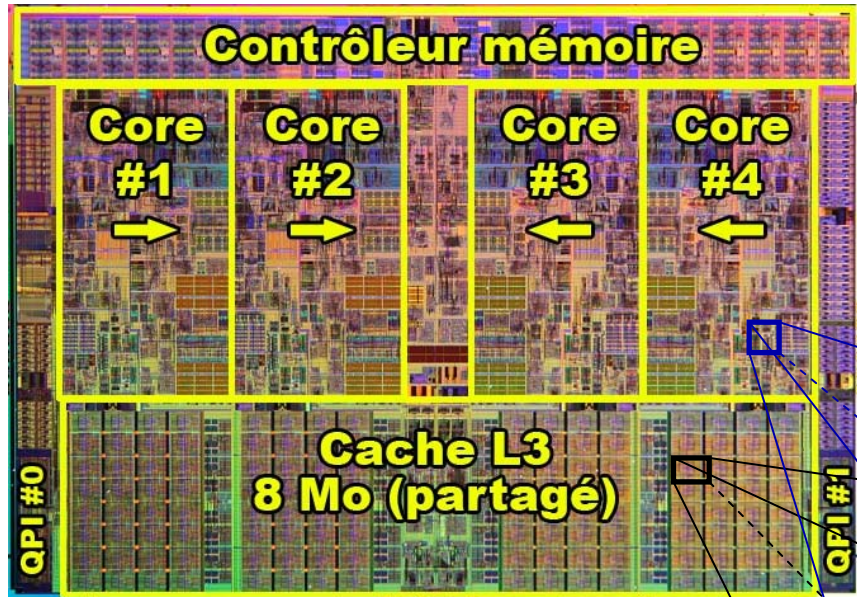
Convergence du modèle en régime variable



Impact de la barrière Schottky sur la fréquence d'oscillation

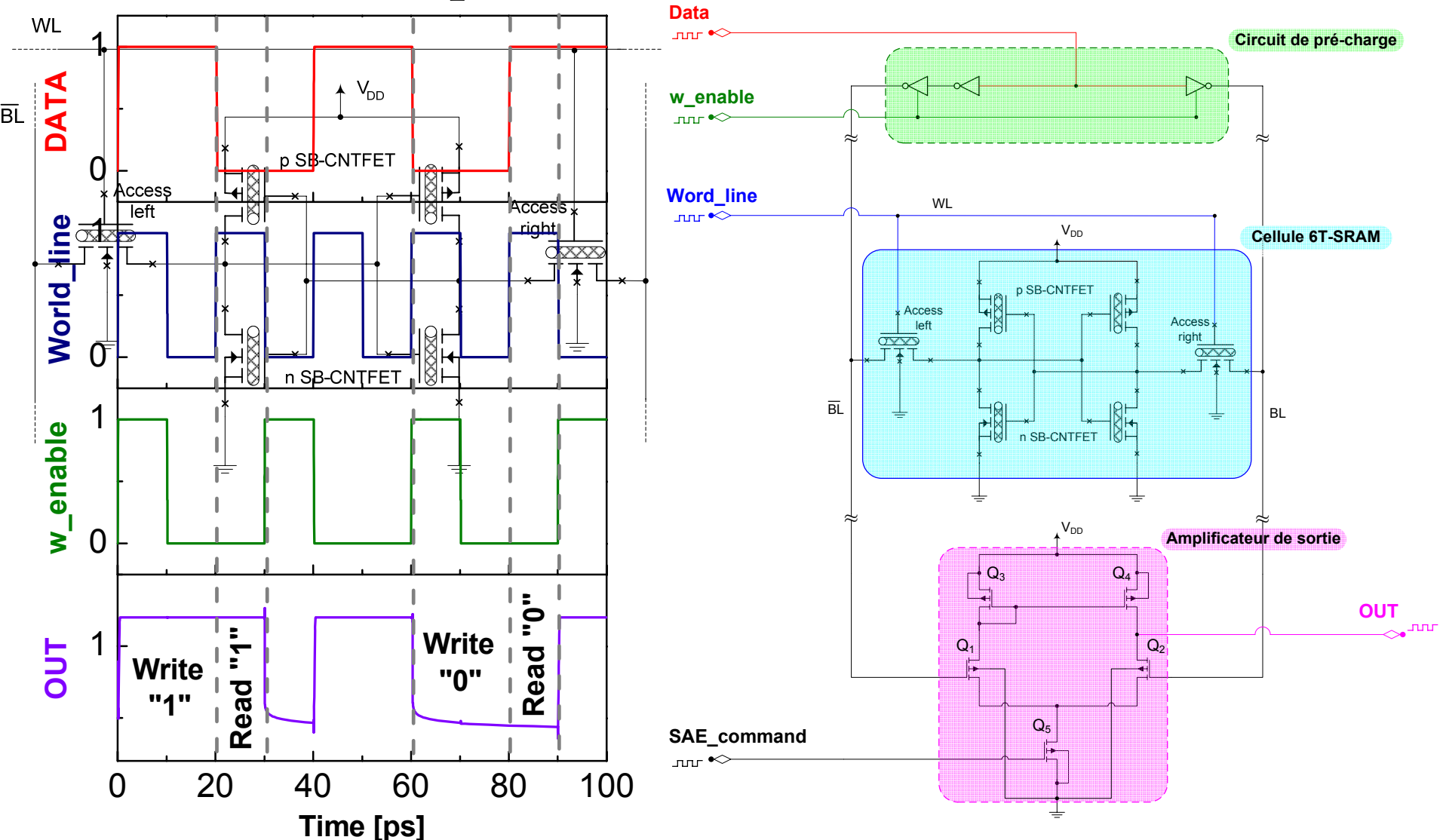
La cellule mémoire statique "SRAM"

SRAM: Static Random Access Memory



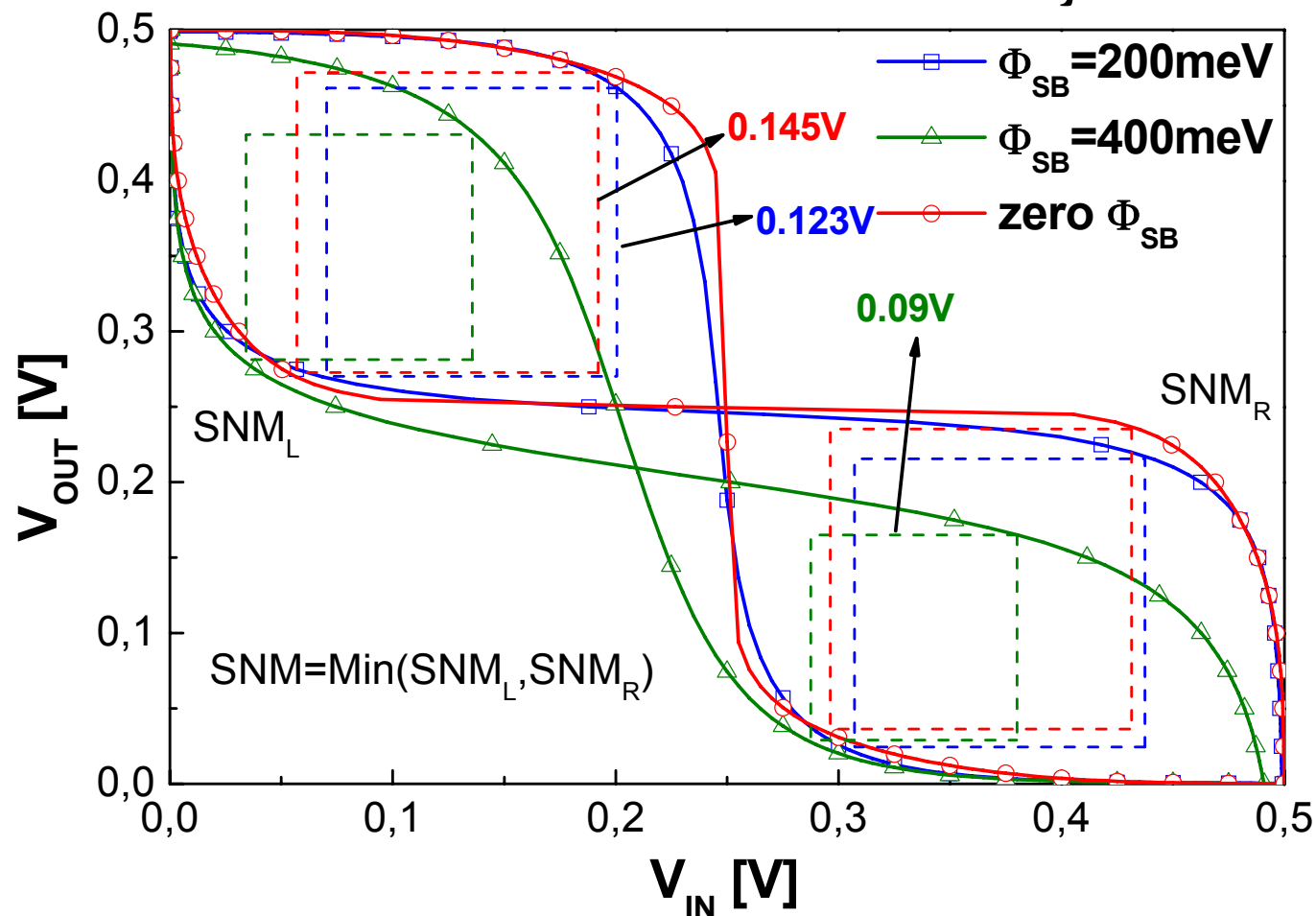
La cellule mémoire statique "SRAM"

6T-SRAM : Principe de fonctionnement



La cellule mémoire statique "SRAM"

6T-SRAM : Influence de la barrière Schottky

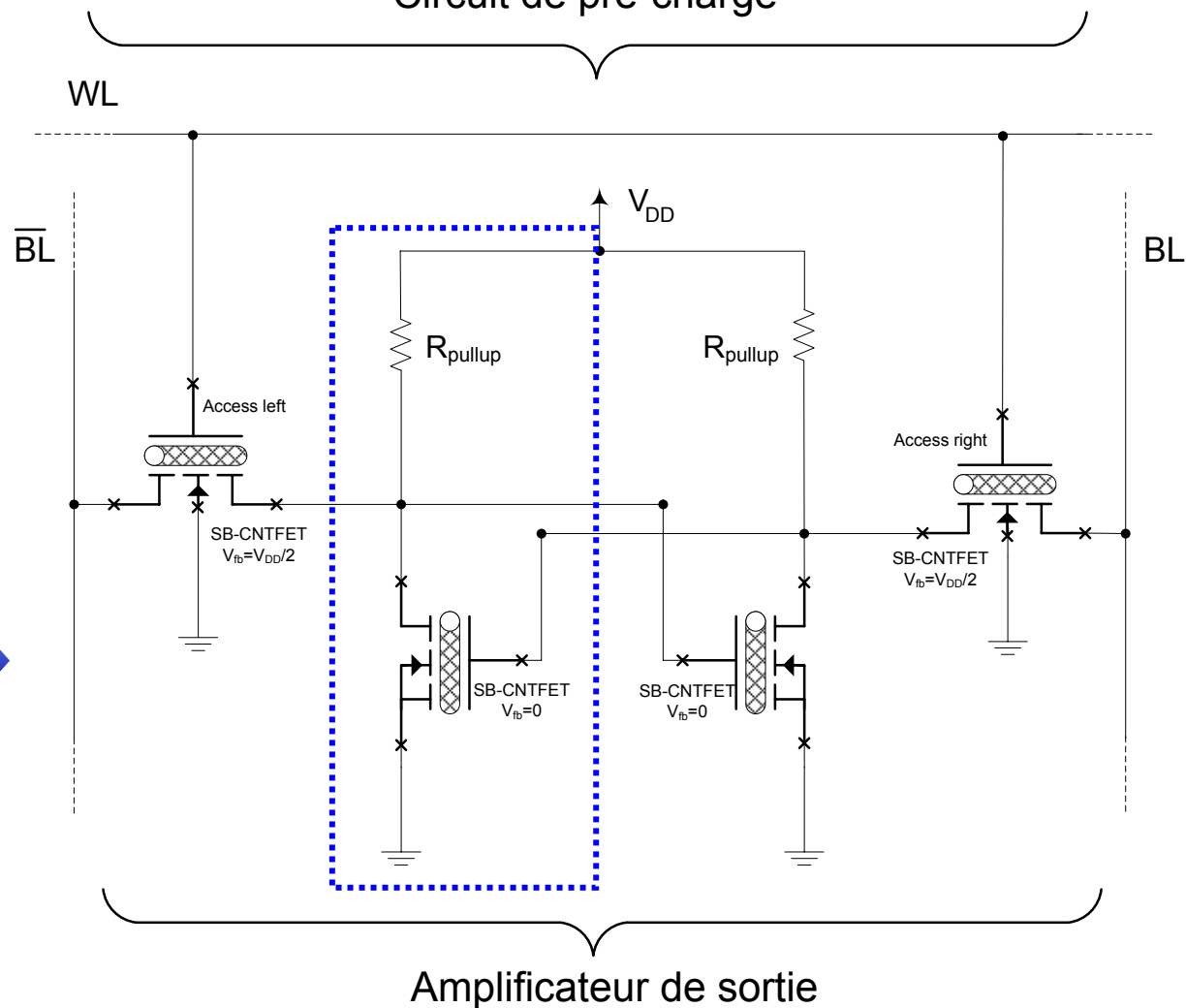
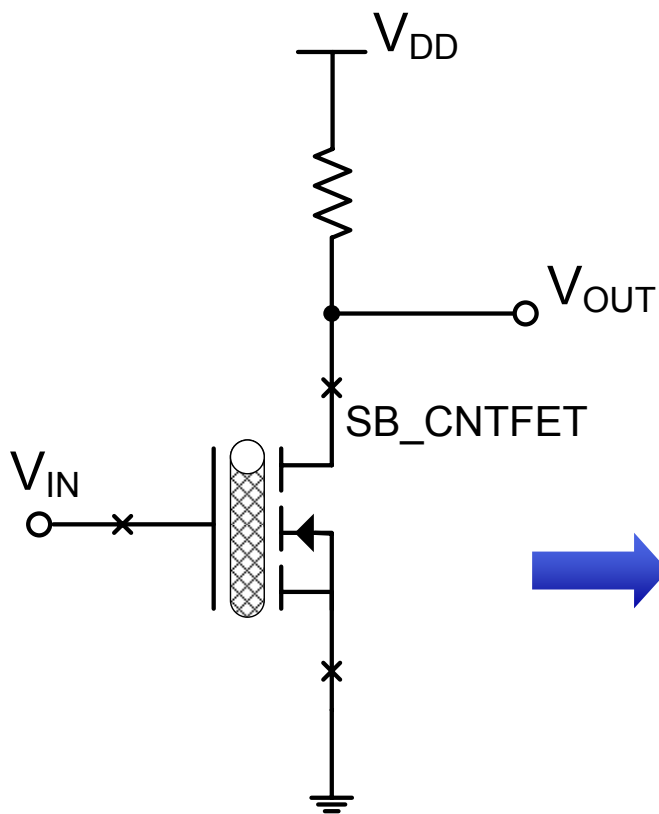


Les barrières Schottky affectent considérablement le SNM des 6T-SRAM

La cellule mémoire statique "SRAM"

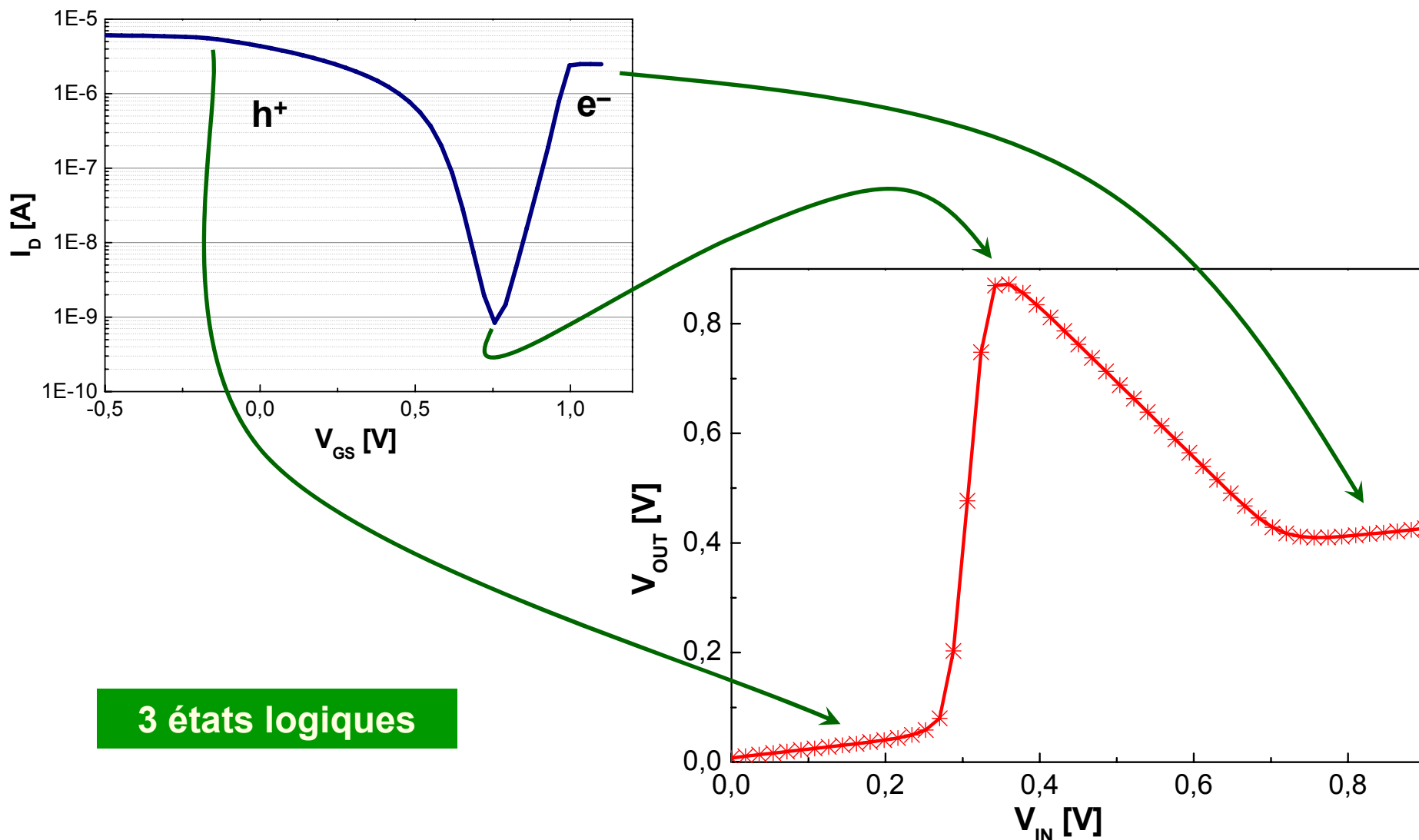
4T-SRAM : Mise à profit des barrières Schottky

Circuit de pré-charge



La cellule mémoire statique "SRAM"

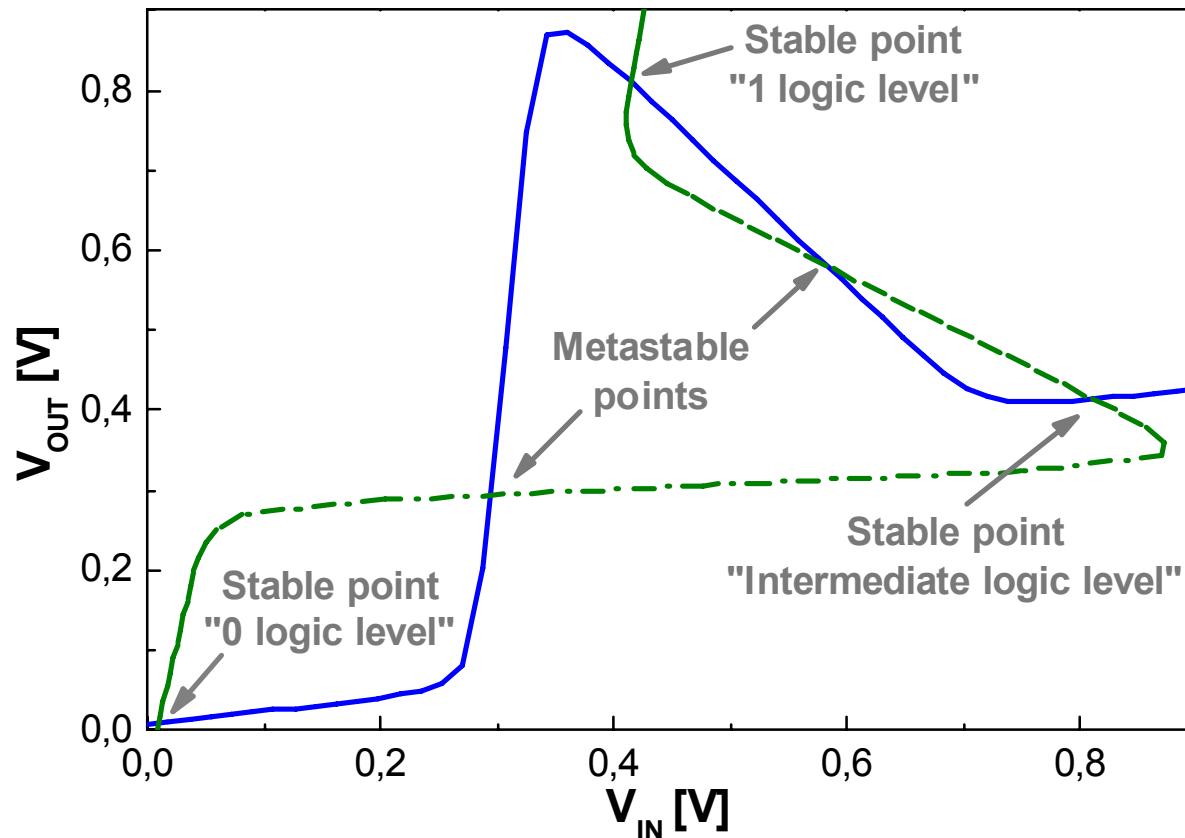
4T-SRAM : Mise à profit des barrières Schottky



3 états logiques

La cellule mémoire statique "SRAM"

4T-SRAM : Mise à profit de la barrière Schottky



Cellule 4T-SRAM à 3 états logiques stables

La cellule mémoire statique "SRAM"

➤ Inverseur logique



Convergence du modèle en régime continu



Vérifier l'influence de la barrière Schottky sur les marges du bruit

➤ Oscillateur en anneau à 5 étages



Convergence du modèle en régime variable



Impact de la barrière Schottky sur la fréquence d'oscillation

➤ Cellules mémoires statiques :

➤ 6T-SRAM

➤ 4T-SRAM



Convergence du modèle pour un nombre important de transistors



Architecture d'une mémoire à 3 états logiques

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Le SB-CNTFET
- 3 Modélisation compacte du SB-CNTFET
- 4 Applications aux circuits numériques
- 5 Conclusions & Perspectives

Conclusions

Technologie

Comportement Physique

Intégrabilité

Effets parasites

Dispersion technologique



- ✓ Compréhension des phénomènes physiques

Conception

Fonction

Performances

Domaine d'application

Fiabilité



- ✓ Conception circuits numériques
- ✓ Mise à profit des barrières Schottky : 4T-SRAM à 3 états logiques stables

Modélisation compacte



- ✓ Formulation analytique
- ✓ Comparaison des résultats avec simulation M.C et mesures
- ✓ Etude d'influence (performances statiques/dynamiques)

Conclusions

Technologie

Comportement Physique

Intégrabilité

Effets parasites

Dispersion technologique

Modélisation compacte

Conception

Fonction

Performances

Domaine d'application

Fiabilité

ACCENT

"Action Calcul Composant En NanoTube"

ANR PNANO

LPMCN, CEA, IMS, IEF, Silvaco

Multi-scale simulation, Ab initio – Monte Carlo, Compacte

PANINI

Neuro-inspired Circuit Design

ANR architec. du futur

IEF, CEA, IMS

Conclusions

➤ 3 Revues spécialisées avec comité de lecture

- *IEEE Transactions on Electron Devices (accepté et publié 2010)*
- *Physica Status Solidi Journal, PSS (c) (accepté et publié 2010)*
- *International Journal of Transactions on Systems, Signals and Devices (soumis)*

➤ 5 conférences internationales

IEEE DTIS'08

IEEE SSD'09

Trends in NanoTechnology 2009

IEEE DTIS'10

Trends in NanoTechnology 2010

➤ 4 conférences nationales

JNTE'09

GDR Nano 2009

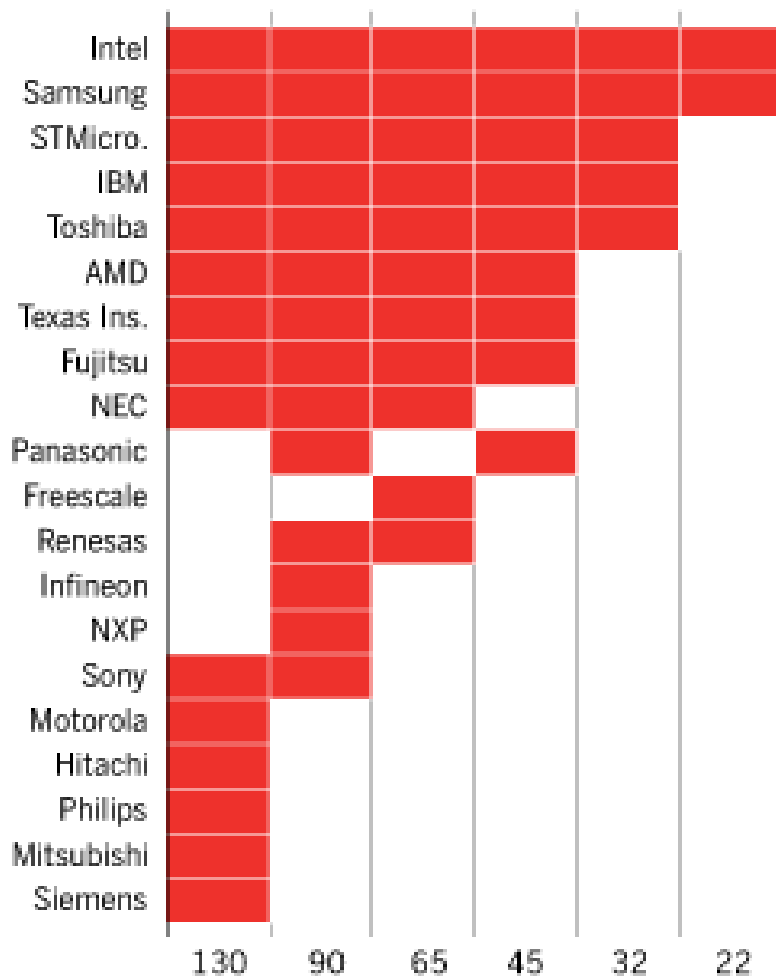
GDR Soc-Sip 2010

JNRDM 2010

Extra Slides

Fabrication capabilities

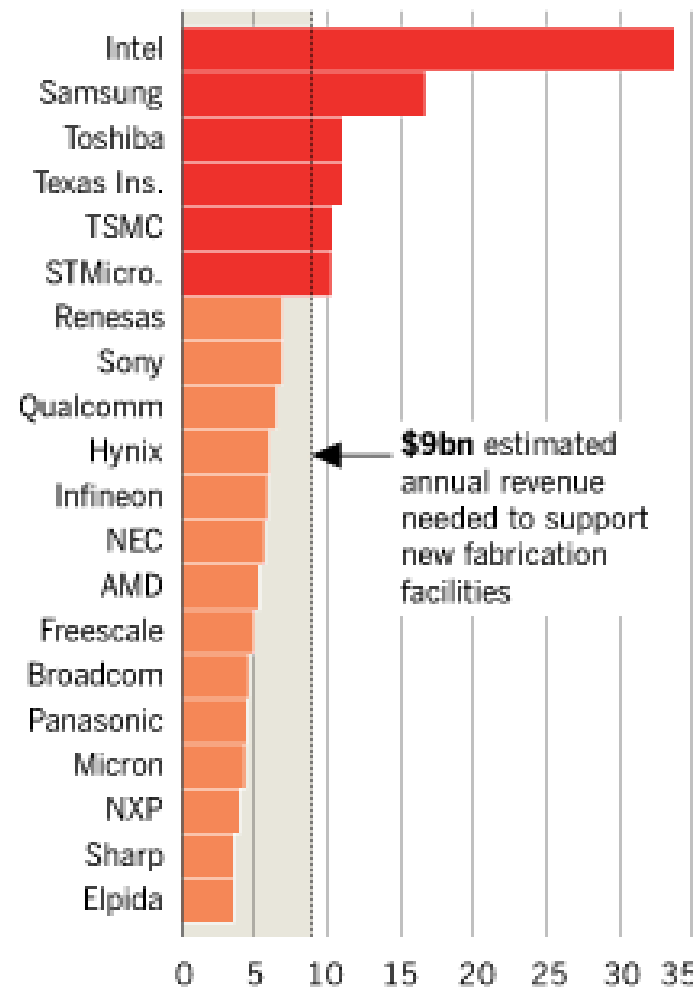
Transistor size (nanometer)



Source: Intel

Semiconductor maker revenues

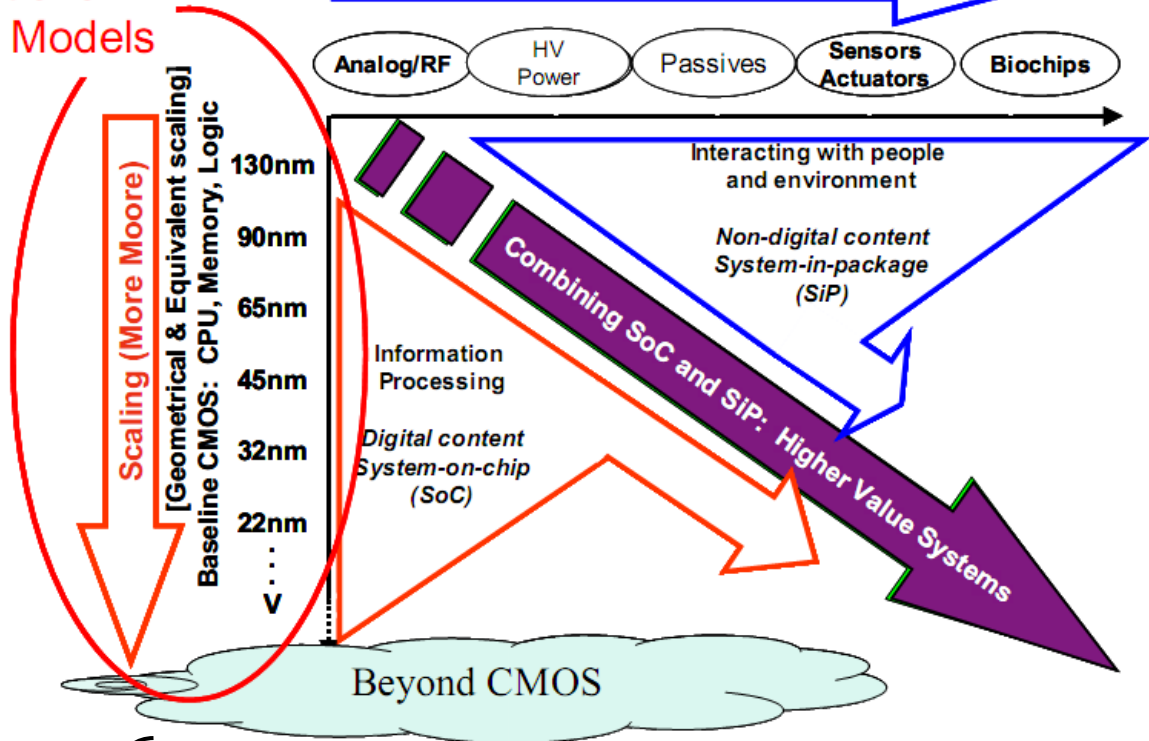
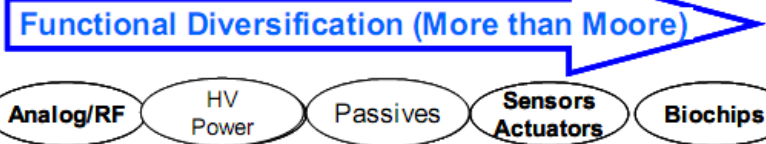
Shipments, estimated 2008 (\$bn)



FT Graphic: Mario Lenda

Moore's Law & More

Traditional ORTC Models



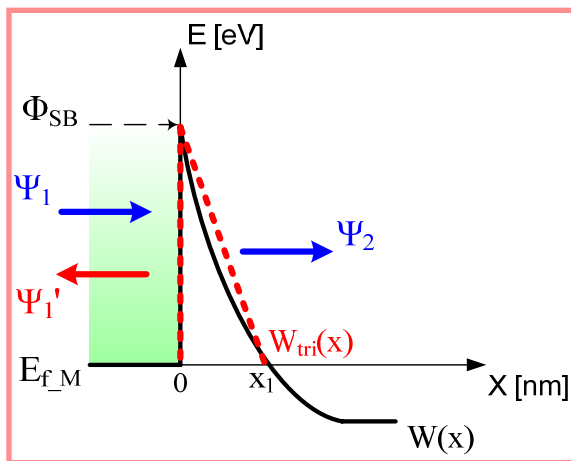
Beyond CMOS

Emerging Research Materials (ERM)

Emerging Research Devices (ERD)

ITRS 2009

1ère approche de modélisation Modèle analytique de T(E)

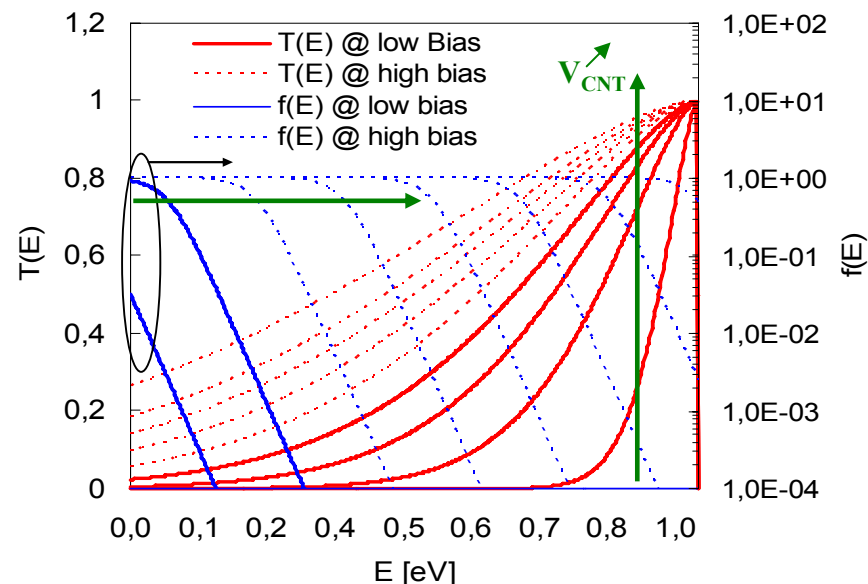


Approximation Wentzel-Kramers-Brillouin:
"WKB"

$$T(E) = \exp\left(-2 \int_0^{x_1} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} (E - W(x))} dx\right)$$

Approximation triangulaire:

$$T(E) = \exp\left(-4 \frac{\sqrt{2m^*}}{3\hbar E_{elec}} (\phi_{SB} - E)^{3/2}\right)$$



2 gammes de polarisation

- Fiable polarisation
- Forte polarisation

Faible polarisation

- $f(E) \rightarrow$ forme exponentielle

$$f(E) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{E-V}{k_B T}\right)}$$

- $T(E) \rightarrow (\phi_{SB} - E)^{3/2}$:

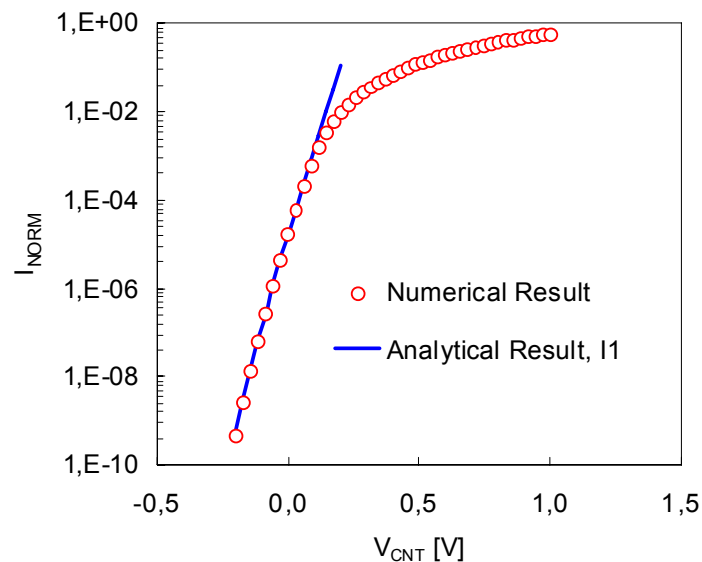
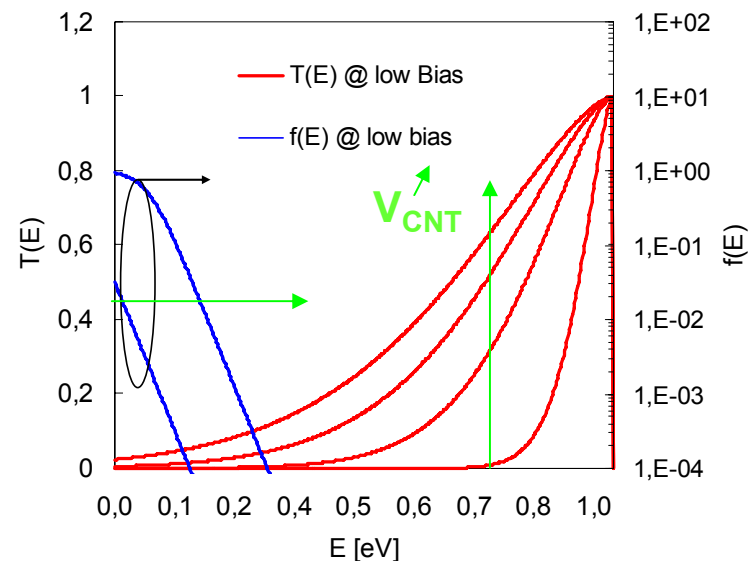
Dev. Taylor 1^{er} ordre à "0"

$$T(E) = \exp(a_0 + a_1 E)$$

$$I_1 = \int_{sbbd}^{\infty} T(E) f(E) dE = \int_{sbbd}^{\infty} \frac{\exp(a_0 + a_1 E)}{\exp\left(\frac{E-V}{k_B T}\right)} dE$$



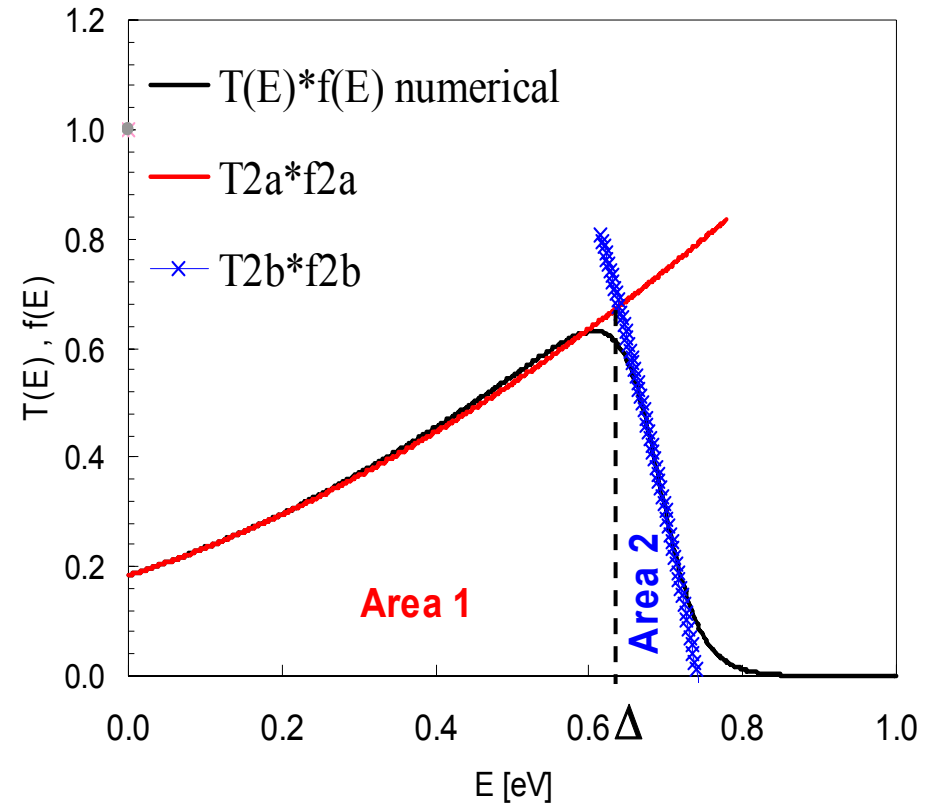
$$I_1 = \frac{k_B T \exp(a_0 + a_1 E)}{(a_1 k_B T - 1) \exp\left(\frac{E+V}{k_B T}\right)}$$



1ère approche de modélisation

Forte polarisation

► Deux gammes d'énergies :

■ Surface 1 : $T_{2a}(E) \cdot f_{2a}(E)$ ■ Surface 2 : $T_{2b}(E) \cdot f_{2b}(E)$ Bande d'énergie supplémentaire Δ

$$\Delta = qV_{CNT} - 2k_B T$$

Forte polarisation – Faible énergie

► Deux gammes d'énergies :

■ Surface 1 : $T_{2a}(E) \cdot f_{2a}(E)$

□ Surface 2 : $T_{2b}(E) \cdot f_{2b}(E)$

- $f(E) \rightarrow$ égale à "1"

$$f_{2a}(E) = 1$$

- $T(E) \rightarrow$ Dev. Taylor 2^{ème} ordre à "0"

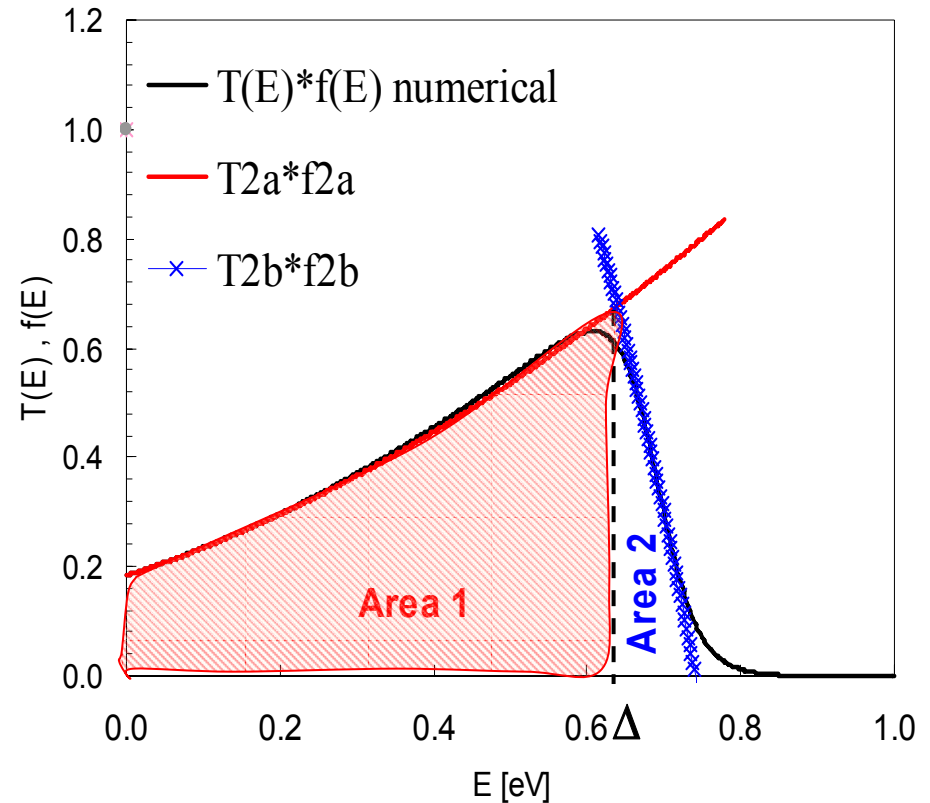
$$T_{2a}(E) = b_0 + b_1 E + b_2 E^2$$

$$I_{2a} = \int_{sbbd}^{\Delta} (b_0 + b_1 E + b_2 E^2) dE$$



$$I_{2a} = \left[\begin{array}{l} \left(b_0 \Delta + \frac{1}{2} b_1 \Delta^2 + \frac{1}{3} b_2 \Delta^3 \right) - \\ \left(b_0 sbbd + \frac{1}{2} b_1 sbbd^2 + \frac{1}{3} b_2 sbbd^3 \right) \end{array} \right]$$

$$E < \Delta$$



Bande d'énergie supplémentaire Δ

$$\Delta = qV_{CNT} - 2k_B T$$

Forte polarisation – Forte énergie

► Deux gammes d'énergies :

□ Surface 1 : $T_{2a}(E)*f_{2a}(E)$

■ Surface 2 : $T_{2b}(E)*f_{2b}(E)$

- $f(E) \rightarrow$ Dev. Taylor 1^{er} ordre à " V_{CNT} "

$$f_{2b}(E) = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \frac{1}{k_B T} (E - qV_{CNT})$$

- $T(E) \rightarrow$ Dev. Taylor 1^{er} ordre à " V_{CNT} "

$$T_{2b}(E) = d_0 + d_1 (E - qV_{CNT})$$

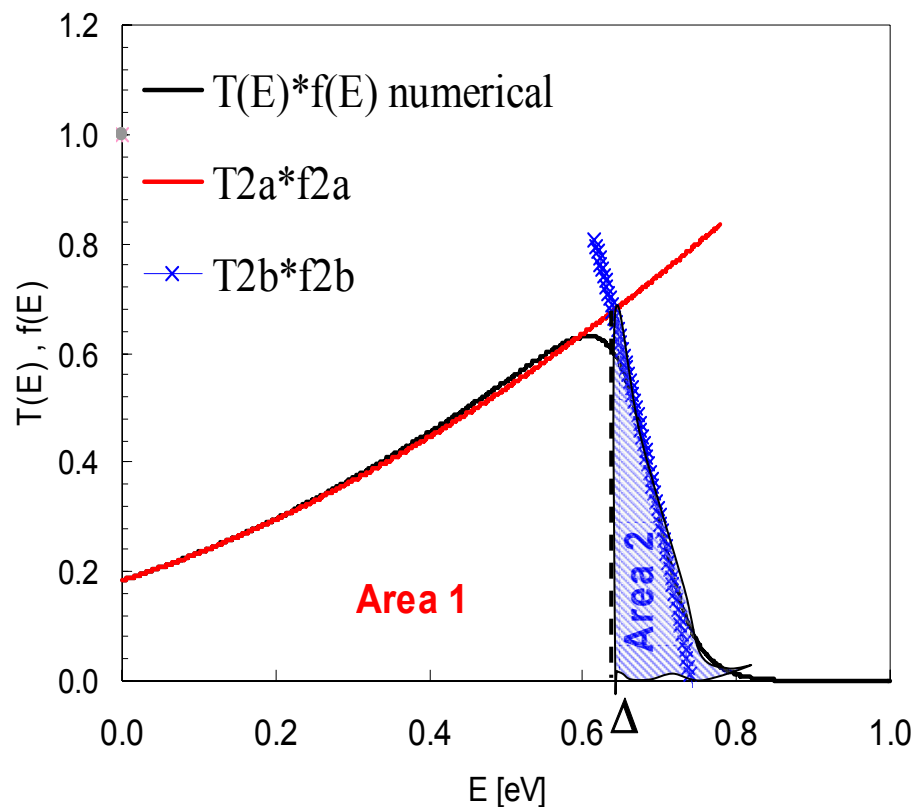
$$I_{2b} = \int_{\Delta}^{+\infty} \left[\frac{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \frac{1}{k_B T} (E - qV_{CNT}) \right)}{\left(d_0 + d_1 (E - qV_{CNT}) \right)} \right] dE$$

$$I_{2b} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \frac{V_{CNT}}{k_B T} \right) (d_0 + d_1) \Delta + \frac{1}{2}$$

$$\left(\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \frac{V_G}{k_B T} \right) d_1 - \frac{1}{4} \frac{d_0 - d_1 V_G}{k_B T} \right) \Delta^2$$

$$- \frac{1}{4} \frac{d_1 \Delta^3}{k_B T}$$

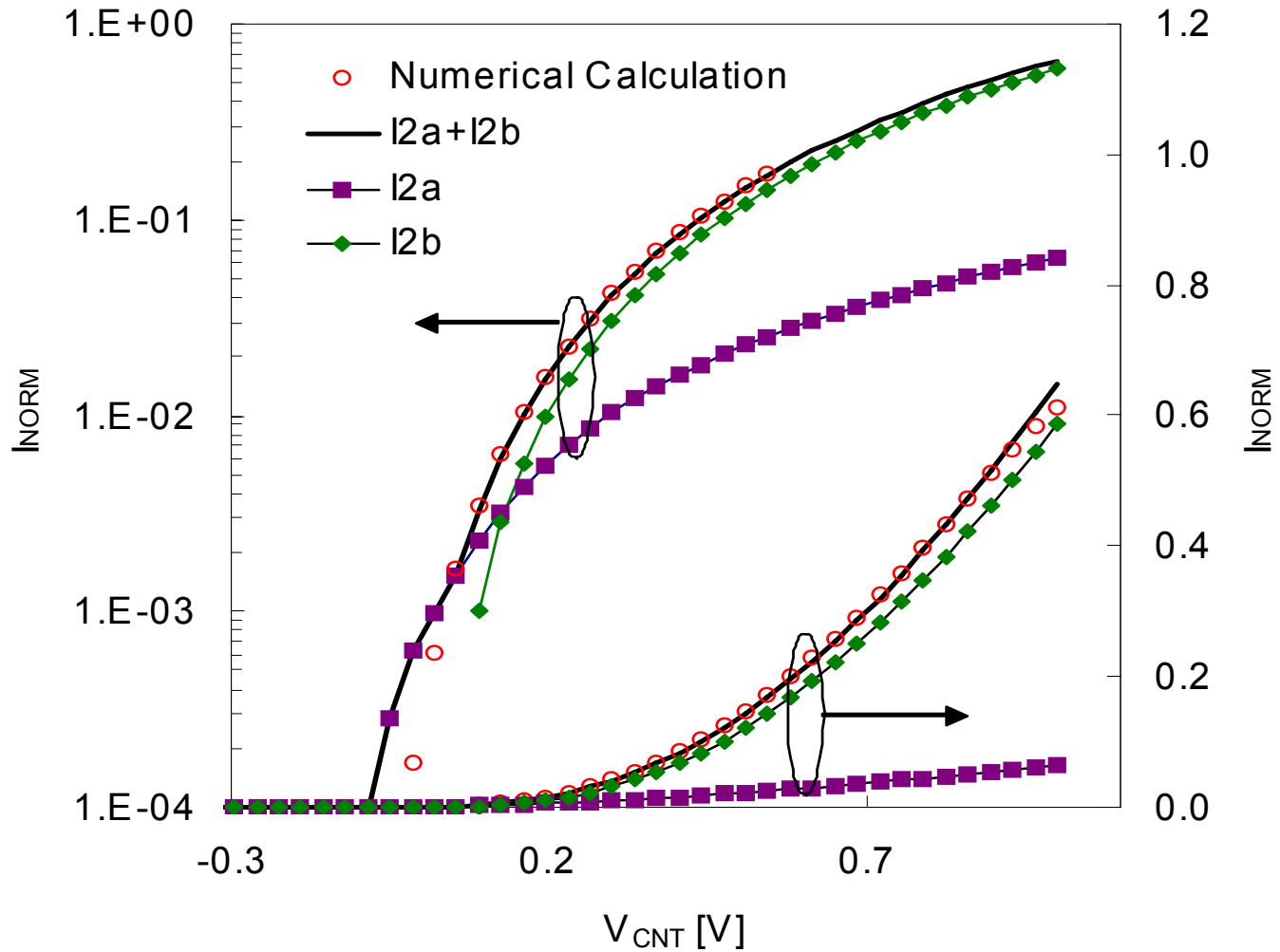
$E > \Delta$



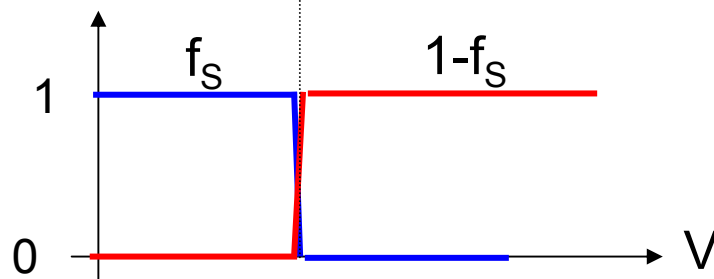
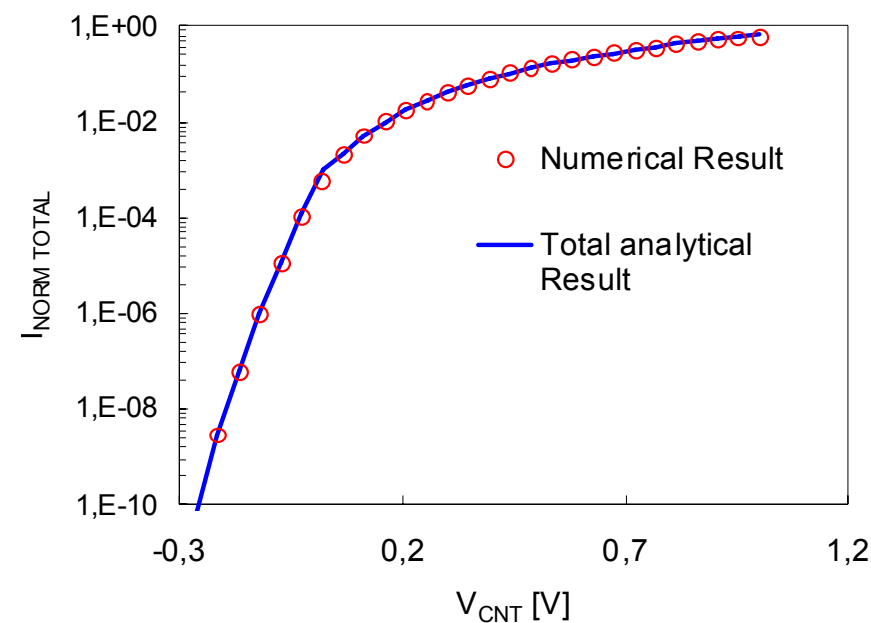
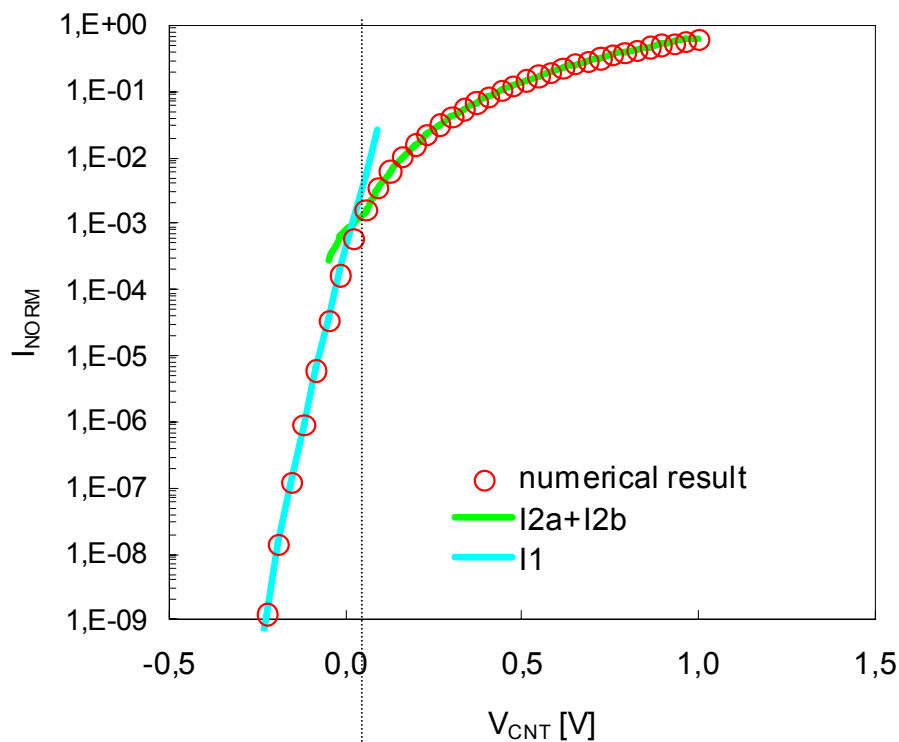
Bande d'énergie supplémentaire Δ

$$\Delta = qV_{CNT} - 2k_B T$$

Forte polarisation – Toute gamme d'énergie

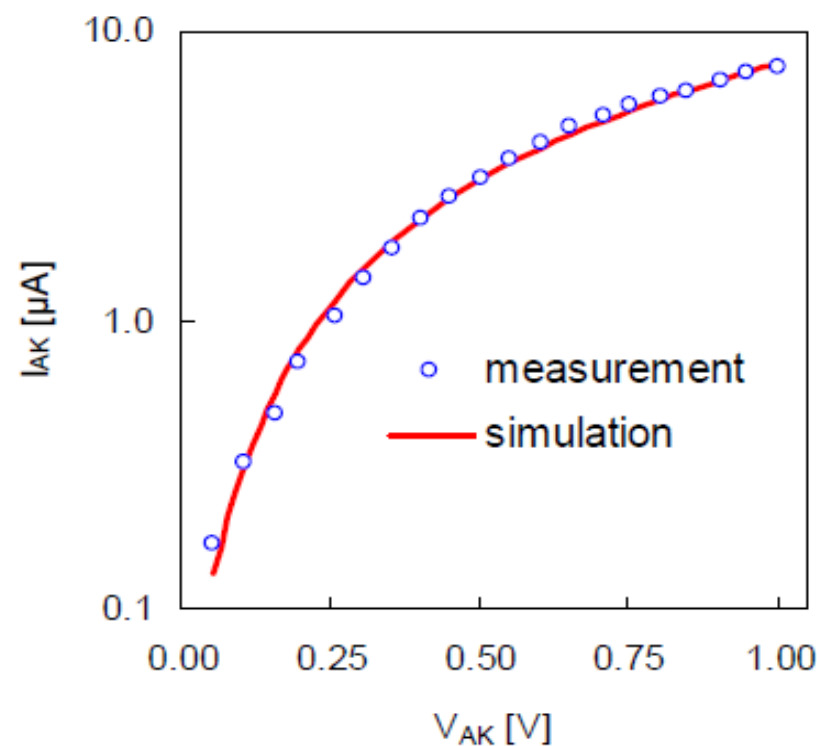
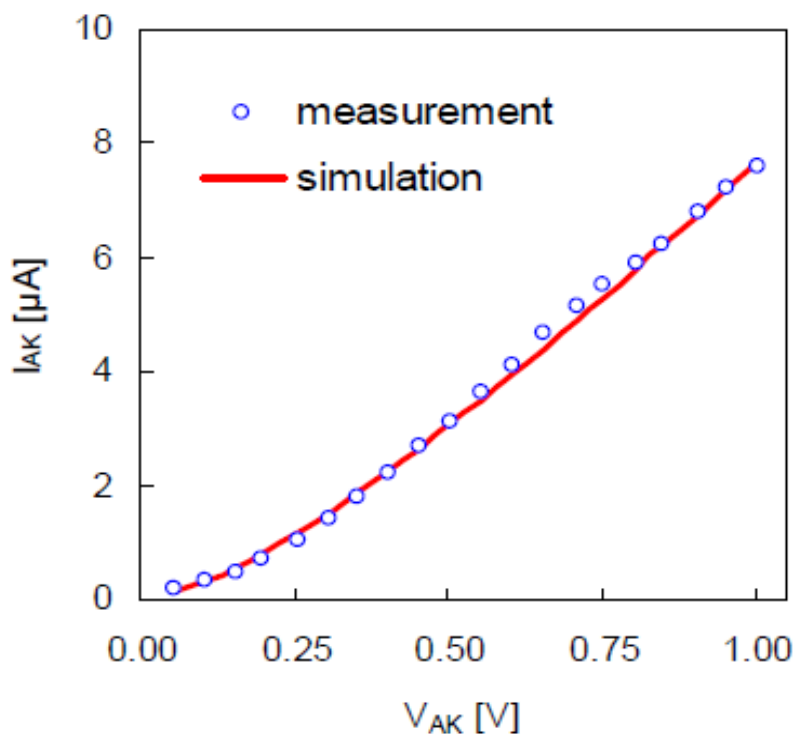
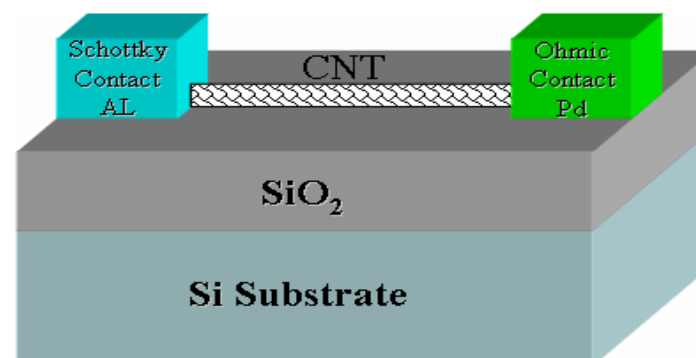


Solution complète – Fonction de lissage



Comparaison avec les mesures

Structure d'une diode à nanotube de carbone



Code VerilogA
149 lignes

Bias condition

$$V_{GS} \neq 0 \ \& \ V_{DS} \neq 0$$

$$V_{GS} > V_{DS}$$

Temps de simulation
~1mn par I/V

$$I_{tunnel} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} (T_T(E) \cdot f_S(E) - T_T(E) \cdot f_D(E)) dE$$

Source Contribution

$$I_{tunnel_S} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} (T_T(E) f_S(E)) dE$$

Drain Contribution

$$I_{tunnel_D} = \int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB} - qV_{DS}} (T_T(E) f_D(E)) dE$$

Low V_{GS}

High V_{GS}

Low V_{GS}

High V_{GS}

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} Taylor(T_{global}(E), E = 0,1) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)} dE$$

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB} - qV_{DS}} Taylor(T_{global}(E), E = -qV_{DS},1) \times \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right)} dE$$

$$Q_{S,D} = \frac{2Mh}{q} \sum_p \int_{E_0}^{+\infty} D(E) T_T(E) f(E - qV_{S,D}) dE$$

?!!

Low Energy

High Energy

Deuxième approche de modélisation

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} Taylor(T_{global}(E), E = 0,1) \times Taylor(f_S(E), E = 0,1) dE$$

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB}} Taylor(T_{global}(E), E = \phi_{SB} - qV_{GS}, 4) dE$$

$$\int_{\phi_{SB} - qV_{GS}}^{\phi_{SB} - qV_{DS}} Taylor(T_{global}(E), E = -qV_{DS}, 1) \times Taylor(f_S(E), E = -qV_{DS}, 1) dE$$

Thermionic charge 1/3

- Low bias hypothesis leads to simplifications

$$Q_{S/D} = 2Mq \sum_p \int_{\phi_{SB}^{eff}}^{\infty} f(E - qV_{S/D}) D(E) dE$$

$$f(E - qV_{S,D}) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{(E - V_{S,D})}{k_B T}\right)}$$

$$D(E, [p]) = \frac{l}{\pi \hbar} \frac{\sqrt{m[p]^*}}{\sqrt{2(E - sbbd[p])}}$$

- Analytical solution through "Erreur Erf" function

$$Q_{Low_bias_S/D} = eD_0 \sqrt{\pi k_B T} \exp\left(\frac{eV_{S/D} - sbbd_{[p]}}{k_B T}\right) \times \left(1 - \text{Erf}\left(\sqrt{\frac{\Phi_{SB}^{eff} - sbbd_{[p]}}{k_B T}}\right)\right)$$

with $\text{Erf}(x) = 1 - (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5) \exp(-x^2) + \varepsilon(x)$

and $t = \frac{1}{1 + px}$, $\varepsilon(x) \leq 1.510^{-7}$

Najari M et al., Trends in NanoTechnologies, Barcelonna, Spain, 2009

Thermionic charge 2/3

- High bias hypothesis leads to approximations

$$Q_{high_bias_S/D} = 2Mq \sum_p \left[\int_{\phi_{SB}^{eff}}^{\infty} f(E - qV_{S/D}) D(E) dE + \int_{\Delta}^{\infty} f(E - qV_{S/D}) D(E) dE + \right]$$

$Q_{high\ bias\ S/D}$
 $Q_{medium\ bias\ S/D}$

$$D(E, [p]) = \frac{l}{\pi \hbar} \frac{\sqrt{m[p]^*}}{\sqrt{2(E - sbbd[p])}}$$

$$f(E - qV_{S,D}) \approx b_0 + b_1 \times (E - sbbd[p])$$

$$D(E, [p]) \approx \beta D(E = \Delta)$$

$$= \frac{l}{\pi \hbar} \frac{\sqrt{m[p]^*}}{\sqrt{2(\Delta - sbbd[p])}}$$

$$f(E - qV_{S,D}) \approx \frac{1}{\exp\left(\frac{(E - V_{S,D})}{k_B T}\right)}$$

Both expressions gets a direct analytical solution

Thermionic charge 3/3

