

# **Perspectives nouvelles en électronique pour bolomètres**

**- de la technologie et physique mésoscopique à la cryoélectronique**

Yong JIN

CNRS/LPN, Marcoussis



*DRTBT09, Fréjus, le 10 - 15 mai 2009*



# Plan

- **Introduction**
  - 2DEG et HEMT
  - HEMTs commerciaux → dispositifs mésoscopiques → cryoélectronique
- **HEMT balistique 1D et multiplexage d'une matrice de bolomètres**
  - Conducteur balistique 1D → HEMT balistique
  - Réalisation et résultats expérimentaux
  - Confirmation par le formalisme Landauer-Buttiker
  - Application dans le multiplexage d'une matrice de bolomètres
- **HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée**
  - Réalisation et caractérisations
  - Résultats expérimentaux et comparaisons
  - Récents résultats
- **Conclusions et perspectives**

# 2DEG et HEMTs

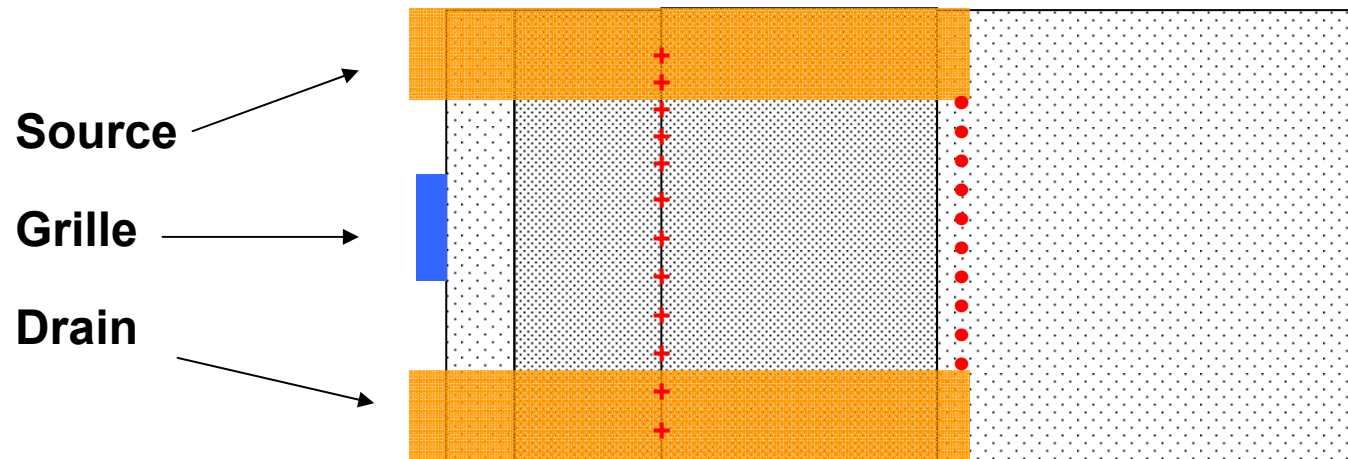
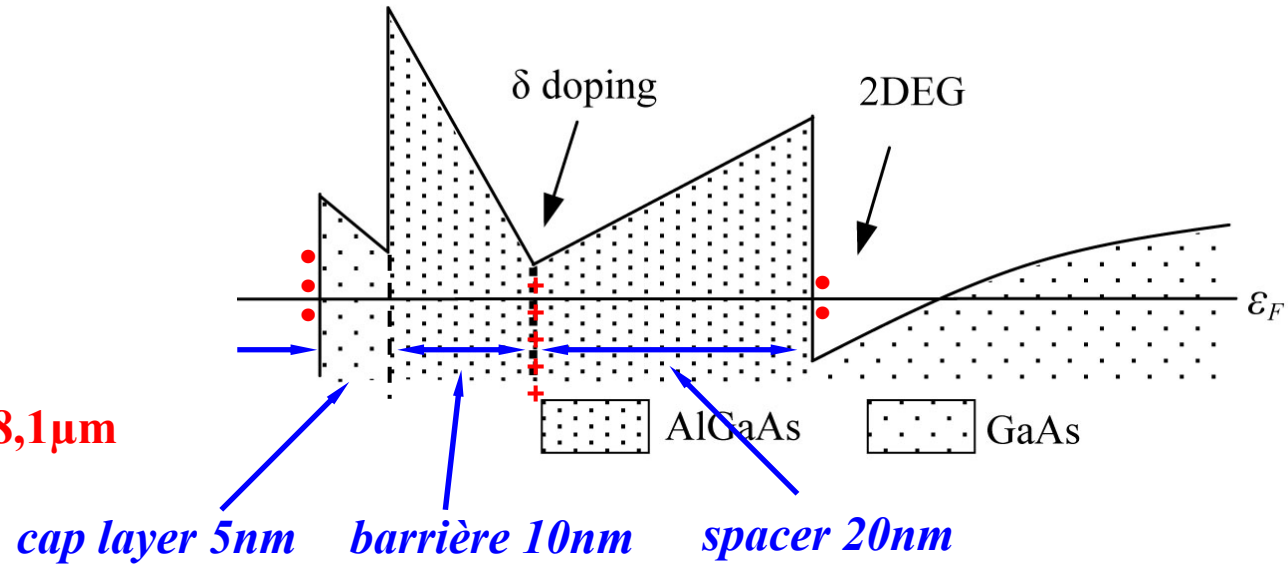
2DEG (gaz d'électron bidimensionnel)  
HEMT (High Electron Mobility Transistor)

à 4,2K :

$$n=5 \times 10^{11} / \text{cm}^2$$

$$\mu=0,7 \times 10^6 \text{cm}^2 / \text{Vs}$$

$$l_e = v_F \tau_e = v_F \mu m^* / e = 8,1 \mu\text{m}$$



## Critère de base du FET

- Gain en puissance  $A_p$  et gain en tension  $A_v$

$$A_p = \frac{\delta V_{out} \times \delta I_{DS}}{\delta V_{in} \times \delta I_{GS}}, \quad A_v = \frac{\delta V_{out}}{\delta V_{in}}$$

-  $A_p$  et  $A_v$

$$A_p = \frac{\delta V_{out} \times \delta I_{DS}}{\delta V_{in} \times \delta I_{GS}} = A_v \times \frac{\delta I_{DS}}{\delta I_{GS}} = A_v^2 \times \frac{\delta R_{in}}{\delta R_{out}}$$

-  $A_v > 1 \rightarrow A_p > 1$  car  $\delta R_{in} \gg \delta R_{out}$  et  $\delta I_{DS} \gg \delta I_{GS}$

- Par contre  $A_p > 1 \rightarrow A_v ?$

- Gain en tension intrinsèque  $A_v$  et paramètres électriques:

$$g_m = \partial I_{DS} / \partial V_{GS}, \quad g_d = \partial I_{DS} / \partial V_{DS},$$

$$A_v = \partial V_{DS} / \partial V_{GS} = g_m / g_d > 1$$

$$\Rightarrow \nearrow g_m + \searrow g_d$$

**Important :**

fort gain en tension  $\rightarrow$  faible bruit équivalent en tension à l'entrée

## **HEMT commerciaux → Dispositifs méso → Cryoélectronique**

### **- HEMTs commerciaux**

**avantages : hautes mobilité électronique et densité → Hyperfréquences**

**défauts : trop grande différence  $\mu$  entre le type n et le type p**

**courant de fuite de grille  $I_{gs}$  et bruit  $1/f$**

### **- 2DEG → Dispositifs pour la Physique Mésoscopique**

**Transport électronique en régime balistique**

**Température de fonctionnement jusqu'à 30 mK**

### **- Dispositifs Mésoscopiques → HEMTs cryogéniques**

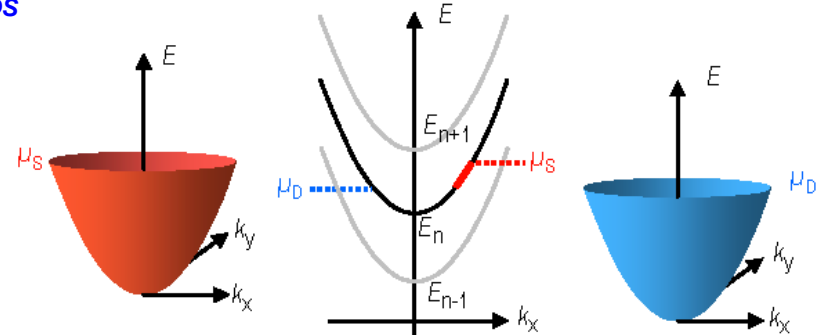
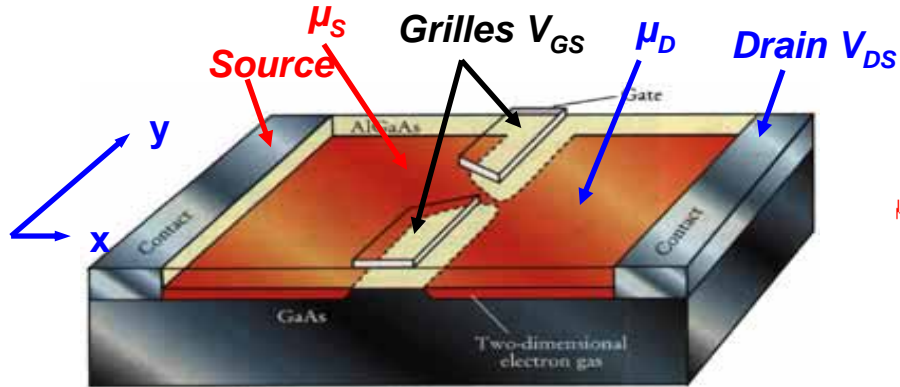
**verrous technologiques :  $I_{gs}$  et  $1/f$**

# Plan

- Introduction
  - 2DEG et HEMT
  - HEMTs commerciaux → dispositifs mésoscopiques → cryoélectronique
- **HEMT balistique 1D et multiplexage d'une matrice de bolomètres**
  - **Conducteur balistique 1D → HEMT balistique**
  - **Réalisation et résultats expérimentaux**
  - **Confirmation par le formalisme Landauer-Buttiker**
  - **Application dans le multiplexage d'une matrice de bolomètres**
- HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée
  - Réalisation et caractérisations
  - Résultats expérimentaux et comparaisons
  - Récents résultats
- Conclusions et perspectives

# Conducteur balistique quantique 1D par QPC 1/2

- Quantum Point Contact (QPC) sur un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG)



## Potentiel électrostatique et relation de dispersion

$$eV(x,y) = eV_0(V_{GS}, V_{DS}) + \frac{1}{2} m \omega_y^2 y^2 - \frac{1}{2} m \omega_x^2 x^2$$

$$E_n(k_x) = eV_0(V_{GS}, V_{DS}) + (n - \frac{1}{2})\hbar\omega_y + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$$

## Formalisme de Landauer-Büttiker (1D)

$$I = \frac{2e}{h} \int \{ \sum_n T_n(E) [f^+(E) - f^-(E)] \} dE$$

$$T_n(E) = [1 + \exp(-\pi \varepsilon_n)]^{-1} \quad \text{Phys. Rev. B41, 7906 (1990)}$$

$$\varepsilon_n = 2[E - \hbar\omega_y (n - \frac{1}{2}) - eV_0] / \hbar\omega_x$$

## Conducteur balistique quantique 1D par QPC 2/2

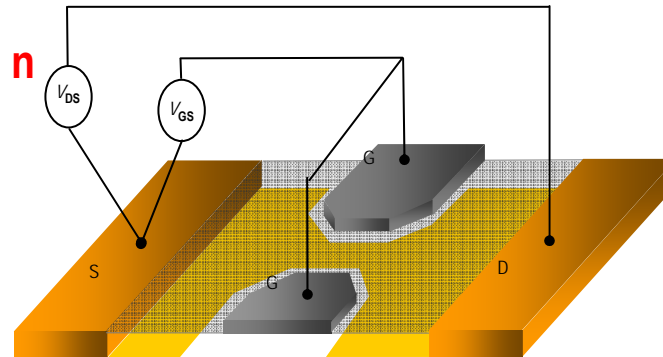
$$I_{DS} = \frac{2e}{h} \sum_n \frac{\hbar\omega_X}{2\pi} \ln \left( \frac{1 + \exp(2\pi(\mu_S - E_n)/\hbar\omega_X)}{1 + \exp(2\pi(\mu_D - E_n)/\hbar\omega_X)} \right)$$

$E_n$  : niveau d'énergie du bas de la sous bande  $n$

$$\mu_S = E_F$$

$$\mu_D = E_F - e V_{DS}$$

$$E_n = f(V_{GS}, V_{DS})$$

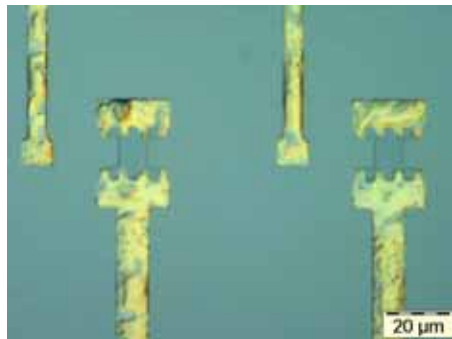
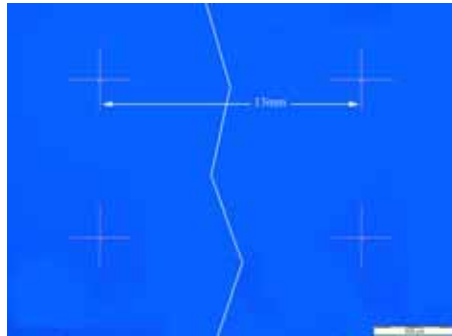


➔ Forte variation de  $I_{DS} \sim E_n(V_{GS})$  quand  $E_n \sim (\mu_S + \mu_D)/2 \rightarrow \nearrow g_m$

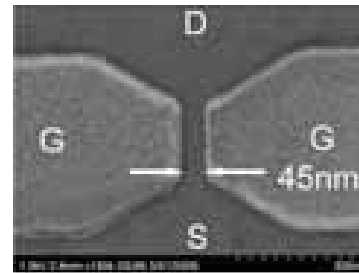
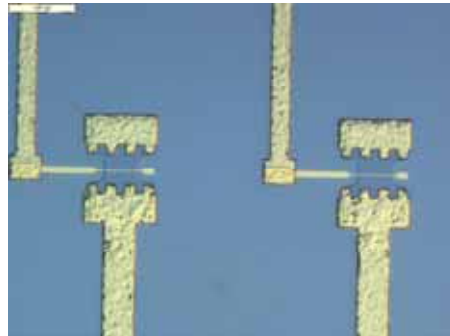
➔ Non linéarité de  $I_{DS} \sim \mu_D(V_{DS})$  quand  $\mu_D < E_n < \mu_S \rightarrow \searrow g_d$



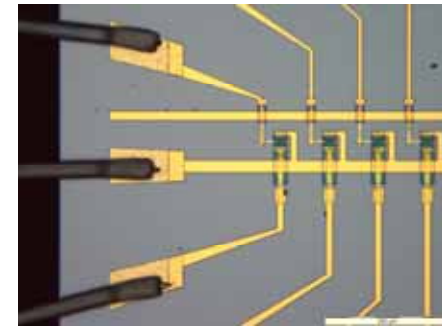
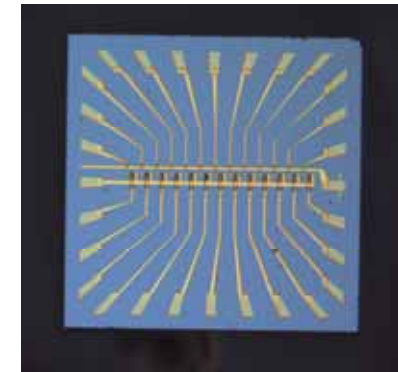
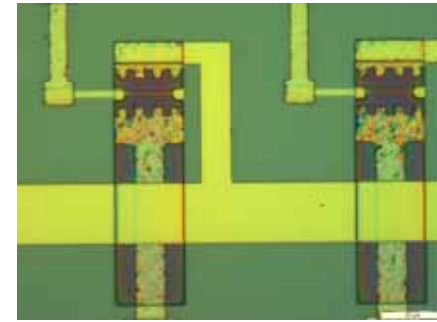
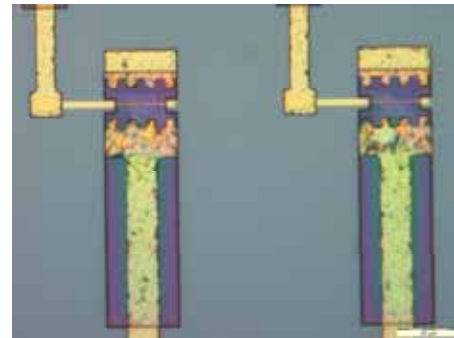
# Réalisation



Contact  $\Omega$

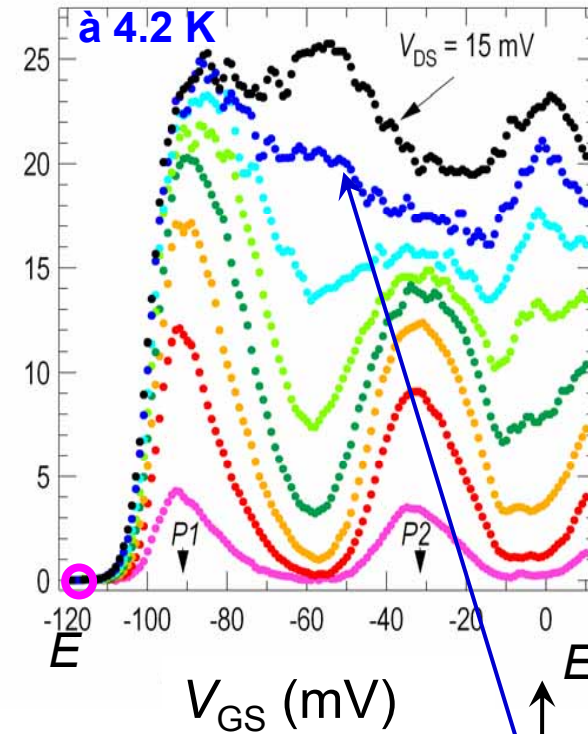
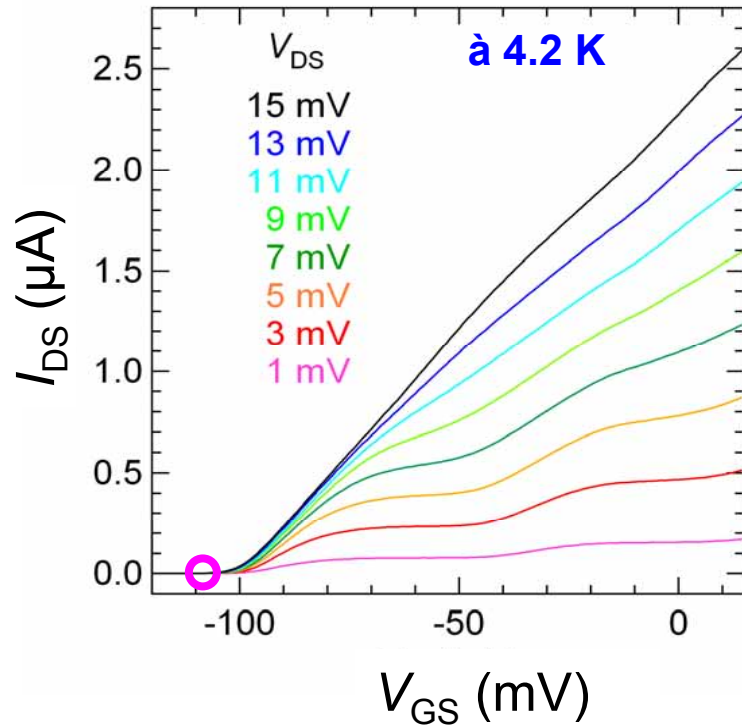


Grille à QPC



# Transconductance mesurée $g_m = \partial I_{DS} / \partial V_{GS}$

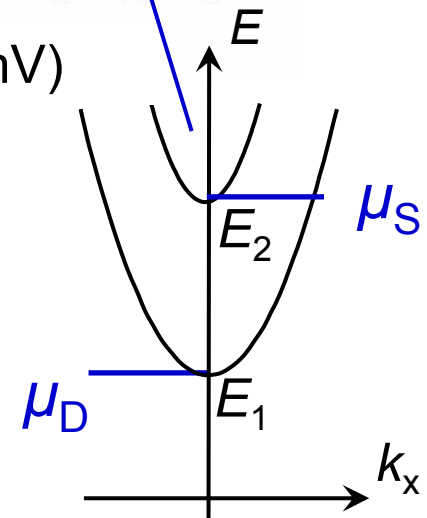
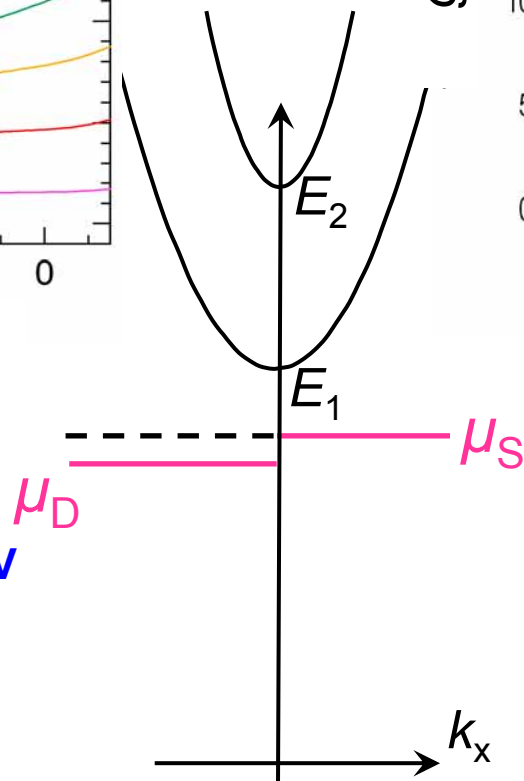
La transmission est modulée par les sous-bandes 1D  $\Rightarrow \nearrow g_m$



$g_m = 20 \mu S$

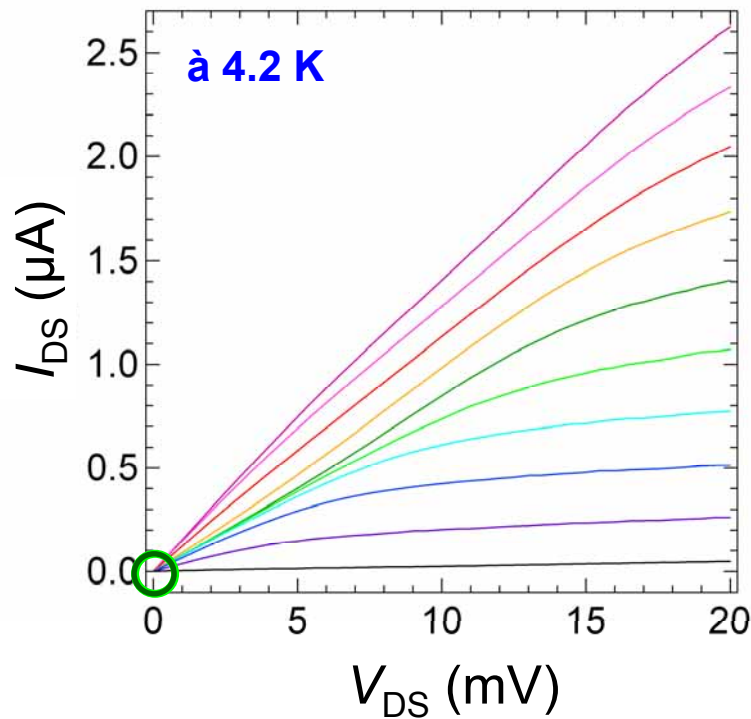
à  $V_{DS} = 7$  mV et  $V_{GS} = -90$  mV

$E_2 - E_1 = 13$  meV



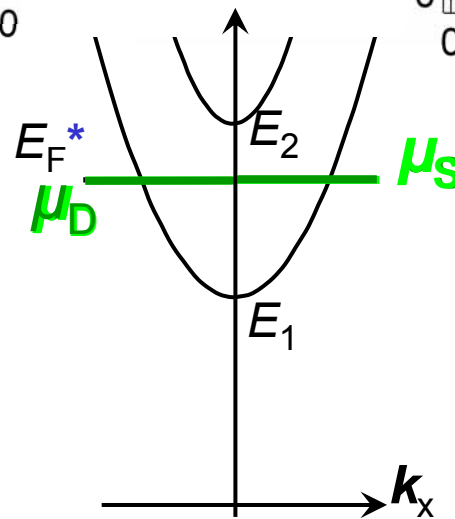
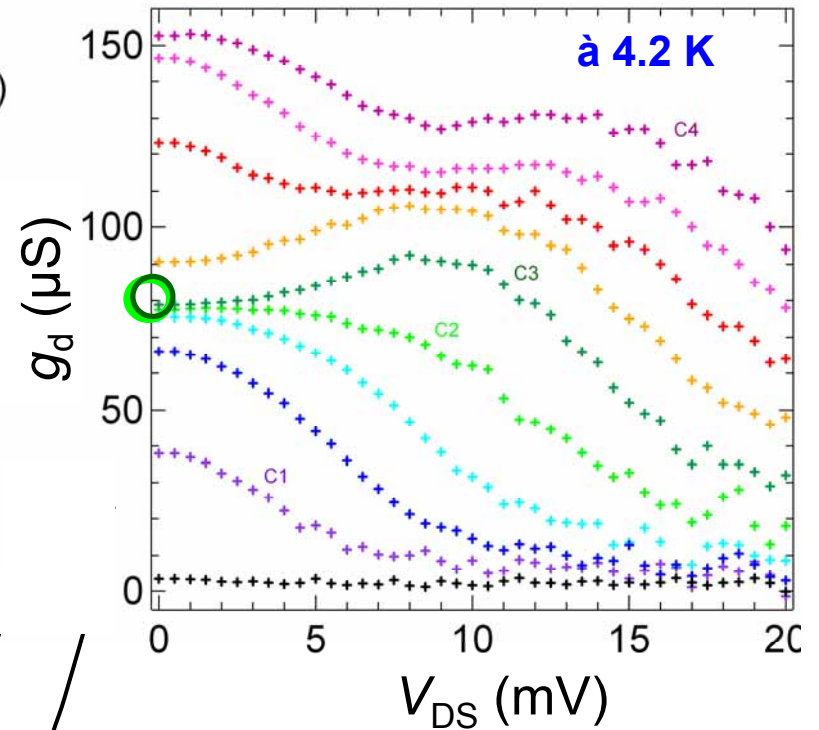
## Conductance de sortie mesurée $g_d = \partial I_{DS} / \partial V_{DS}$

L'injection d'électrons est contrôlée par les sous-bandes 1D  $\Rightarrow$  non linéarité  $\Rightarrow \searrow g_d$



$V_{GS}$  (mV)

- 10
- 20
- 30
- 40
- 50
- 60
- 70
- 80
- 90
- 100



$g_d = 10 \mu\text{S}$

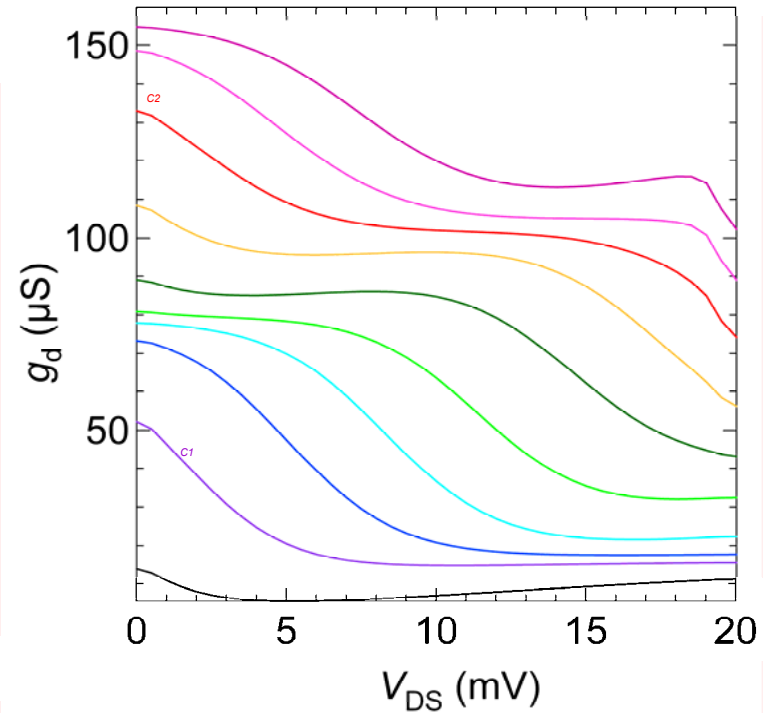
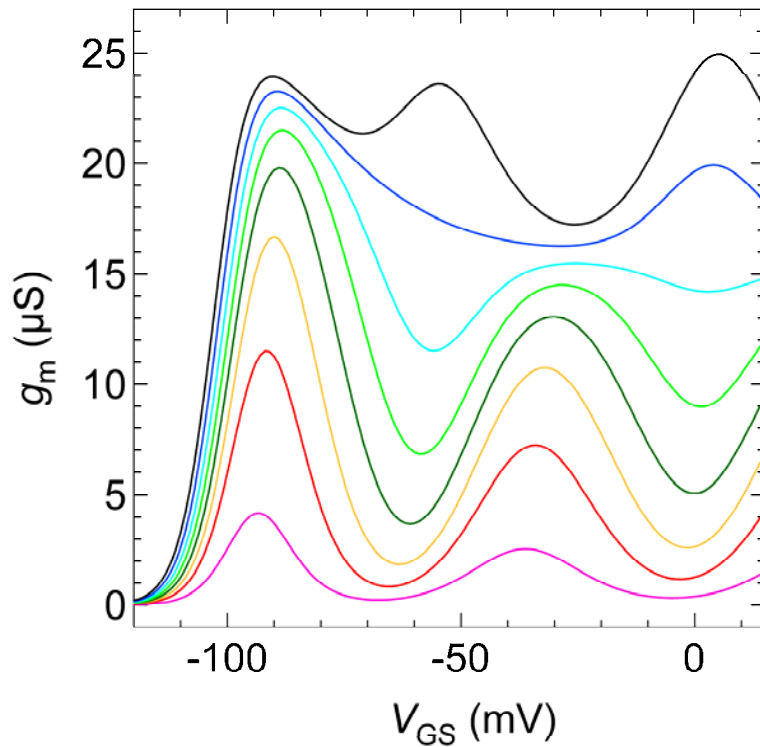
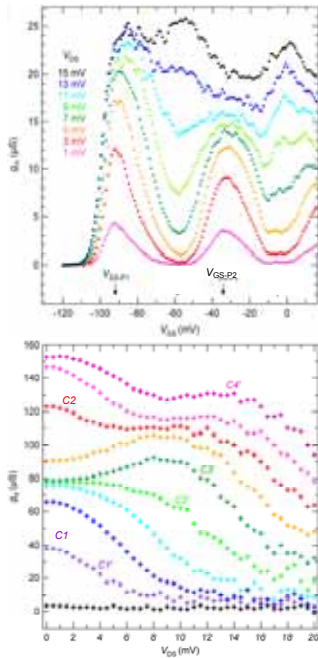
à  $V_{DS} = 7\text{mV}$  et  $V_{GS} = -90\text{ mV}$

## Confirmation par le formalisme Landauer-Büttiker

$$I_{DS} = \frac{2e}{h} \sum_n \frac{\hbar\omega_X}{2\pi} \ln \left( \frac{1 + \exp(2\pi(\mu_S - E_n)/\hbar\omega_X)}{1 + \exp(2\pi(\mu_D - E_n)/\hbar\omega_X)} \right)$$

$$\mu_S = E_F \quad \mu_D = E_F - eV_{DS}$$

$$E_n = E_{n0} + \alpha(V_{DS}) + \beta(V_{GS})$$



## Gain en tension

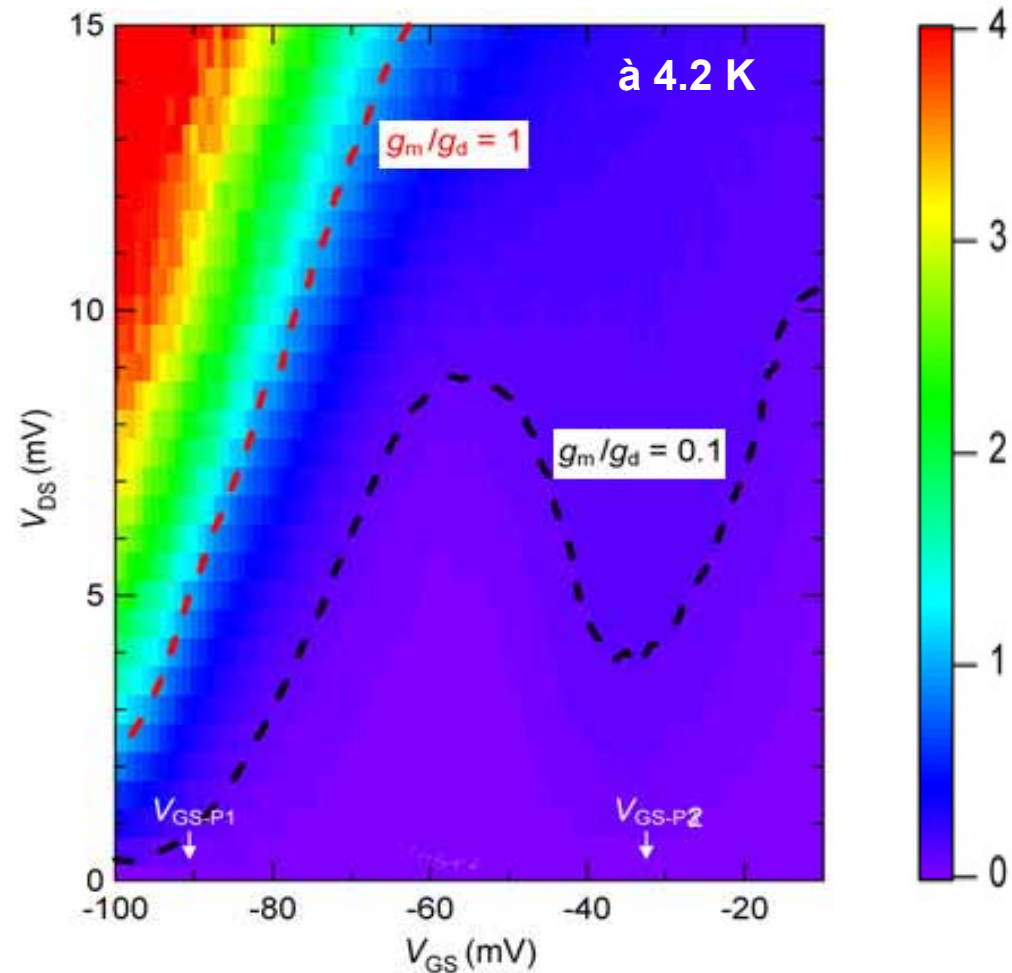
- Pour un point de fonctionnement

$V_{DS} = 7 \text{ mV}$ ,  $I_{DS} = 0,17 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $P = 1,2 \text{ nW}$

$g_m = 20 \text{ }\mu\text{S}$ ,  $g_d = 10 \text{ }\mu\text{S} \Rightarrow A_V = g_m/g_d = 2$

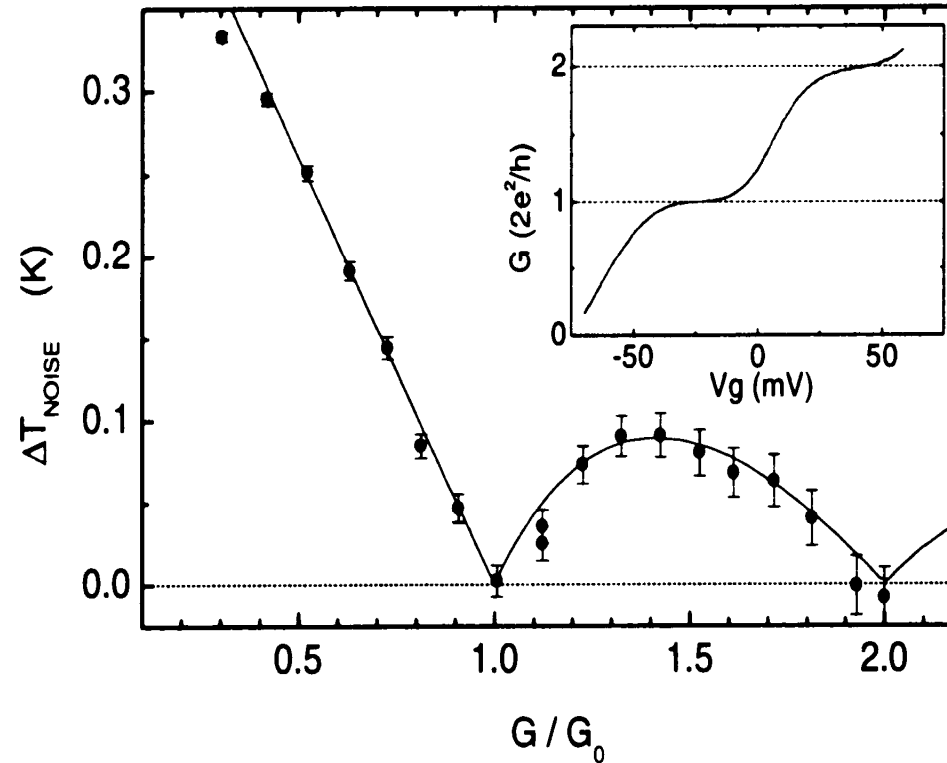
- Dans la région de la première sous-bande 1D :

$$A_V = g_m/g_d > 1$$



*Appl. Phys. Lett. 97, 233505 (2010)*

## Réduction quantique du bruit de grenaille



$$\langle (\Delta I)^2 \rangle = 2 e I \Delta f \frac{\sum T_n (1 - T_n)}{\sum T_n} \quad \text{PRL, 76, 2778, 1996}$$

FET balistique est intrinsèquement parfait, mais, extrinsèquement...



# Application dans le multiplexage d'une matrice de bolomètres

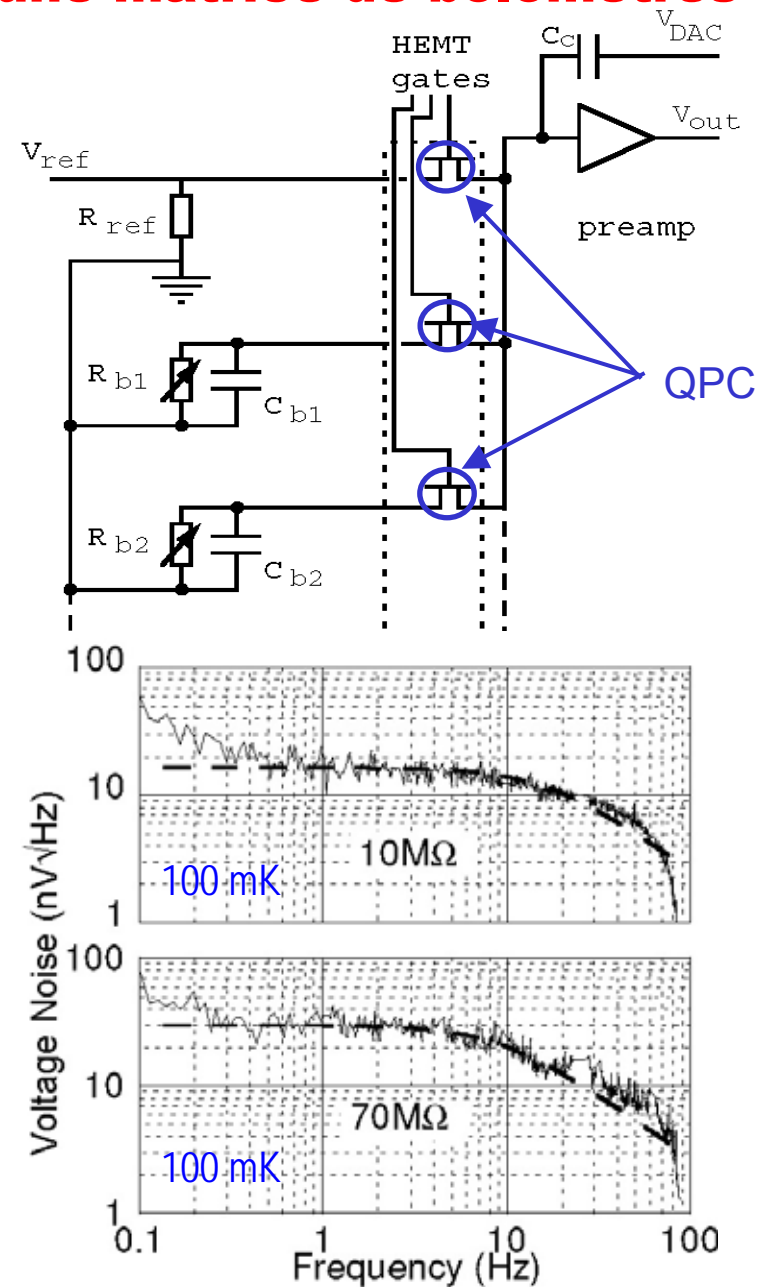
Collaboration : Alain BENOIT, Institut Néel/CNRS

## • Cahier des charges de l'interrupteur

- Faible capacité  $C_{GS} < 1$  fF
- Faible  $R_{on}$  (par rapport à  $R_{bolomètre}$ )
- Faible  $I_{GS}$  (bruit de grenaille)  $< 1$  pA
- Faible puissance dissipée

$T = 4.2$ K	HEMT FHX35LG Fujitsu	MESFET CF739 Infineon	QPC CNRS/LPN
$V_{GS-ON}$	- 0.2 V	- 1.5 V	+ 100 mV
$V_{GS-OFF}$	- 0.7 V	- 2.3 V	- 100 mV
$R_{ON}$	< 10 k $\Omega$	< 10 k $\Omega$	~ 10 k $\Omega$
$I_{GS-ON}$	X	X	< 0.1 pA
$I_{GS-OFF}$	~ 10 pA	~ 30 pA	< 0.1 pA
$C_{GS}$	0.1/0.3 pF	X	< 1 fF

Rev. Sci. Instrum. 78, 035104 (2007)



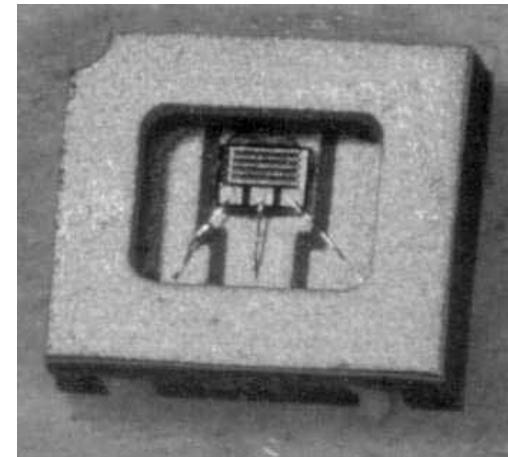
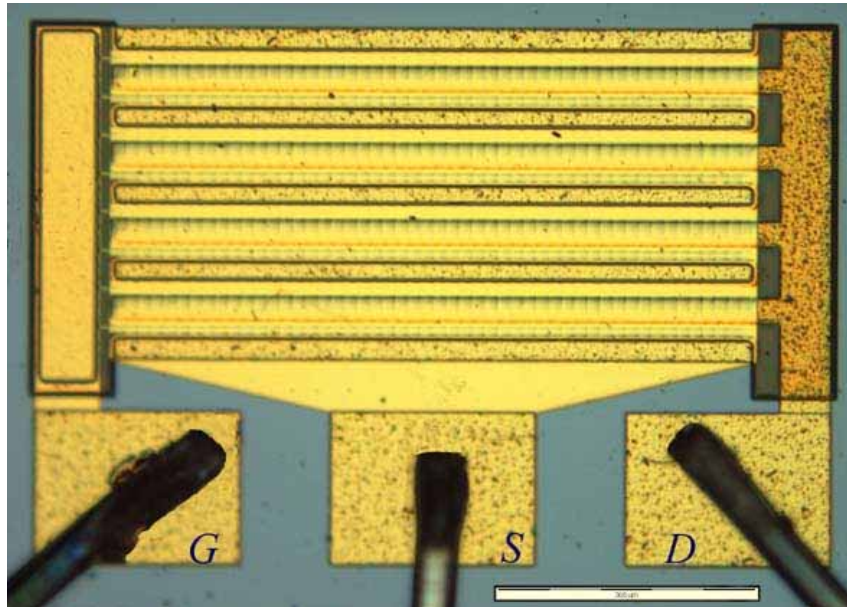
# Plan

- Introduction
  - 2DEG et HEMT
  - HEMTs commerciaux → dispositifs mésoscopiques → cryoélectronique
- HEMT balistique 1D et multiplexage d'une matrice de bolomètres
  - Conducteur balistique 1D → HEMT balistique
  - Réalisation et résultats expérimentaux
  - Confirmation par le formalisme Landauer-Buttiker
  - Application dans le multiplexage d'une matrice de bolomètres
- **HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée**
  - **Réalisation et caractérisations**
  - **Résultats expérimentaux et comparaisons**
  - **Récents résultats**
- Conclusions et perspectives



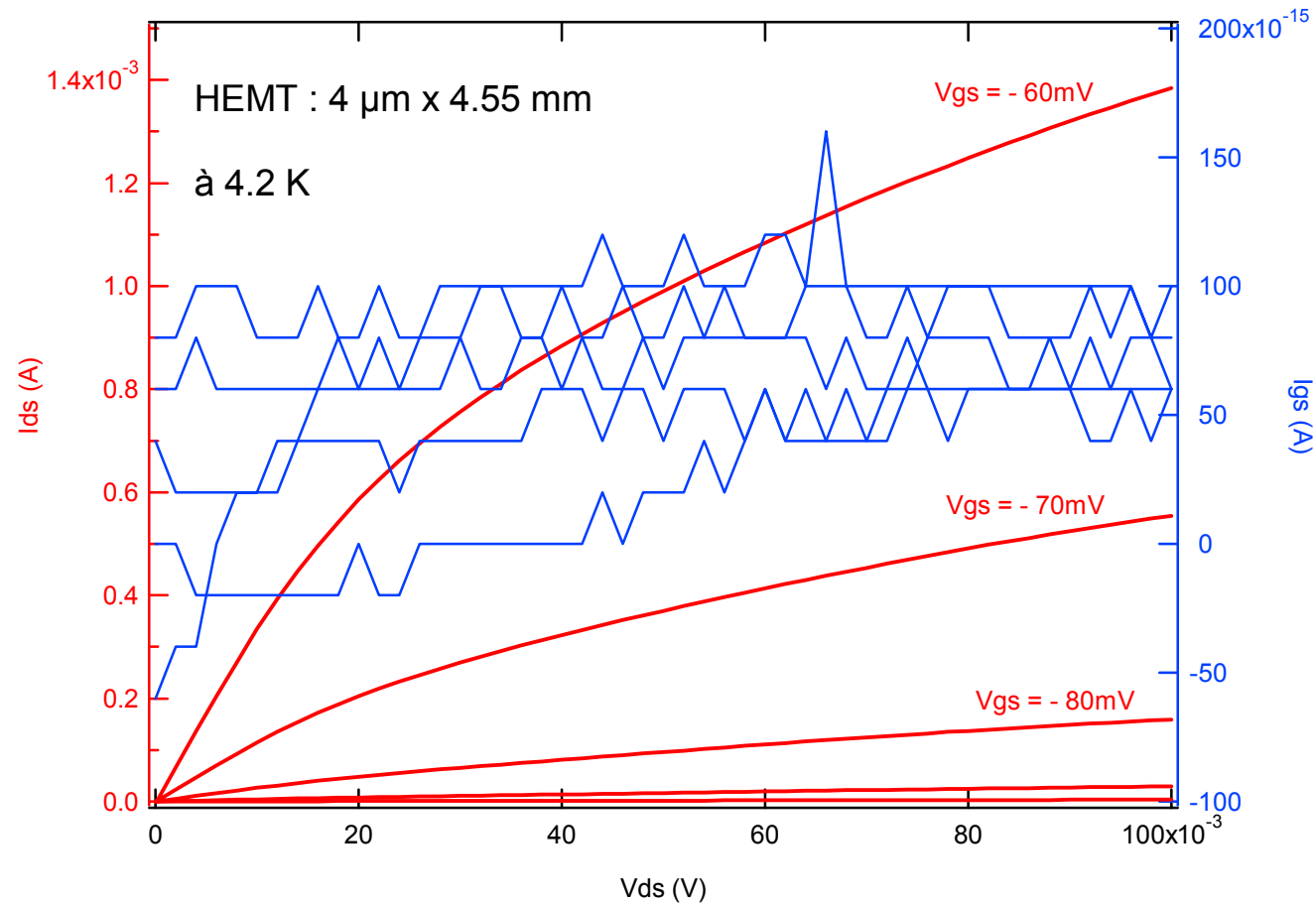
# HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

## Réalisation



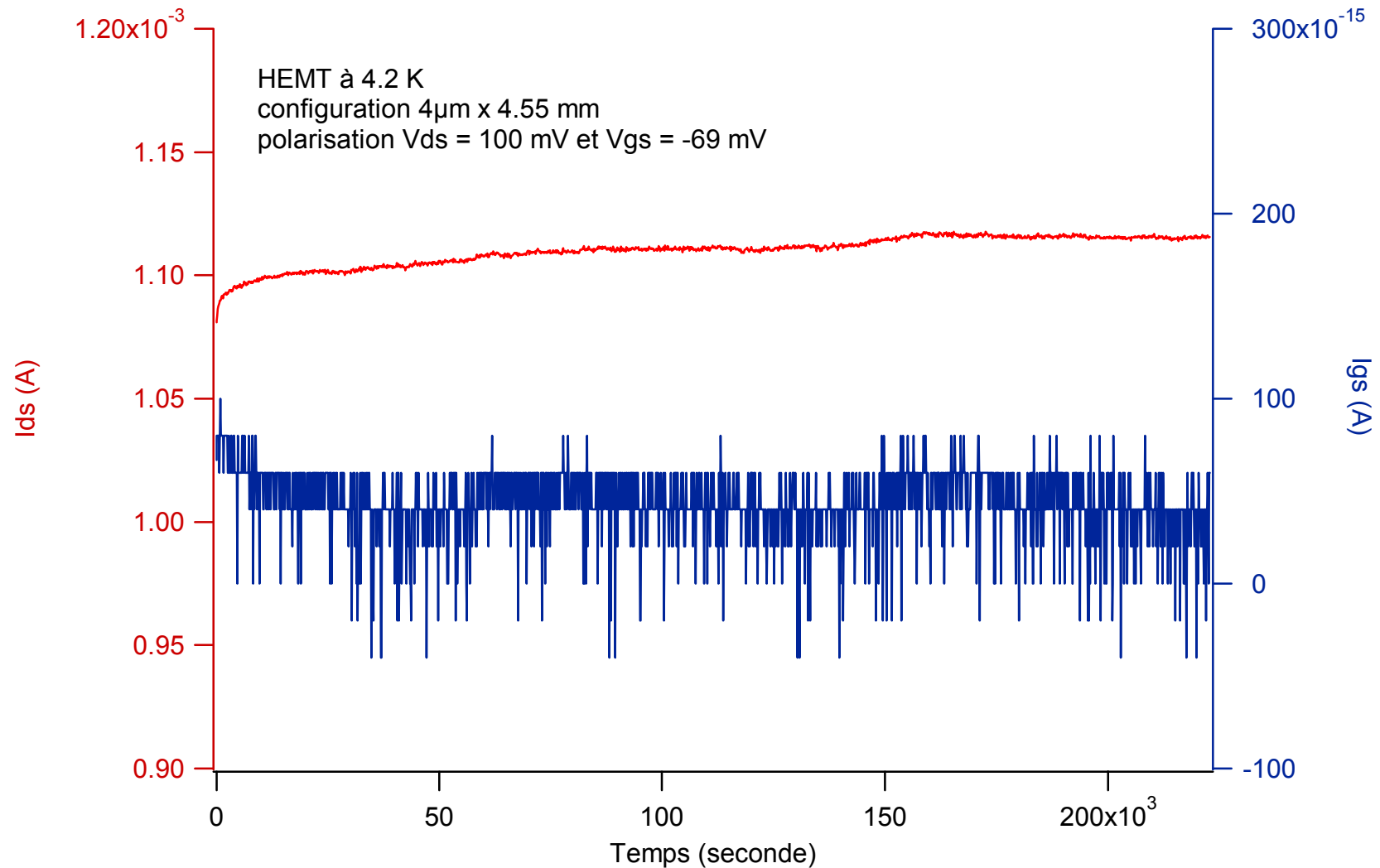
# HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

## Caractéristique I-V



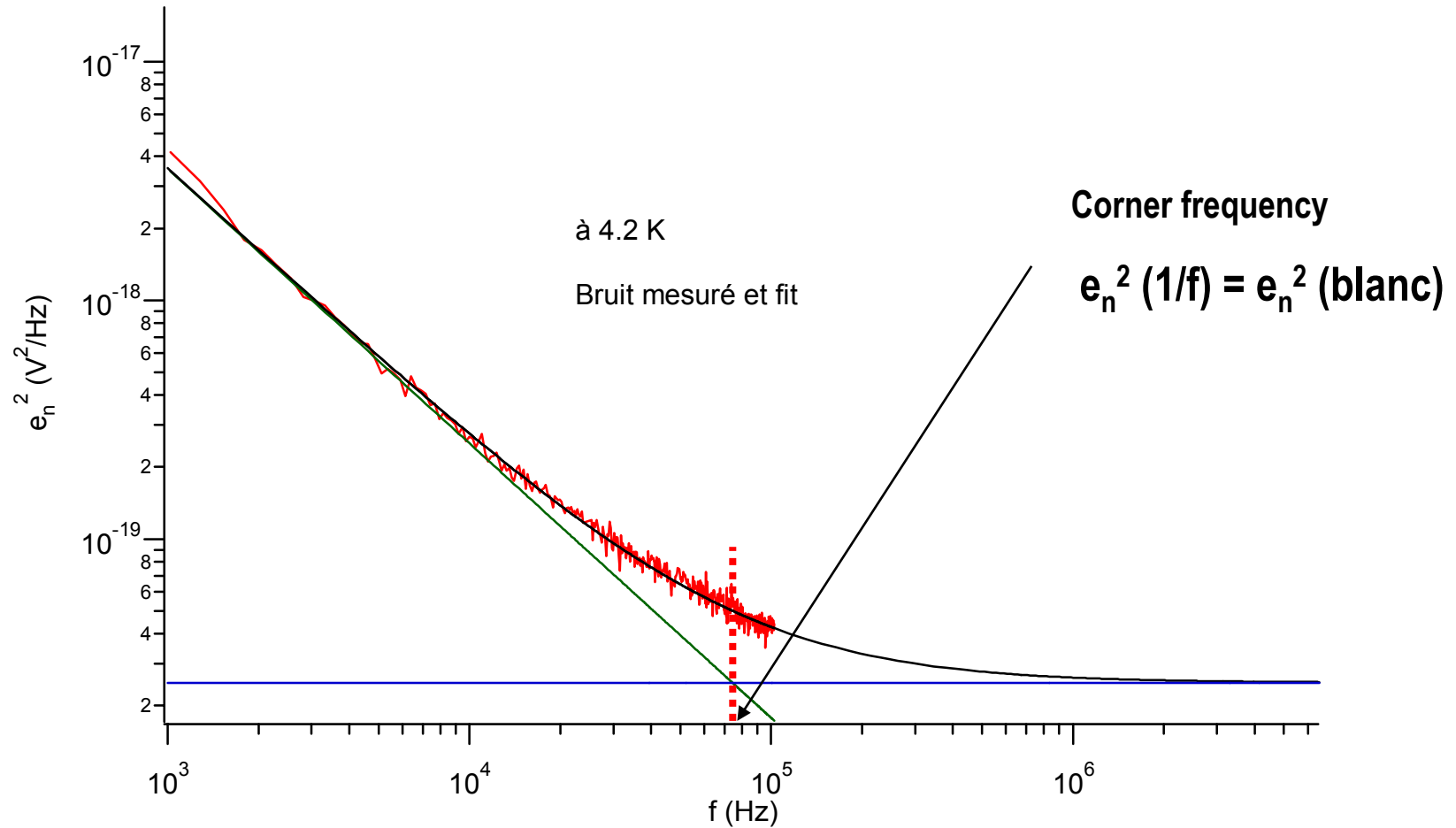
# HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

## Évolution en temps



# HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

## Spectre de bruits



Aire de la surface de grille  $1.8 \times 10^4 \mu m^2$  ( $4 \mu m \times 4.55 mm$ )

## HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

### Résultats expérimentaux et comparaisons

Transistor	T	Puissance dissipée	Capacité d'entrée	Bruit en tension à 1kHz nV/sqrt(Hz)	Minimum de bruit en tension nV/sqrt(Hz)	Courant de fuite de grille pA	Bruit en courant fA/sqrt(Hz)
Si JFET InterFET	> 100K	20 mW	~ 10 pF	0.8	0.8 f > 100 Hz	10 à 300 K	1.5 à 300 K
HEMT Agilent	4K	500 $\mu$ W	20 fF	~16	0.7 f = 1 – 3 MHz	~ 2000	25
HEMT LPN	4K	< 100 $\mu$ W	30 pF	1.8	~ 0.18 f >> 100kHz	< 0.1	< 0.18

## HEMTs à très bas bruit et à faible puissance dissipée

Récents résultats :

Hétérostructure + configuration : ➔  $I_{gs} < 0.1 \text{ pA}$  + réduction du bruit  $1/f$  :

Aire de la surface de grille $\mu\text{m}^2$	Bruit équivalent à l'entrée @ 1 kHz $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	Bruit équivalent à l'entrée blanc $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$3.2 \times 10^4$	0.80	~ 0.16
$1.4 \times 10^5$	0.50	$\leq 0.16$

## Conclusions et perspectives

- Technologies de fabrication
- Physique mésoscopique ➔ FET balistique
- Réductions de  $I_{gs}$  et bruit  $1/f$  dans des HEMTs cryogéniques
- Déterminer prochainement le protocole de fabrication
- Optimiser l'hétérostructure et la configuration de grille
- Répondre aux besoins spécifiques



**E. Grémion (LPN, puis CEA)**

**Y. Liang (postdoc)**

**M. Cheng (Clarkson Univ. NY)**

**D. Niepce (ENS, Cachan)**

**U. Gennser**

**A. Cavanna**

**L. Couraud**

**Y. J.**

**A. Benoit (IN/CNRS)**

**G. Chardin (IN2P3)**

**C. Pigot (CEA)**

**Cette étude a été financée en partie par :**

- **DCMB** (contrat CNES);
- **ArTeMiS** (ANR)
- **BDI CNRS-CEA** pour E.G dans le cadre du programme EDELWEISS, soutenue 2008
- **ULYSSE I&II** contrat Triangle de la Physique pour Y.L, 2008-2010
- **Barrette des HEMTs pour BOLOX** contrat CEA, 2009
- **BDI CNRS-CEA** (à partir du 01-10-2009)

