



Séminaire au Laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'univers

Par **Damien PRÊLE** du Laboratoire des Instruments et Systèmes d'Île de France P6

Équipe de recherche LISIF : **M. REDON, G. KLISNICK et G. SOU**

Collaboration APC : **F. VOISIN, E. BREELLE et M. PIAT**

Collaboration LGEP : **A. KREISLER**

INSTRUMENTATION CRYOGÉNIQUE BAS BRUIT ET LARGE BANDE EN TECHNOLOGIE SiGe

Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

Problématique : ASIC Cryogénique

- ASIC → Technologie Standard
 - CMOS : fonctionne à température cryogénique (thèse de Fabrice VOISIN 2002).
 - + Faible consommation
 - + Très grande résistance d'entrée ($> M\Omega$)
 - + Bas coût (qq k€/run)
 - Limité en fréquence ($\ll GHz$)
 - Faible transconductance ($< 10 mS$)
 - Bruit basse fréquence ($1/f$) élevé ($f_c > 10 kHz$)

Problématique (2) : ASIC Cryogénique

- Bipolaire (technologies BiCMOS) : **BJT**

- *Fonctionne à température cryogénique ?*

- + Fort gain en tension dû à une transconductance élevée ($g_m > 10 \text{ mS}$)

- + Faible bruit en $1/f$ ($f_c < 1 \text{ kHz}$)

- Assez limité en fréquence ($f_T < 1 \text{ GHz}$)

- Faible impédance d'entrée ($h_{11} < 1 \text{ k}\Omega$ à 77 K)

- Forte diminution du gain en courant à basse température + *freeze out* (typiquement 50 K)

Problématique (3) : ASIC Cryogénique

- **Bipolaire à hétérojonction Si/SiGe (technologies BiCMOS SiGe) : HBT SiGe**
 - *Dans la littérature il apparaît des caractérisations laissant pressentir un fonctionnement à basse température 77 K et même à plus basse température.*
 - + Fort gain en tension
 - + Faible bruit en $1/f$
 - + Fonctionnement à haute fréquence ($f_T > 10$ GHz)
 - + Possible augmentation du gain en courant à basse T
 - + Impédance d'entrée plus grande qu'un BJT
 - + Technologie standard
 - **Coût plus élevé qu'une technologie CMOS**

Problématique (4) : ASIC Cryogénique

- Développement d'ASIC :
 - Utilisation d'un outil de CAO :
 - Modèles de transistors
 - Nécessité d'une phase de caractérisation à température cryogénique*
 - Vérification du fonctionnement
 - Évolution des paramètres en fonction de T
 - Prédiction du bon fonctionnement à température cryogénique à partir de simulations à 300 K

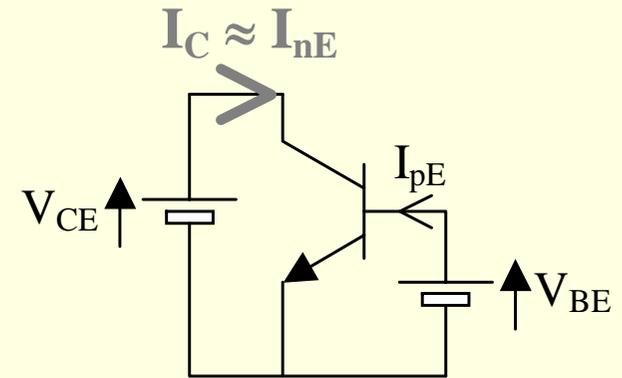
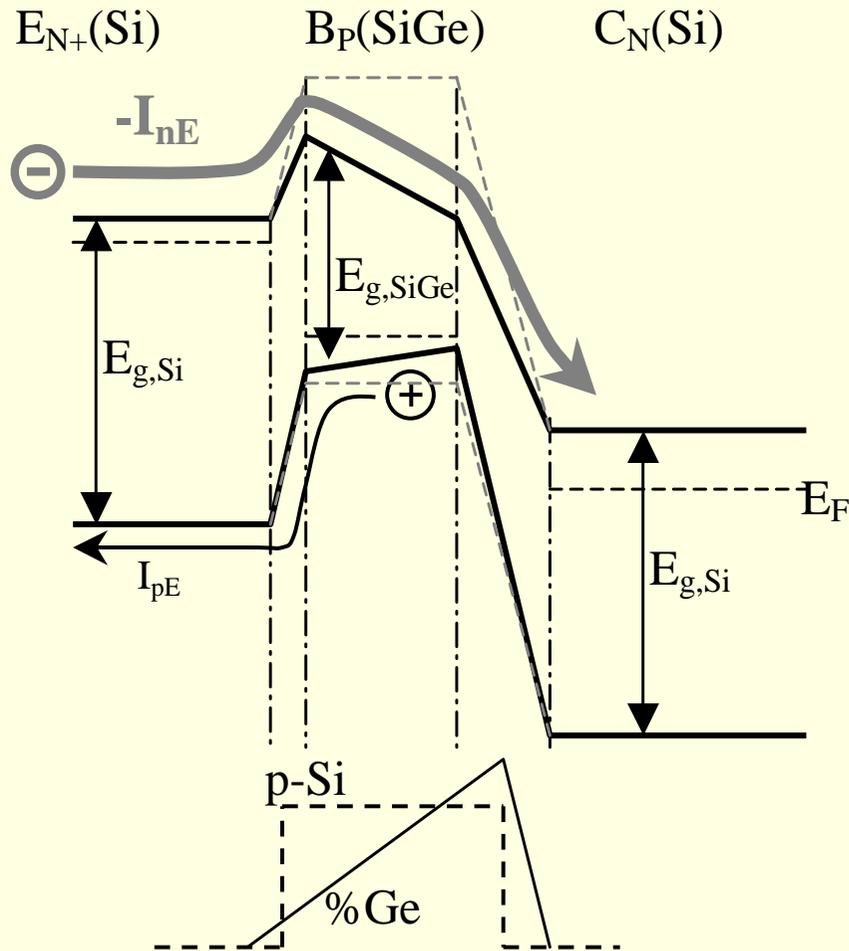
Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

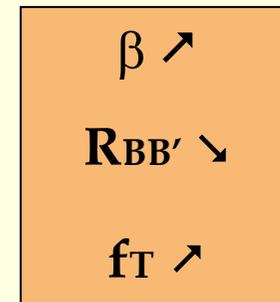
Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe

- Deux technologies BiCMOS SiGe du fondeur Austria Micro Systems (AMS)
 - $0.8 \mu m$
 - $0.35 \mu m$
- Applications à 77 K : *les transistors bipolaires tout Silicium (BJT) fonctionnent mais avec une décroissance forte du gain en courant et une forte réduction de l'impédance d'entrée. Le SiGe offre de meilleures performances.*
- A 4.2 K *les BJT ne fonctionnent plus tandis que les SiGe fonctionnent encore.*
- Ainsi nous ne nous sommes intéressés au SiGe seul.

Transistor Bipolaire à Hétérojonction SiGe (HBT)

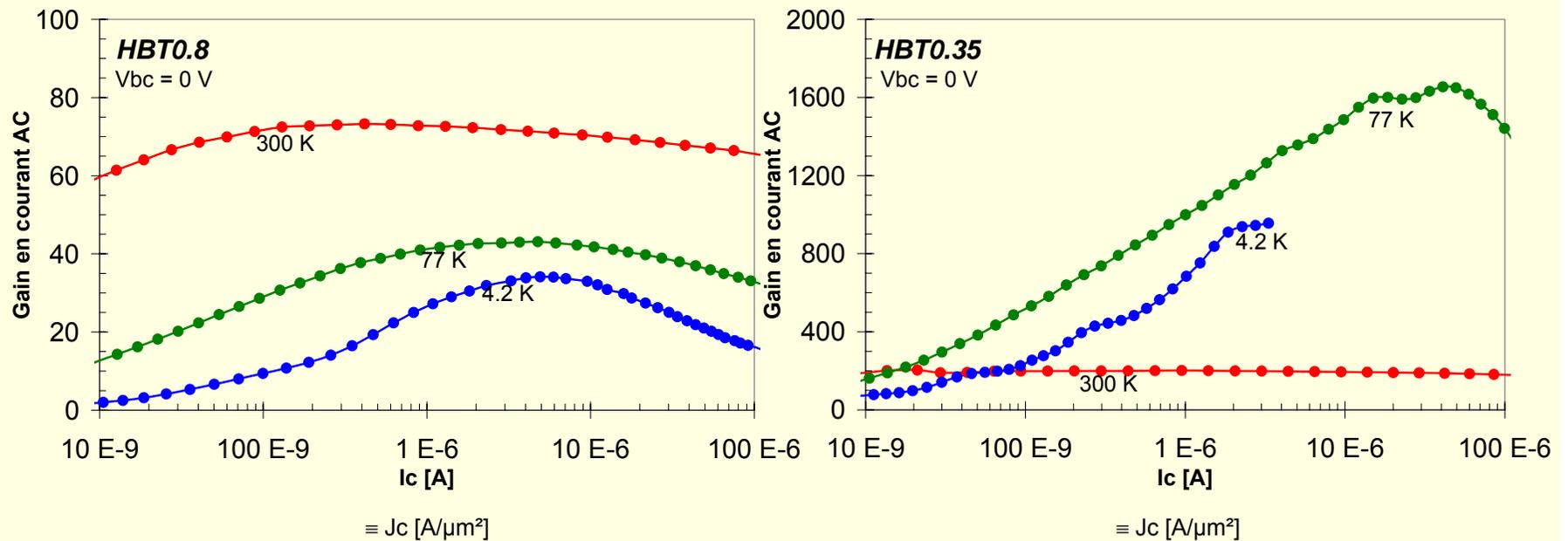


HBT SiGe



Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (2)

- Gain en Courant à 300, 77 et 4.2 K :



Expression du Gain en Courant

Soit
$$\beta = \frac{\mu_n L_p N_{dE}}{\mu_p W_B N_{aB}} \cdot \frac{n_{iB}^2}{n_{iE}^2} = \frac{\mu_n L_p N_{dE}}{\mu_p W_B N_{aB}} \exp \frac{E_{gE} - E_{gB}}{k_B T}$$

Avec $n_i^2 = N_C N_V \exp \left(\frac{-E_g}{k_B T} \right)$ la densité intrinsèque de porteurs

Expression du Gain en Courant (2)

- Expression du Gain en Courant d'un BJT

$$\beta \propto \exp \frac{E_{gE} - E_{gB}}{k_B T}$$

Fort dopage de l'émetteur : $E_{gE} = E_{gSi} - \Delta E_{gEapp}$

$$E_{gE} - E_{gB} \approx \underbrace{(E_{gSi} - \Delta E_{gEapp}) - E_{gSi}}_{- \Delta E_{gEapp}} \implies \beta \propto \exp \frac{-\Delta E_{gEapp}}{k_B T}$$

Expression du Gain en Courant (3)

- Expression du Gain en Courant d'un HBT **SiGe**

$$\beta \propto \exp \frac{E_{gE} - E_{gB}}{k_B T} = \exp \frac{E_{gSiFortementDopé} - E_{gSiGe}}{k_B T}$$

$$BJT Si \rightarrow E_{gE} - E_{gB} \approx \left(E_{gSi} - E_{gSi} \right)^{=0} \Delta E_{gEapp}$$

$$HBT SiGe \rightarrow E_{gE} - E_{gB} \approx \left(E_{gSi} - E_{gSiGe} \right)^{>0} \Delta E_{gEapp}$$

Meilleur gain en courant à basse température !

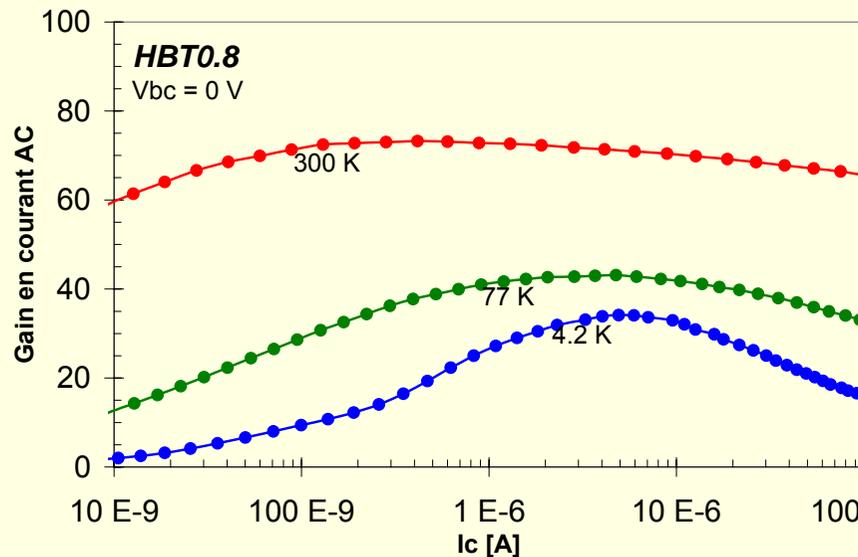
Expression du Gain en Courant (4)

$$\beta \propto \exp \frac{E_{gE} - E_{gB}}{k_B T}$$

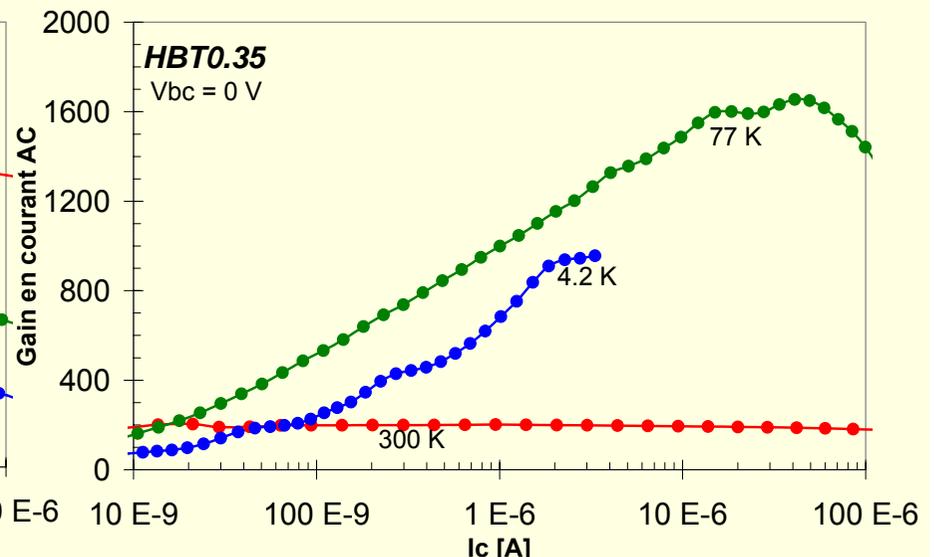
$$(E_{gSi} - E_{gSiGe}) - \Delta E_{gEapp} < 0$$

mais $> -\Delta E_{gEapp}$ (cas du BJT)

$$(E_{gSi} - E_{gSiGe}) - \Delta E_{gEapp} > 0$$



prele@lisif.jussieu.fr



Instrumentation Cryogénique Bas Bruit
et Large Bande en Technologie SiGe

Gain en tension

- Gain en tension d'un émetteur commun:

$$A_V = -gm.R_C$$

- Théorie de la diffusion :

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{k_B T / q}\right)$$

soit $gm = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{qI_C}{k_B T}$

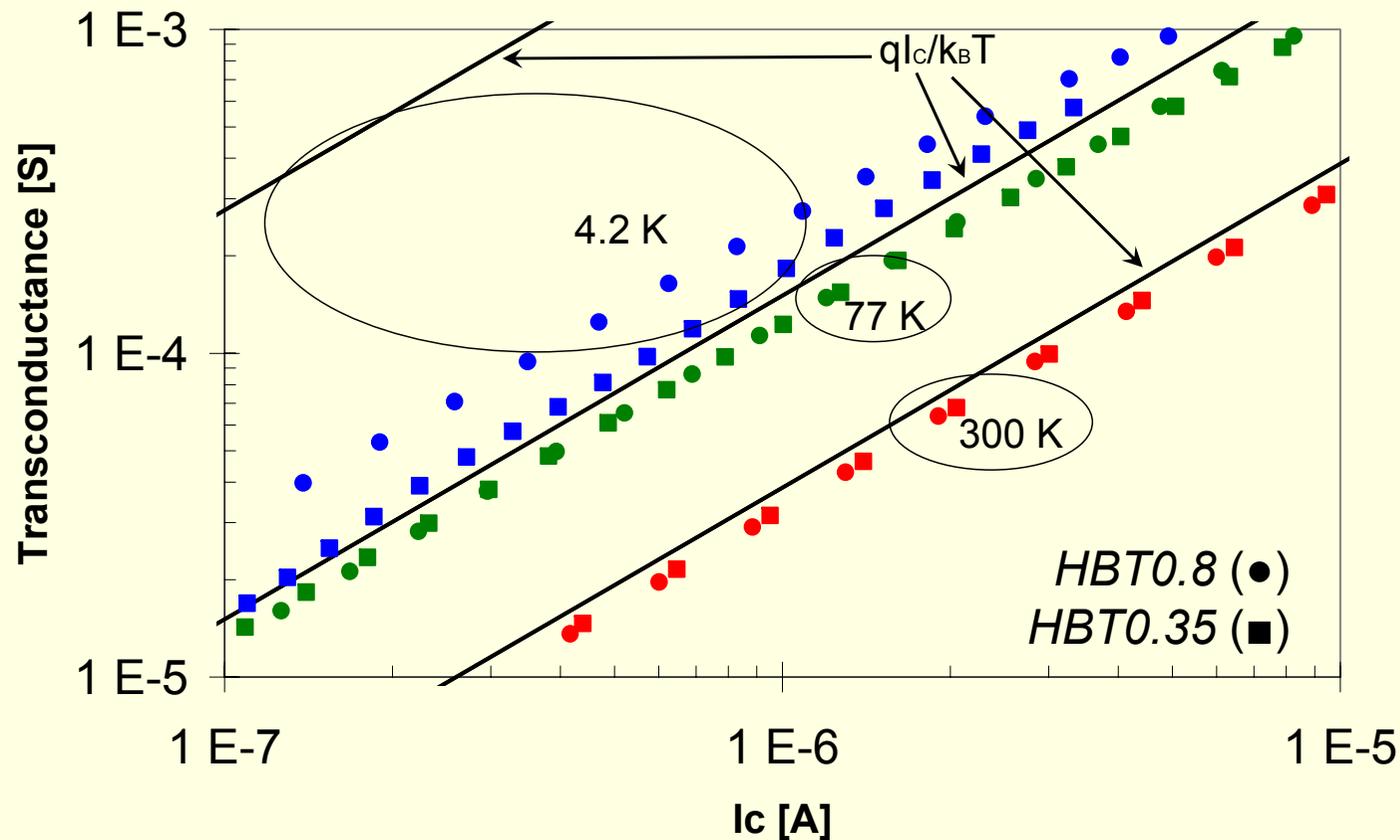
$$A_V \propto gm \propto T^{-1}$$

$$300 \text{ K} \rightarrow 77 \text{ K} : A_V \times 4$$

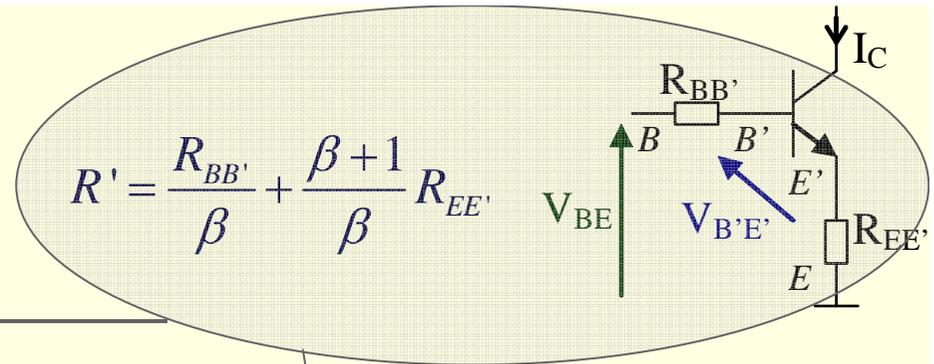
$$300 \text{ K} \rightarrow 4.2 \text{ K} : A_V \times 70 !$$

Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (3)

■ Transconductance gm à 300, 77 et 4.2 K

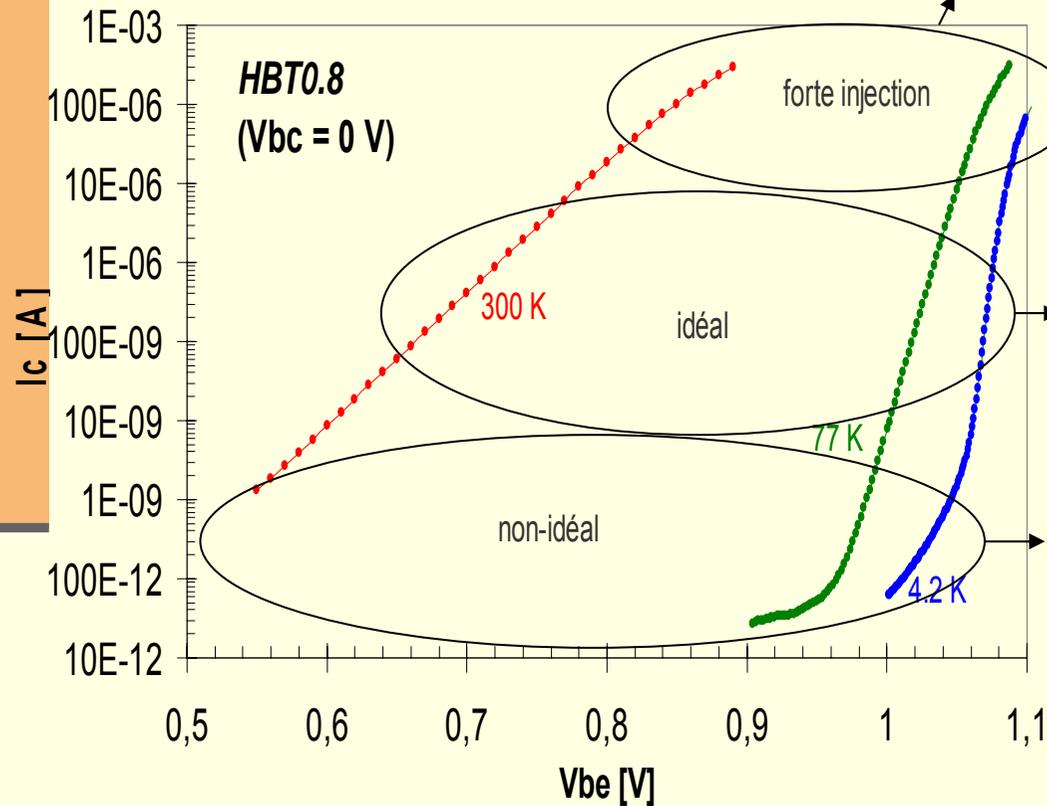


Facteur d'ajustement α



$$I_C = I_S \cdot \exp(qV_{BE}/k_B T)$$

$$g_m = \partial I_C / \partial V_{BE}$$



$$g_m = \frac{qI_C}{\left(1 + R' \cdot \frac{qI_C}{k_B T}\right) k_B T}$$

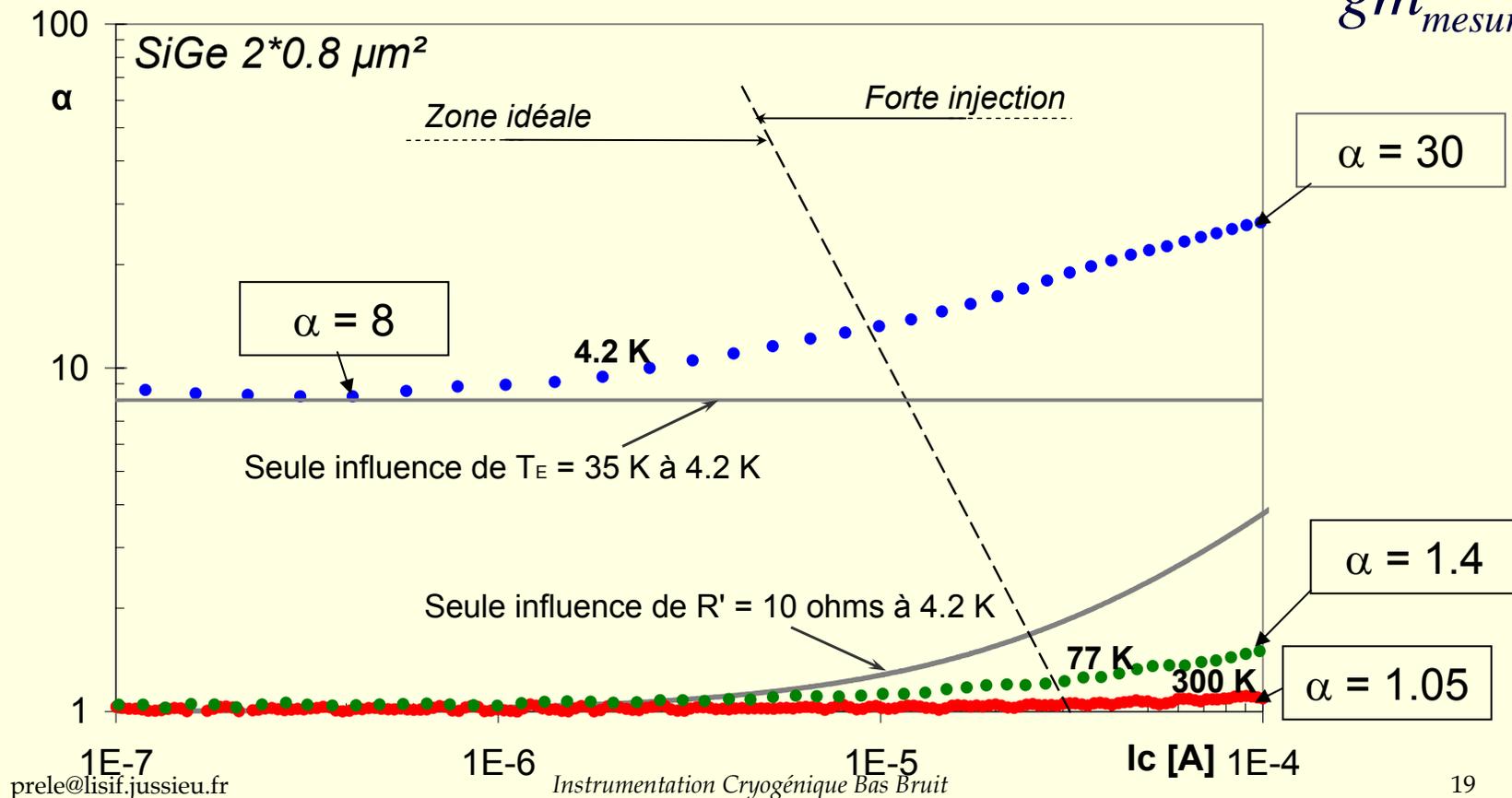
$$g_m = \frac{qI_C}{k_B T_E}$$

$$g_m = \frac{qI_C}{\eta k_B T}$$

$$\frac{qI_C}{\alpha k_B T}$$

Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (4)

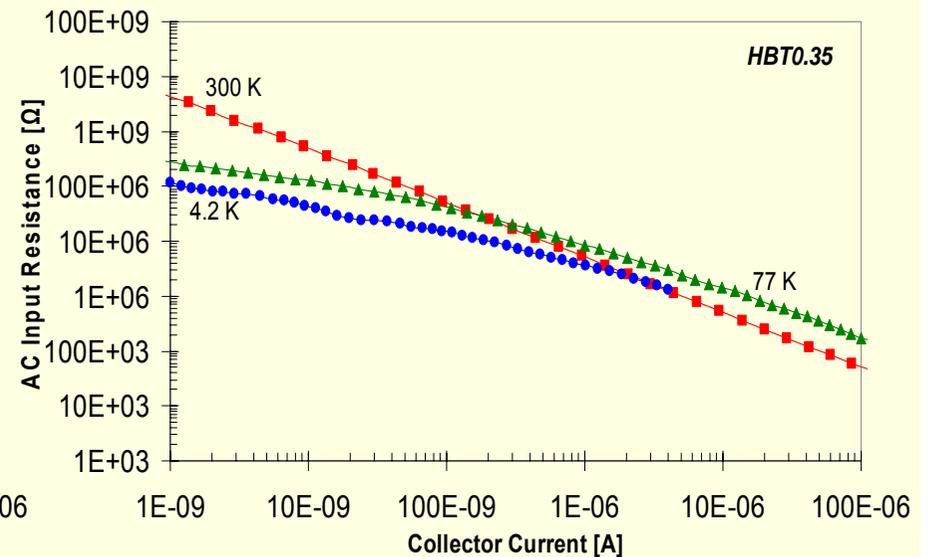
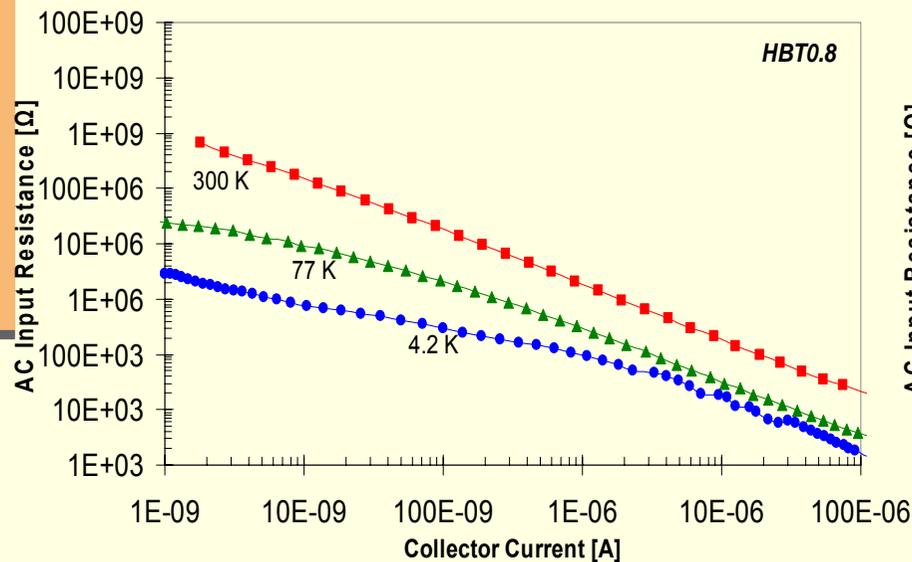
- Facteur d'ajustement à 300, 77 et 4.2 K : $\alpha = \frac{qI_C / k_B T}{gm_{mesuré}}$



Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (5)

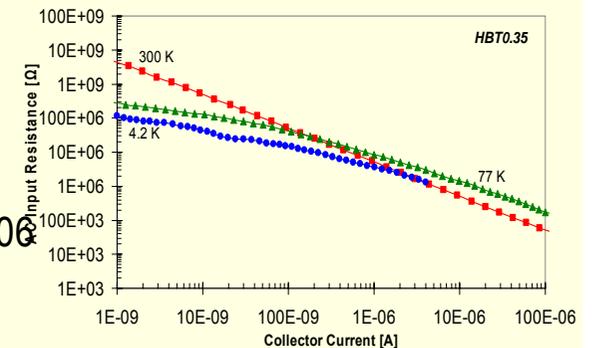
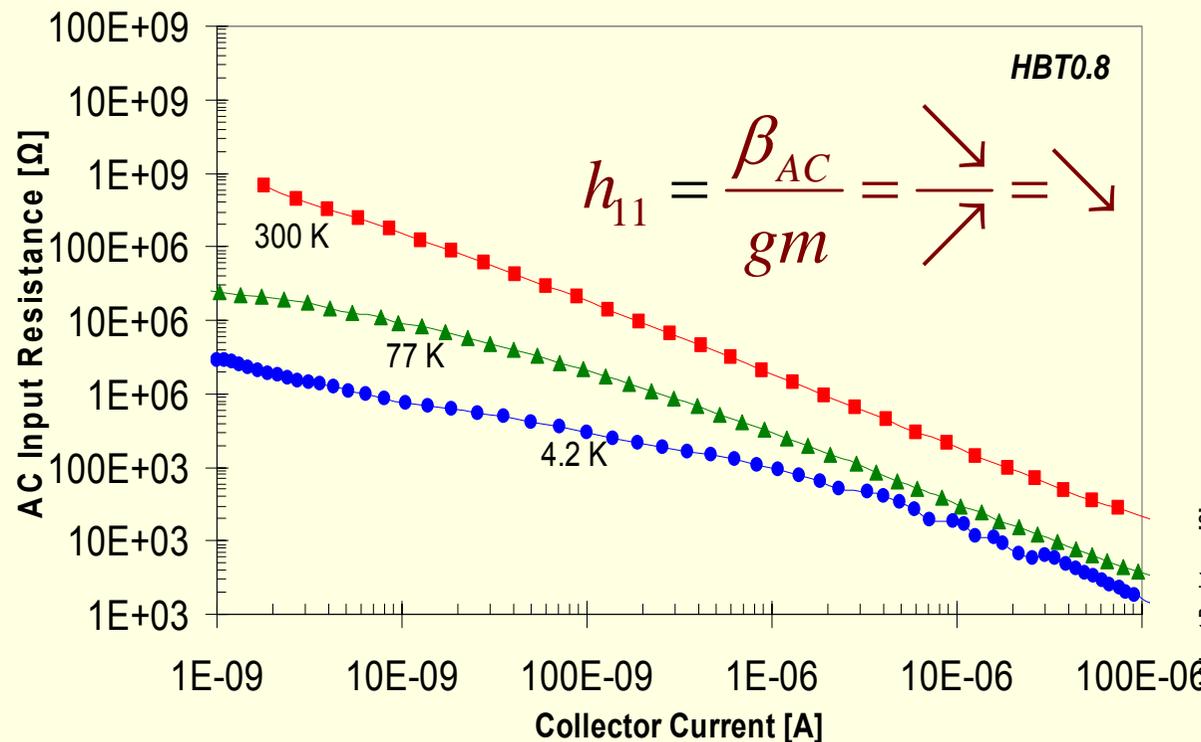
- Mesure de l'impédance différentielle d'entrée h_{11} à 300, 77 et 4.2 K

$$h_{11} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\beta_{AC}}{gm}$$



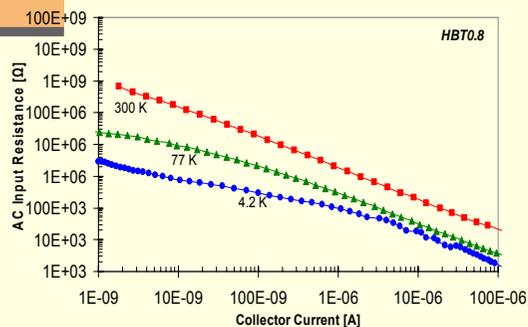
Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (5)

- Mesure de l'impédance différentielle d'entrée h_{11} à 300, 77 et 4.2 K

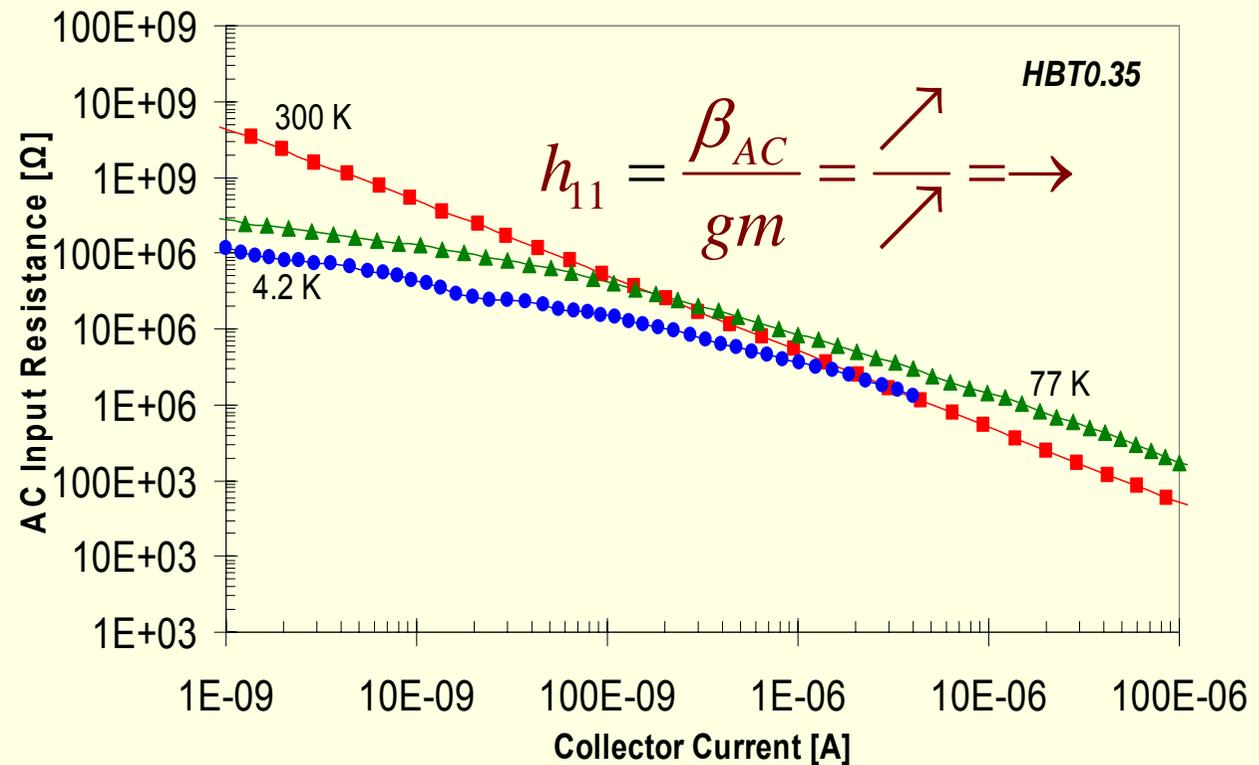


Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (5)

- Mesure de l'impédance différentielle d'entrée h_{11} à 300, 77 et 4.2 K

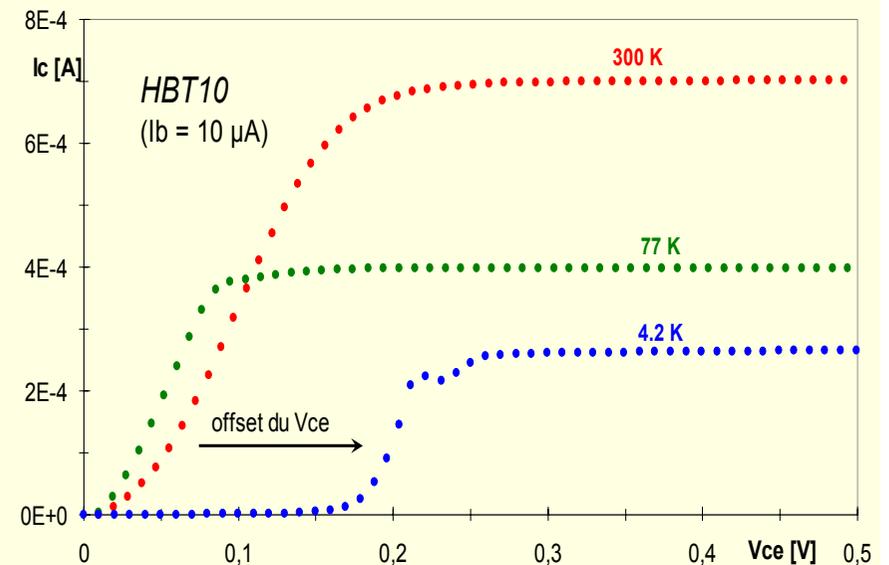
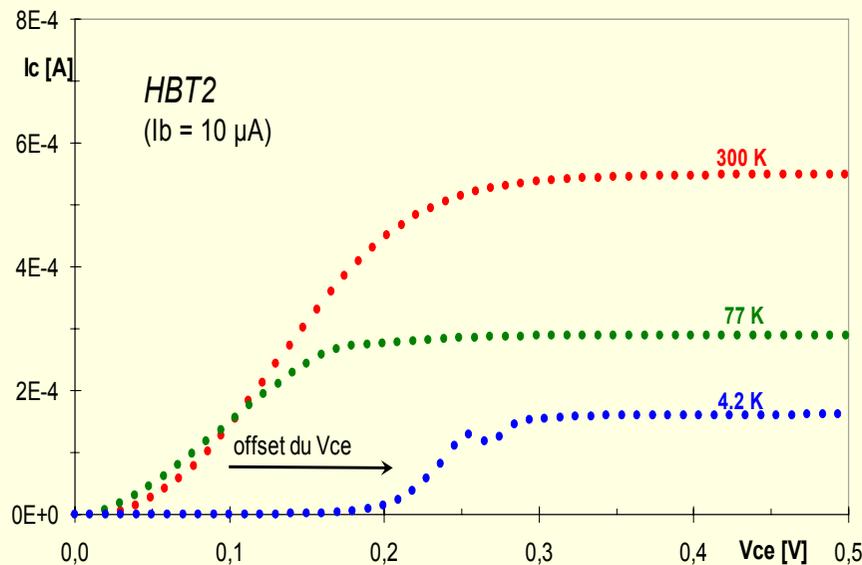


prele@lisif.jussieu.fr



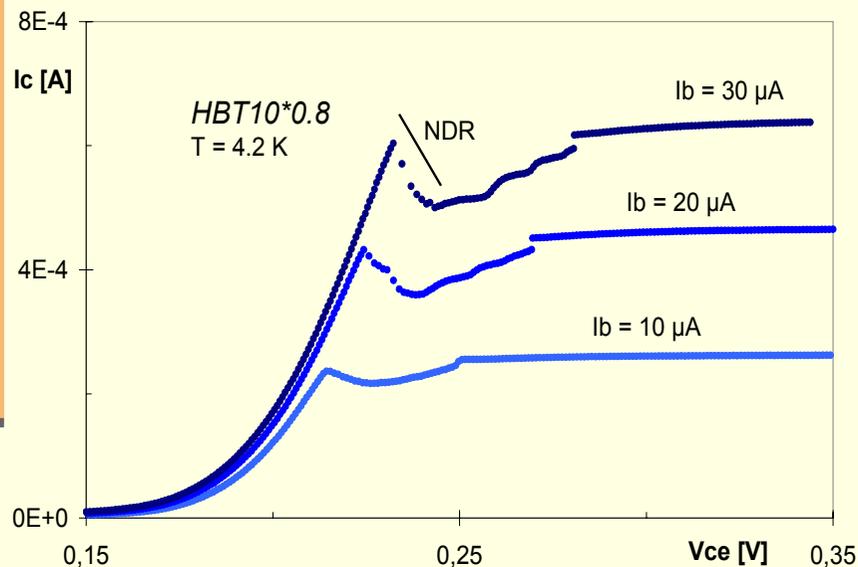
Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (6)

- Mesure de la caractéristique de sortie $I_c(V_{CE})$ à 300, 77 et 4.2 K ; V_{CE} *offset* :

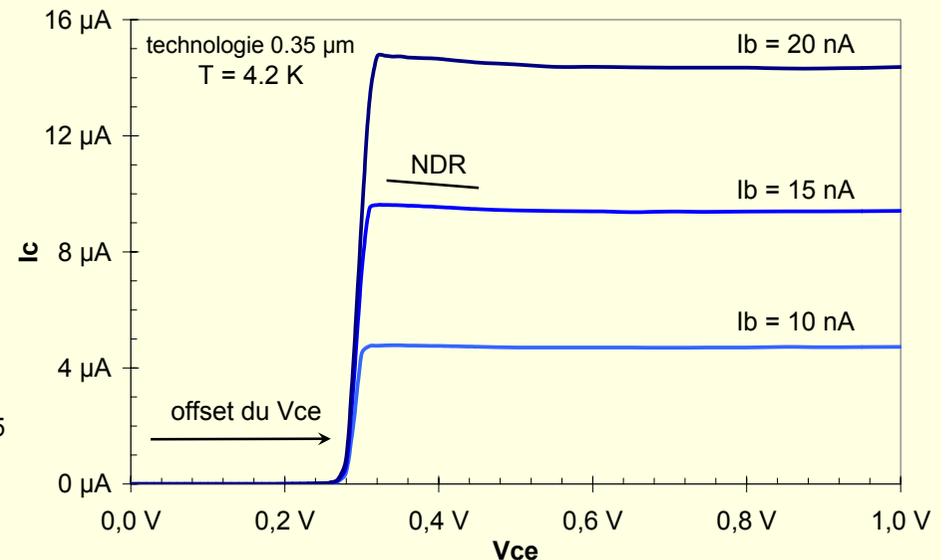


Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (7)

Mesure de la caractéristique de sortie d'un HBT 0.8 μm $I_c(V_{CE})$ à 4.2 K avec $I_B = 10, 20$ et $30 \mu\text{A}$; NDR :



Mesure de la caractéristique de sortie d'un HBT 0.35 μm $I_c(V_{CE})$ à 4.2 K avec $I_B = 10, 15$ et 20 nA ; NDR :



Caractérisations cryogéniques de technologies SiGe (8)

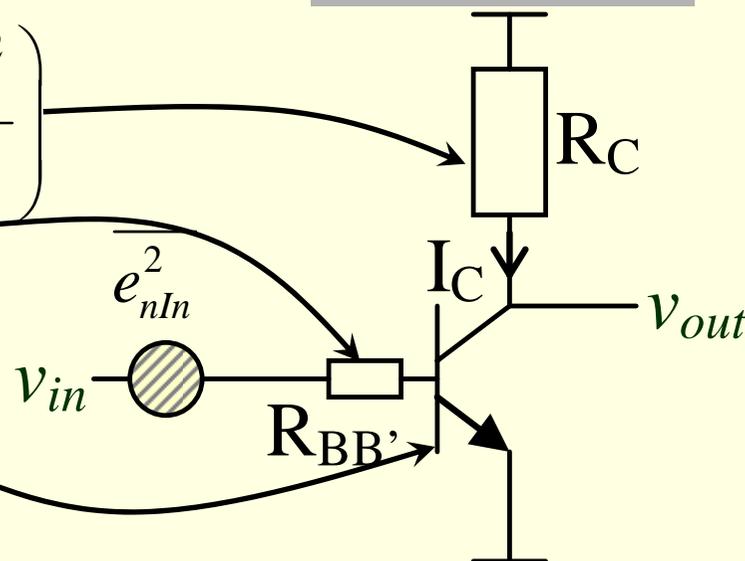
- Mesure de bruit à 300, 77 et 4.2 K :
SiGe 0.35 μm
 - *HBT1* SiGe 0.35 μm
 - Aire 0.35 μm * 4.8 μm (1.68 μm^2)
 - *HBT100* SiGe 0.35 μm
 - Aire 10*0.35 μm * 48 μm (168 μm^2)

Bruit des HBT SiGe

$$\overline{e_{nIn}^2} = \frac{\alpha^2}{gm^2 R_C^2} \cdot \left(4k_B T_{ext} R_C + \frac{K_{R_C}}{A_{R_C}} \cdot \frac{(R_C I_C)^2}{f} \right)$$

$$+ 4k_B T_E R_{BB'}$$

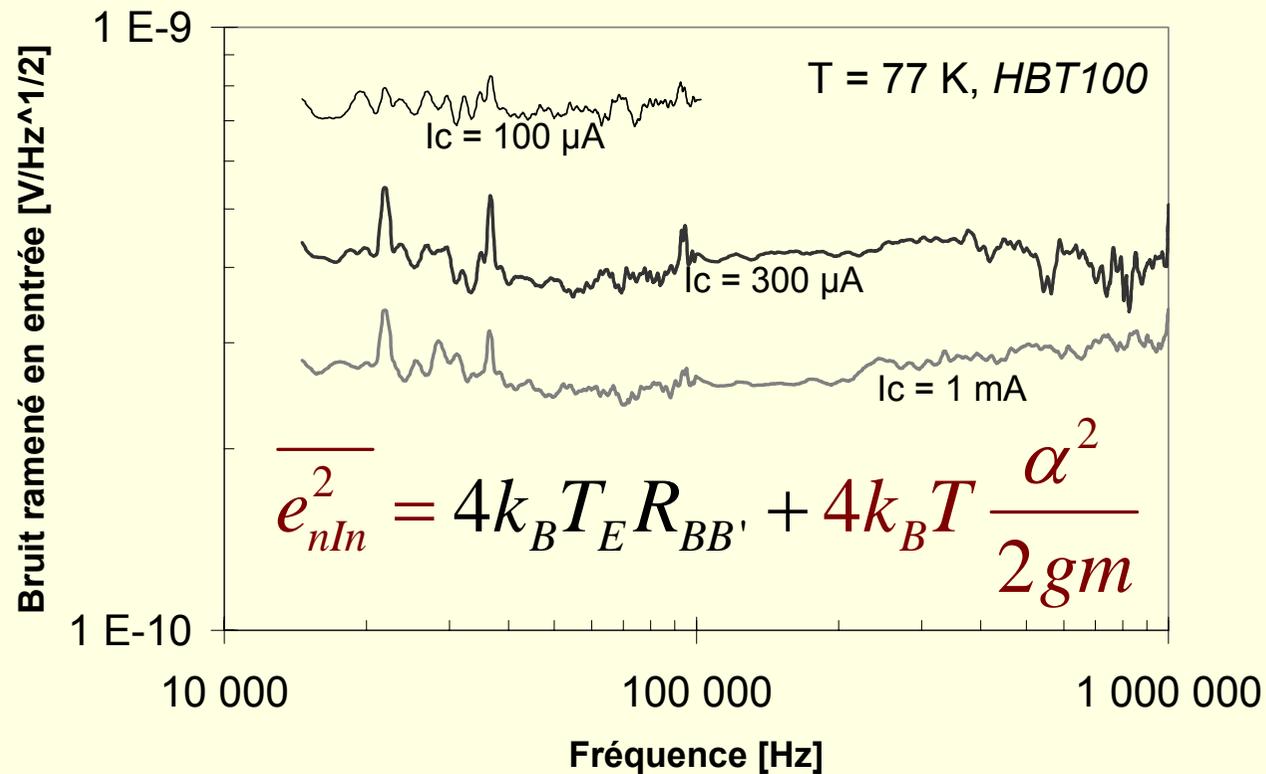
$$+ 4k_B T \frac{\alpha^2}{2gm} + 2qI_B R_{BB'}^2 + \frac{I_B^2}{f} R_{BB'}^2 \frac{K_Q}{A_E}$$



$$\overline{e_{nIn}^2} = 4k_B T_E R_{BB'} + 4k_B T \frac{\alpha^2}{2gm}$$

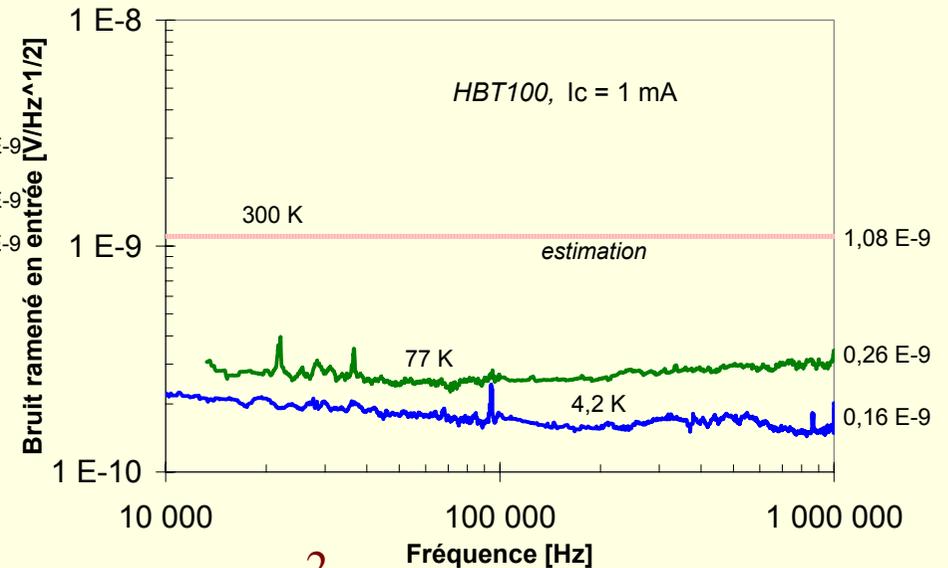
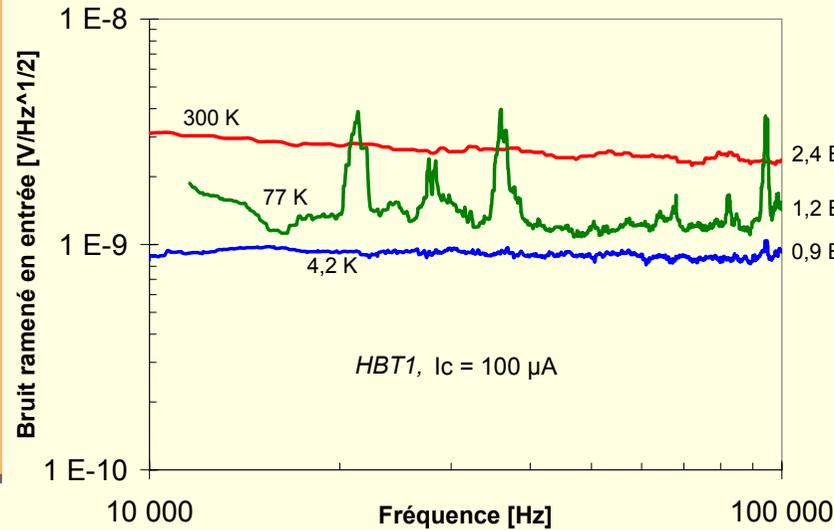
Bruit des HBT SiGe (2)

- Mesure de bruit à 77 K : Influence du bruit de grenaille



Bruit des HBT SiGe (3)

- Mesure de bruit à 300, 77 et 4.2 K



$$\overline{e_{nIn}^2} = 4k_B T_E R_{BB'} + 4k_B T \frac{\alpha^2}{2gm}$$

Conclusion sur les Caractérisations cryogéniques

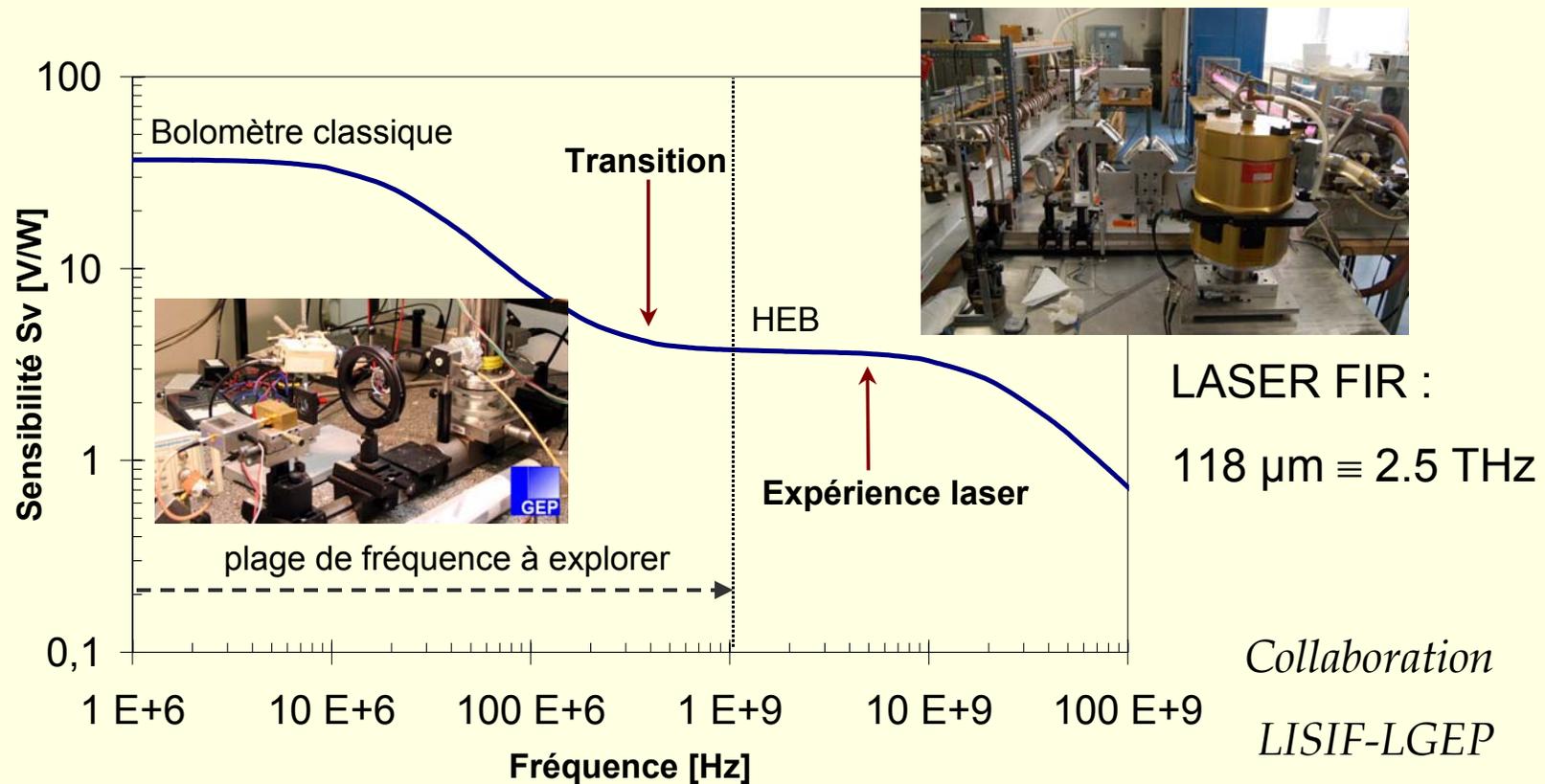
- Deux technologies SiGe standard qui fonctionnent jusqu'à 4.2 K
- Accroissement du gain en tension malgré une forte disparité du comportement en température du gain en courant des deux technologies
- Impédance d'entrée compatible avec une application à supraconducteur
- Réduction significative du bruit blanc

Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

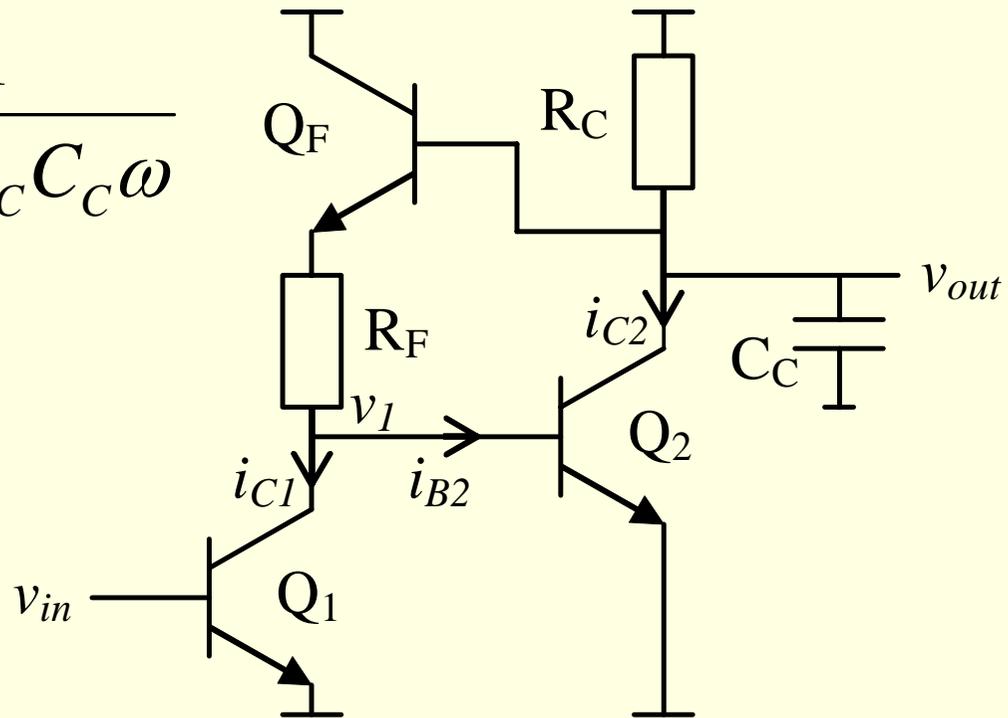
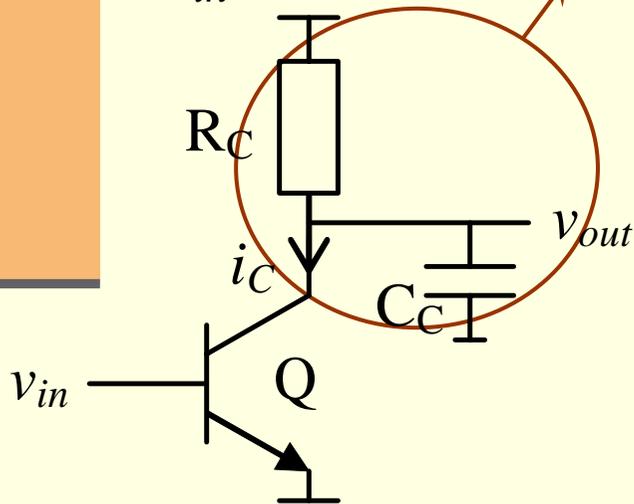
■ Bolomètre à électrons chauds



Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

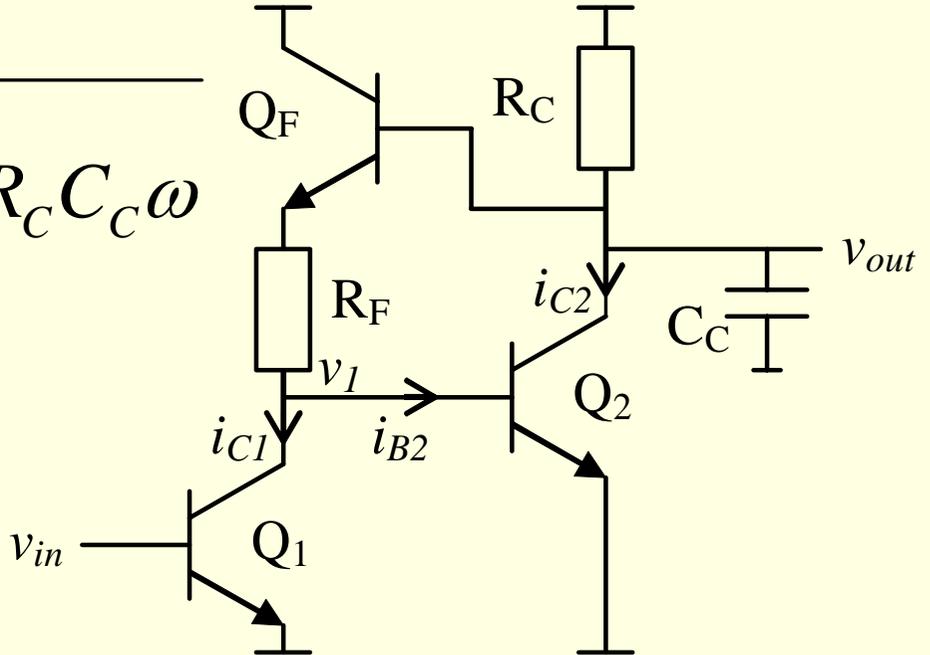
■ Parallel Feedback Amplifier (PFA)

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} \approx -gmR_C \cdot \frac{1}{1 + jR_C C_C \omega}$$



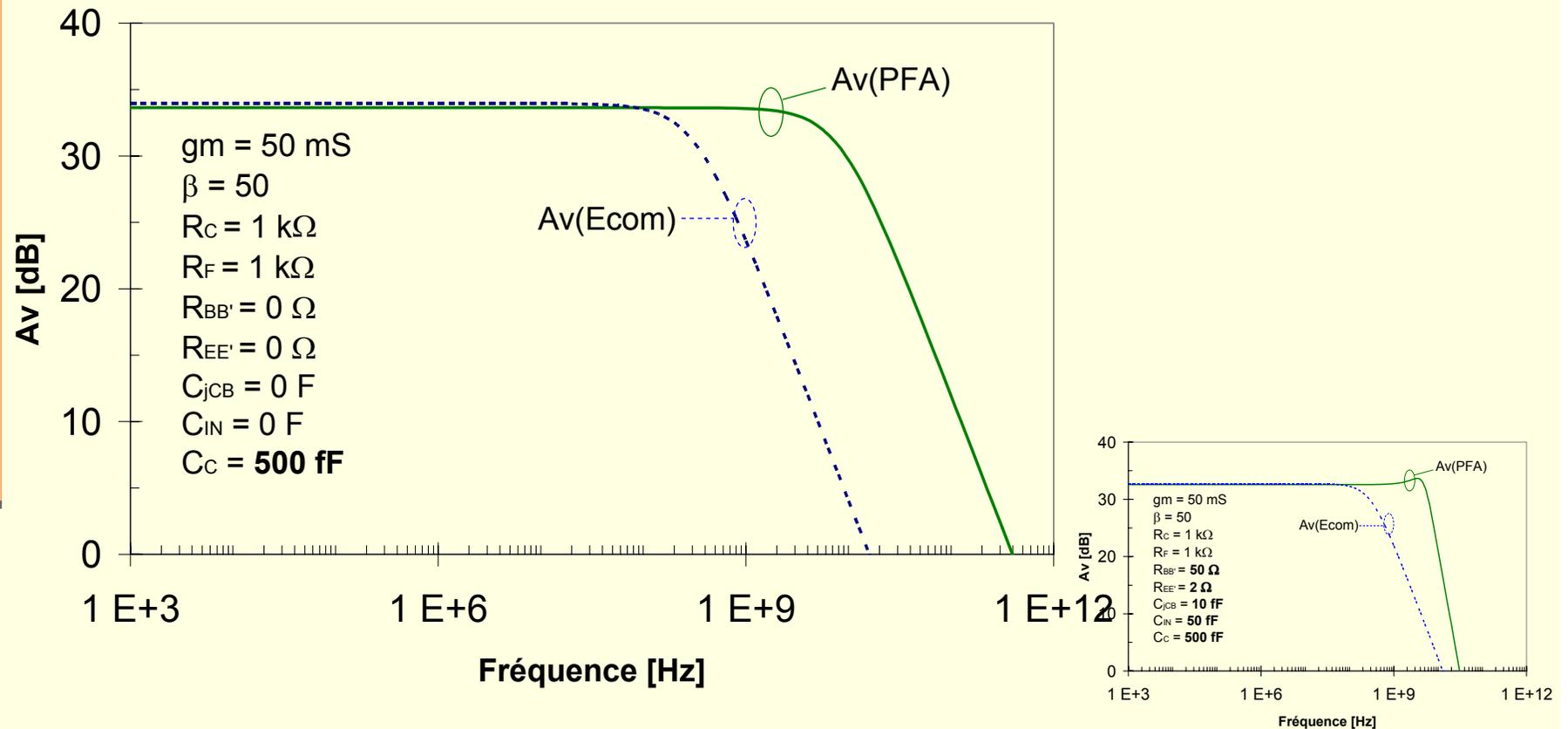
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Parallel Feedback Amplifier (PFA) (2)

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} \approx \frac{gm_1 R_F}{1 + j \left(\frac{R_F}{\beta_2 R_C} + \frac{1}{gm_2 R_C} \right) R_C C_C \omega}$$


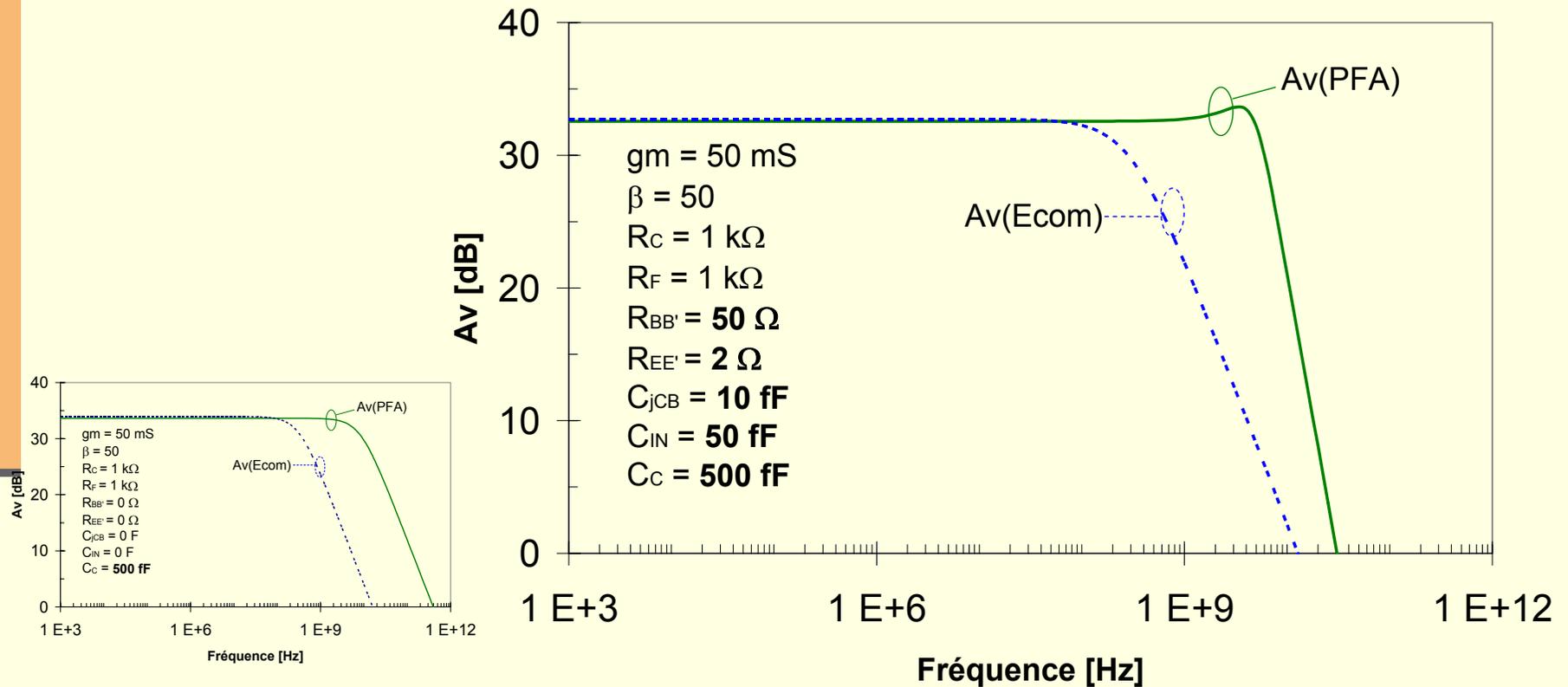
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Parallel Feedback Amplifier (PFA) (3)



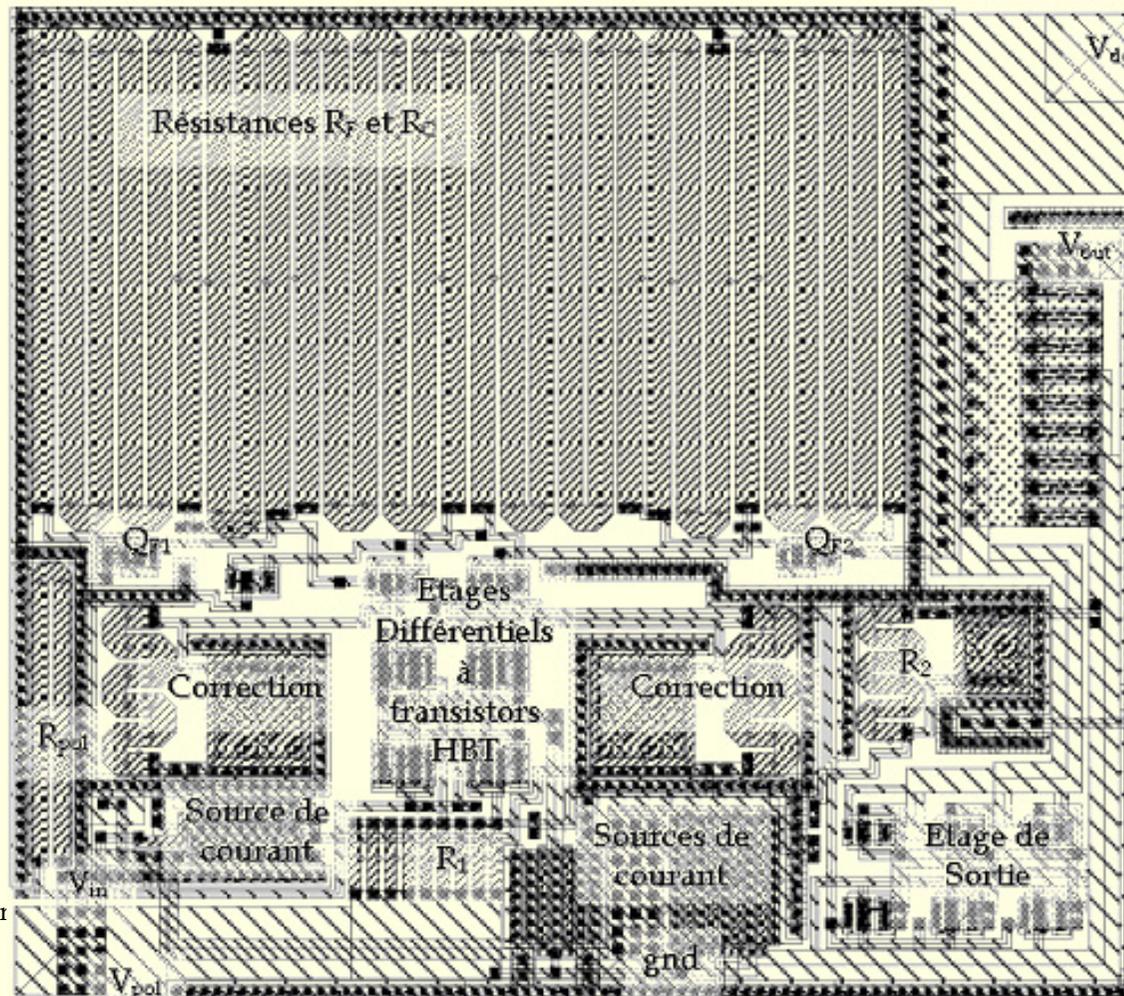
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Parallel Feedback Amplifier (PFA) (3)



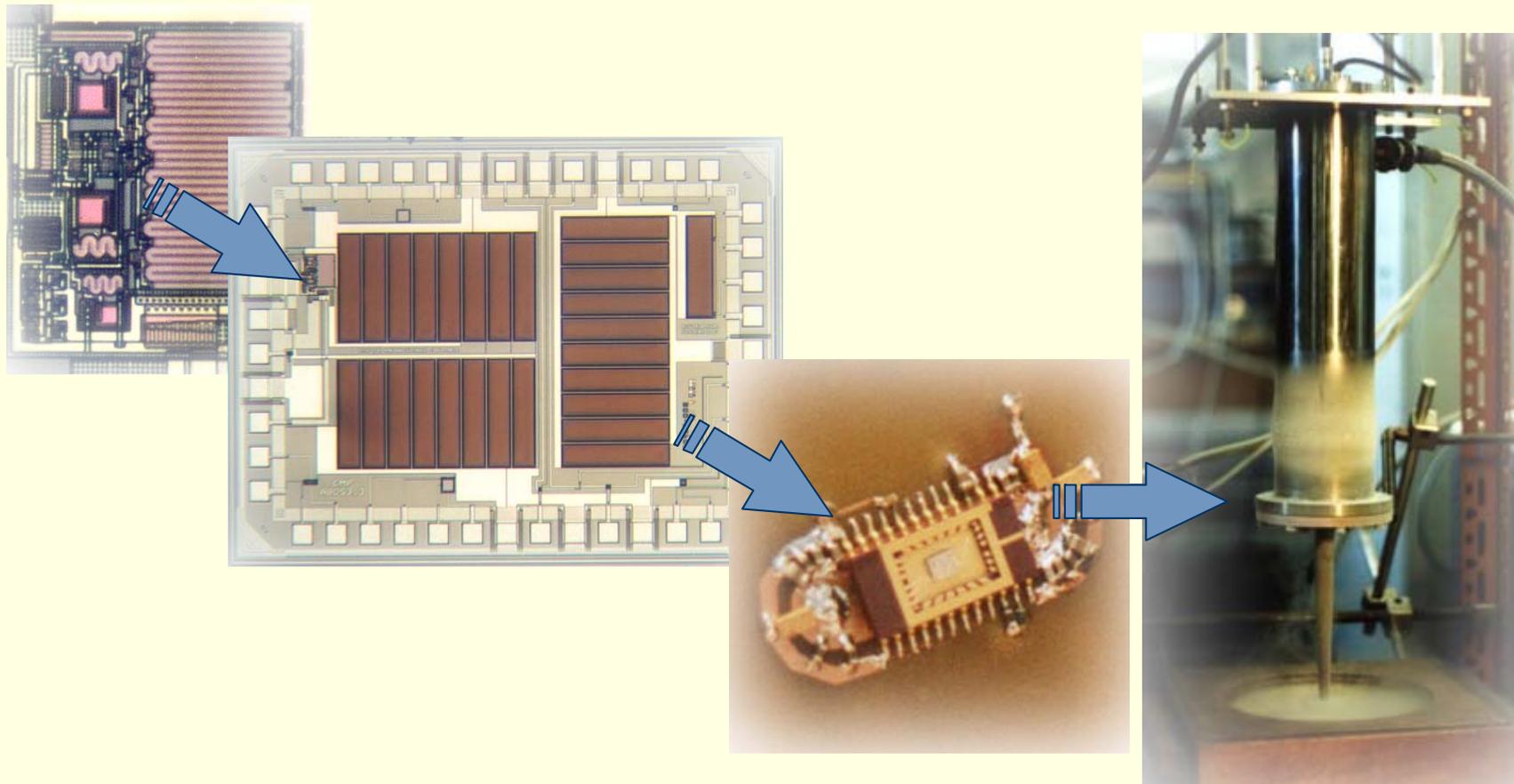
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Parallel Feedback Amplifier (PFA) (5)



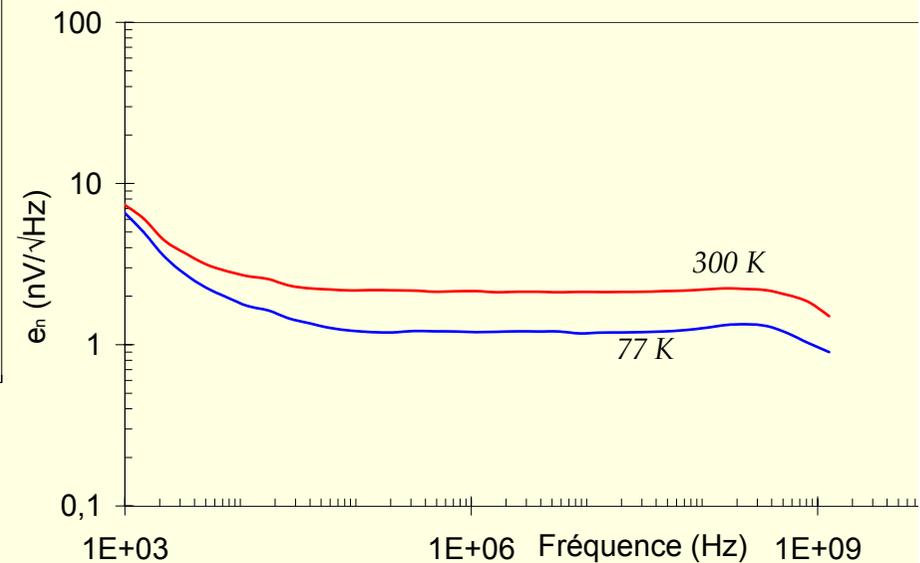
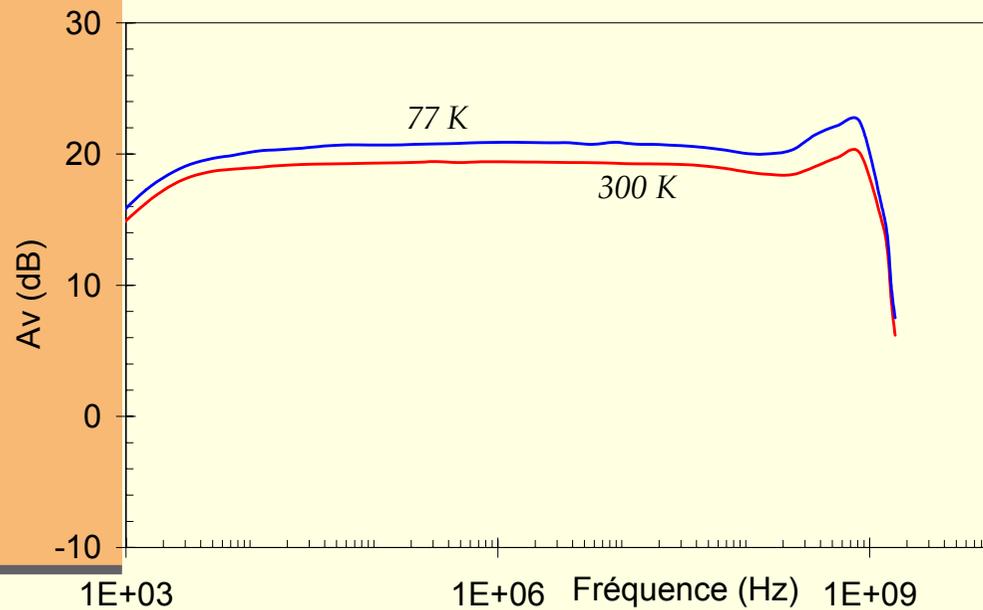
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Réalisation



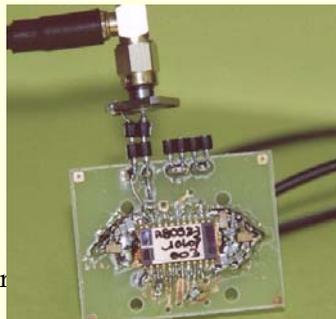
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

■ Mesures à 300 K et 77 K



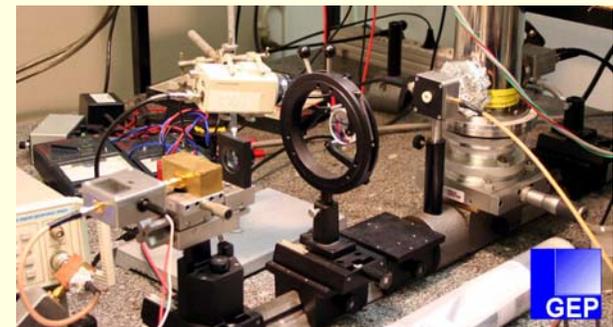
Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K

- Conclusion sur l'ASIC à 77 K
 - Réalisation d'un ASIC fonctionnant à 77 K
 - Utilisation des propriétés haute fréquence de la technologie SiGe (GHz)
 - Niveau de bruit blanc de l'ordre du nV/\sqrt{Hz}
 - Banc de caractérisation optique au LGEP



prele@lisif.jussieu.fr

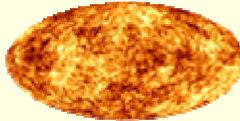
*Instrumentation Cryogénique Bas Bruit
et Large Bande en Technologie SiGe*



Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

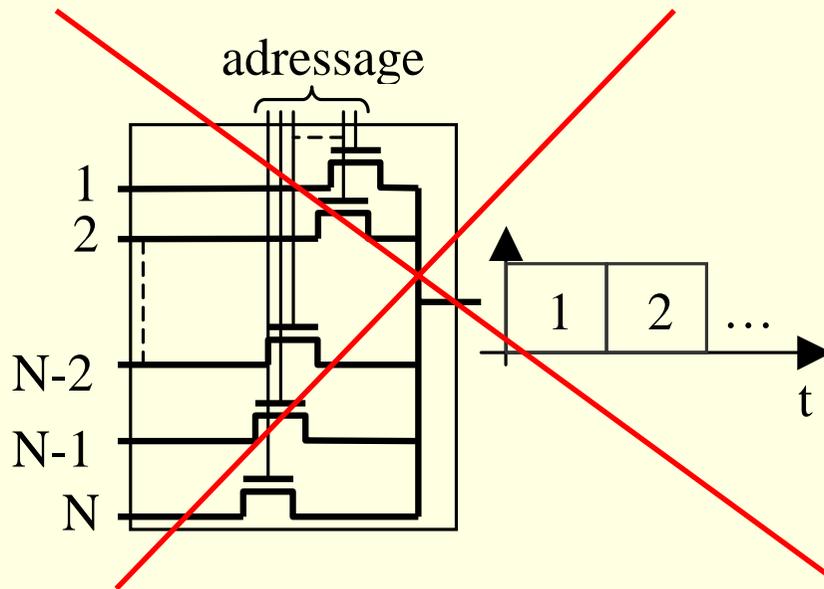
- Télescope dédié à la mesure de la polarisation du CMB : 
- Lecture d'une matrice de SQUID fonctionnant à 4.2 K
- Multiplexage et amplification à 4.2 K
- Très faible bruit

Collaboration

LISIF-APC

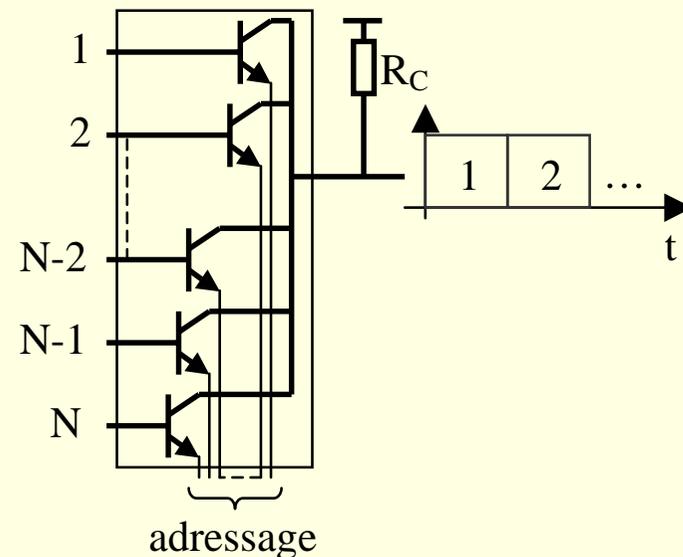
Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

■ Multiplexage



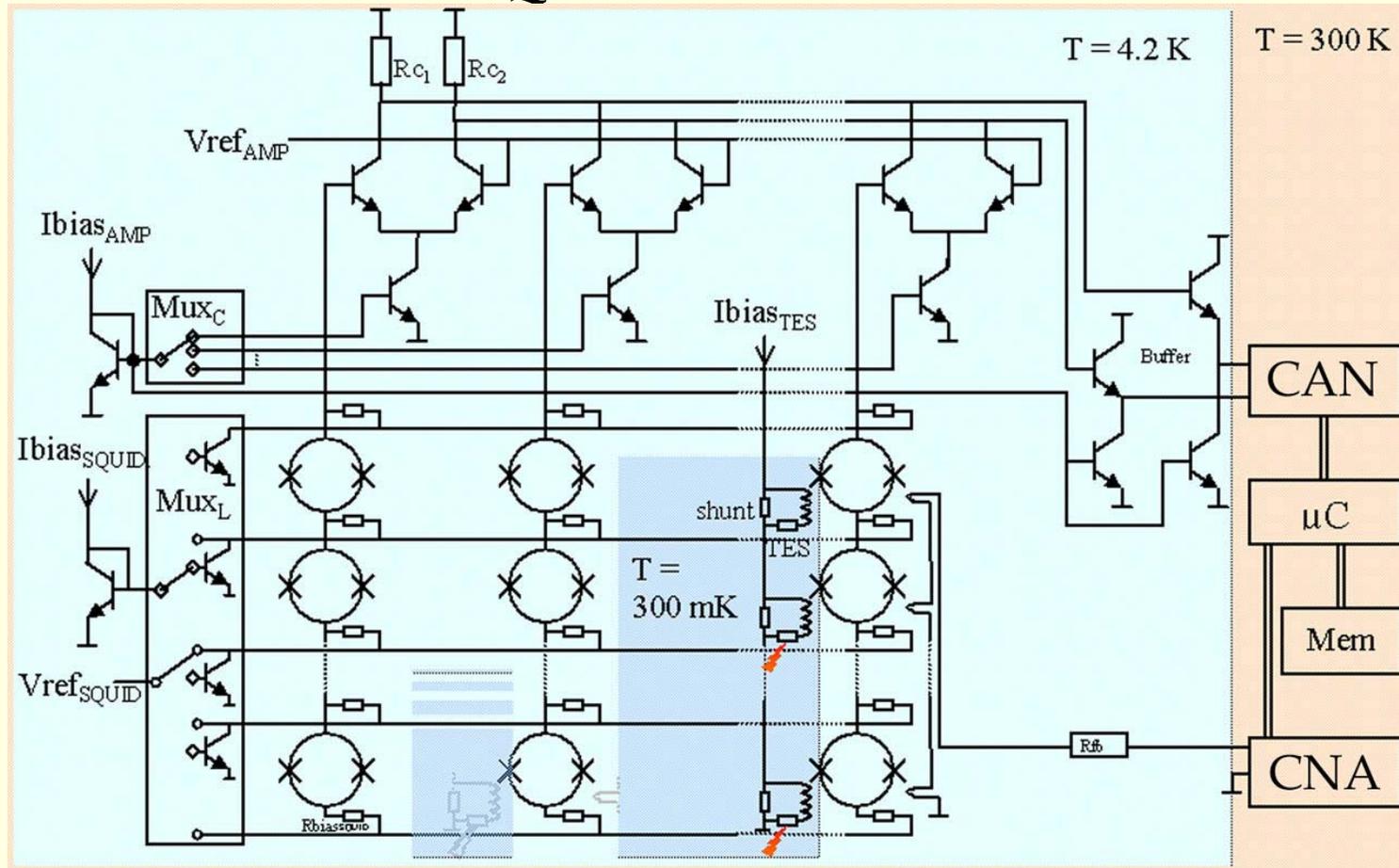
Pas adapté aux
capteurs basse
impédance

Multiplexage de la polarisation de
l'étage d'entrée



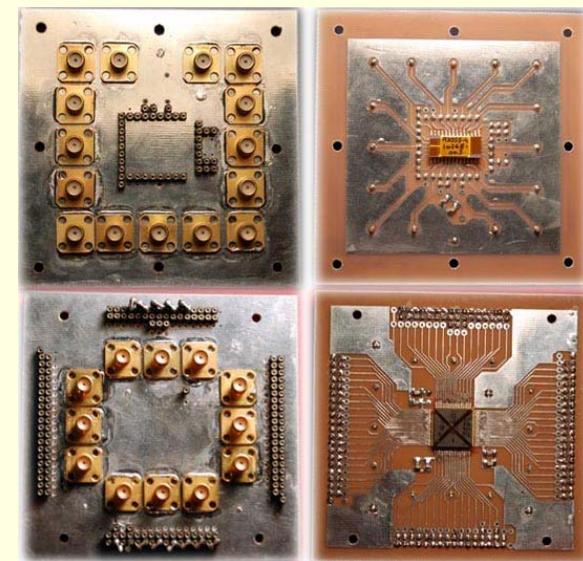
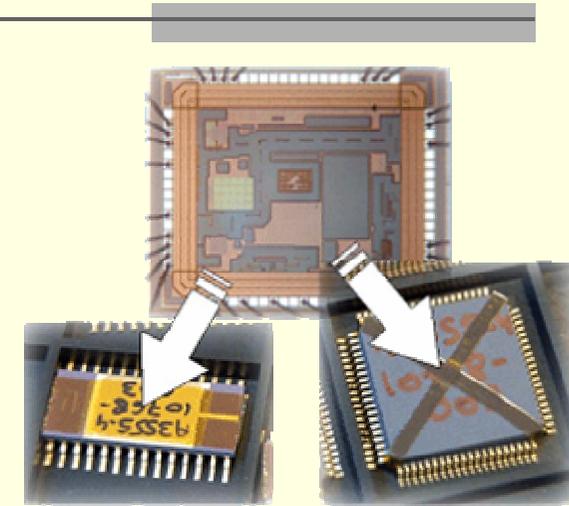
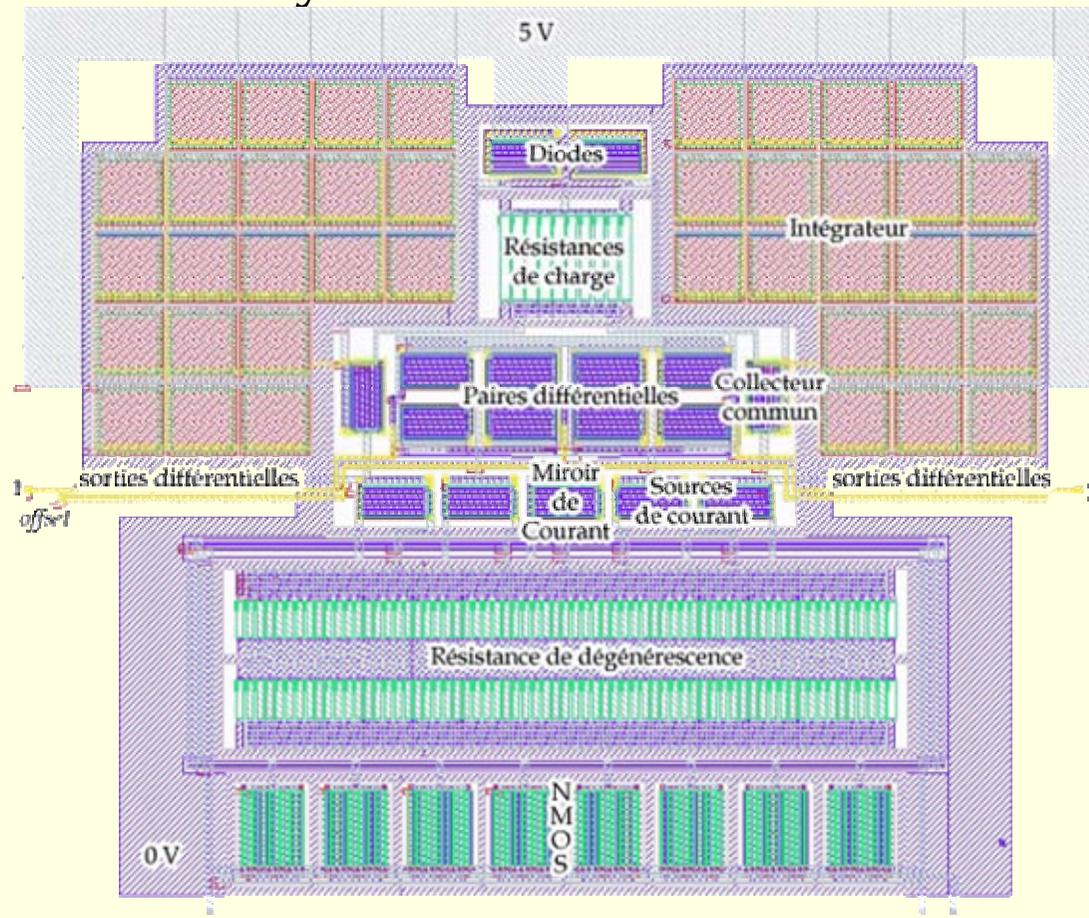
Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

■ Matrice de SQUID



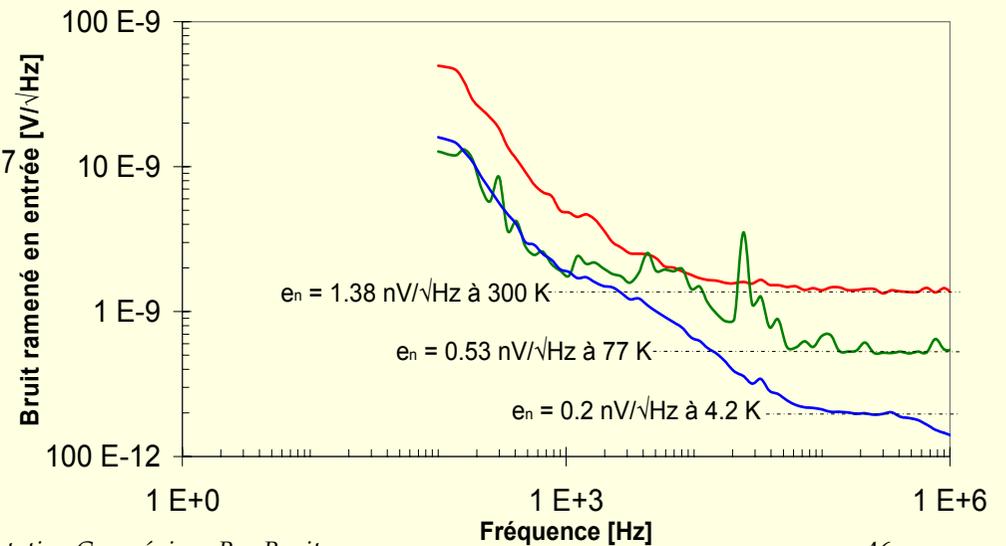
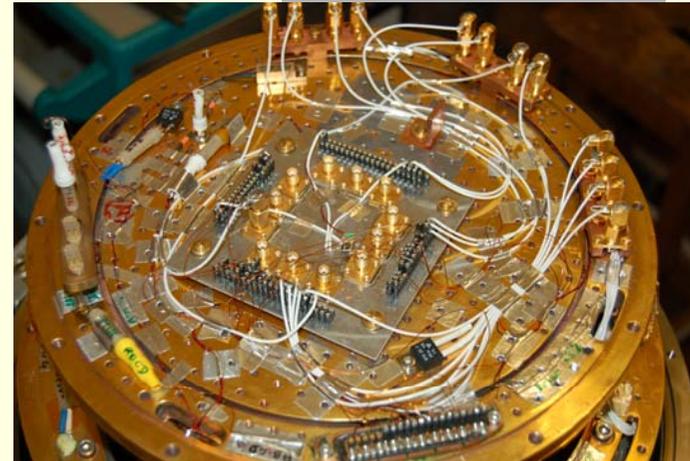
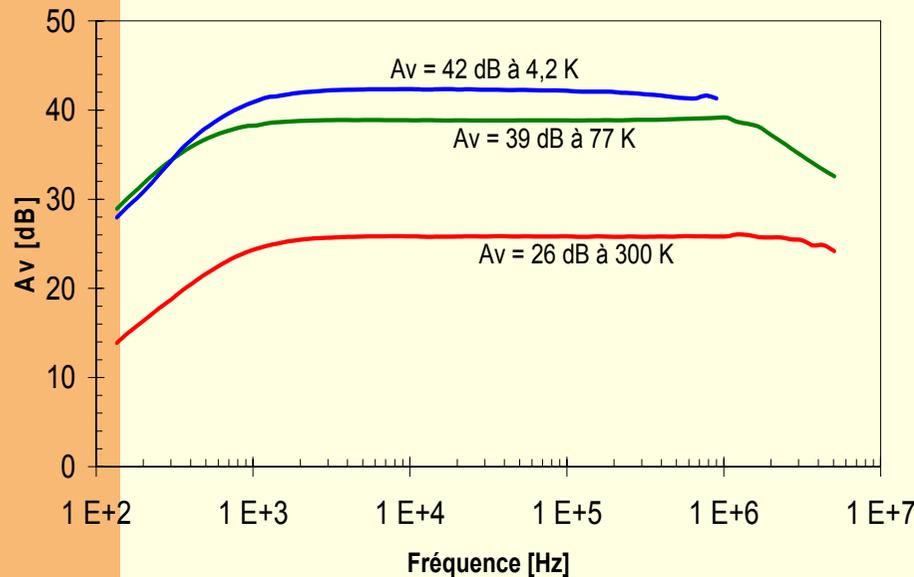
Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

Layout



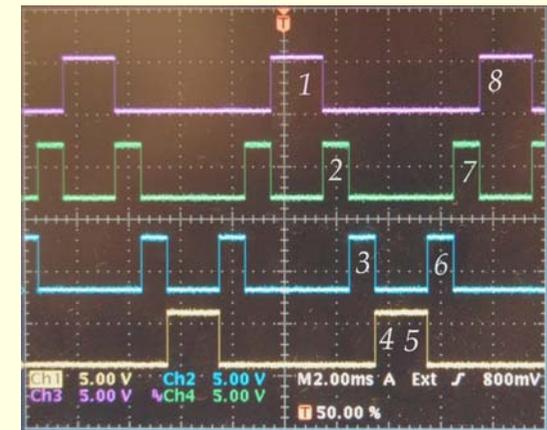
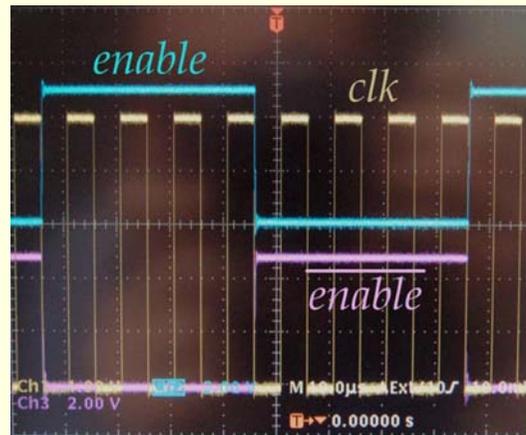
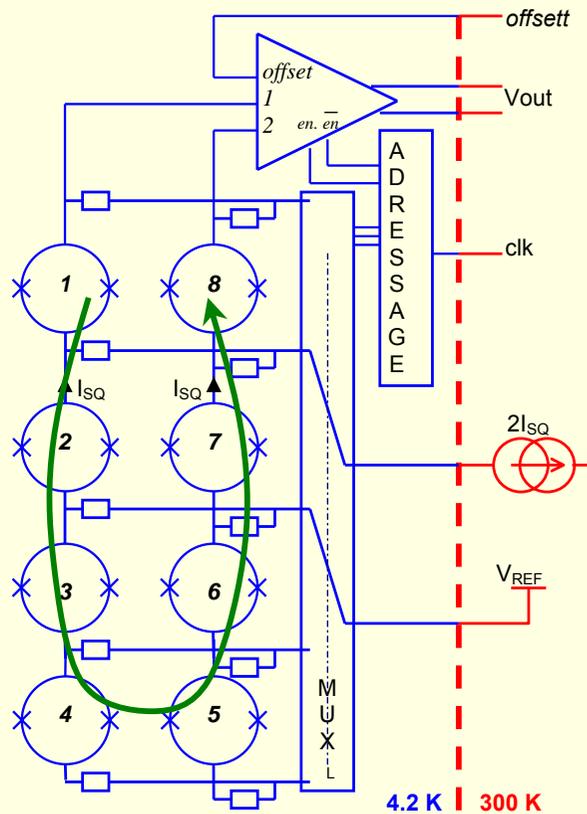
Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

■ Mesures à 300, 77 et 4.2 K



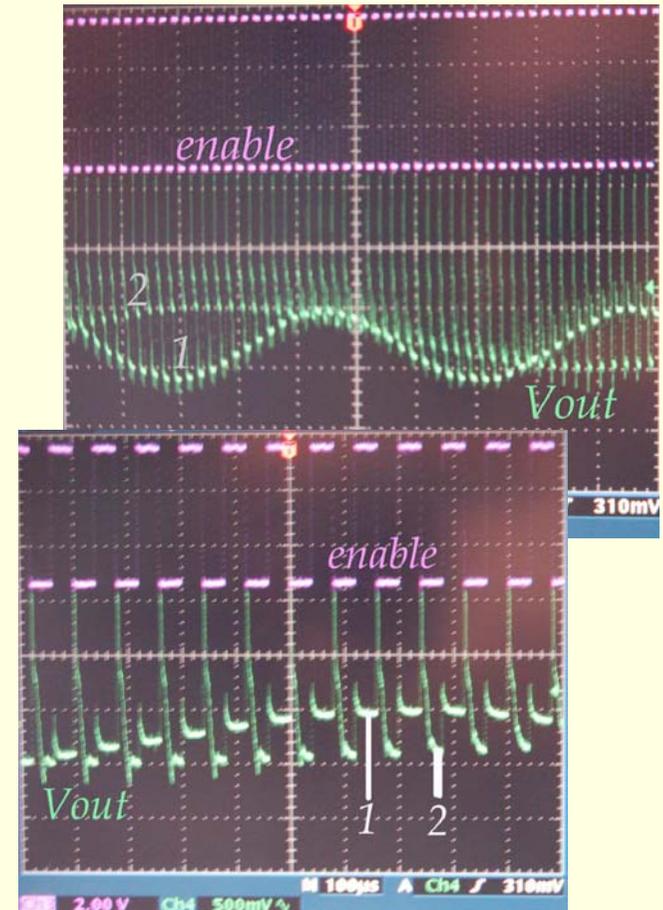
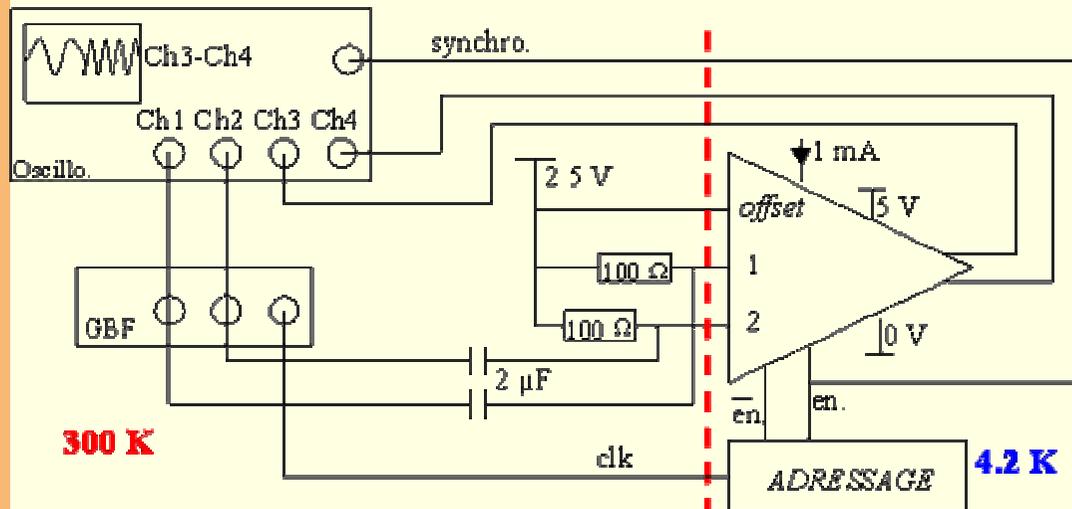
Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

■ Commande du multiplexage à 4.2 K



Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

■ Multiplexage à 4.2 K



Clk = 100 kHz

Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

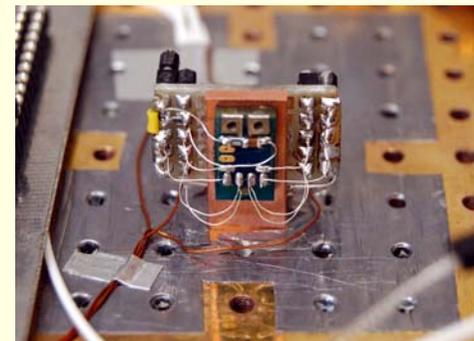
■ Multiplexage à 4.2 K (2)



Clk = 20 kHz

Amplificateur Ultra Bas Bruit Multiplexé à 4.2 K

- Conclusion sur l'ASIC à 4.2 K
 - Réalisation d'un ASIC fonctionnant à 4.2 K
 - Multiplexage très faible bruit $0.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
 - Mise en place d'un démonstrateur 2 x 4 SQUID



Plan

- Problématique : ASIC Cryogénique
- Caractérisations de technologies SiGe à 300 K, 77 K et 4.2 K
- Amplificateur Bas Bruit et Large Bande fonctionnant à 77 K
- Amplificateur Ultra Bas Bruit à Entrées Multiplexées fonctionnant à 4.2 K
- Conclusion

Conclusion

- La technologie SiGe même standard permet la réalisation d'ASIC cryogénique jusqu'à 4.2 K
- Large bande ($> \text{GHz}$)
 - Utilisation d'une structure différentielle PFA
- Bas bruit ($< \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
 - Multiplexage bas bruit sans interrupteurs