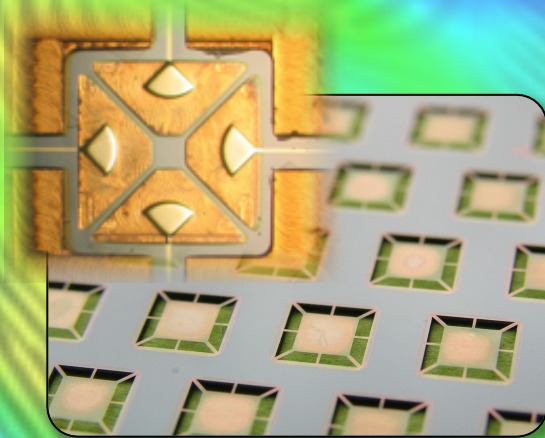
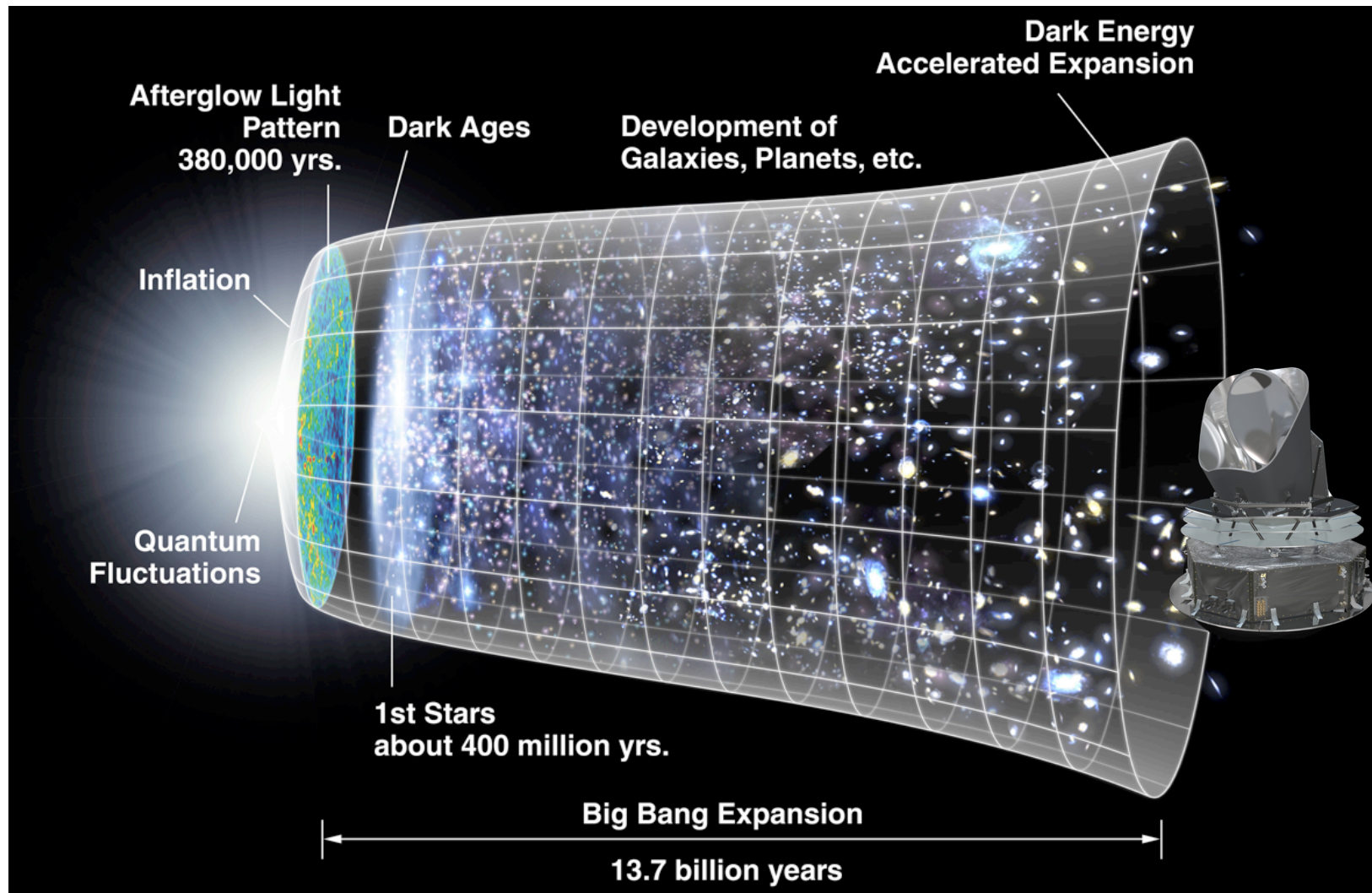


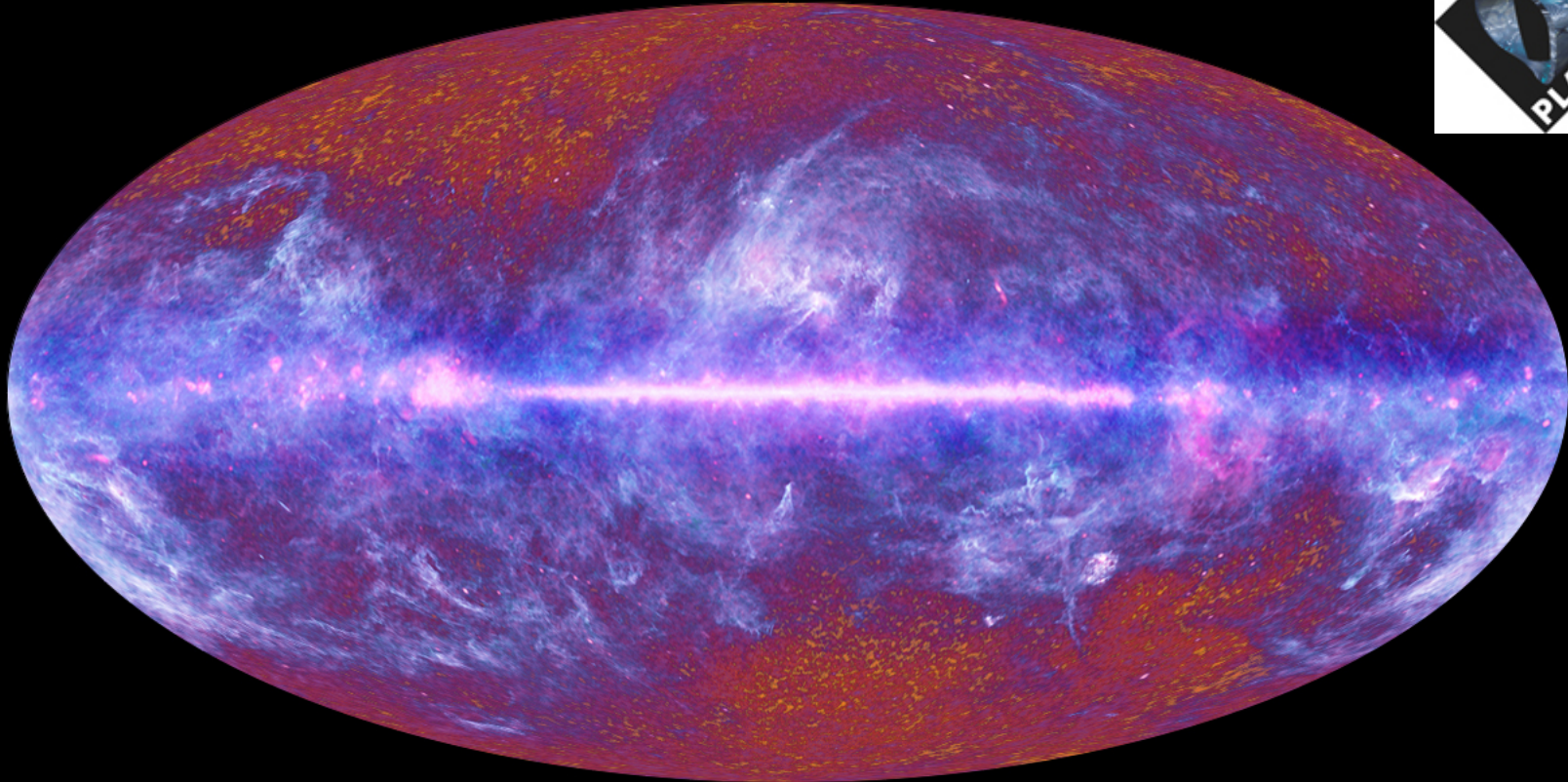
# Architecture de détection supraconductrice pour la détection de la polarisation du rayonnement fossile



Michel Piat  
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie  
Université Paris Diderot

# Le fond diffus cosmologique ou CMB (Cosmic Microwave Background)





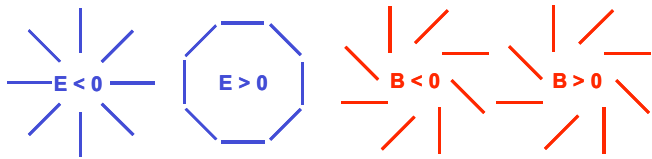
# Planck (2009): 30-857GHz

The Planck one-year all-sky survey

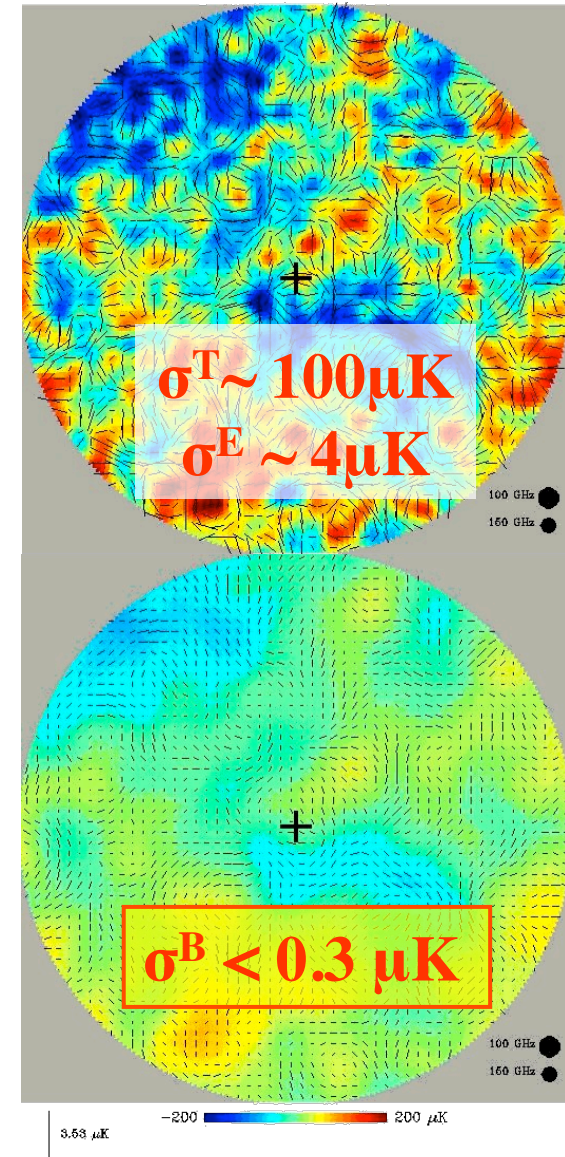


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

# Polarisation du CMB

- Modes E et B: 
- Modes scalaires: fluctuations de densité
  - ↪ TT, EE, TE
  - ↪ Aujourd'hui bien connus
- Modes tensoriels: ondes gravitationnelles issues de l'inflation
  - ↪ TT, EE, TE et BB
  - ↪ **BB = signature des OG primordiales** (hors lensing)
  - ↪ Amplitude reliée à l'échelle d'énergie de l'inflation
  - ↪ Rapport tenseur sur scalaire  $r = T/S$

$$V = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left( \frac{r}{0.01} \right)^{1/4}$$





# Polarisation du CMB: connaissances actuelles

- Mode E détecté

- ↳ DASI, WMAP, Boomerang...

- Mode B jamais détecté jusqu'à présent

- ↳  $r < 0.21$  à 95%

- (SPT+WMAP7, Keisler et al. 2011 arXiv:1105.3182v1)

- ↳ **L'un des défis de la cosmologie observationnelle**

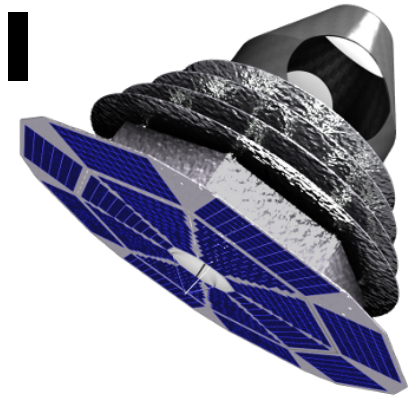
- Planck: détection envisageable si  $r > 0.05$

- (Efstathiou et Gratton, 2009)

- ↳ Grandes échelles angulaires (pic de la ré-ionisation)

- ↳ Première contrainte spatiale des modes B

# Vers un instrument spatial dédié: l'exemple de COre

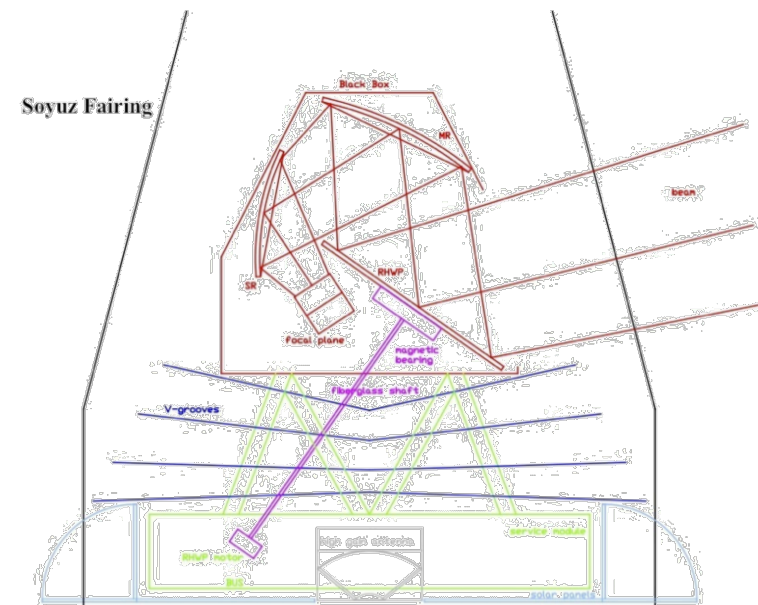


## ■ Cosmic Origins Explorer

- ↳ Environ 30 fois plus sensible que Planck
- ↳ Avec la même résolution angulaire que Planck,
- ↳ et un contrôle draconien des effets systématiques

## ■ Proposition soumise à l'ESA Cosmic Vision 2

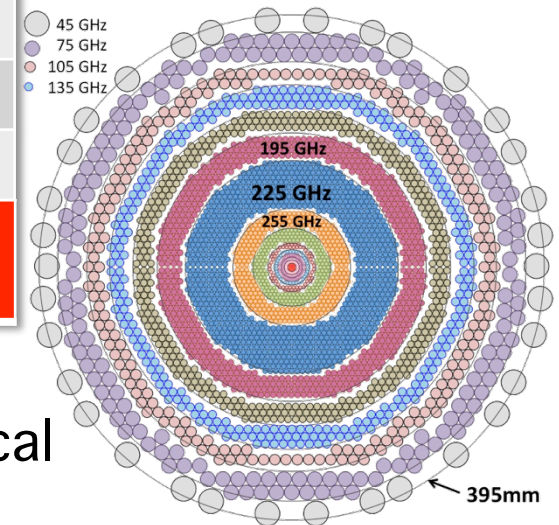
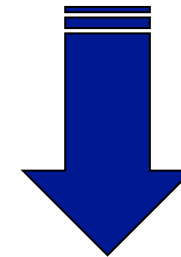
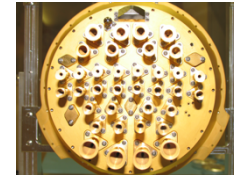
- ↳ Arrivée juste en dessous du seuil de sélection
- ↳ Points faibles: coûts, modulateur optique, plan focal



# De Planck à COre

Paramètre	Planck-HFI	COre
$\lambda$	300 $\mu$ m-3mm	1mm-10mm
$\lambda/\Delta\lambda$	3	3
Résolution angulaire	5'-10'	1'-23'
Détecteurs	Bolo. semicond. 100mK	Bolo. supracond. 100mK
Nombre de détecteurs	4-12 par canal 52 total	64-2000 par canal 6384 total
NEP	1-10.10 <sup>-17</sup> W.Hz <sup>-0.5</sup>	2-3.10 <sup>-18</sup> W.Hz <sup>-0.5</sup>
Constante de temps	5-8ms	0.5-10ms
Efficacité quantique	>37%	>50%
Architecture de détection	Polarisation Sensitive Bolometers	Lame 1/2 onde + duplexer de polarisation

Planck-HFI



Plan focal  
COre



# Contraintes instrumentales pour un futur instrument spatial dédié

## 1. Sensibilité: matrices de bolomètres supraconducteurs

↪ Collaboration **DCMB**

- IN, APC, CSNSM, IAS, IEF, LPSC, LPN, L2E
- Centrale de technologie IEF Minerve
- Financements CNRS, universités, CNES (→ 2010)

## 2. Immunité aux effets parasites instrumentaux: composants micro-ondes supraconducteurs

↪ Collaboration **BSD**

- APC, CSNSM, IAS, IEF, IN, LERMA, LPSC, L2E
- Financements ANR JC, GIS P2I, CNES

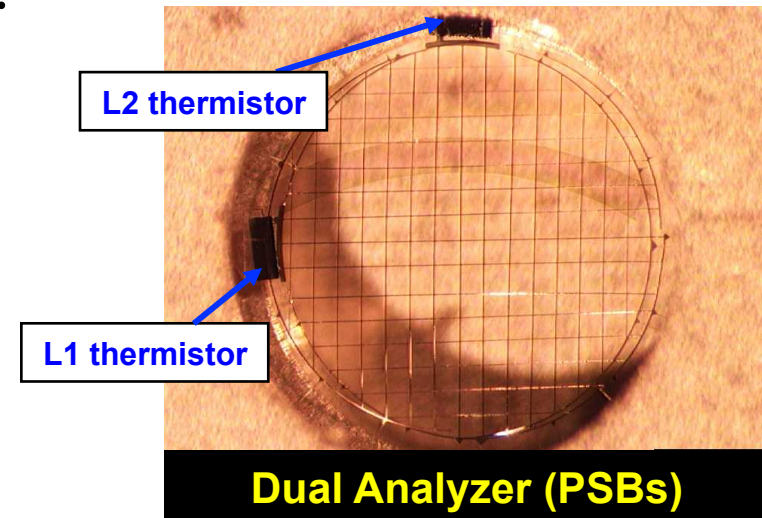
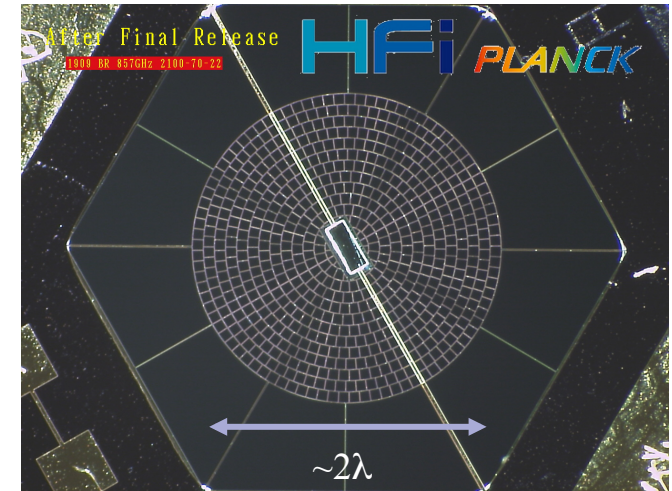
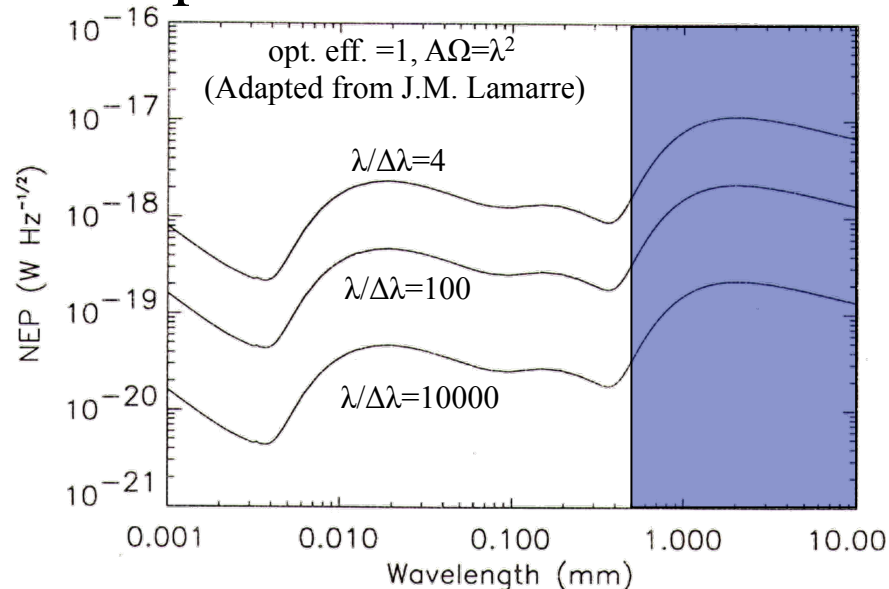


# 1. Bolomètres: état de l'art Spider web (Caltech-JPL)

## ■ Performances:

- ↖ 300mK:  $\tau=11\text{ms}$ ,  $\text{NEP}=1.5 \cdot 10^{-17} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
- ↖ 100mK:  $\tau=1.5\text{ms}$ ,  $\text{NEP}=2.5 \cdot 10^{-18} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$

## ■ BLIP pour les observations CMB!



**Amélioration de la sensibilité → augmentation du nombre de détecteurs: Matrices de bolomètres**

# DCMB (→2010)

- “Développement Concerté de Matrices de Bolomètres”
  - ↪ Collaboration pluridisciplinaire
  - ↪ PI: Alain Benoit (IN)
- **Objectif:** *développer par microfabrication des matrices de bolomètres fonctionnant aux très basses températures pour les observations astrophysiques*
- **Alliage NbSi:**
  - ↪ Haute impédance
  - ↪ Supraconducteurs (TES)
- **Financements:**
  - ↪ CNRS (programme Astroparticule)
  - ↪ CNES
  - ↪ Universités

Labo	Main task
IN/LAOG	Multiplexage haute impédance, cryogénie, MPI
LPSC	Antennes, MPI
LPN	HEMTs
CSNSM	Films minces NbSi (semiconducteurs, supraconducteurs)
IEF	Architecture bolométrique, microfabrications
IAS	Tests supraconducteurs
APC	Tests supraconducteurs, ASIC SiGe, multiplexage à SQUIDs
L2E	ASIC SiGe, multiplexage à SQUIDs
CESR	Etude des CEB, électronique de lecture

Filières **semiconducteurs** / supraconducteurs

# Points forts

## ■ NbSi (CSNSM)

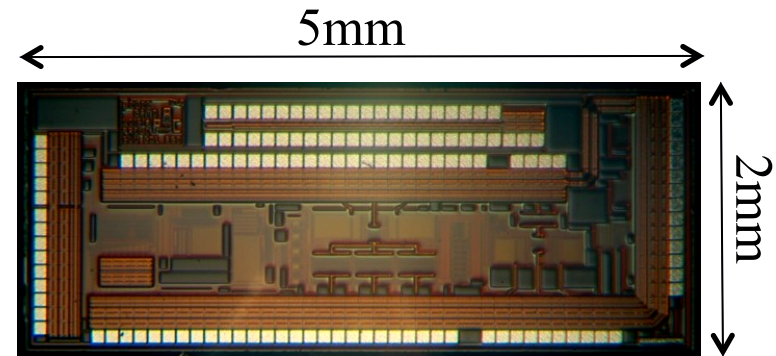
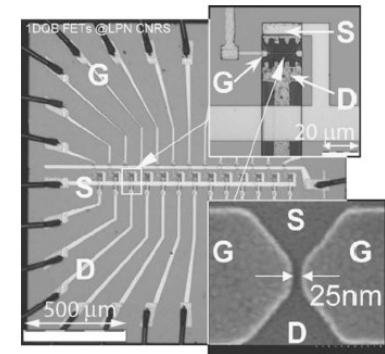
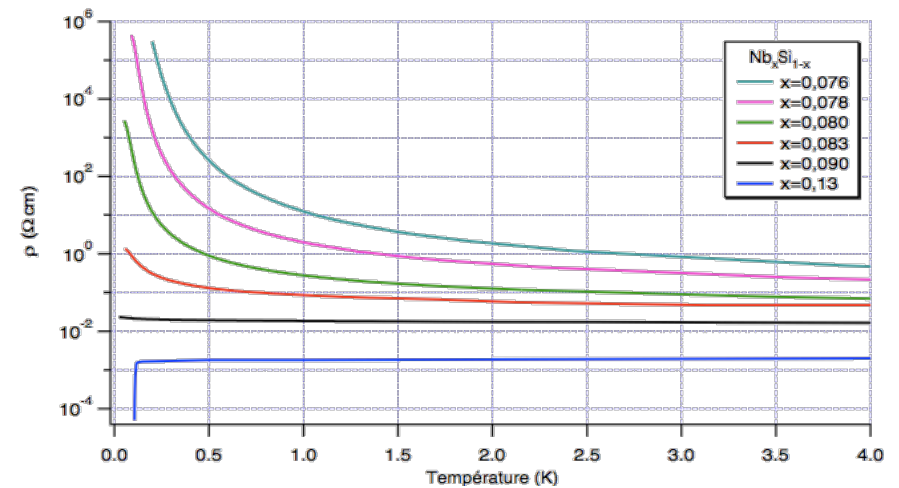
- ↳ Alliage original
- ↳ Supra ou semi-conducteur

## ■ Mux HEMTs à 100mK (IN)

- ↳ Bolomètres semiconducteurs

## ■ ASIC SiGe à 4K (APC)

- ↳ Microélectronique cryogénique
- ↳ Mux SQUIDs
- ↳ Autres applications
- ↳ P2I: CDD D. Prêle  
(32% du financement P2I)





# Contraintes pour la réalisation de matrices de bolomètres

## ■ Procédé de fabrication collectif

↪ Micro et nanotechnologies

## ■ Homogénéité des différents détecteurs

↪ Contre réaction électro-thermique

## ■ Multiplexage

↪ Nécessaire au delà d'une centaine de pixels

↪ Difficile avec les bolomètres semi-conducteur

- Composants fonctionnant à  $T > 100\text{K}$  (FET) ou bruyants aux BF (CMOS)

- HEMT + JFET: limitation du facteur de multiplexage

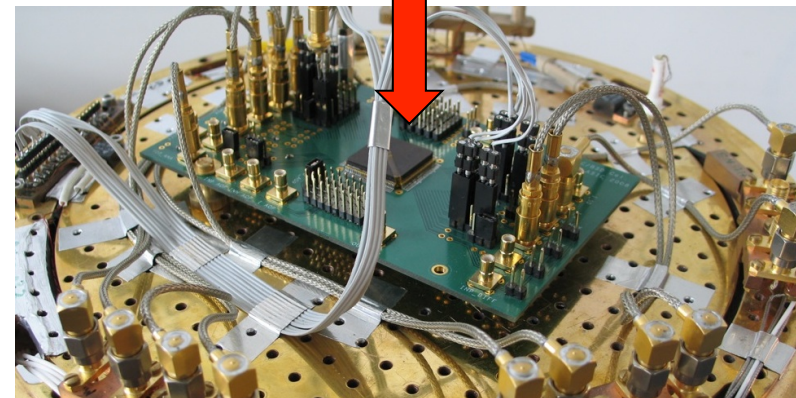
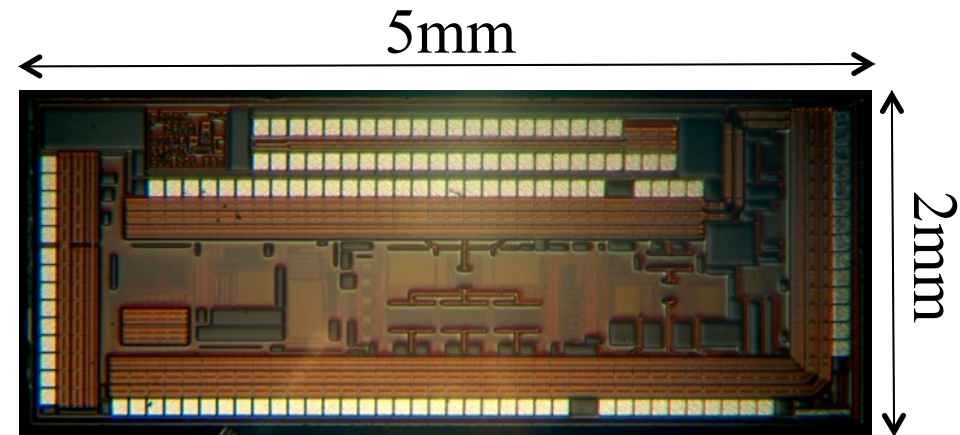
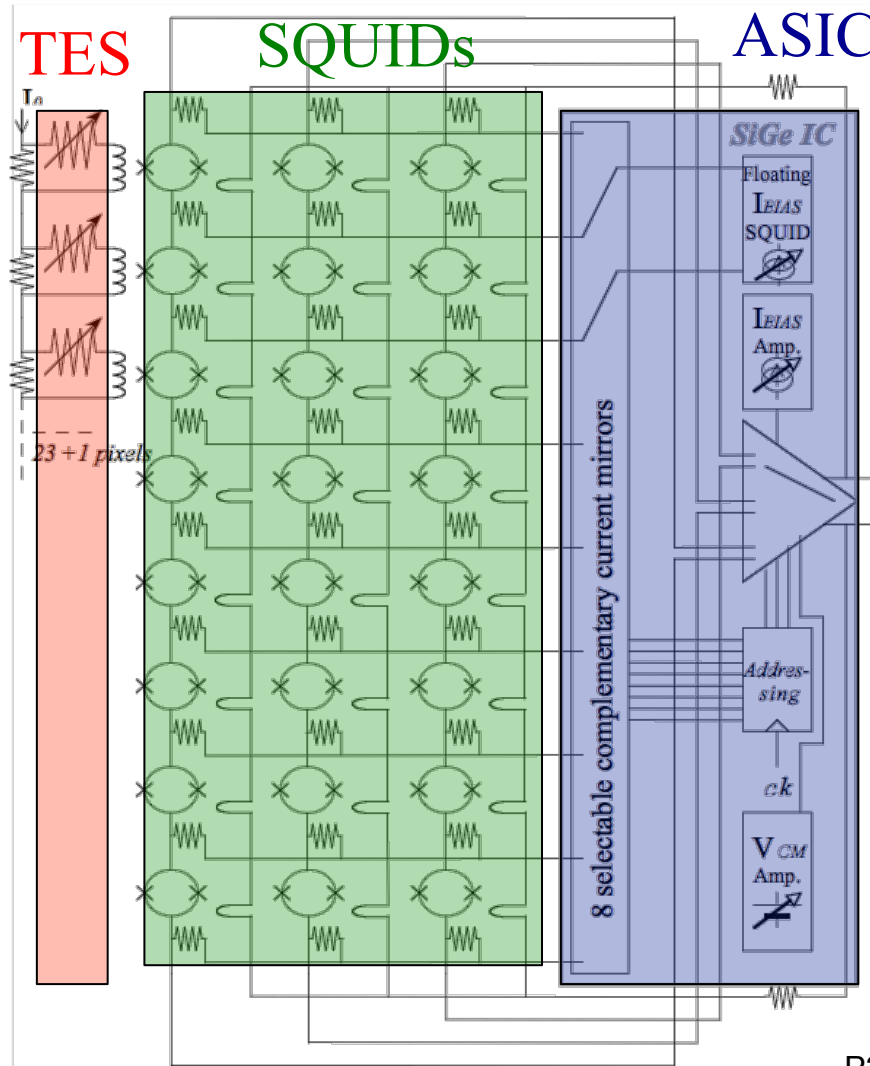
↪ Plus « aisé » avec les bolomètres supraconducteur

- Les SQUIDs fonctionnent aux très basses températures

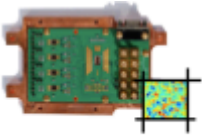
➔ **Matrice de bolomètres supraconducteurs**

# Electronique de lecture des TES: ASIC SiGe à 4K

(F. Voisin, D. Prêle)

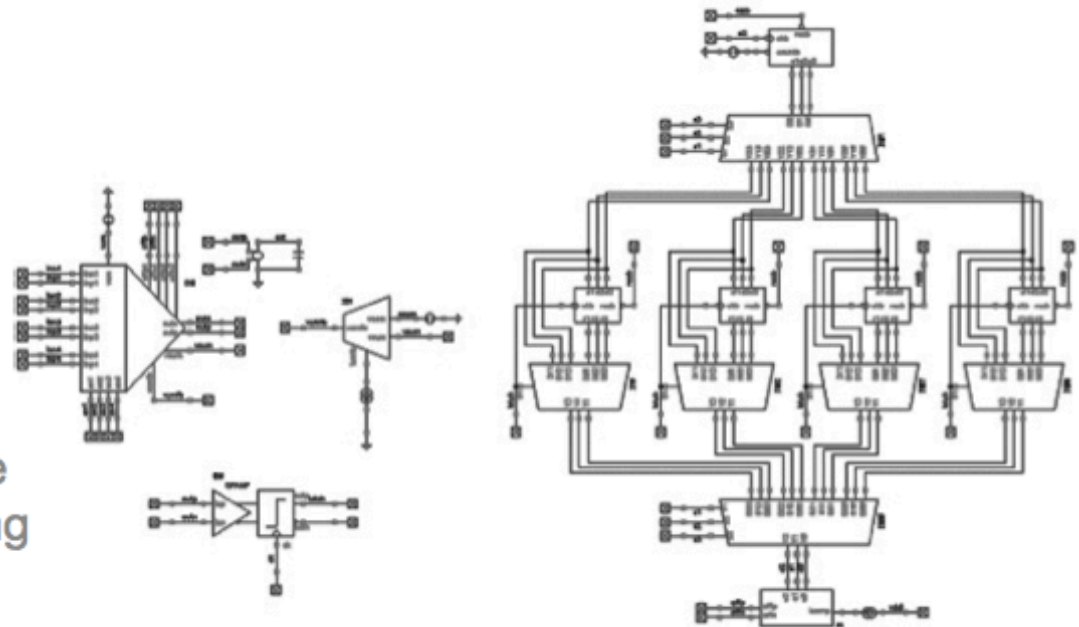


Tests à 300K, 77K et 4K



## Cryogenic IC : new design (3rd generation)

- readout of **4 columns of 32 SQUID** in series ; Readout of 128 detectors
- fully **configurable** matrix addressing (offset, depth and direction) ;
- **replace resistor addressing by capacitor to reduce power dissipation** SQUID AC biasing setup ;
- **dynamic offset compensation** (calibration and memorization) ;
- **reduce ASIC power consumption** :  $V_{\text{supply}}=5\text{ V}$  to  $3.3\text{V}$  ;
- **serial protocol** to address each ASIC reconfigurable parts (voltage and current references...) reducing of the number of required wiring.



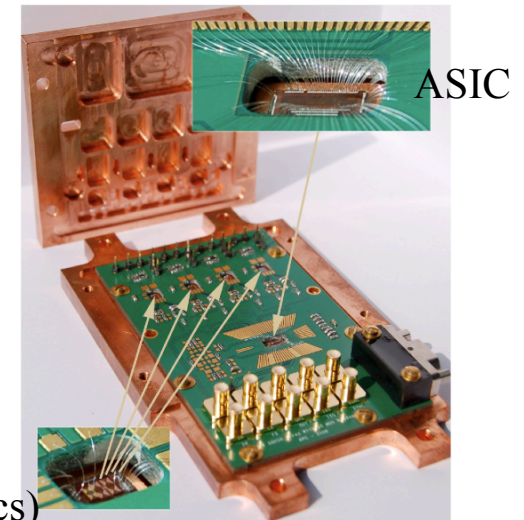
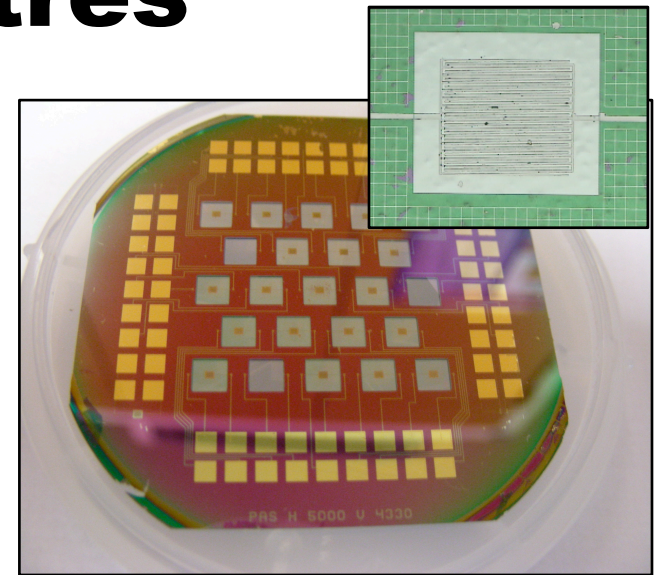
Status: design frozen, layout being done

# Matrice de 23 bolomètres supraconducteurs

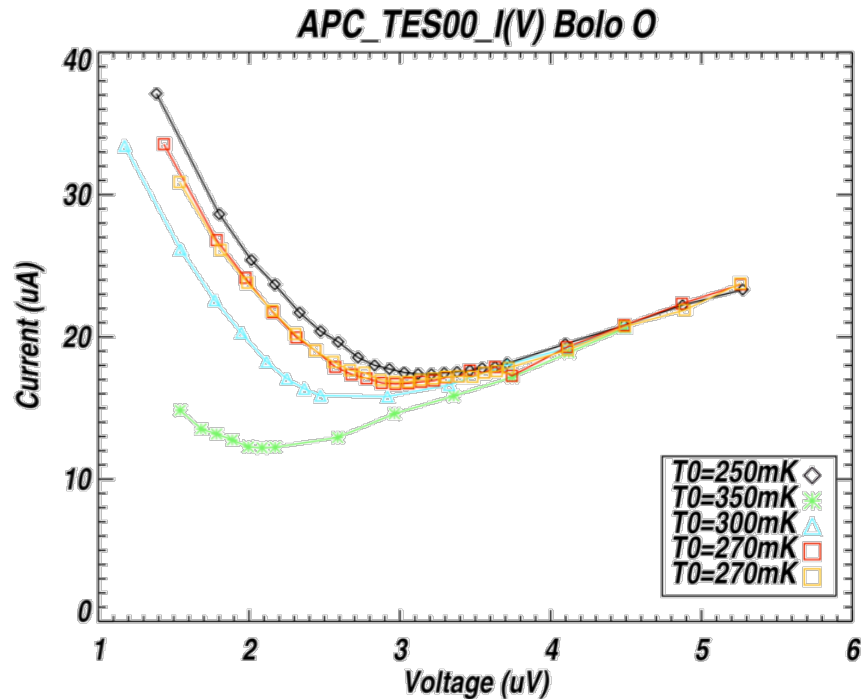
- 1ère réalisation IEF-IAS  
(thèse Y. Atik, B. Belier)

↳ Membranes pleines (type Olimpo):  
 $NEP \sim 10^{-16} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$

- Lecture via ASIC B2B et une architecture thermo-mécanique



# TES: Courbes I-V et P-V (Joseph Martino)

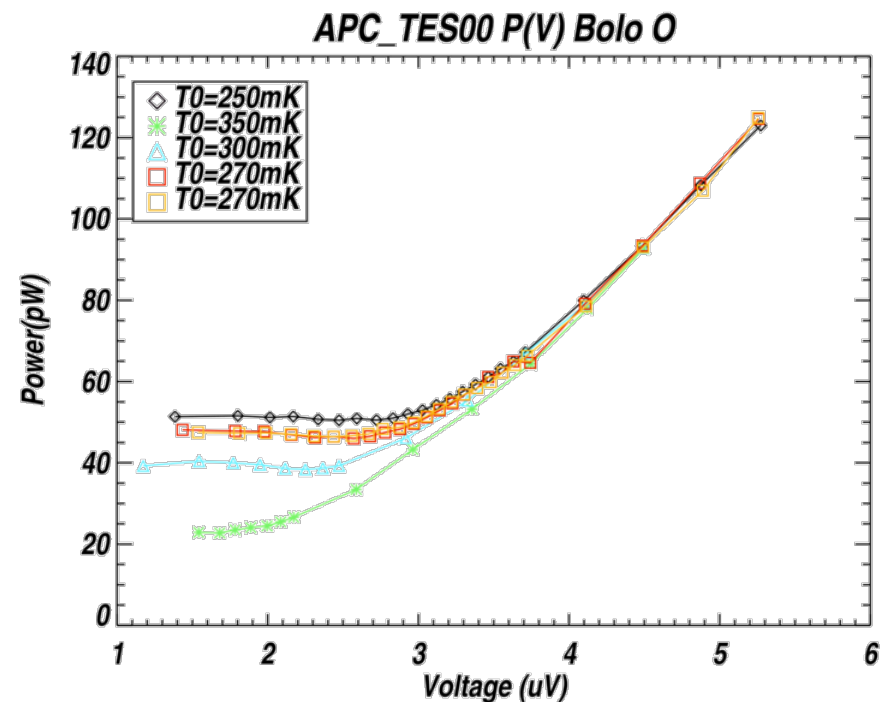


- Passage de la saturation au régime contre-réactionné

- Détermination de la conductance thermique:

↳  $G=677\text{pW/K}$

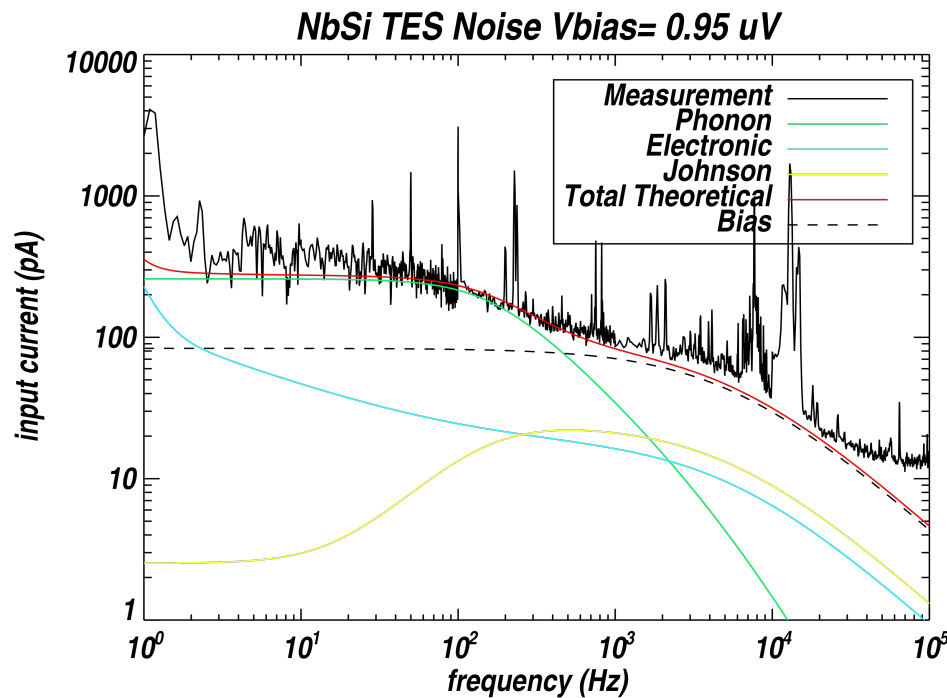
↳ Membrane pleine





# Bruit

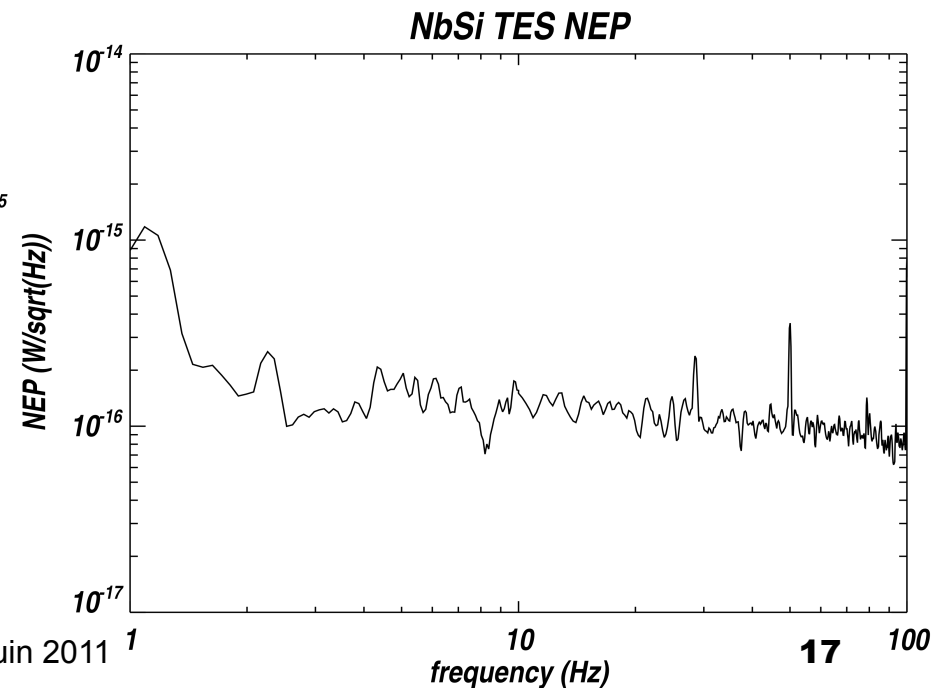
(Joseph Martino)



- Bruit en courant cohérent avec le modèle

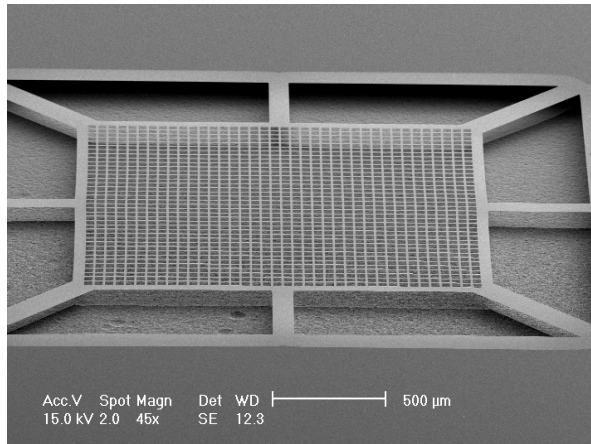
↪ Pas de fit ici!

- $NEP=10^{-16} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$   
(membrane pleine)
- Pas de bruit en excès!

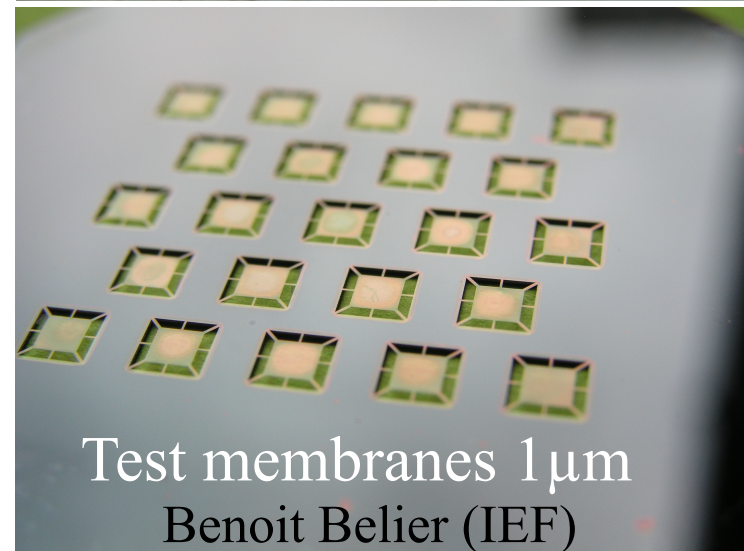
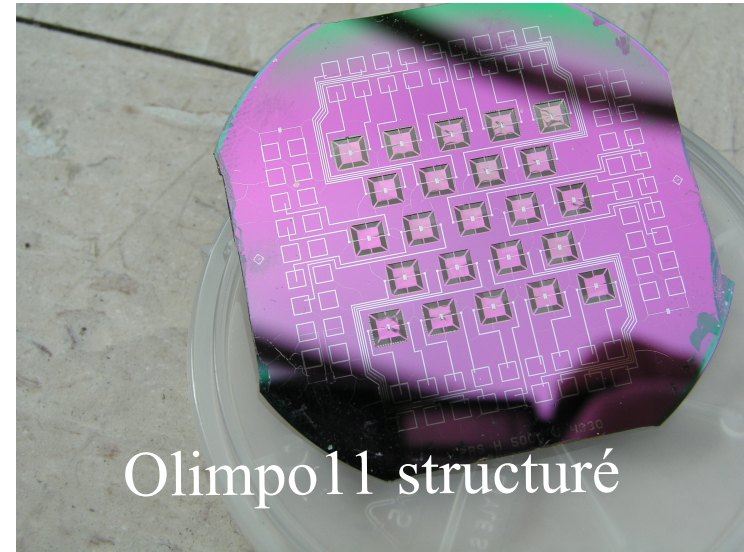


# Etape suivante: Membranes ouvertes

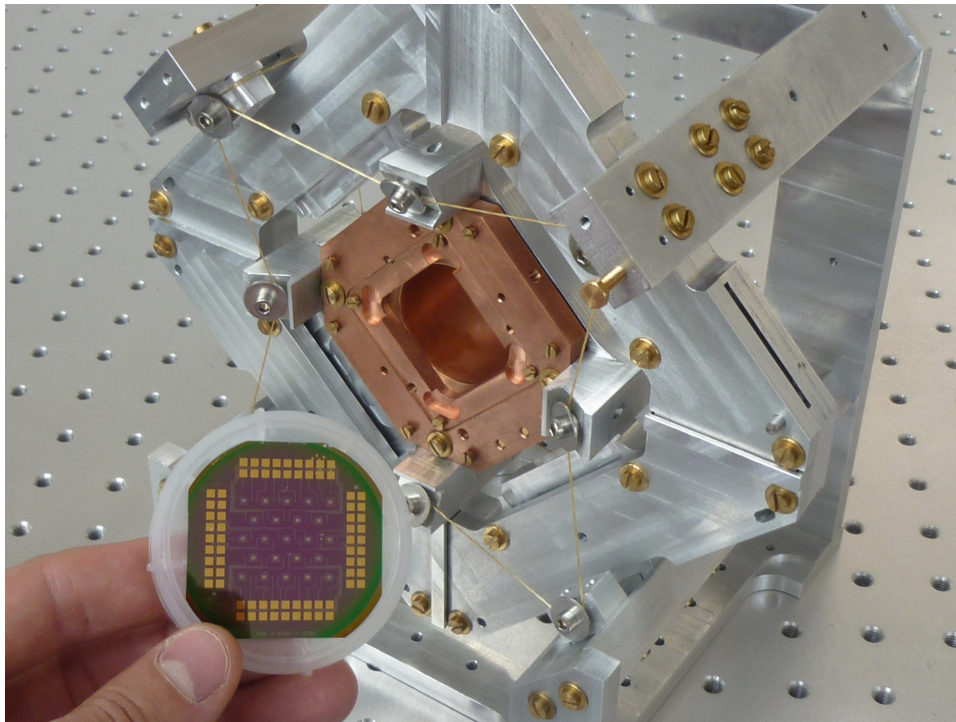
- Gravure XeF<sub>2</sub>



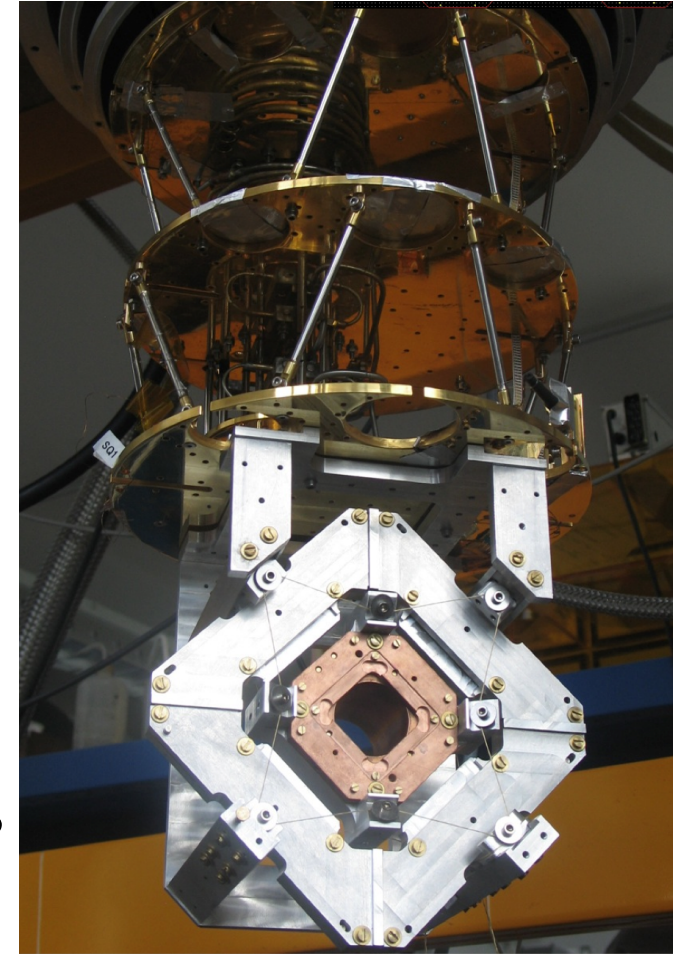
- $NEP=10^{-17}W.Hz^{-0.5}$
- Base pour les détecteurs  
QUBIC



# Architecture complète



- Intégration de l'électronique et des détecteurs dans une architecture mécanique et thermique



## 2. Vers de nouvelles architectures de détection

- Méthode de mesure actuelle: soustraction du signal de 2 détecteurs mesurant des polarisations perpendiculaires

↪ Paramètres de Stokes :

$$I = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle$$

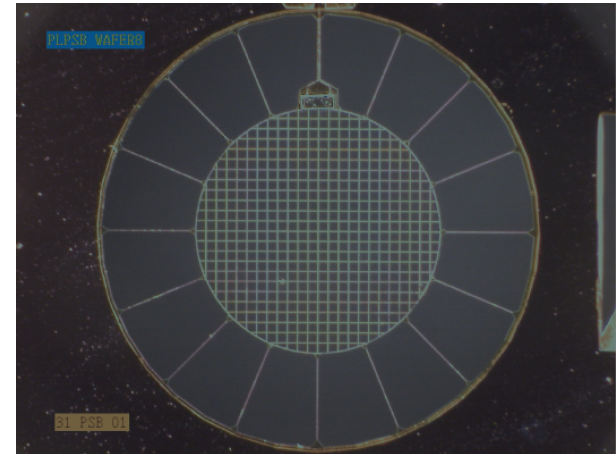
$$Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle$$

$$U = 2 \langle E_x E_y \cos \delta \rangle$$

$$V = 2 \langle E_x E_y \sin \delta \rangle$$

↪ Méthode Planck, Bicep...

- Polarisation Sensitive Bolometer (Caltech-JPL)
- Modulation du signal : stratégie d'observation



# Effets parasites instrumentaux

- Imperfections instrumentales

- ↪ Susceptible de masquer le signal cosmologique

- Améliorations requises:

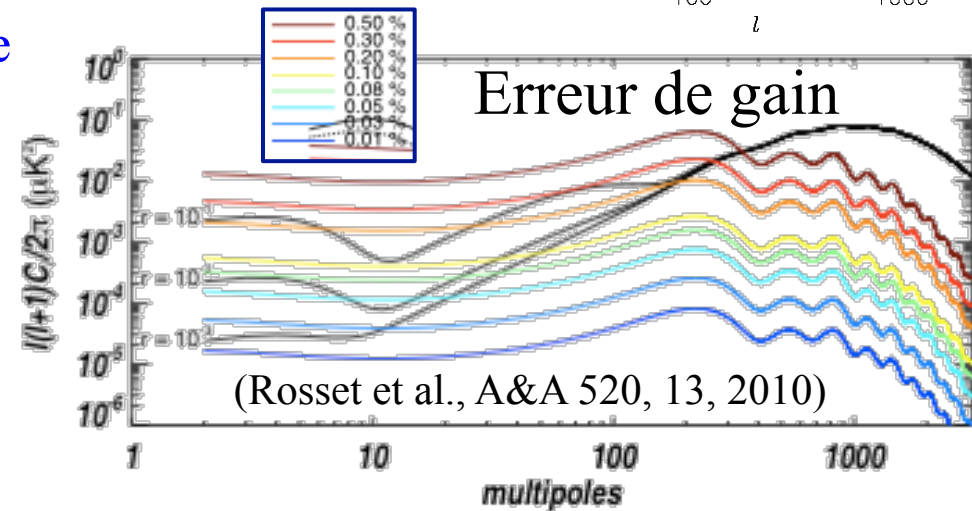
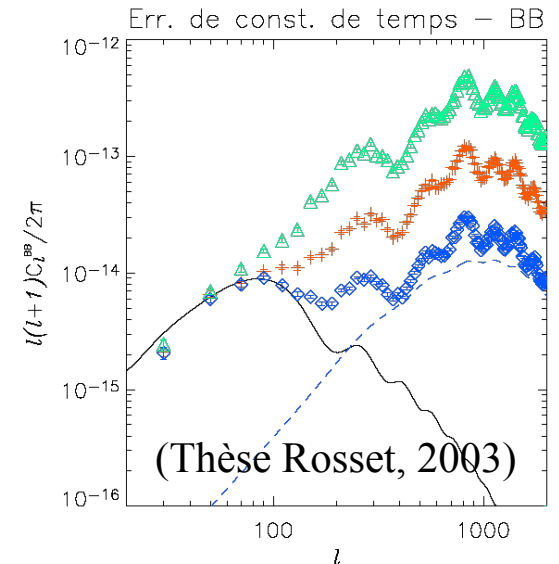
- ↪ Couplage optique, pureté de polarisation: **antennes**
  - ↪ Filtrage optique: **filtre sur ligne de transmission**
  - ↪ Qualité de la mesure: **architecture évoluée**
  - ↪ Intégration: **technologie planeaire**

$\tau = 7\text{ms}$  erreur:

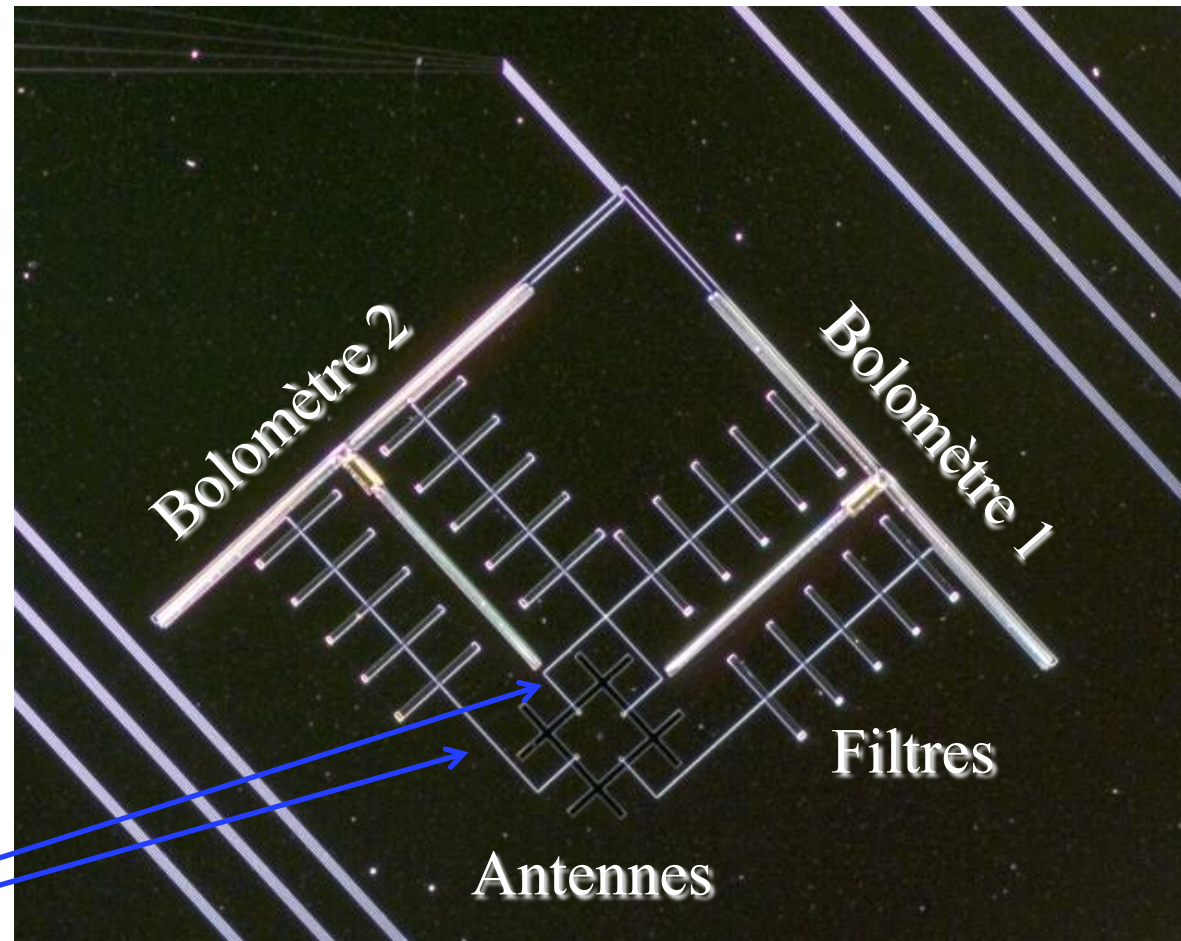
0.8ms

0.4ms

0.2ms



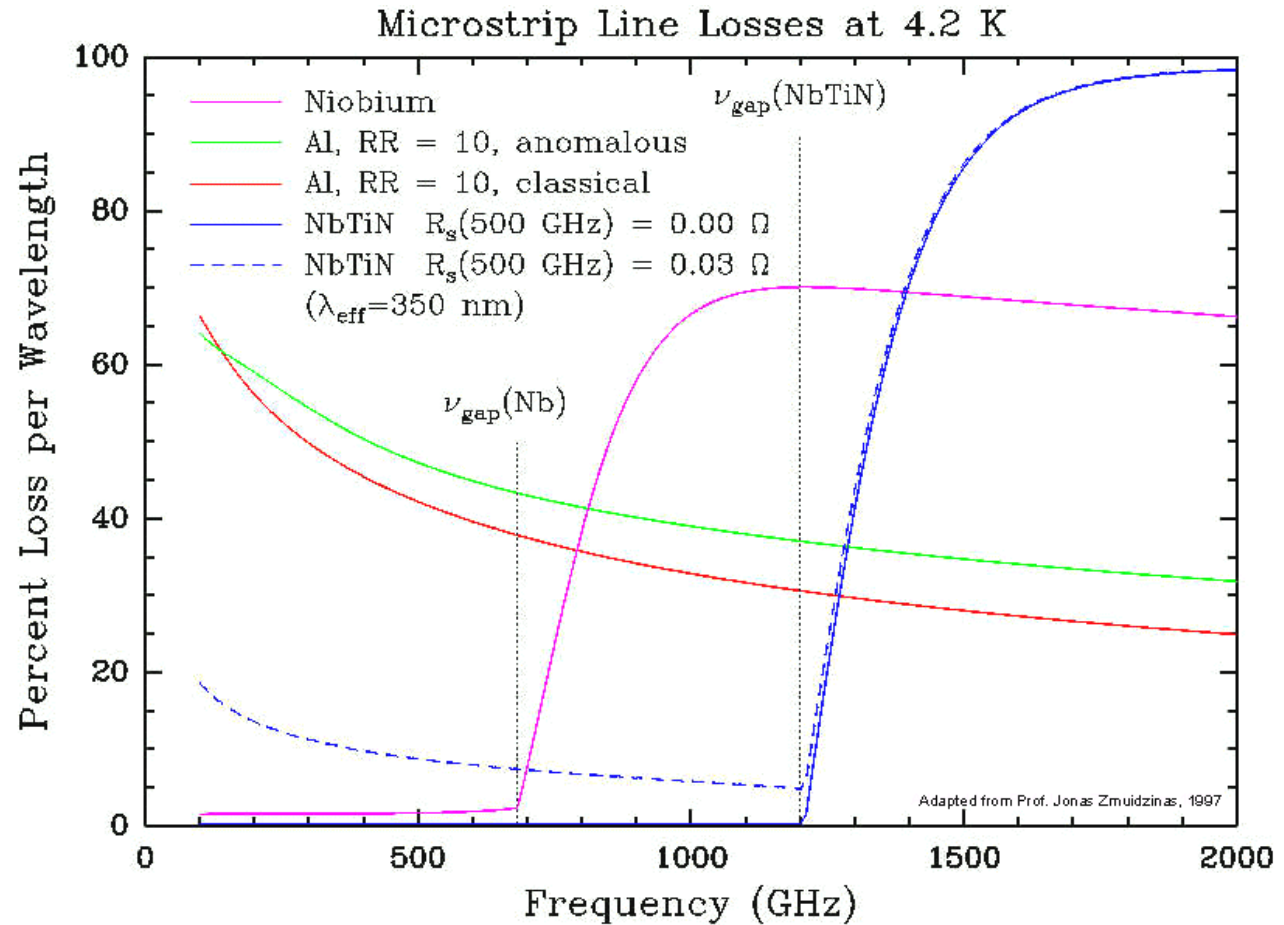
# Radiomètre complet (Polar Bear UCB)



Lignes de  
transmission  
supraconductrices

# Lignes supraconductrices

- Niobium utilisable jusqu'à 700GHz



# Architectures évoluées

## ■ Mesure directe des paramètres de Stokes

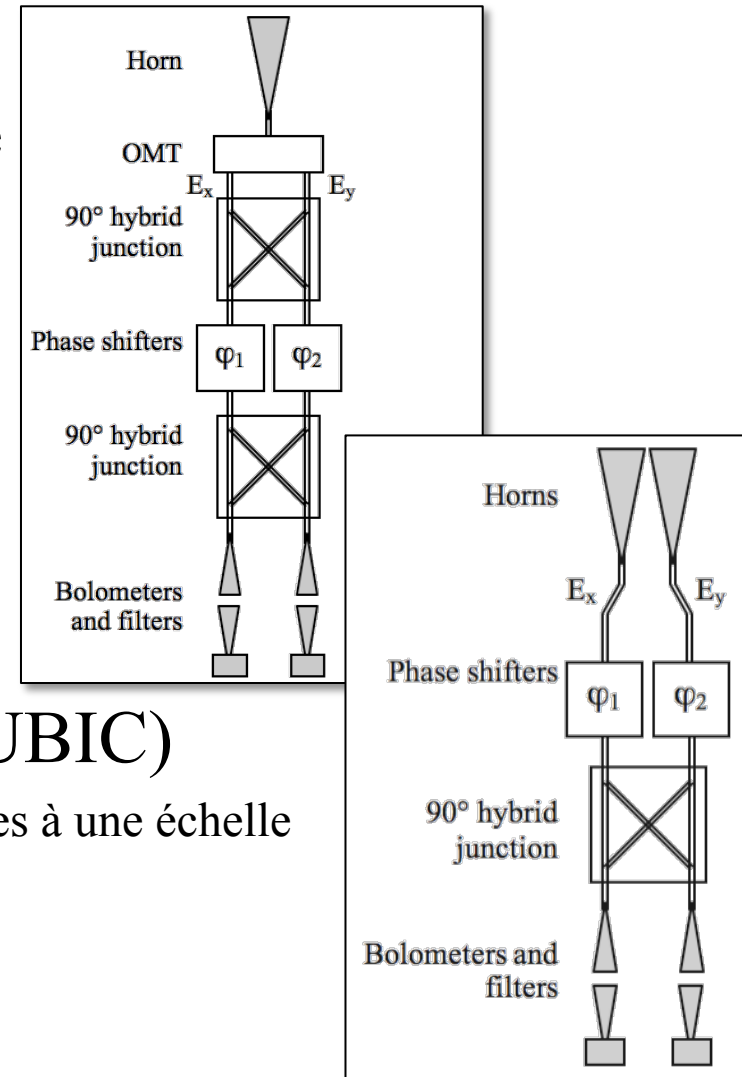
- ↪ Architecture intégrée planaire
- ↪ Pas de systèmes rotatifs

## ■ Pseudo-correlator scheme (CLOVER)

- ↪ Equivalent à un polariseur tournant

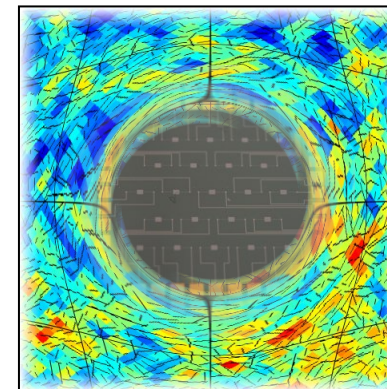
## ■ Interférométrie bolométrique (QUBIC)

- ↪ Coefficients de Fourier des paramètres de Stokes à une échelle spatiale donnée (ligne de base

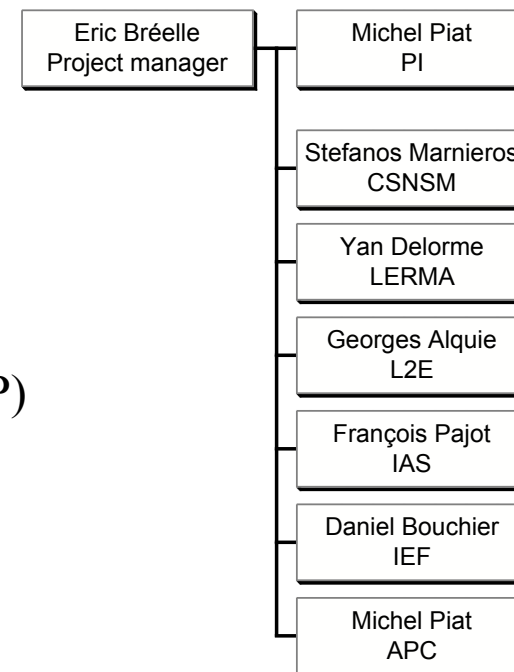




# BSD: B-mode Superconducting Detectors



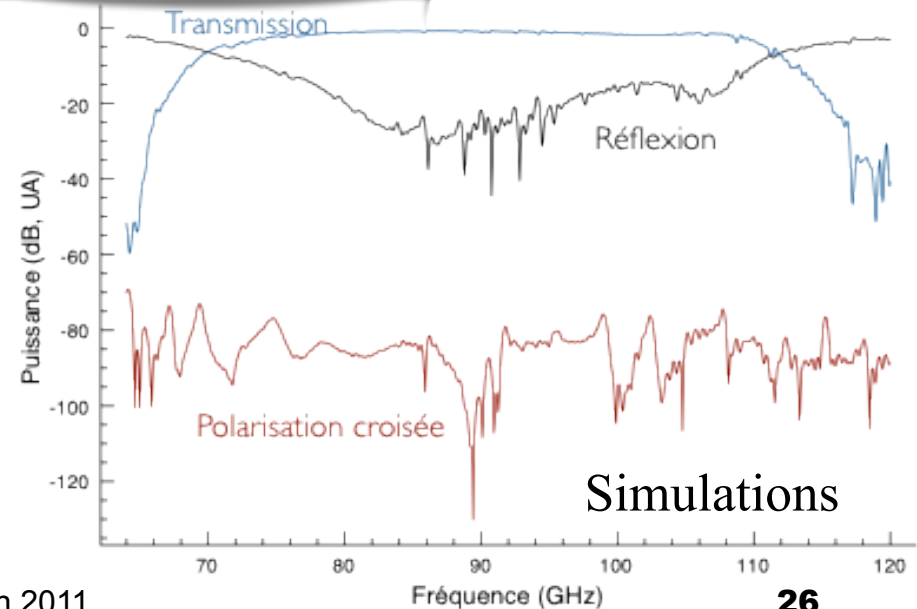
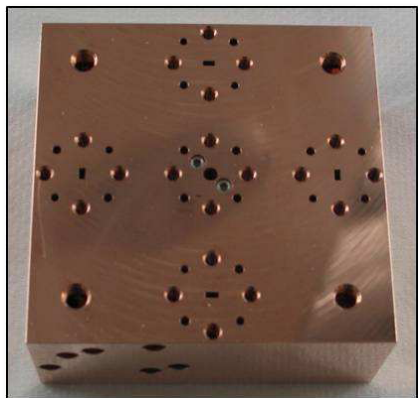
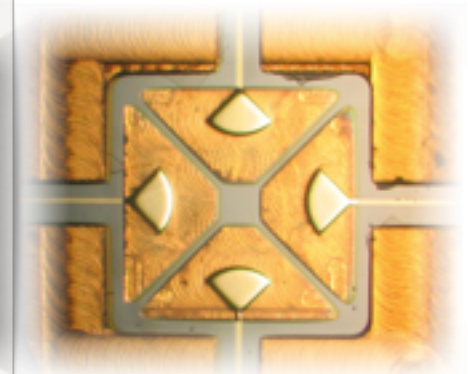
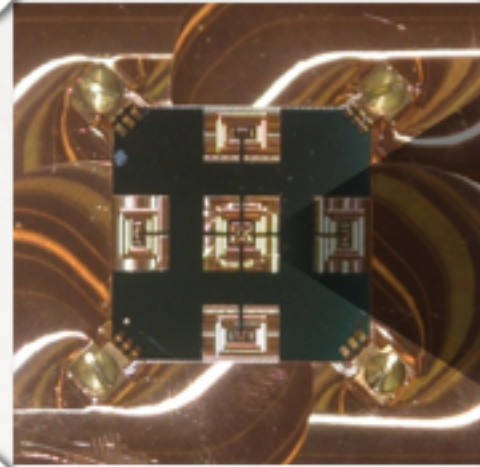
- Initié en septembre 2007
  - ↪ Premiers financements (GIS P2I, ANR JC, CNRS P&U)
- Principal objectif: Réalisation de composants micro-onde supraconducteurs pour la mesure de la polarisation du CMB
  - ↪ Technologie Nb
  - ↪ 70GHz-350GHz
  - ↪ Composants: antennes, lignes de transmission, filtres, déphaseurs, switch, coupleur/diviseur de puissance
- 2010: financement CNES
  - ↪ Extension au pôle grenoblois (IN) et toulousain (IRAP)
- Réalisation de démonstrateurs
  - ↪ QUBIC



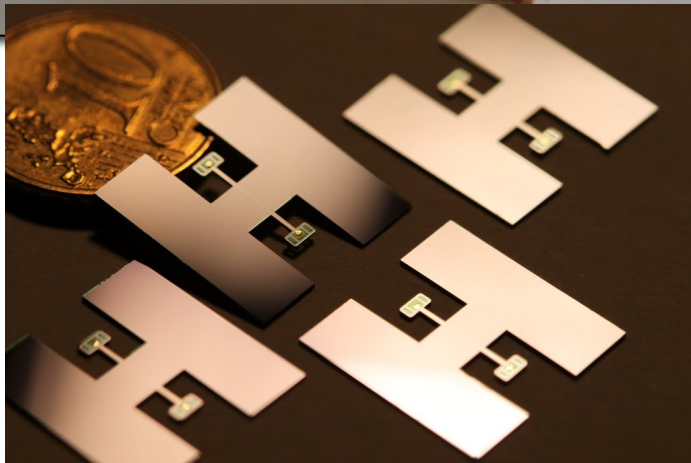
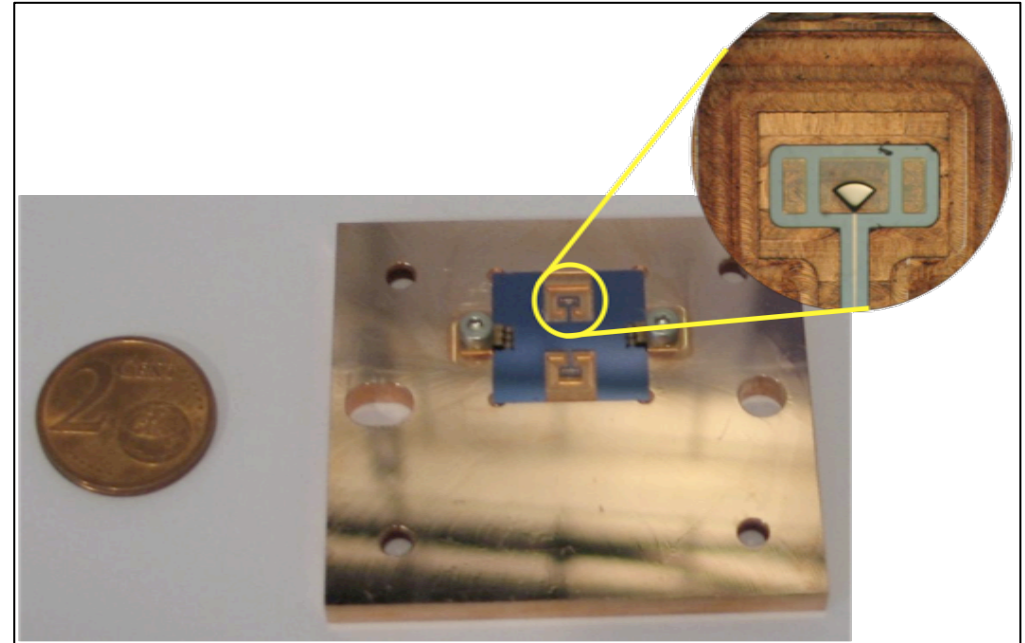
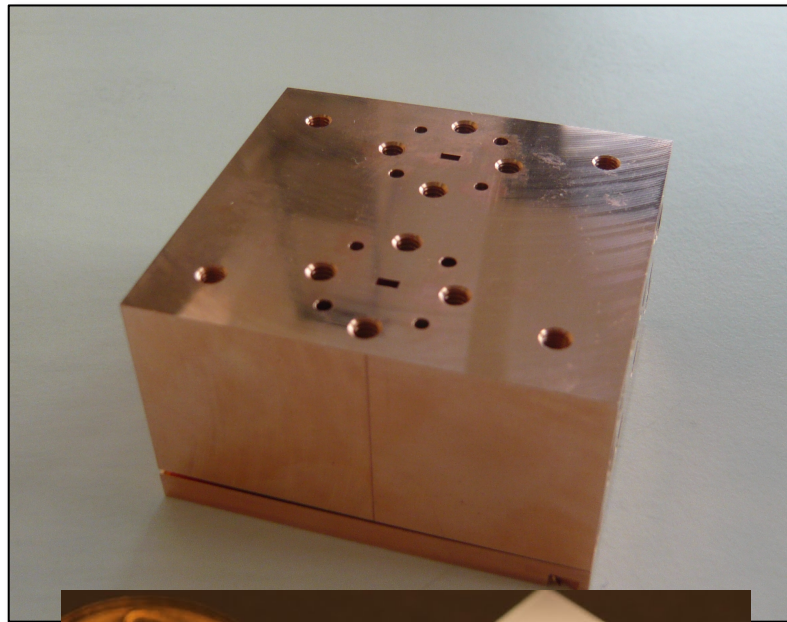
# Ortho-Mode Transducer (OMT) planaire

(A. Ghribi, BSD collaboration)

- Séparation planaire des polarisations perpendiculaires
- En cours de caractérisation à Milan Bicocca

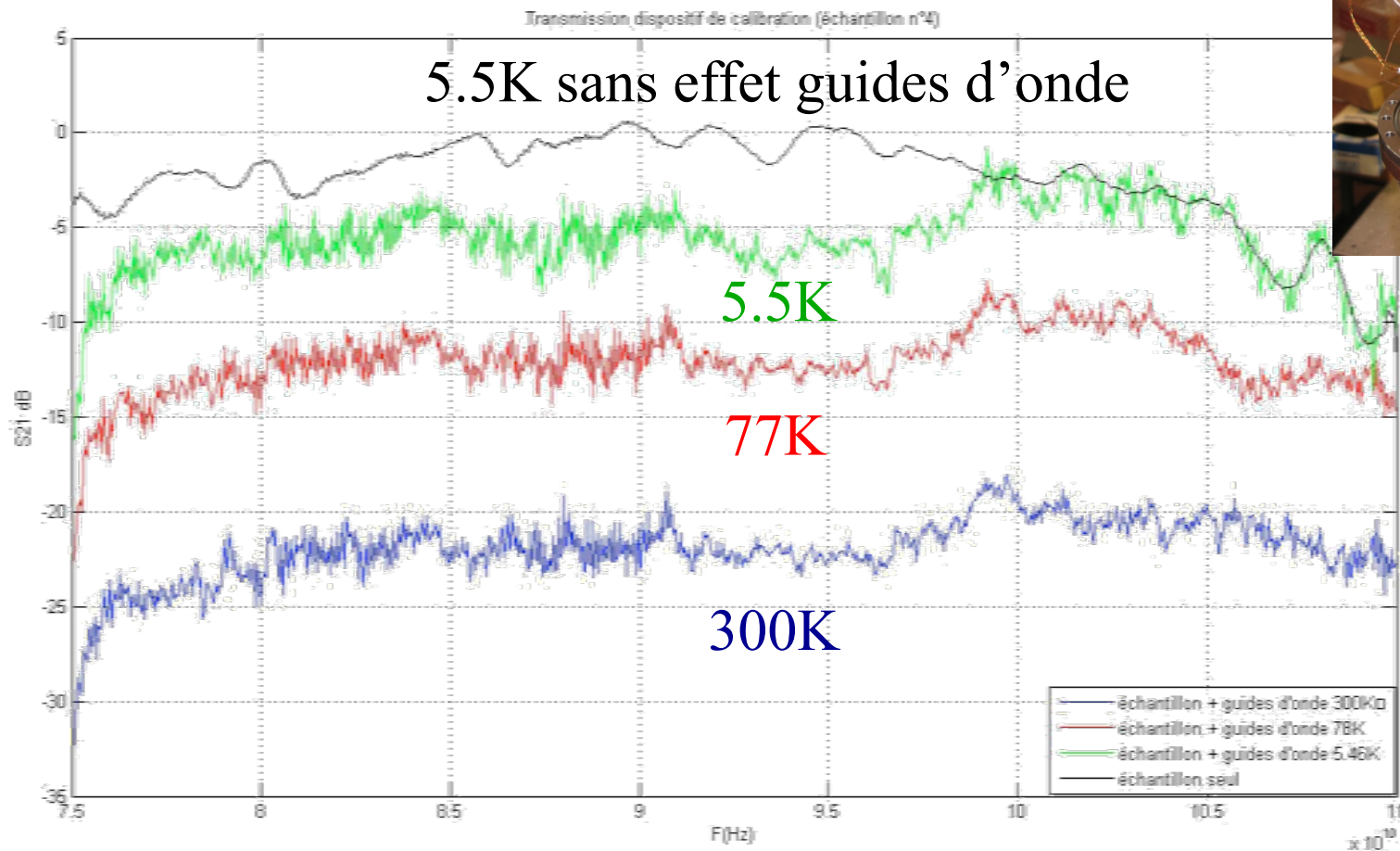
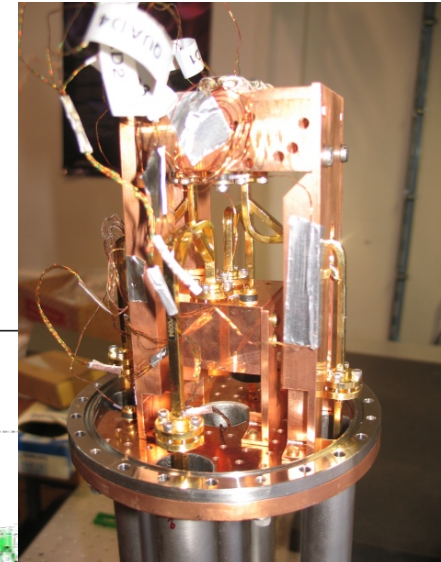


# BSD: Module d'étalonnage



- Système nécessaire à la mesure de l'OMT

# Mesure transmission structure d'étalonnage

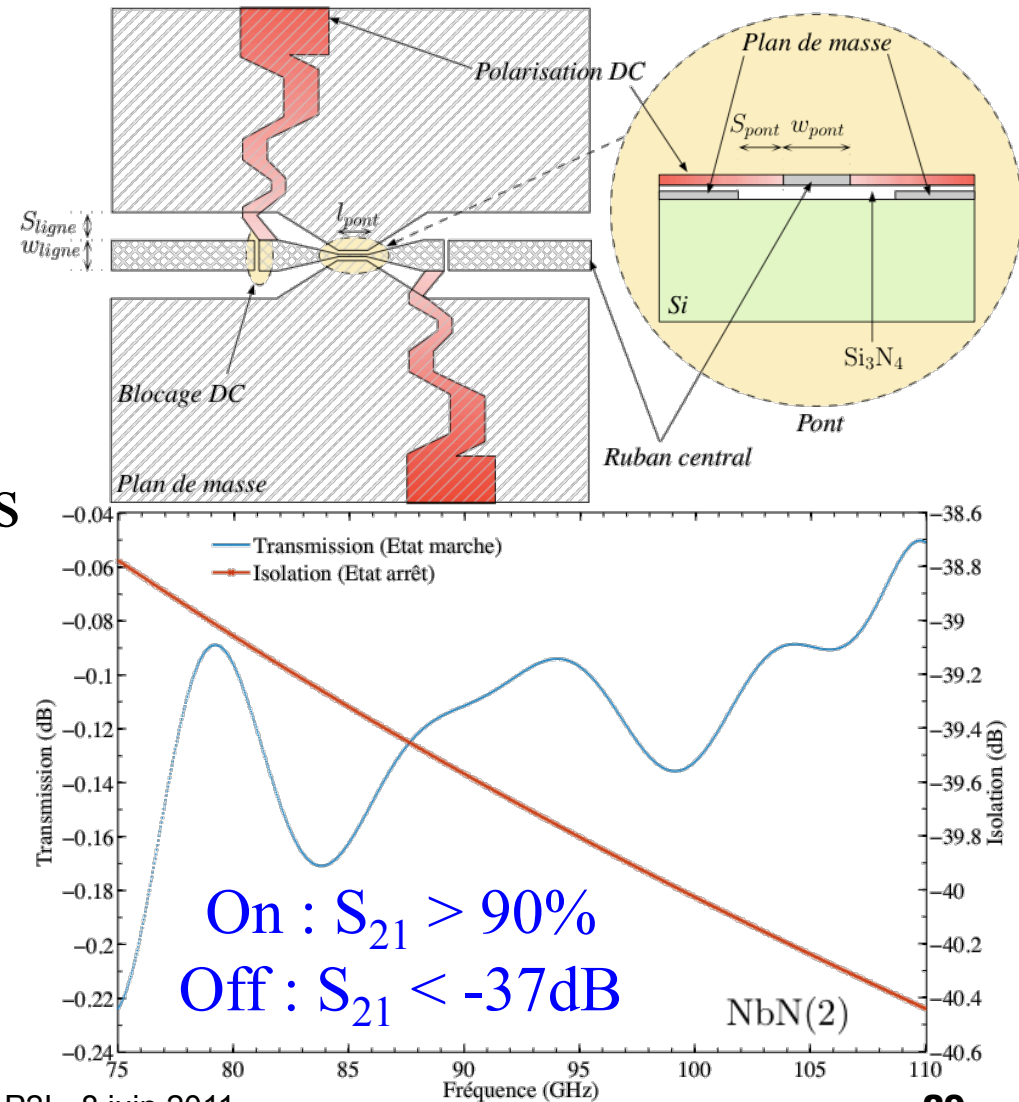


# Superconducting switch design

(Thèse A. Ghribi)

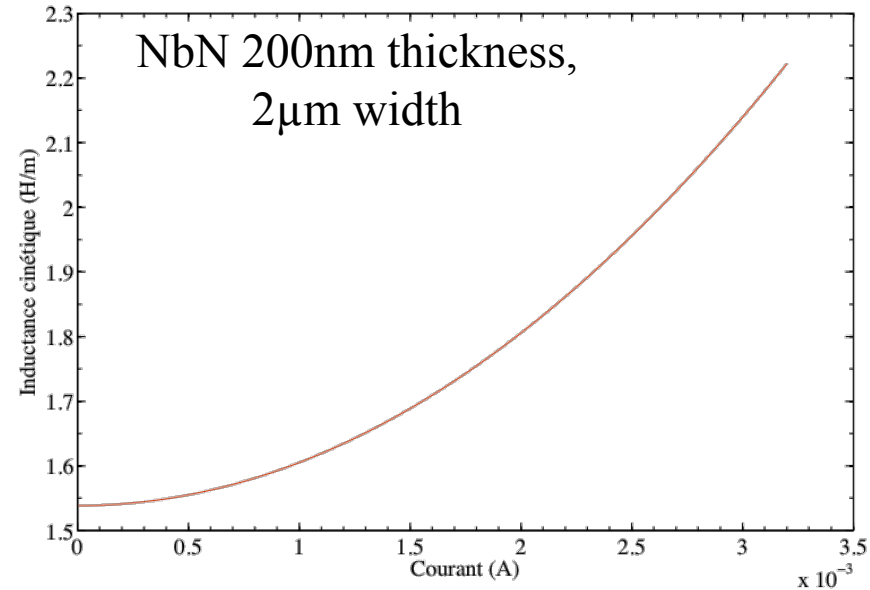
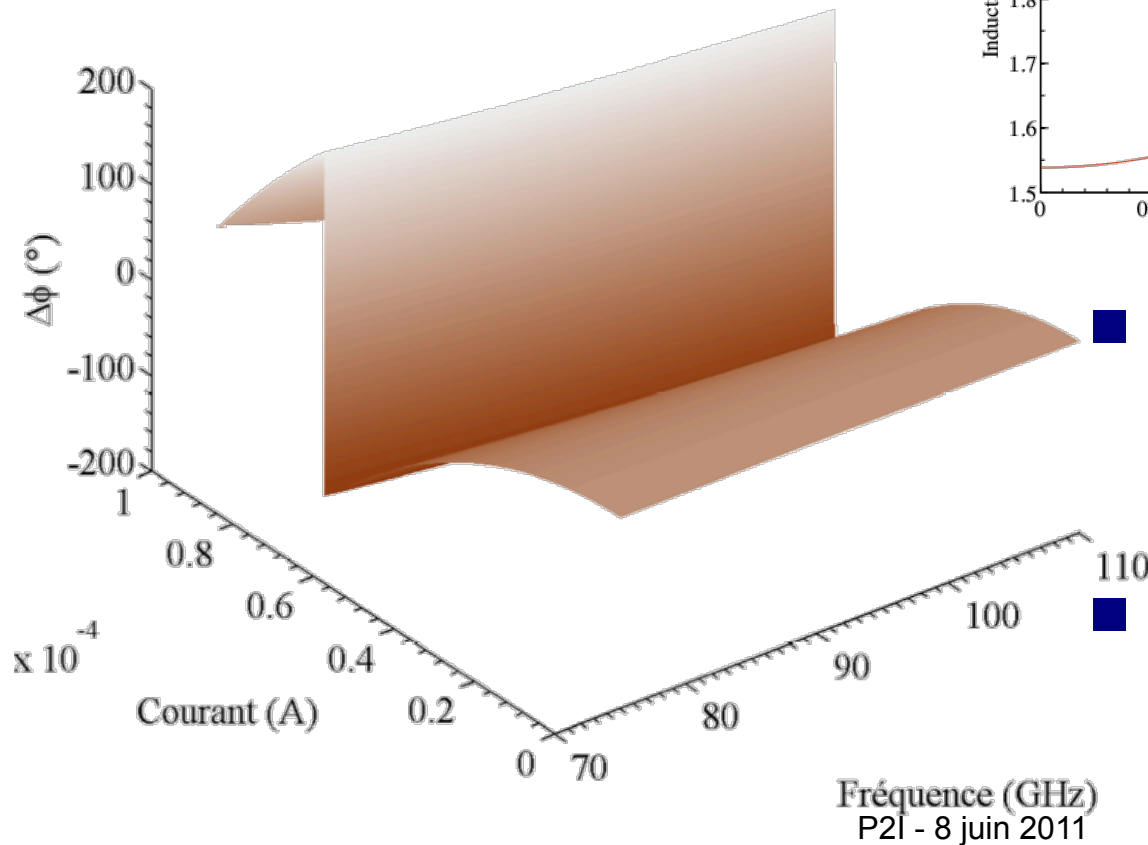
- Use of temperature or current to switch a superconducting bridge to normal
- Performances depends on normal resistivity

Nb	20 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbN(1)	200 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbN(2)	1000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbSiN	1000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbAlN	20000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$



# Kinetic inductance phase shifter (A. Ghribi PhD)

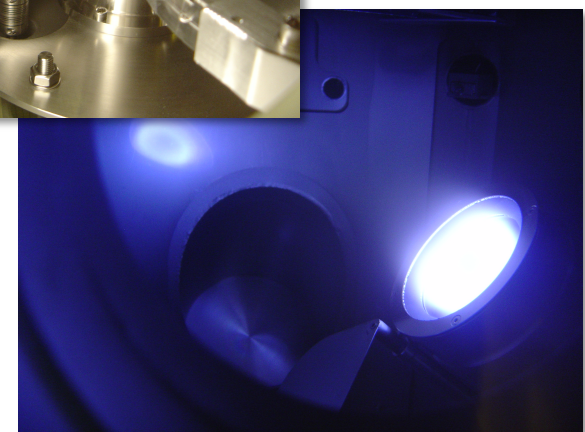
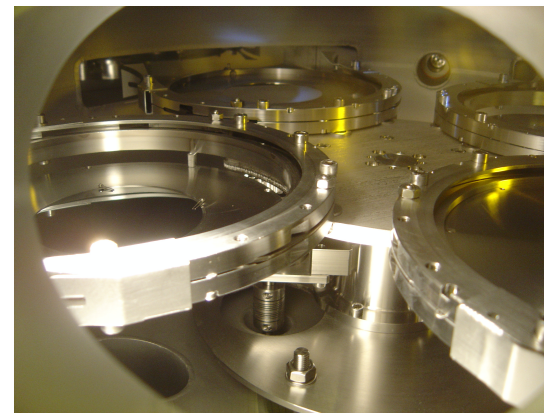
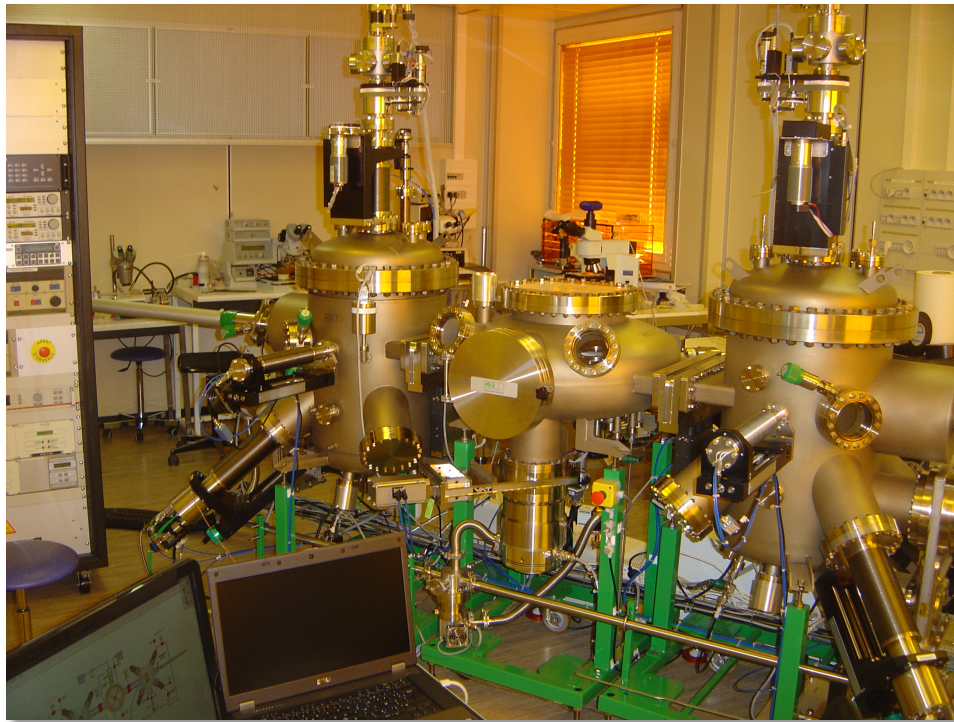
- Kinetic inductance variation with current:



- An optimised supercond. bridge could be used as analog phase shifter
- Prototype being designed

# Systeme de pulvérisation cathodique ultraviolette multi chambres

- Dépôts de Nb, Nb/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et NbSi sur des wafer de 8"
- Livraison en décembre 2010, en cours de tests
- 150k€/458k€ financé par P2I (42% du financement de P2I pour BSD)



# Conclusions



- Besoin instrumentaux pour la mesure des modes B

## Technologie supraconductrice: R&D BSD

- Originalités de la communauté française
  - ↳ NbSi
  - ↳ ASIC SiGe @ 4K
  - ↳ Composants RF supraconducteurs
- P2I a permis de développer nos points forts

