

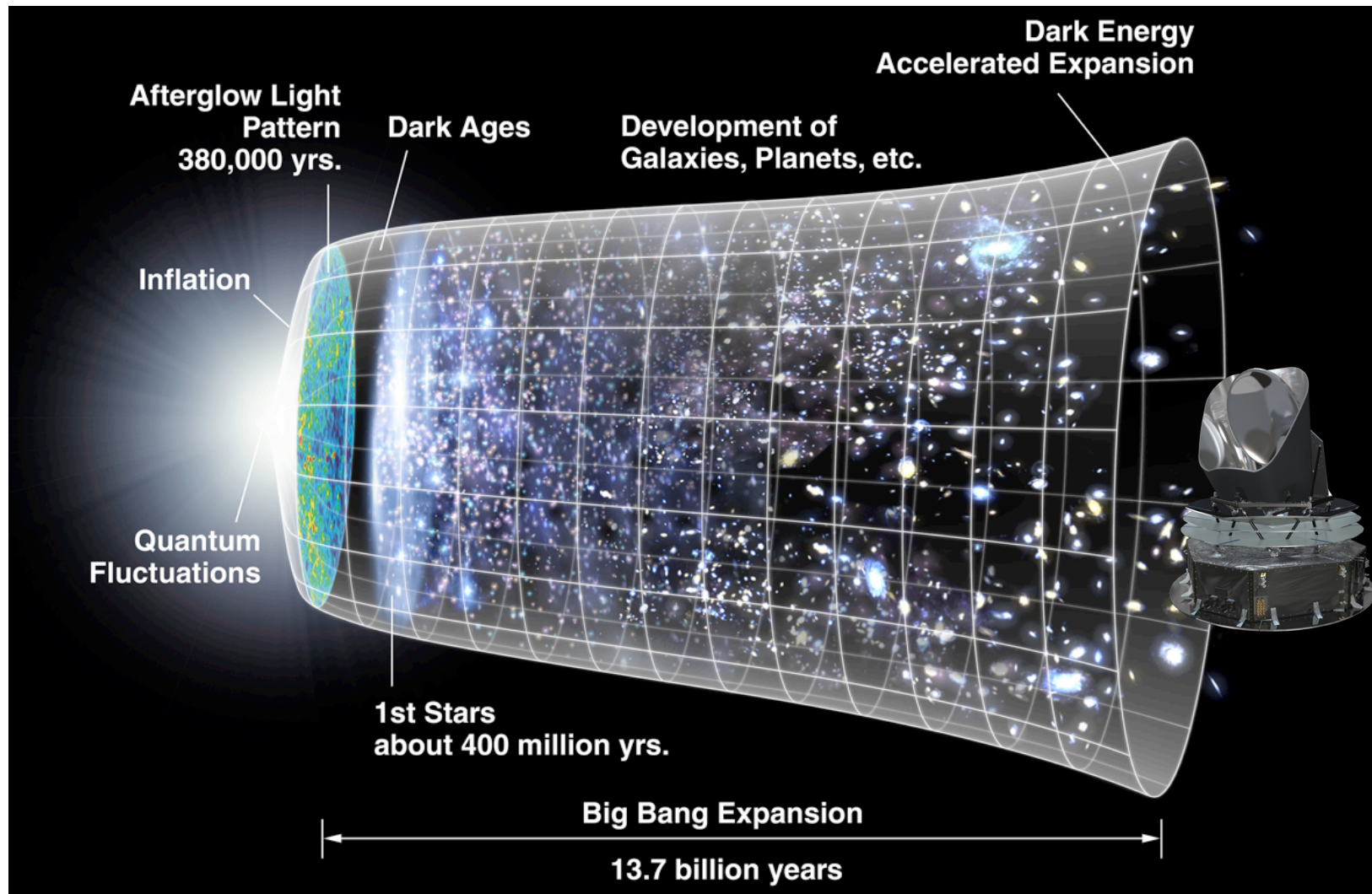
A la recherche des modes B de polarisation du rayonnement fossile: vers de nouveaux instruments

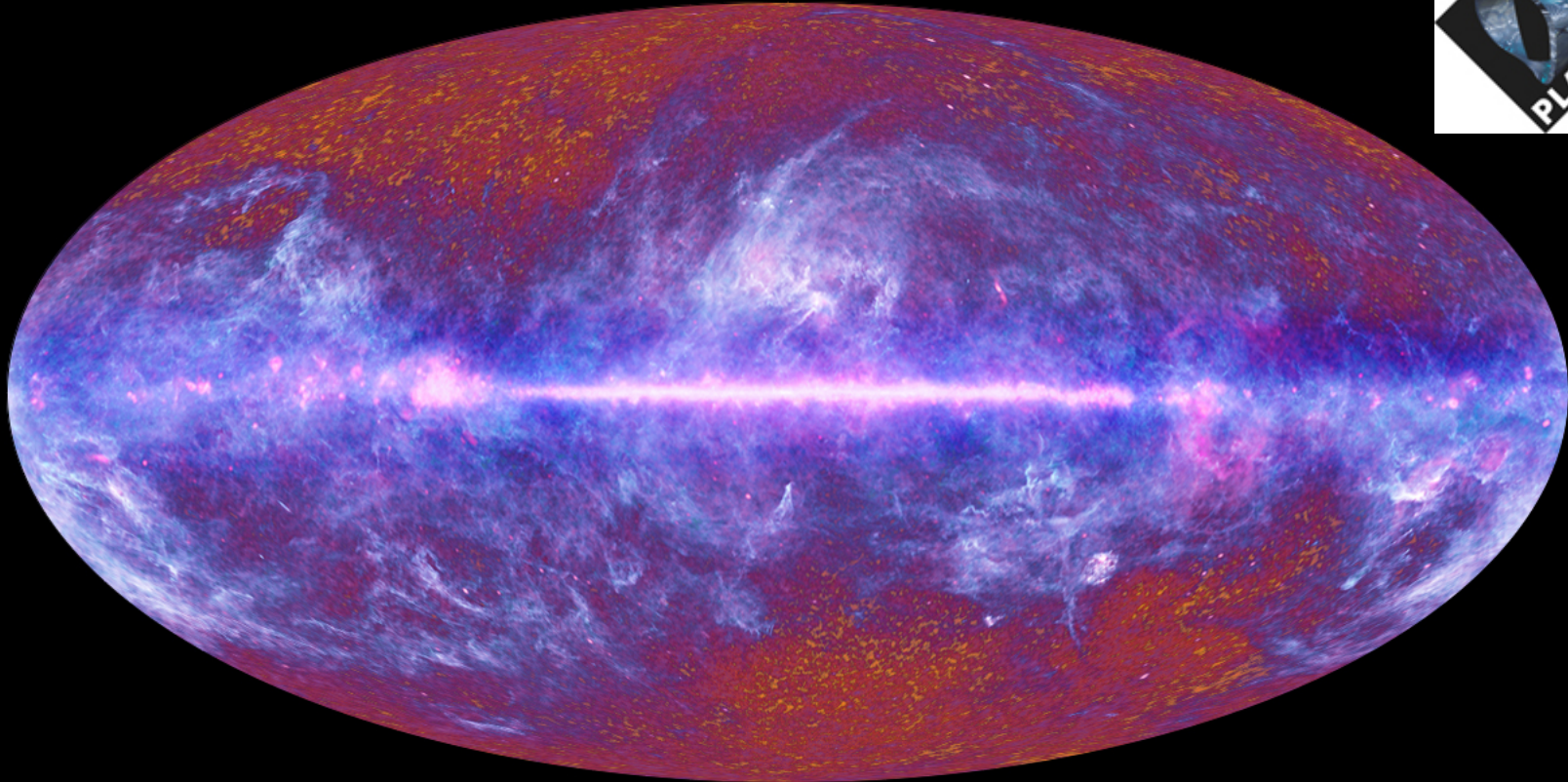
université
**PARIS
DIDEROT**
PARIS 7



Michel Piat
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
Université Paris Diderot

Le fond diffus cosmologique ou CMB (Cosmic Microwave Background)





Planck (2009): 30-857GHz

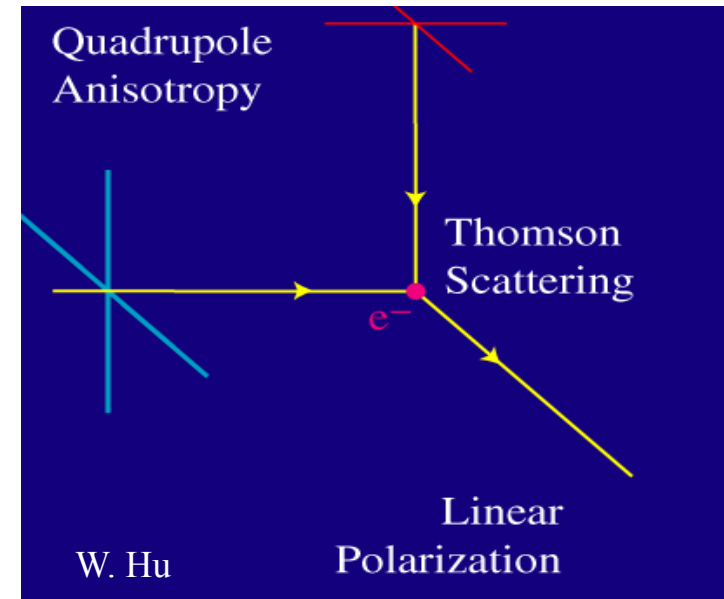
The Planck one-year all-sky survey



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

La polarisation du CMB

- Origine: diffusion Thomson au moment du découplage rayonnement-matière
- Requiert un rayonnement incident à l'électron qui soit anisotrope
 - ↪ **Electron tombant dans une surdensité (fluctuations scalaires)**
 - ↪ **Déformation de l'espace par les ondes gravitationnelles (fluctuations tensorielles)**
- Polarisation linéaire d'environ 10%



Caractérisation de la polarisation

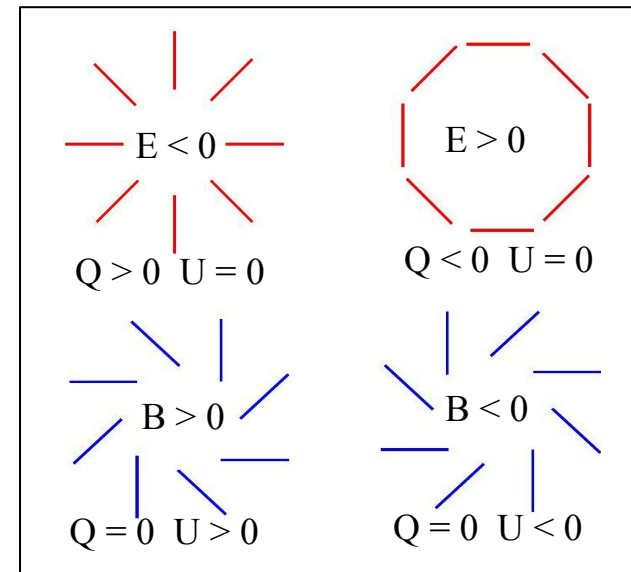
■ Paramètres de Stokes

- ↪ **Paramètres locaux**
- ↪ **I: intensité totale**
- ↪ **Q, U: polarisation linéaire**
- ↪ **V: polarisation circulaire**

■ Modes E et B

- ↪ **Paramètres non locaux**

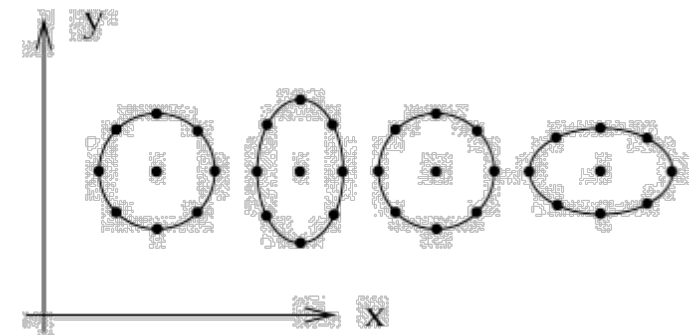
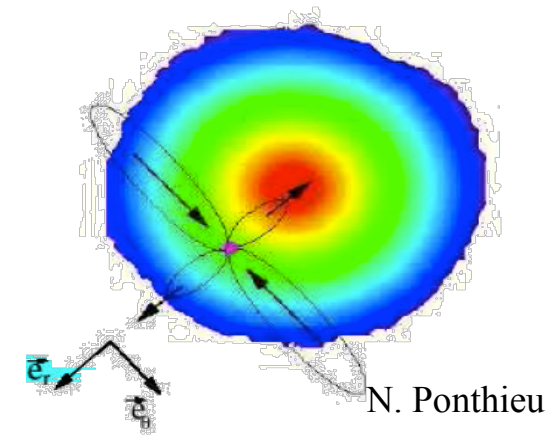
$$\begin{cases} I = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U = 2\langle E_x E_y \cos \delta \rangle \\ V = 2\langle E_x E_y \sin \delta \rangle \end{cases}$$



Origine physique des modes E et B

- *Modes scalaires*: fluctuations de densité
 - ↪ **TT, EE, TE**
- *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 $r = T/S$**

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

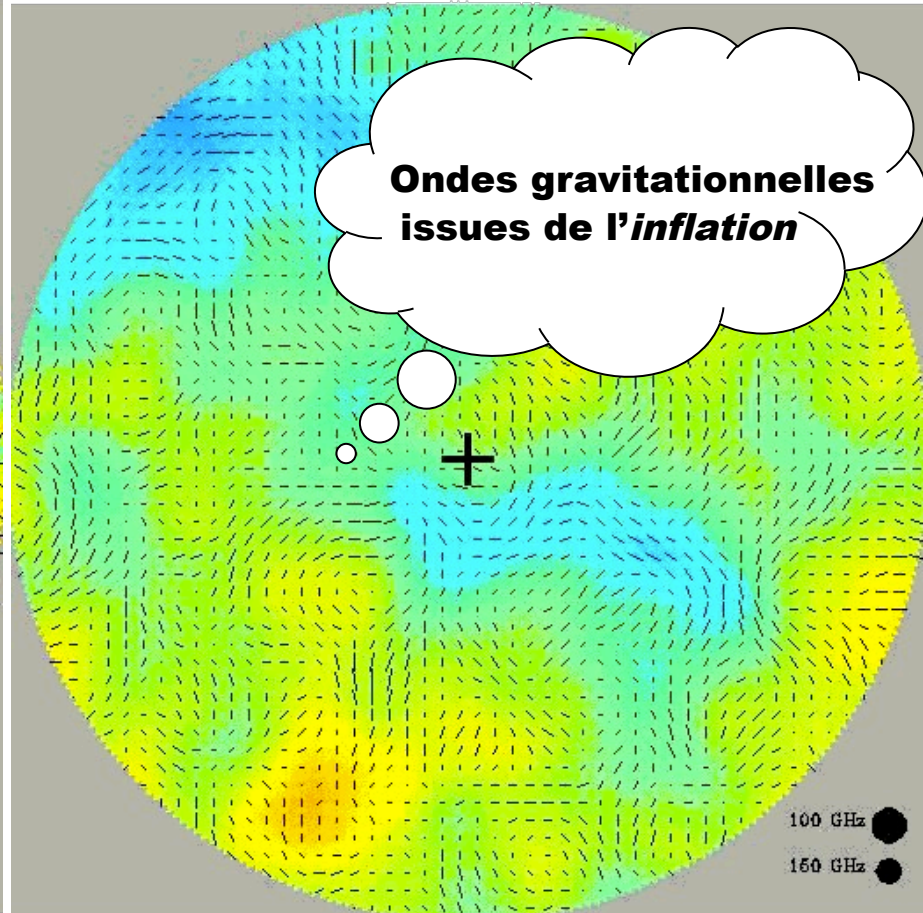
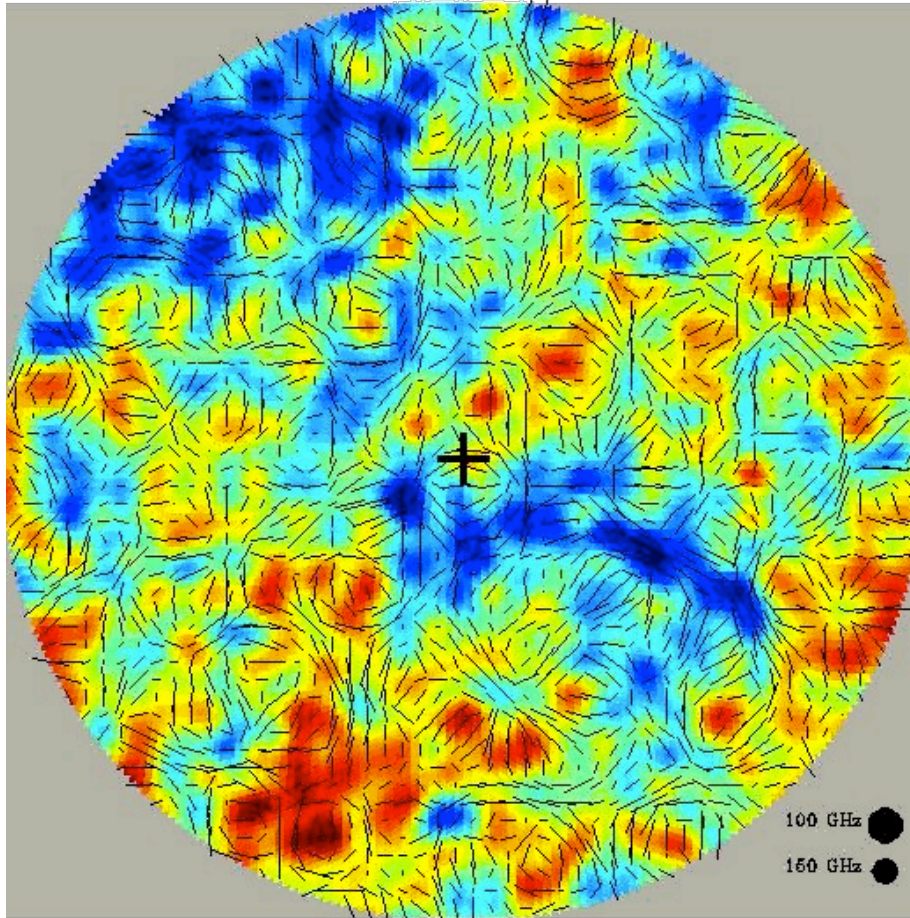


Polarisation du CMB

Scalar+Tensor Perturbations
42' beam, 30deg. diam. polar cap

T/S=0.28

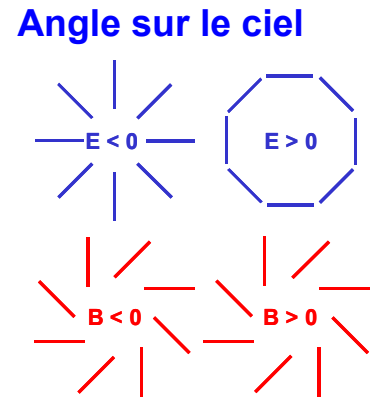
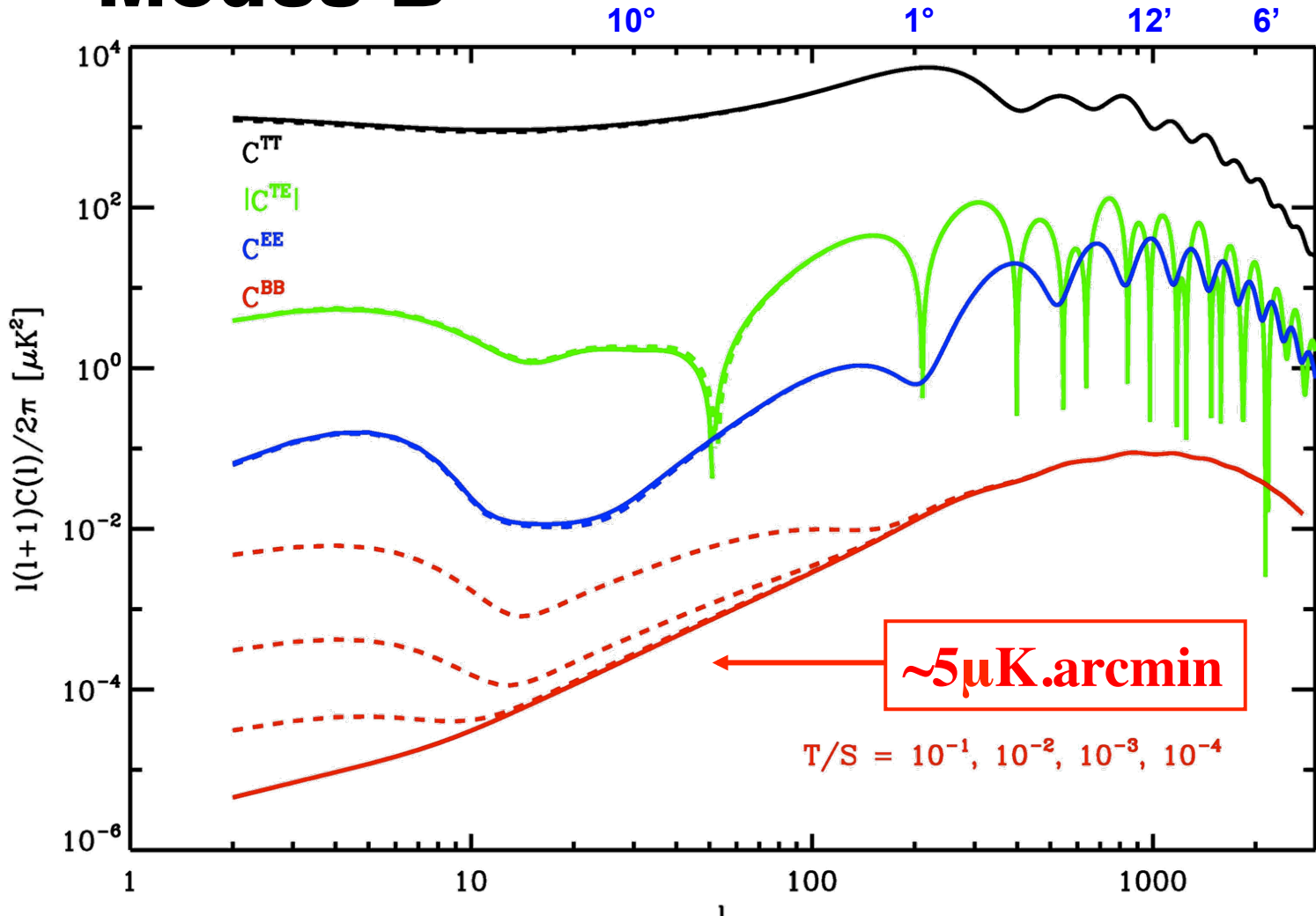
Tensor Perturbations
42' beam, 30deg. diam. polar cap



3.53 μK
-200 200 μK
 $\sigma^T \sim 100 \mu\text{K}, \sigma^E \sim 4 \mu\text{K}$

3.53 μK
-200 200 μK
 $\sigma^B \sim 0.3 \mu\text{K}$

Modes B



Bruit blanc 5 μ K.arcmin => fluctuations RMS 5/ θ μ K pour des pixels de taille θ
 Soit 100 nK avec des pixels de 50 arcmin ($\sim B_{GW}$ pour T/S $\sim 10^{-2}$) (NB: $\sigma_{Temperature} \sim 100 \mu$ K)

Polarisation du CMB: connaissances actuelles

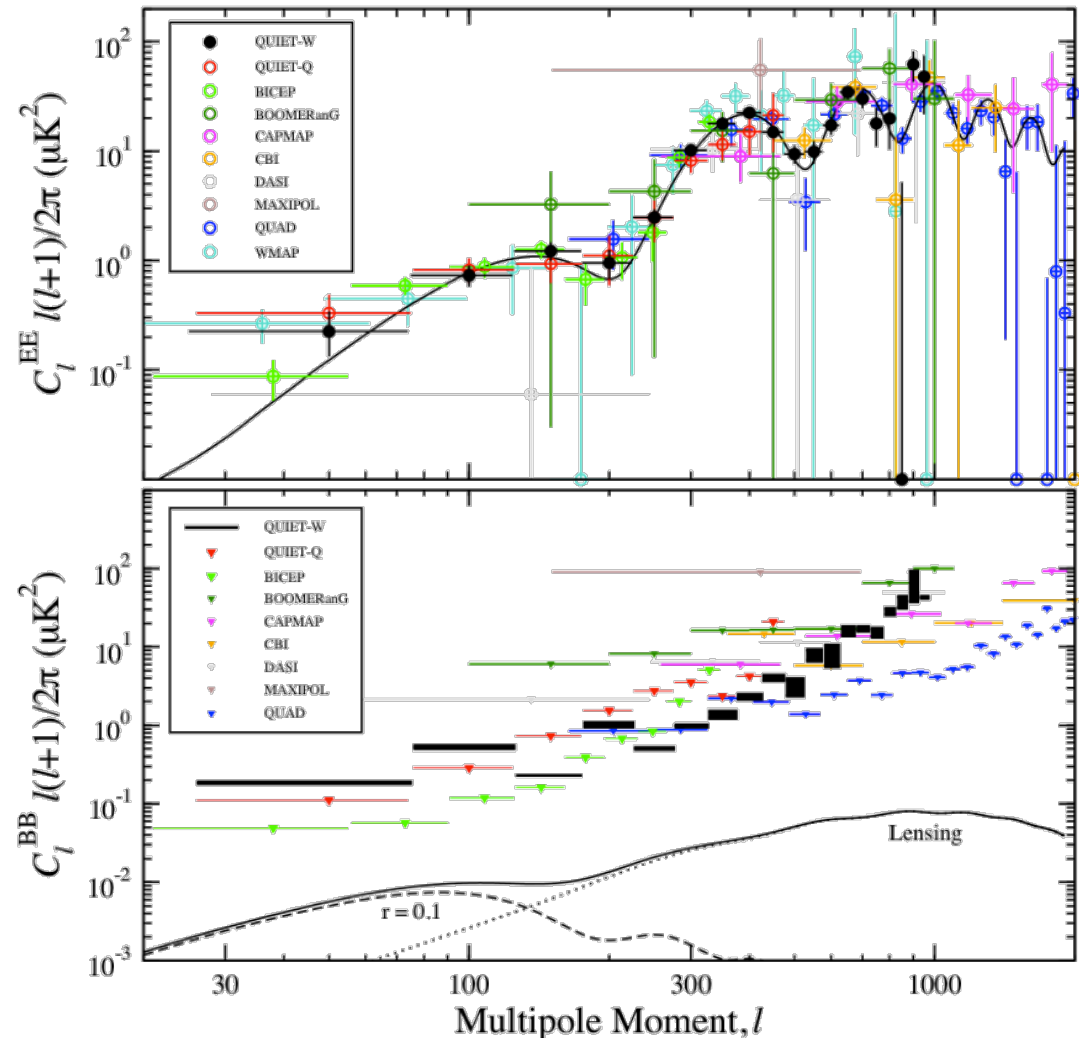
- Mode E détecté

↪ **DASI, WMAP,
Boomerang...**

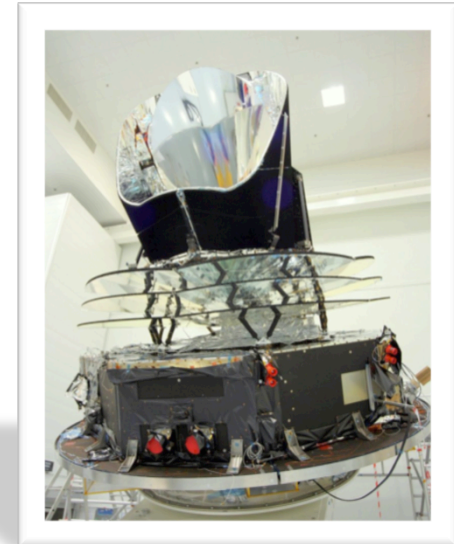
- Mode B jamais détecté
jusqu'à présent

↪ **$r < 0.21$ à 95%**
(SPT+WMAP7, Keisler
et al. 2011 arXiv:
1105.3182v1)

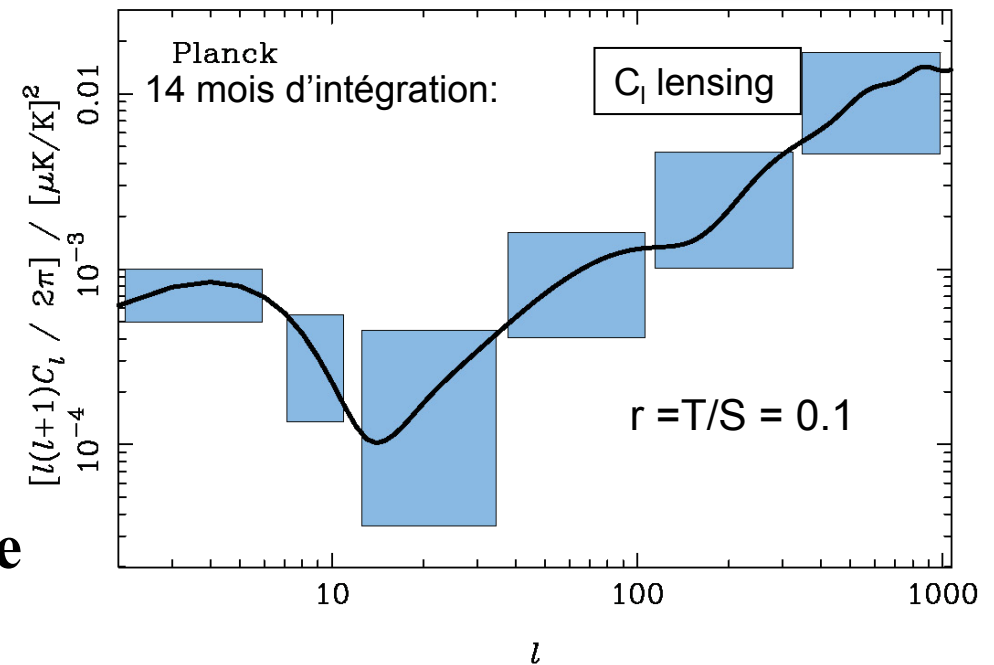
↪ **L'un des défis de la
cosmologie
observationnelle**



Le satellite Planck et les modes B



- Planck (14 mai 2009)
 - ↪ **Conçu pour être limité par la confusion des avant-plans non polarisés**
 - ↪ **“expérience ultime” pour les anisotropies en T**
- Sensibilité à la polarisation
 - ↪ **Limitée par le bruit instrumental**
 - ↪ **~60 $\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$ en 1 an**
 - ↪ **Modes B: détection envisageable si $r > 0.05$ (Efstathiou et Gratton, 2009)**
- **Première contrainte des modes B depuis l'espace**



Vers de nouveaux instruments...

1. Un concept spatial: CORE
2. R&D BSD *B-mode*
Superconducting Detectors
3. L'interférométrie bolométrique:
QUBIC

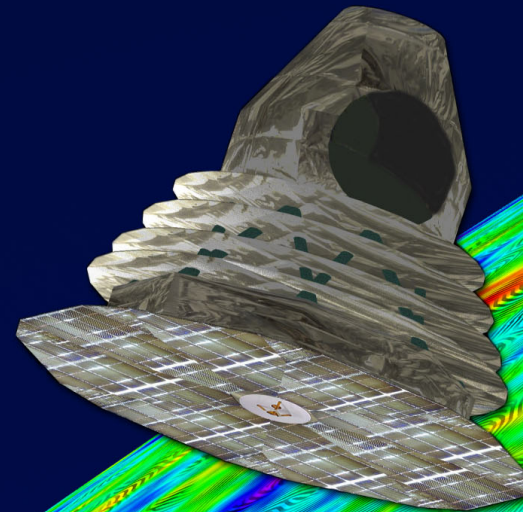
1. CORE

- Une mission dédiée à la mesure précise des anisotropies polarisées du CMB

- ↪ **Environ 30 fois plus sensible que Planck**
- ↪ **Avec la même résolution angulaire que Planck**
- ↪ **Et un contrôle draconien des effets systématiques**

COrE white paper:
[arXiv :1102.2181](https://arxiv.org/abs/1102.2181)

CORE Cosmic ORigins Explorer



A satellite mission for probing cosmic origins, neutrinos masses and the origin of stars and magnetic fields

through a high sensitivity survey of the microwave polarisation of the entire sky

A proposal in response to the European Space Agency
Cosmic Vision 2015-2025 Call



Objectifs scientifiques de CORE

■ Modes B

↪ **$r=T/S=10^{-3}$**

↪ **Soustraction des avant-plans**

■ Masses des neutrinos

↪ **Effet sur le lentillage du CMB**

↪ **Détermination de la hiérarchie des neutrinos**

↪ **Mesure compétitive par rapport aux manip sol**

■ Non gaussianités

↪ **Polarisation: sonde plus puissante que l'intensité**

↪ **Contraintes sur les modèles d'univers primordial**

■ Polarisation des poussières

↪ **Cartographie du champ magnétique galactique particulièrement dans les milieux à faible densité**

L'héritage de SAMPAN

- 2005-06: Etude CNES de phase 0

- ↪ **Etablissement de la faisabilité**

- ↪ **Participation:**

- CNES PASO (Coord: J. Michaud)

- Air Liquide, Alcatel

- Laboratoires (APC, CRTBT, IAP, IAS, LAOG)

- Concepts BPol (2007) puis COrE (2010) très fortement inspirés de SAMPAN

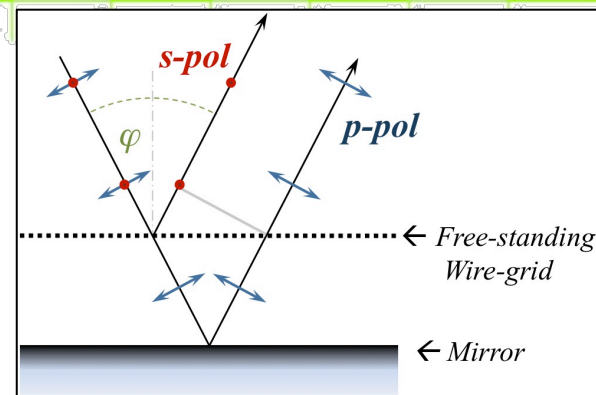
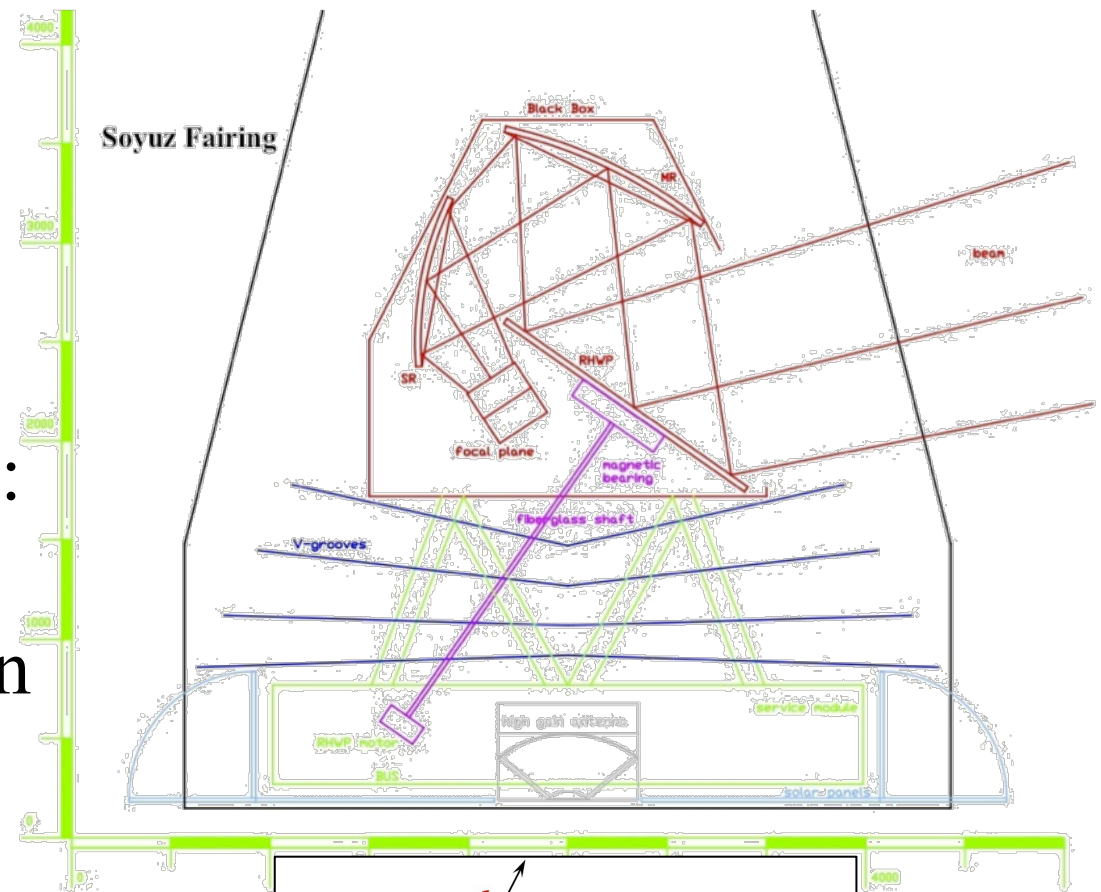
- ↪ **Objectifs scientifiques**

- ↪ **Technologies**



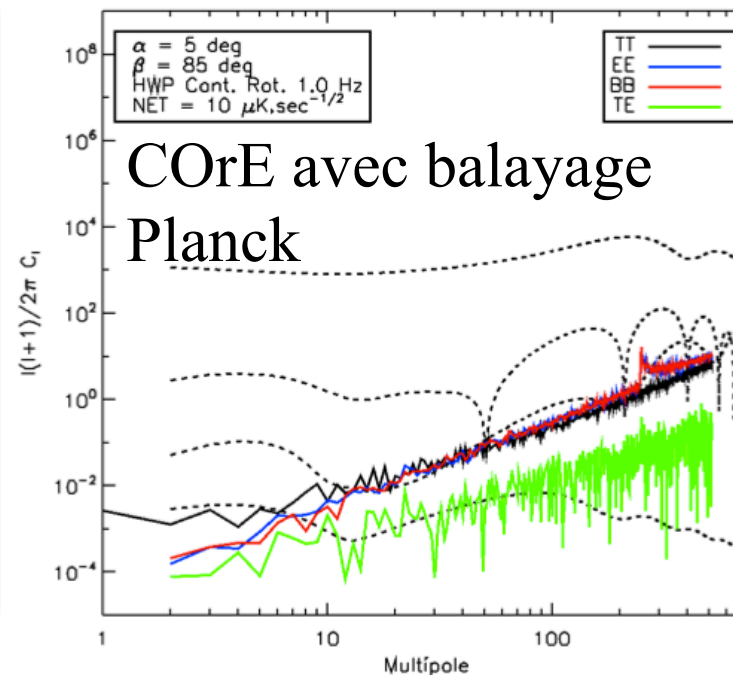
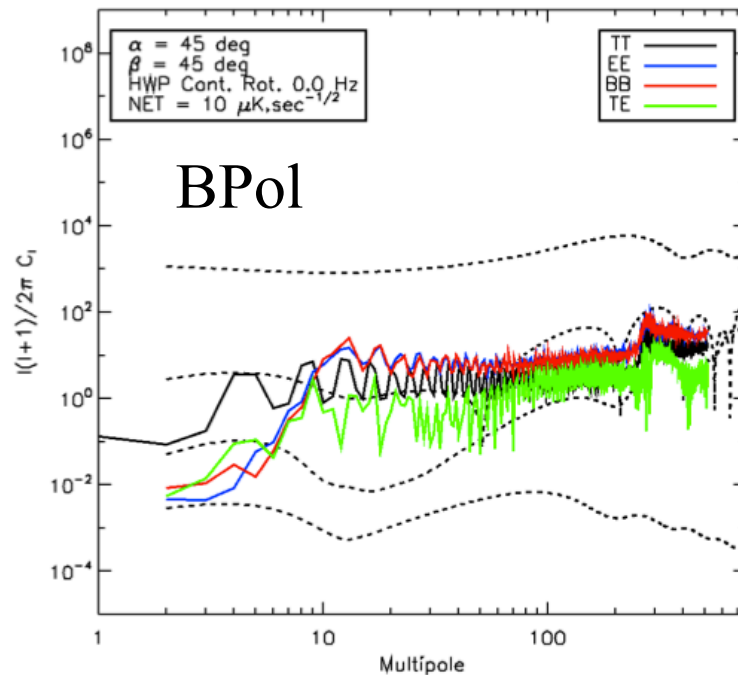
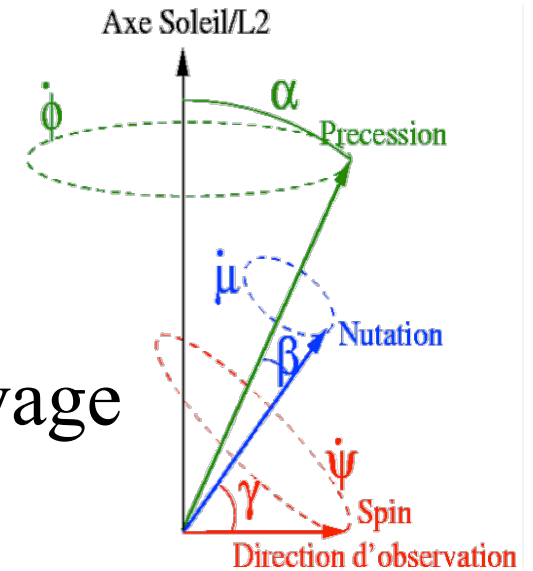
Architecture COre

- Orbite: L2
 - ↳ À la Planck...
- 1er élément optique: lame demi-onde rotative en réflexion
 - ↳ Modulation de la polarisation
- Télescope hors-axe
 - ↳ Ouverture ~1.2m



Stratégie de balayage COreE

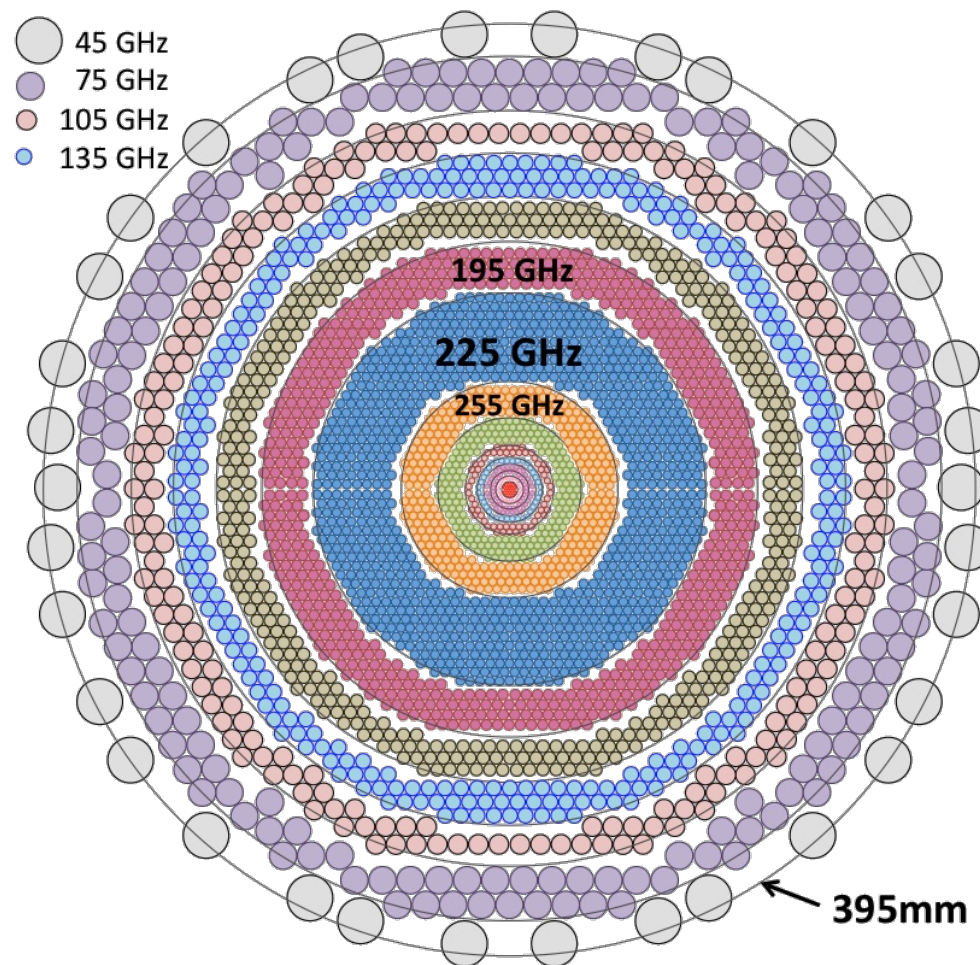
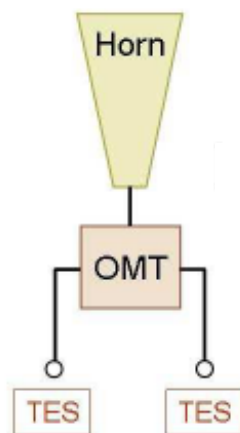
- Modulation de la polarisation → simplification de la stratégie de balayage
- Simulations:



N. Ponthieu

Plan focal de CORe

- Cornets, OMT, bolomètres supraconducteur



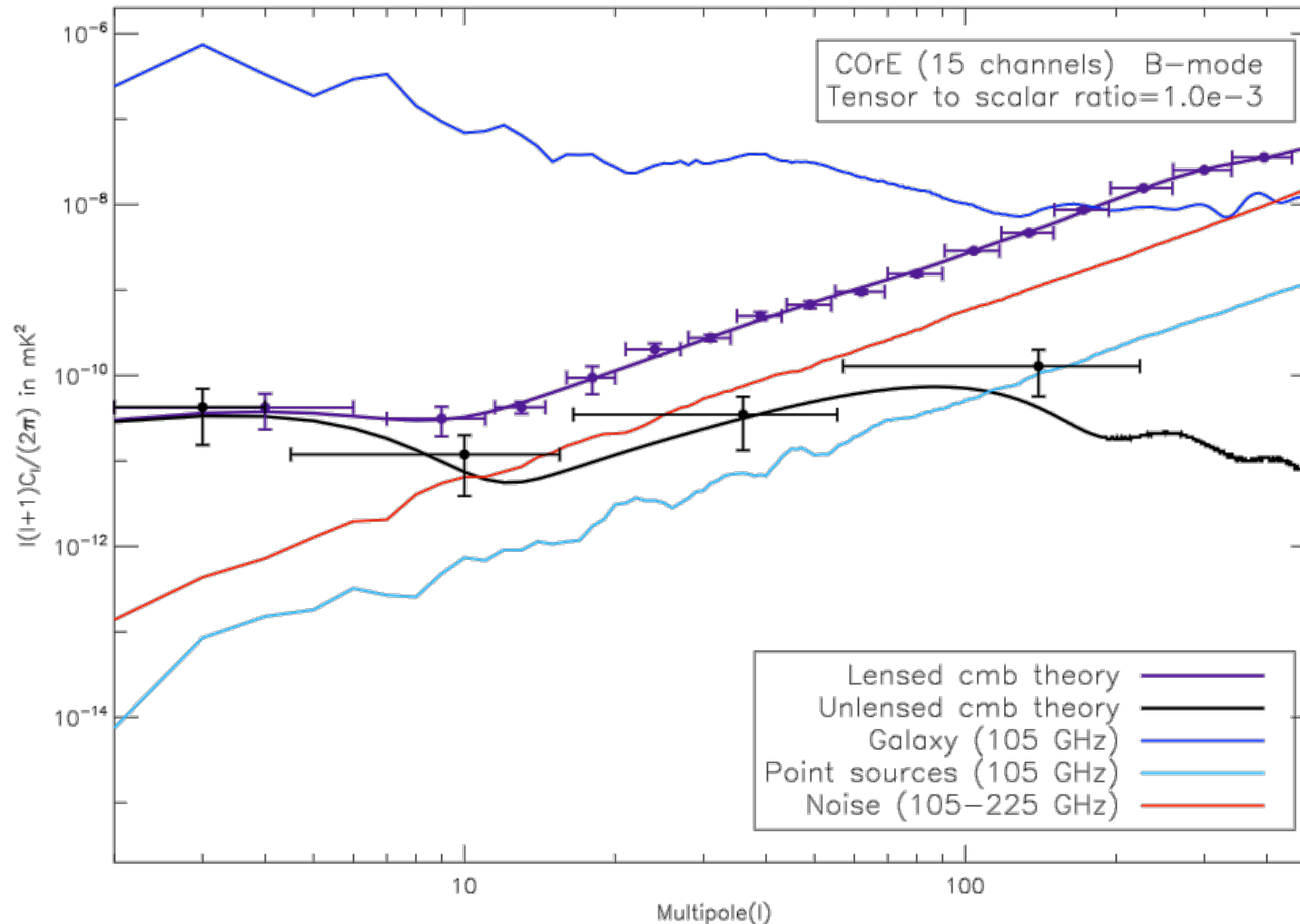
Performances COrE

Table 2: *COrE* performances - assuming a 50% value for detection chain efficiency.

Central Freq. (GHz)	$\Delta\nu$ (GHz)	$N_{detectors}$	FWHM (arcmin)	Unpol. sensitivity ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)	Q & U sensitivity ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)
45	15	64	23.3	5.2	9.0
75	15	300	14	2.7	4.7
105	15	400	10	2.7	4.6
135	15	550	7.8	2.6	4.5
165	15	750	6.4	2.6	4.6
195	15	1150	5.4	2.6	4.5
225	15	1800	4.7	2.6	4.5
255	15	575	4.1	6.0	10.4
285	15	375	3.7	10.0	17
315	15	100	3.3	26.6	46
375	15	64	2.8	67.8	117
435	15	64	2.4	147.6	255
555	195	64	1.9	218	589
675	195	64	1.6	1268	3420
795	195	64	1.3	7744	20881

CMB

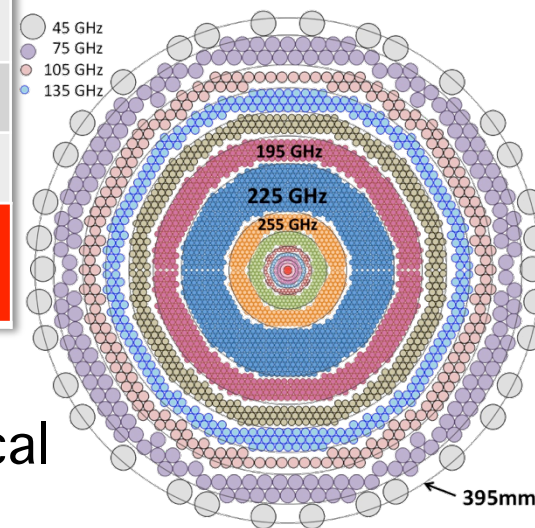
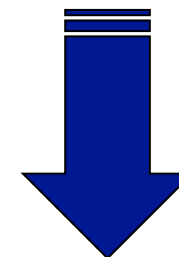
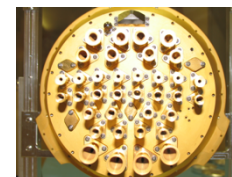
COrE: simulation des performances



De Planck à COre

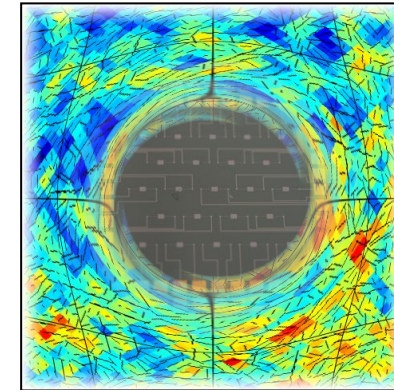
Paramètre	Planck-HFI	COre
λ	300 μ m-3mm	1mm-10mm
$\lambda/\Delta\lambda$	3	3
Résolution angulaire	5'-10'	1'-23'
Détecteurs	Bolo. semicond. 100mK	Bolo. supracond. 100mK
Nombre de détecteurs	4-12 par canal 52 total	64-2000 par canal 6384 total
NEP	1-10.10 ⁻¹⁷ W.Hz ^{-0.5}	2-3.10 ⁻¹⁸ W.Hz ^{-0.5}
Constante 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

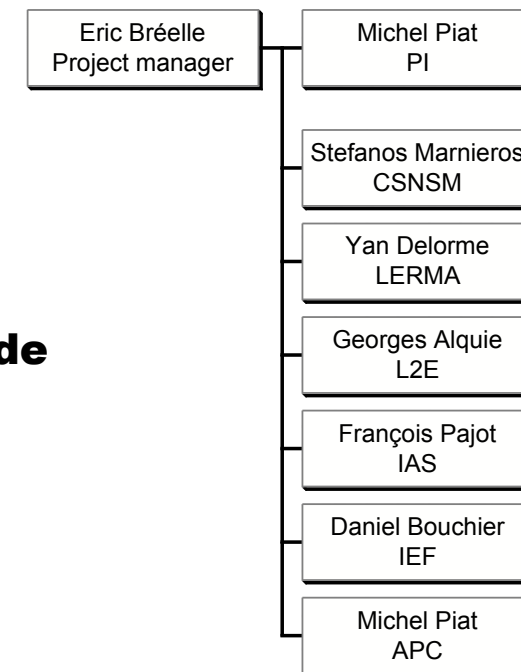


Plan focal
COre

2. BSD: B-mode Superconducting Detectors



- Initié en septembre 2007
 - ↳ Basé sur les acquis de DCMB “Développement Concerté de Matrices de Bolomètres” (→2010)
 - ↳ Premiers financements (GIS P2I, ANR JC, CNRS P&U)
- Principal objectif:
Réalisation d’une chaîne de détection supraconductrice pour la mesure de la polarisation du CMB
 - ↳ Technologie Nb
 - ↳ 70GHz-350GHz
 - ↳ Composants: Détecteurs, antennes, lignes de transmission, filtres, déphaseurs, switch, coupleur/diviseur de puissance
- 2010: financement CNES
 - ↳ Extension au pôle grenoblois (IN) et toulousain (IRAP)





Contraintes pour la réalisation de matrices de bolomètres

■ Procédé de fabrication collectif

↳ **Micro et nanotechnologies**

■ Homogénéité des différents détecteurs

↳ **Réalisation la plus uniforme possible**

↳ **Contre réaction électro-thermique**

■ Multiplexage

↳ **Nécessaire au delà d'une centaine de pixels**

↳ **Bolomètres semi-conducteur:**

- FET: $T > 100K \Rightarrow$ difficile
- CMOS: solution CEA-LETI
- HEMT @ 100mK (IN)

↳ **Bolomètres supraconducteur:**

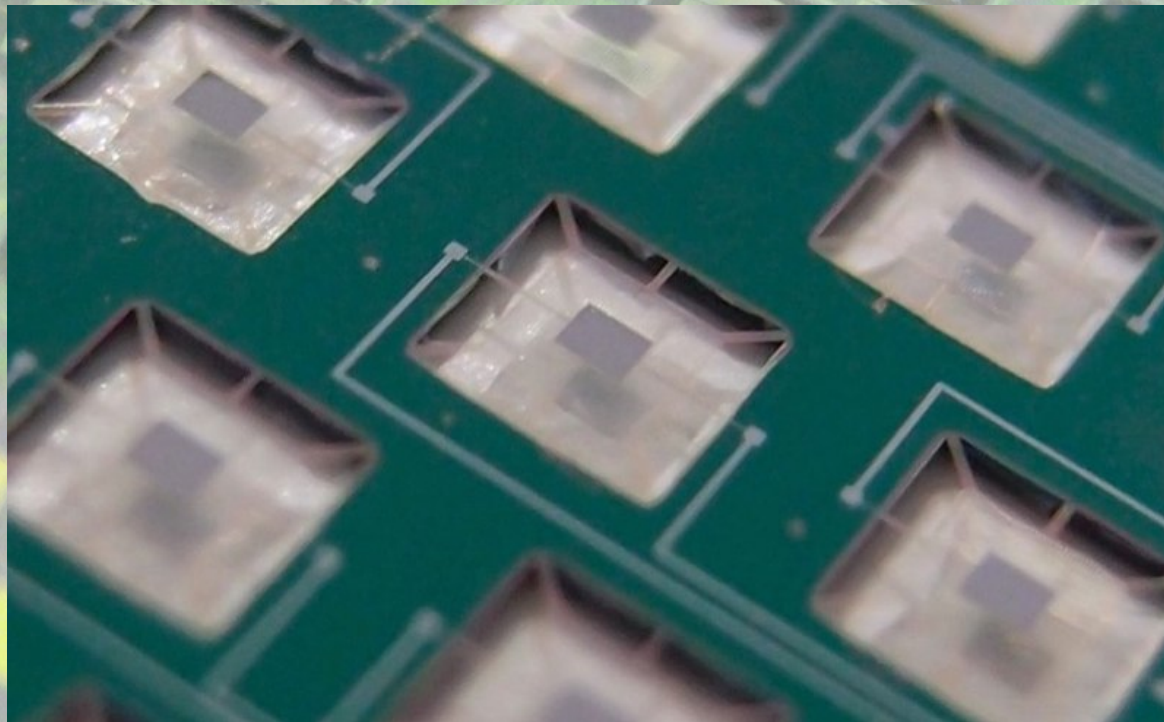
- SQUIDs @ 100mK

➔ **Matrice de bolomètres supraconducteurs**

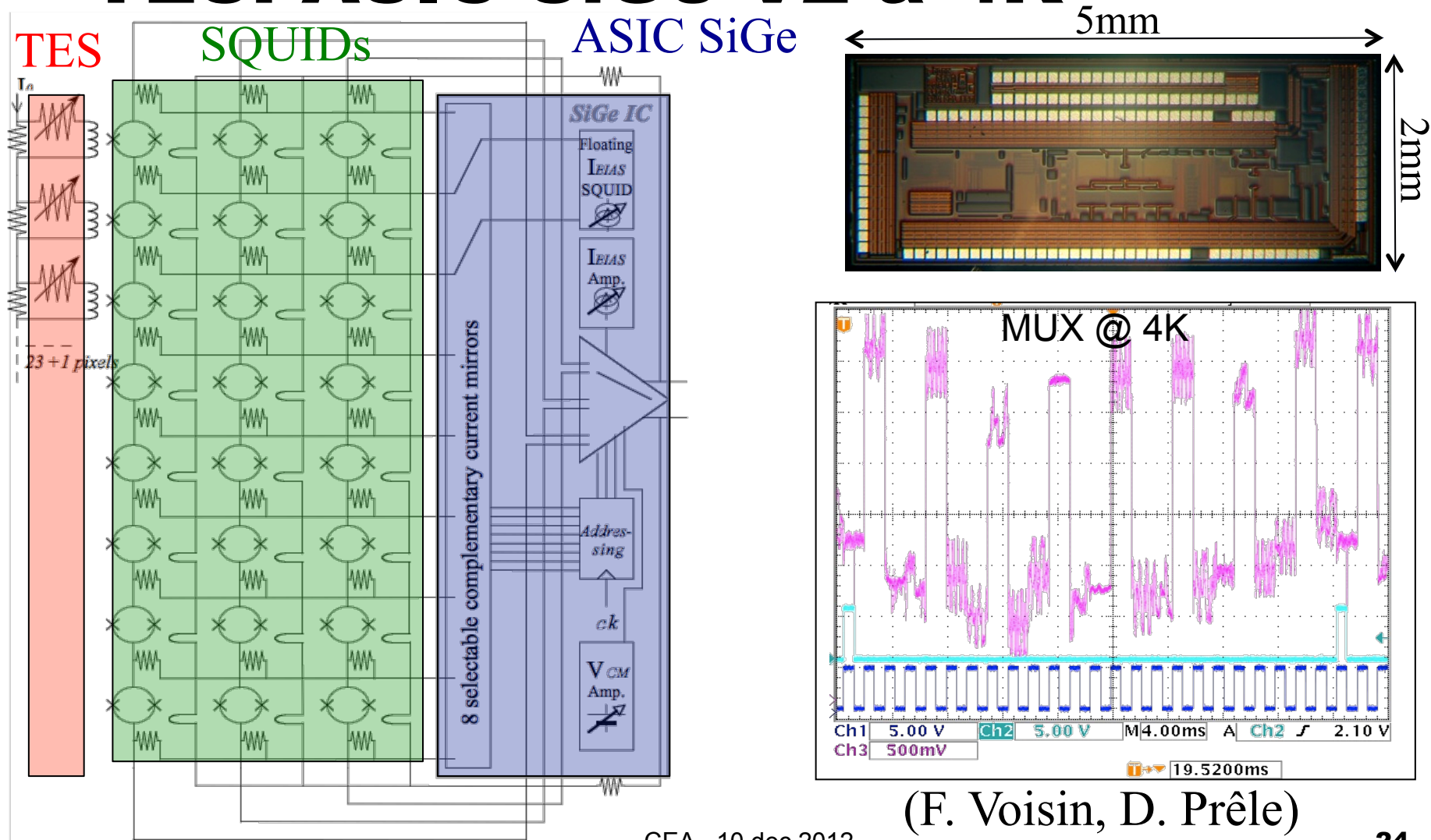
Matrice de 23 bolomètres supraconducteurs

- Réalisation CSNSM - IEF
(S. Marnieros, B. Belier)

↳ Membranes ouverte $NEP \sim 10^{-17} \text{W.Hz}^{-0.5}$ @ 100mK



Electronique de lecture des TES: ASIC SiGe V2 à 4K

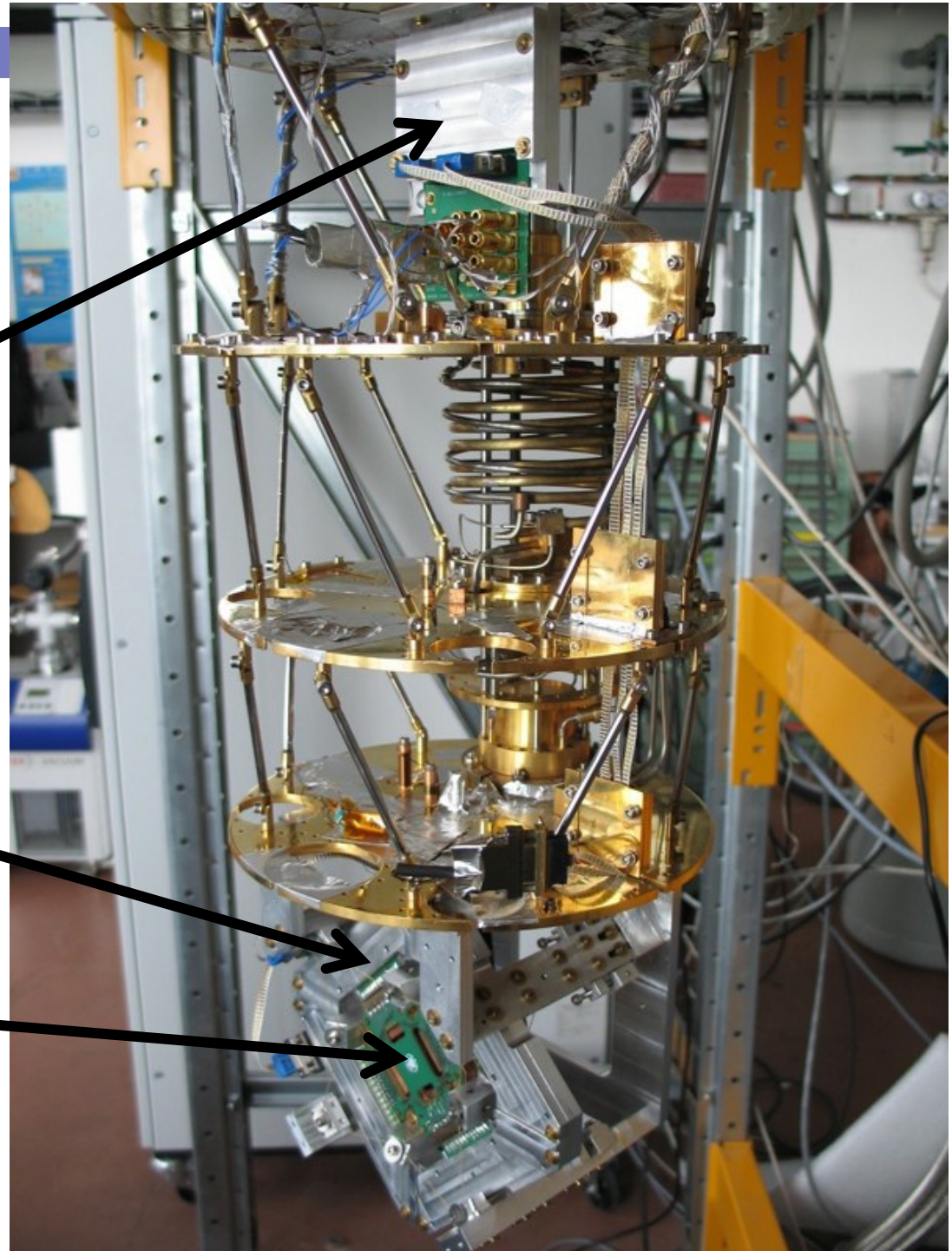


Cryostat à dilution

ASIC SiGe @ 4K

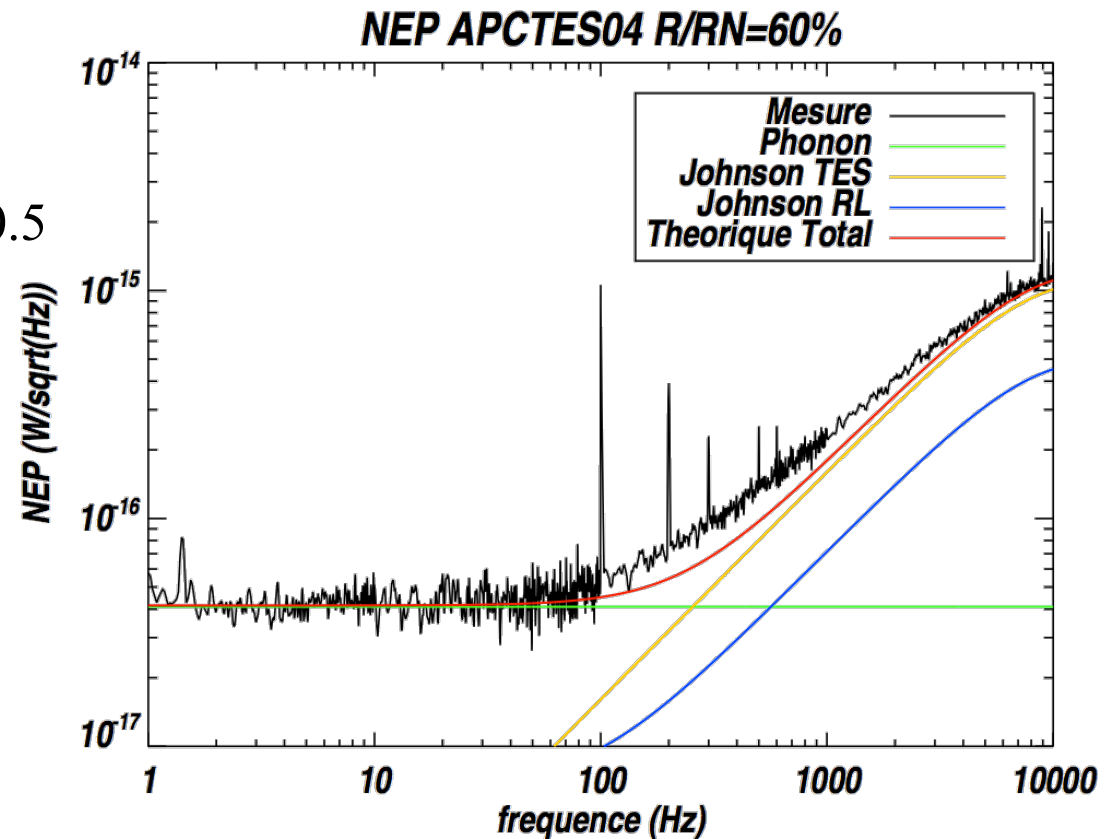
SQUIDs @ 100mK

TESs @ 100mK



TES NbSi: performances

- $T_c = 575\text{mK}$
- $\text{NEP} = 4 \cdot 10^{-17} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$
@ 300mK
- $\tau = 1\text{-}10\text{ms}$
- Faible bruit en excès apparaissant en bas de transition



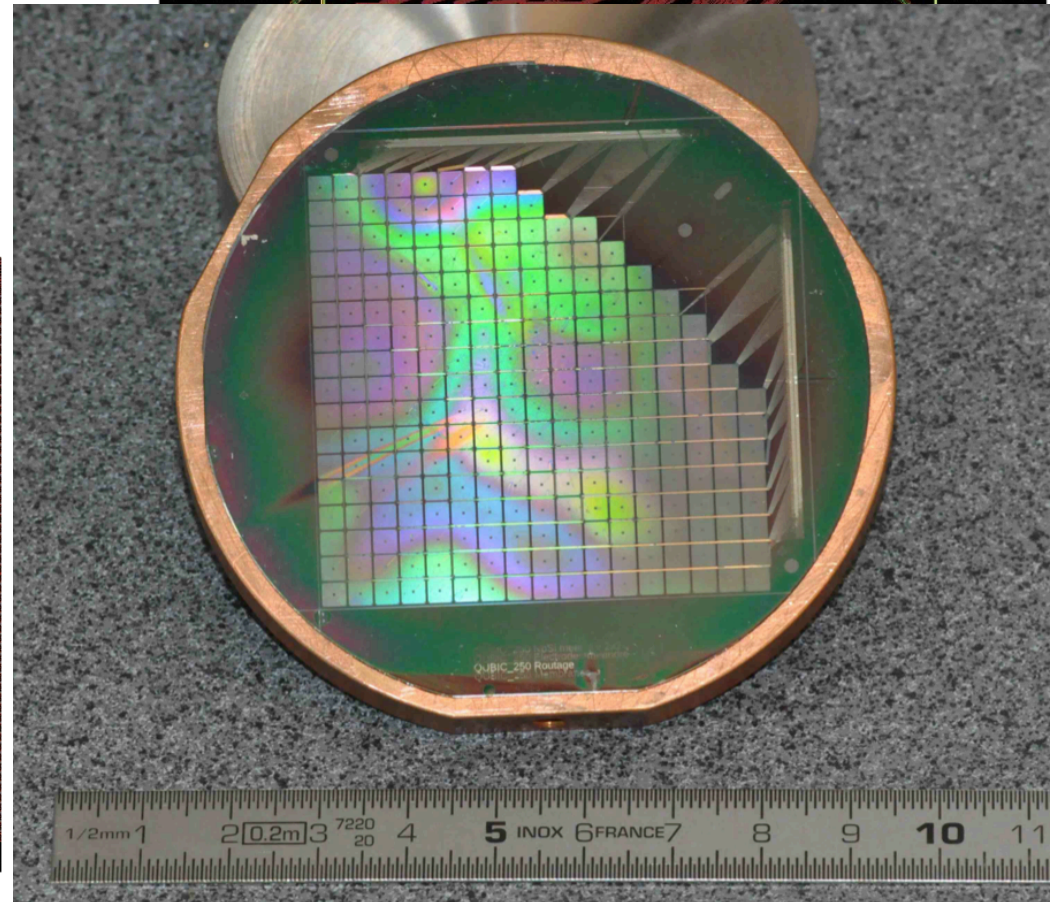
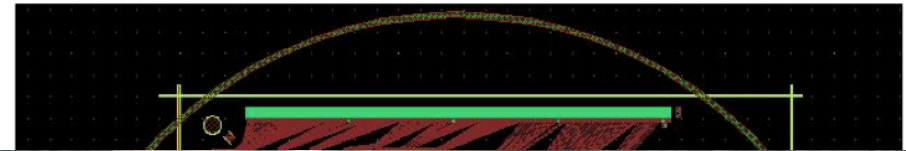
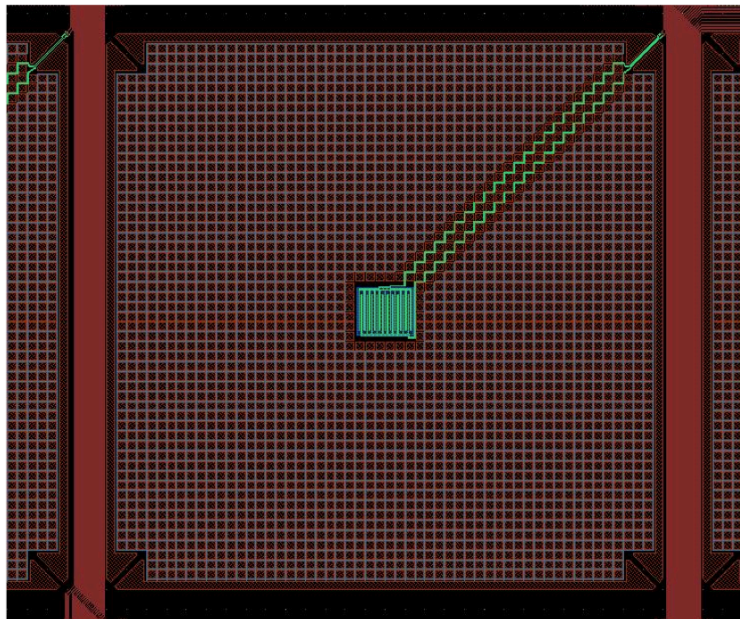
Matrice QUBIC

(Stefanos Marnieros)

■ 4×256 pixels @ 150GHz

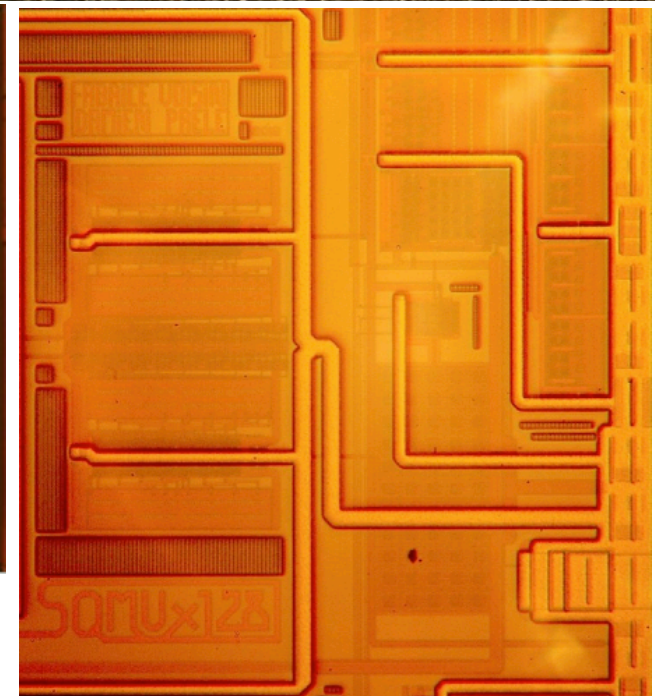
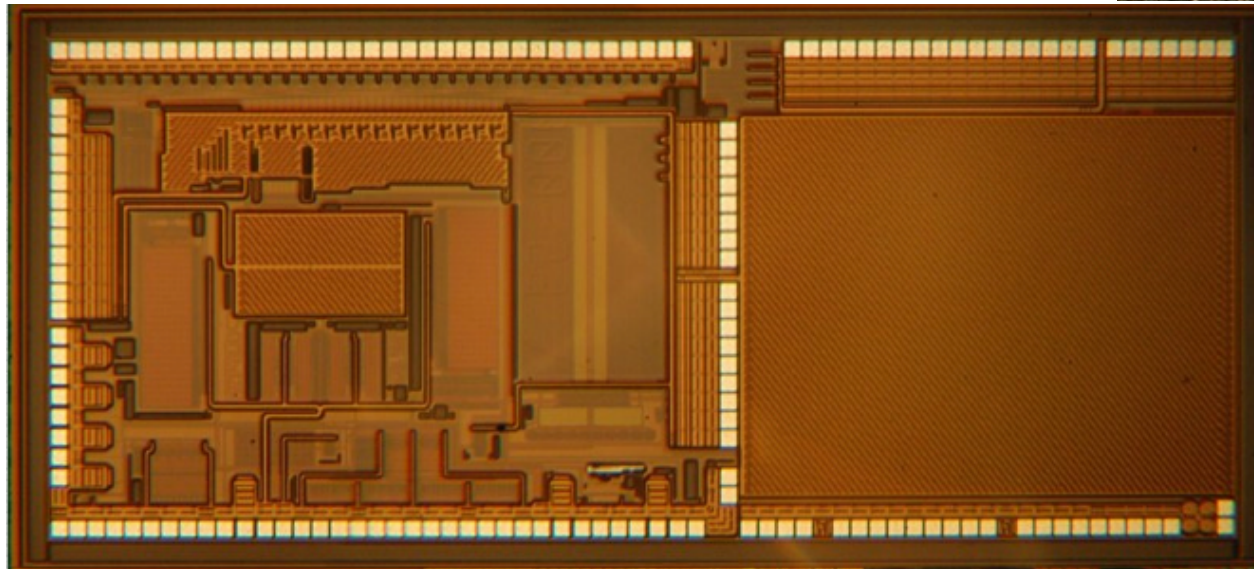
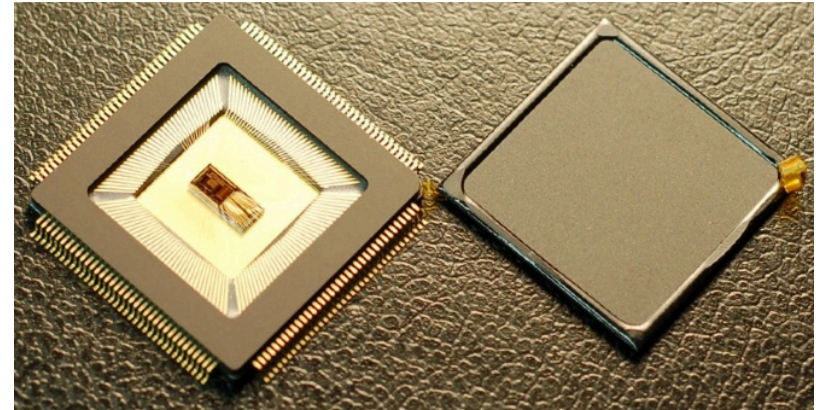
↻ **TES NbSi**

↻ **3mm*3mm, 100mK**



ASIC V3: SQMUX128

- Lecture de 128 pixels multiplexés temporellement
- En cours de tests



2. Vers de nouvelles architectures de détection

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

↳ Paramètres de Stokes :

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

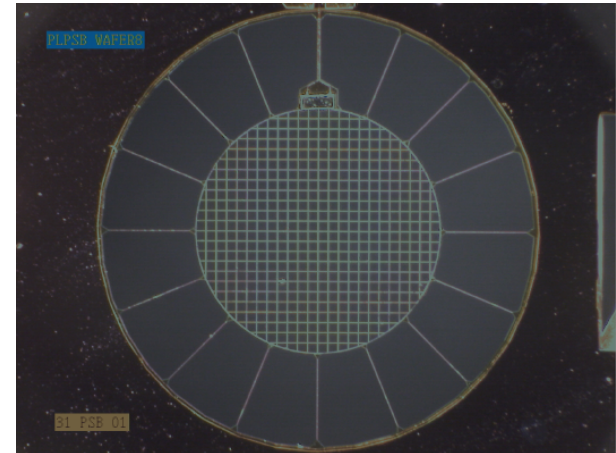
$$Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle$$

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

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

↳ Méthode Planck, Bicep...

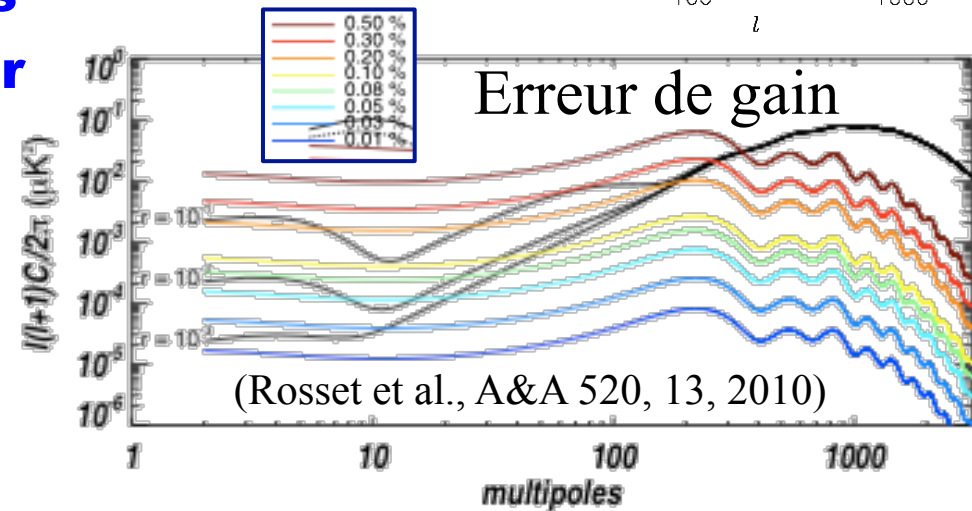
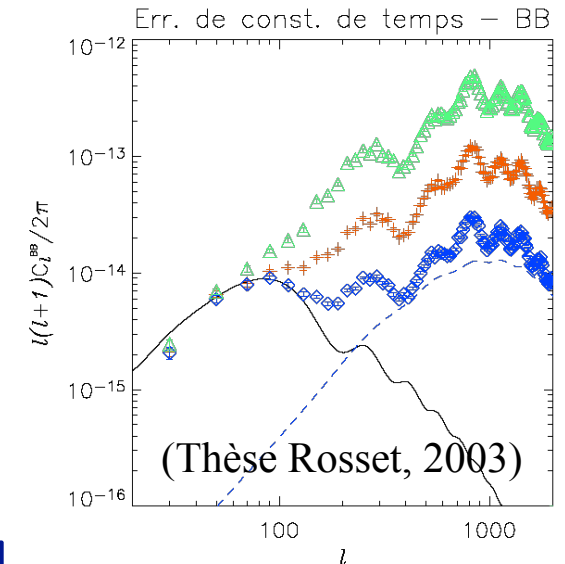
- Polarisation Sensitive Bolometer (Caltech-JPL)
- Modulation du signal : stratégie d'observation



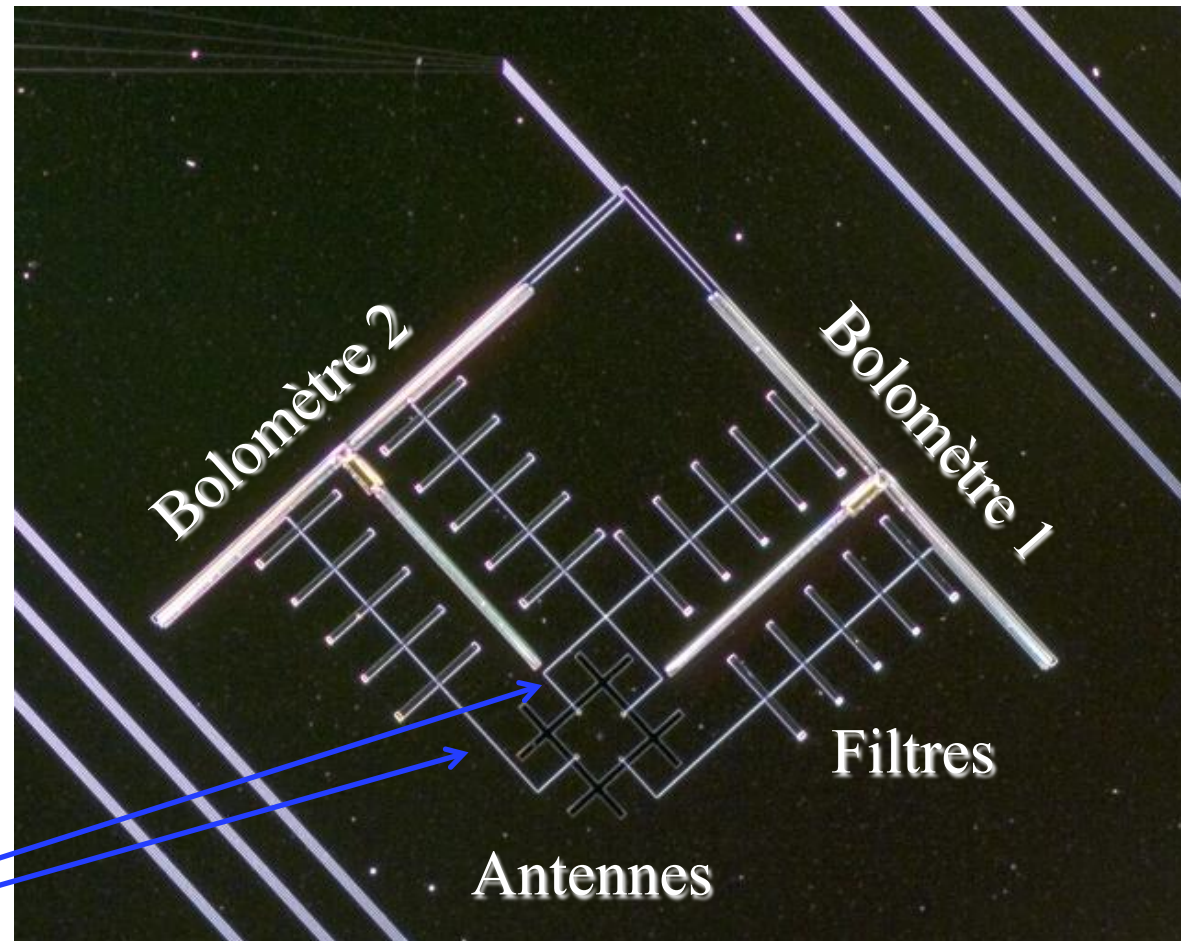
Effets parasites instrumentaux

- Imperfections instrumentales
 - ↳ Susceptible de masquer le signal cosmologique
- Améliorations requises:
 - ↳ Couplage optique, pureté de polarisation: **antennes**
 - ↳ Filtrage optique: **filtre sur ligne de transmission**
 - ↳ Mesure directe des paramètres de Stokes: **architecture évoluée**
 - ↳ Intégration: **technologie planaire**

$\tau = 7\text{ms}$ erreur:
 0.8ms
 0.4ms
 0.2ms



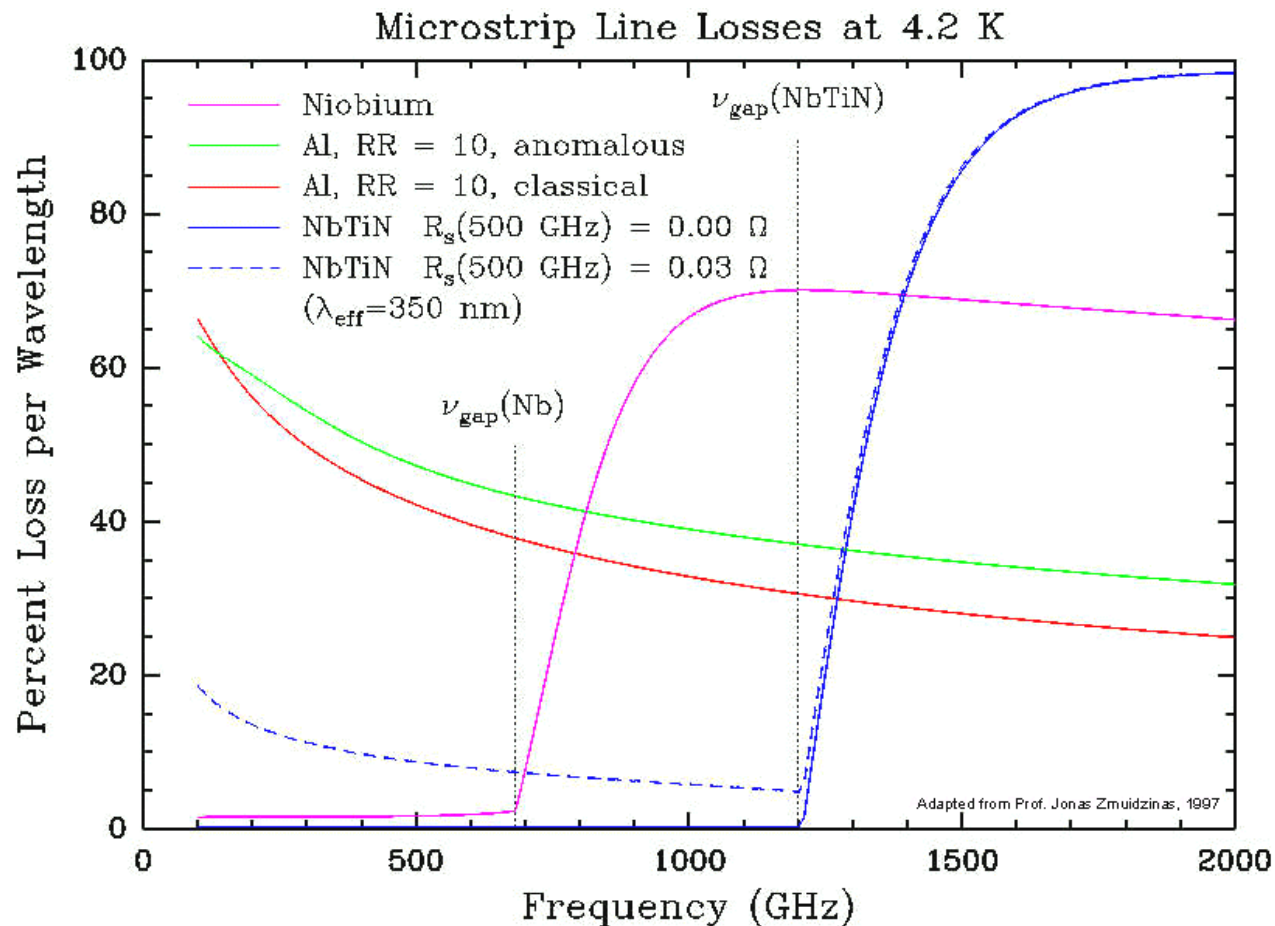
Radiomètre complet (Polar Bear UCB)



Lignes de transmission supraconductrices

Lignes supraconductrices

- Niobium utilisable jusqu'à 700GHz



Architectures évoluées

- Mesure directe des paramètres de Stokes

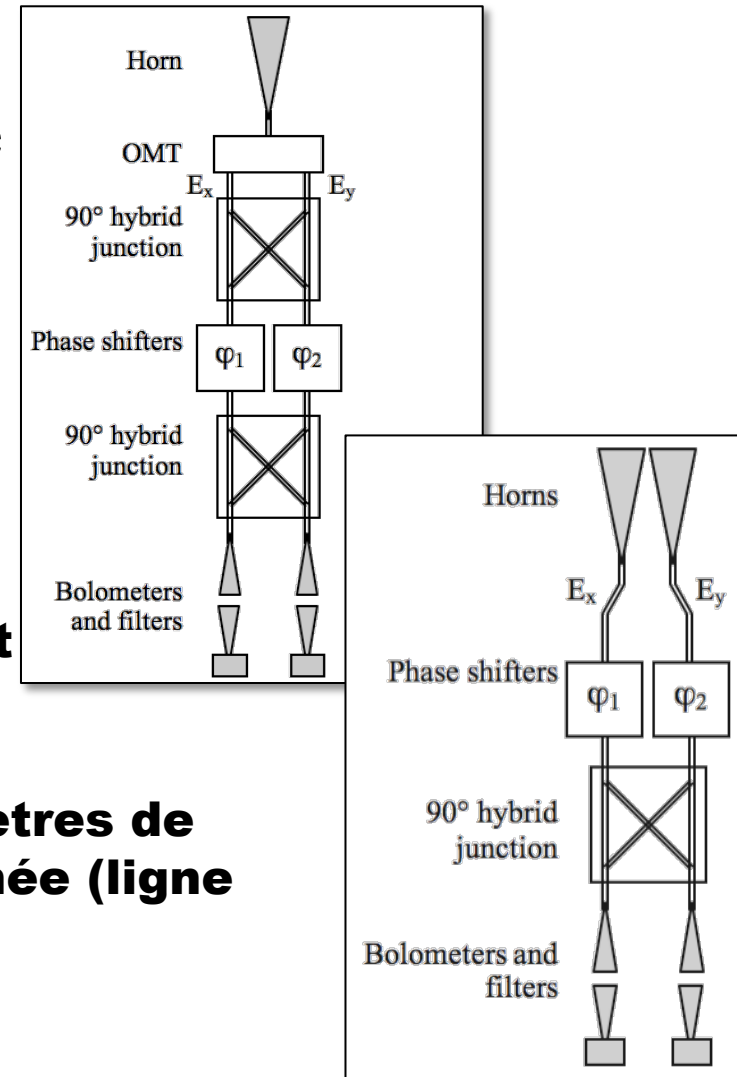
- ↳ **Architecture intégrée planaire**
- ↳ **Pas de systèmes rotatifs**

- Pseudo-correlator scheme (CLOVER)

- ↳ **Equivalent à un polariseur tournant**

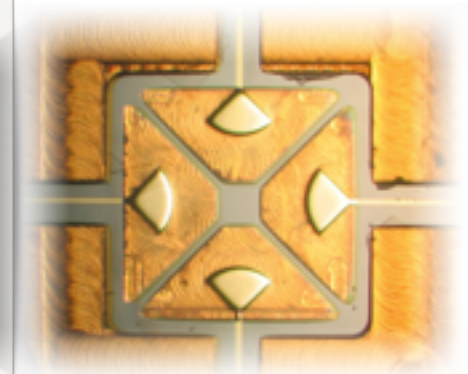
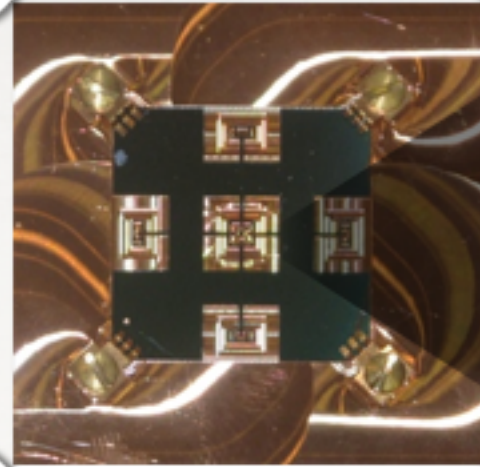
- Interférométrie bolométrique

- ↳ **Coefficients de Fourier des paramètres de Stokes à une échelle spatiale donnée (ligne de base)**

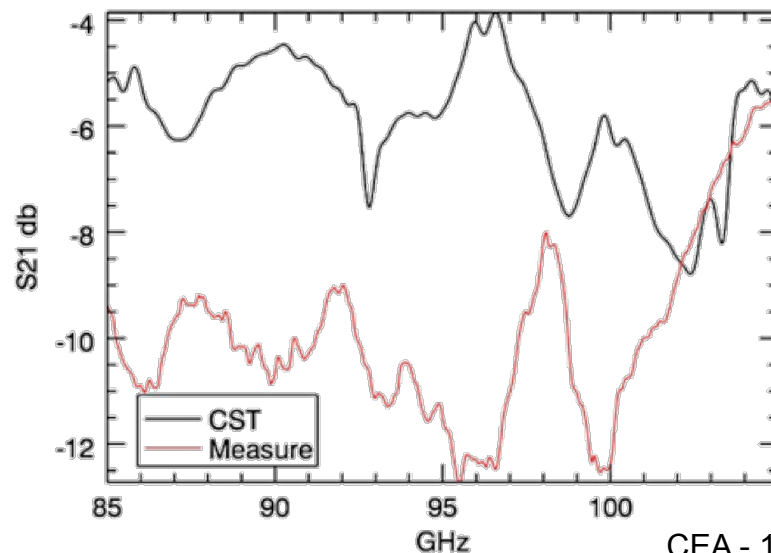


Ortho-Mode Transducer (OMT) (A. Ghribi, G. Bordier, BSD collaboration) planaire

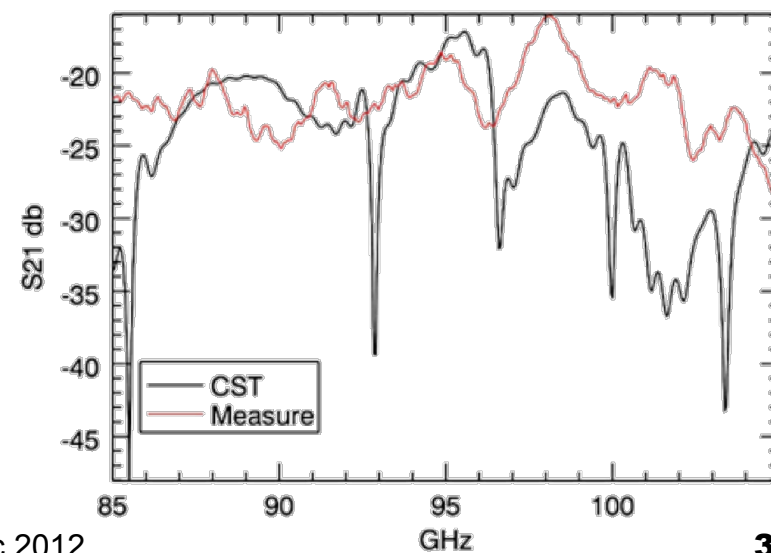
- Séparation planaire des polarisations perpendiculaires



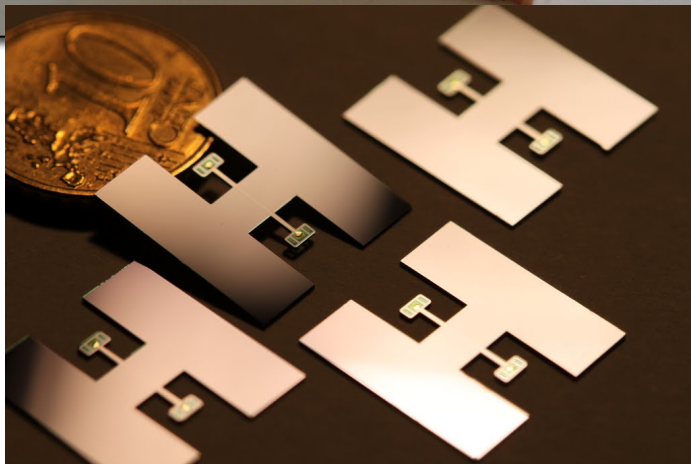
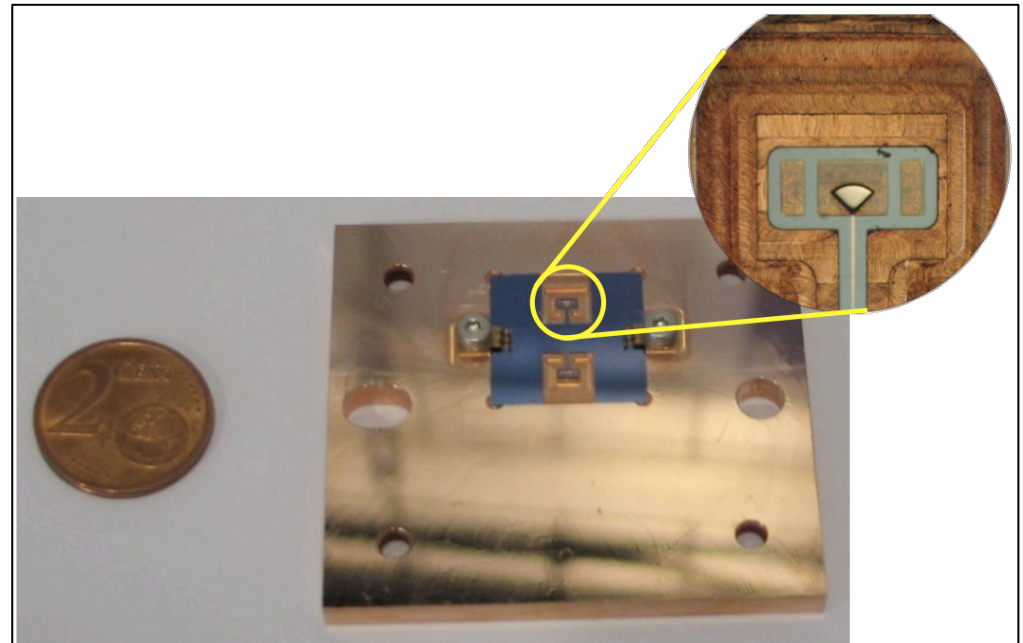
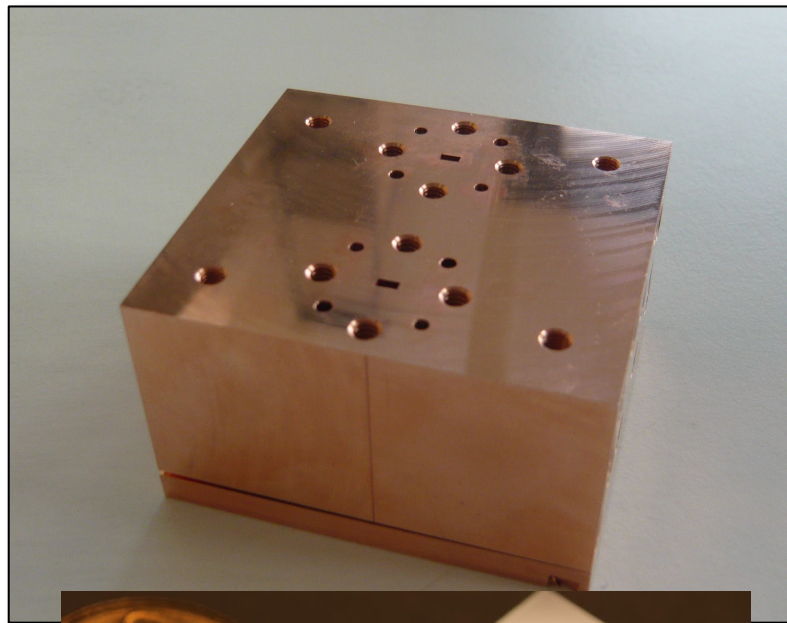
CoPol: CST simulation and measure at 5K



XPol: CST simulation and measure 5K

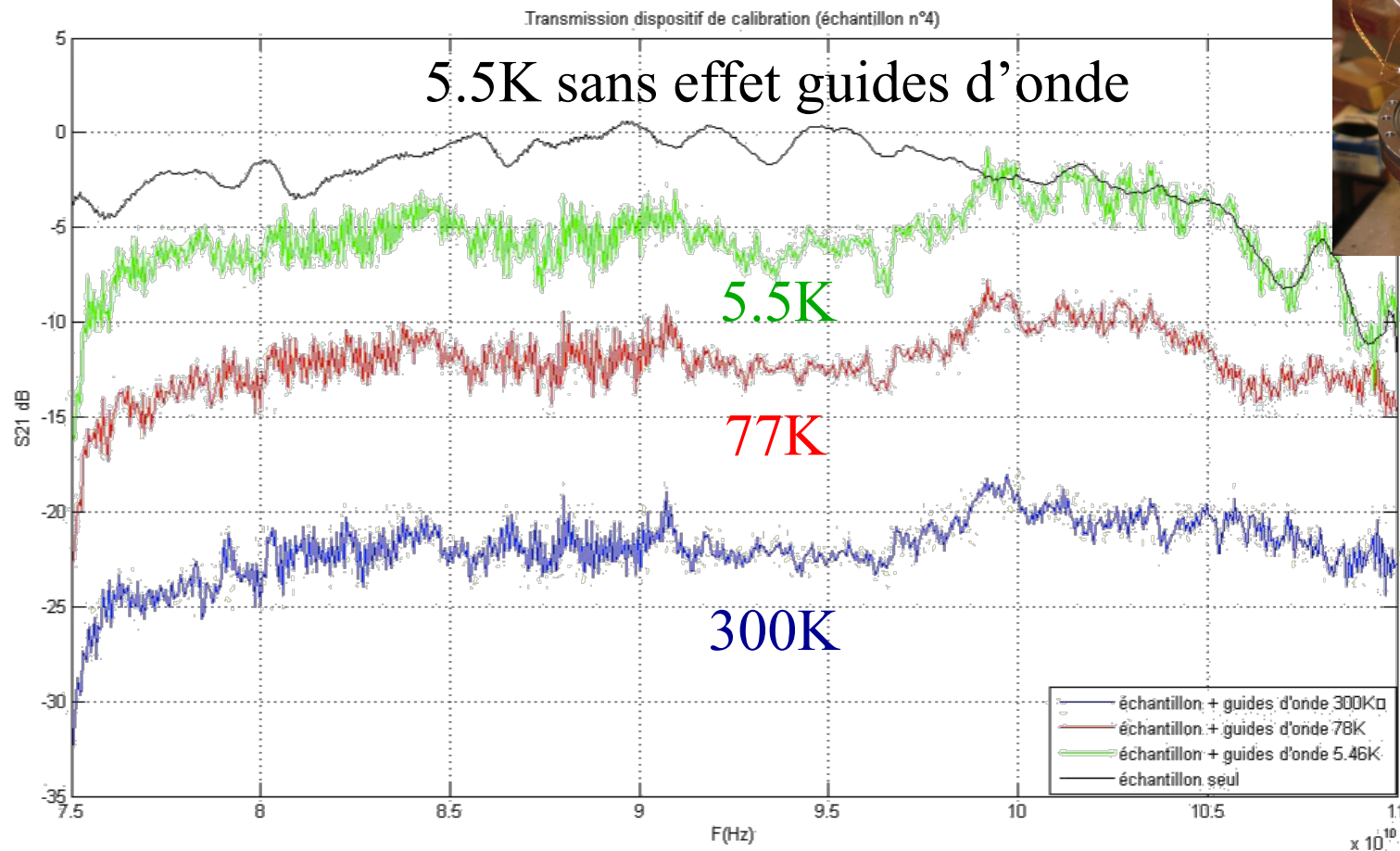
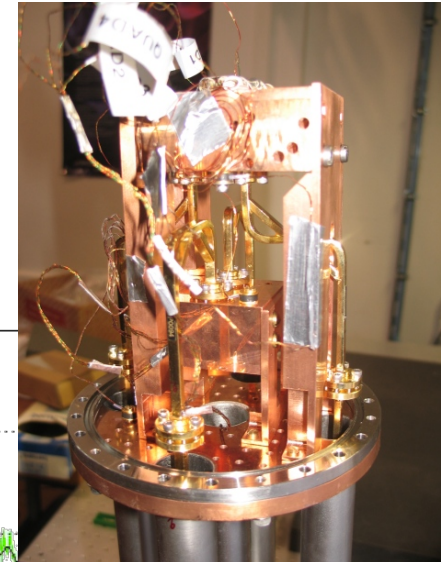


BSD: Module d'étalonnage



- Système nécessaire à la mesure de l'OMT

Mesure transmission structure d'étalonnage

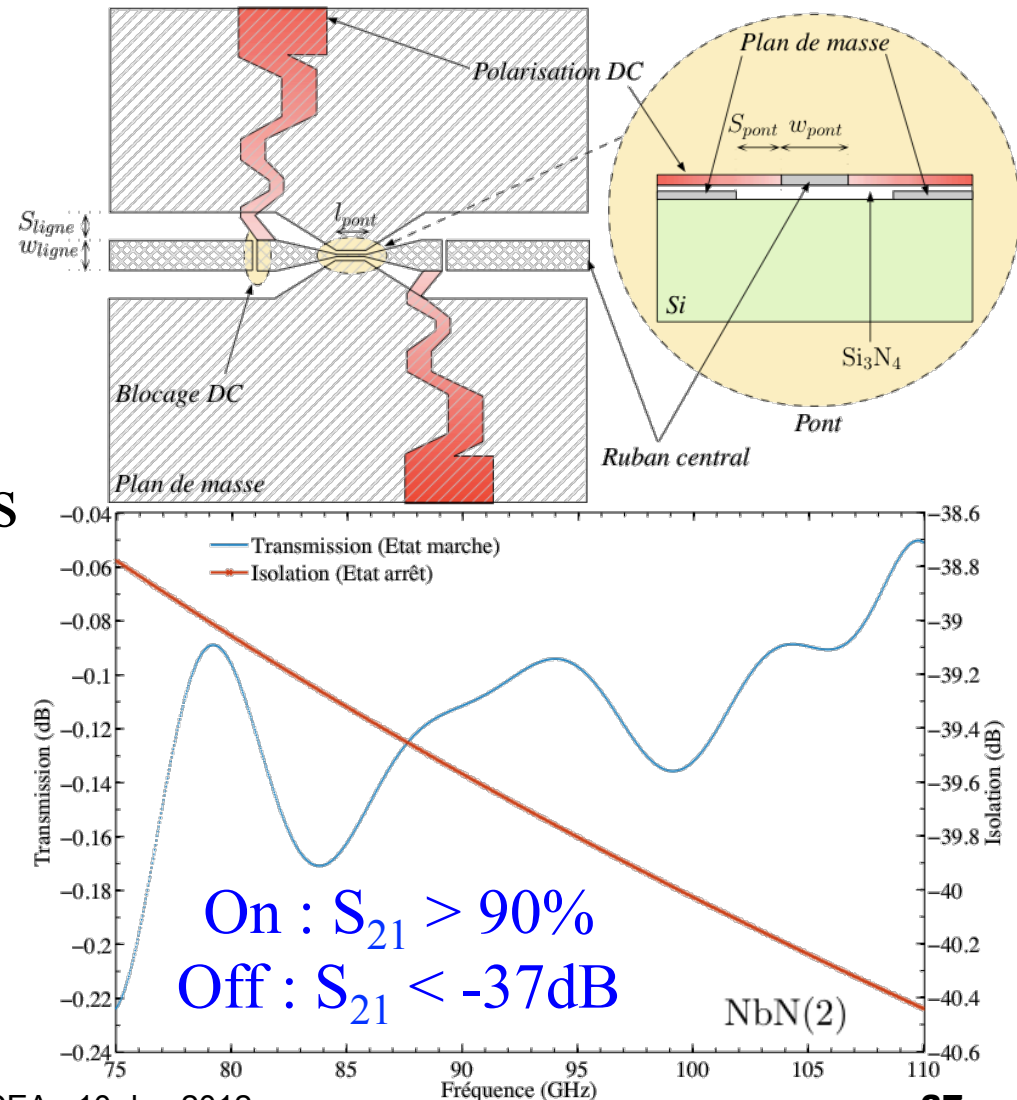


Superconducting switch design

(Thèse A. Ghribi, G. Bordier)

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

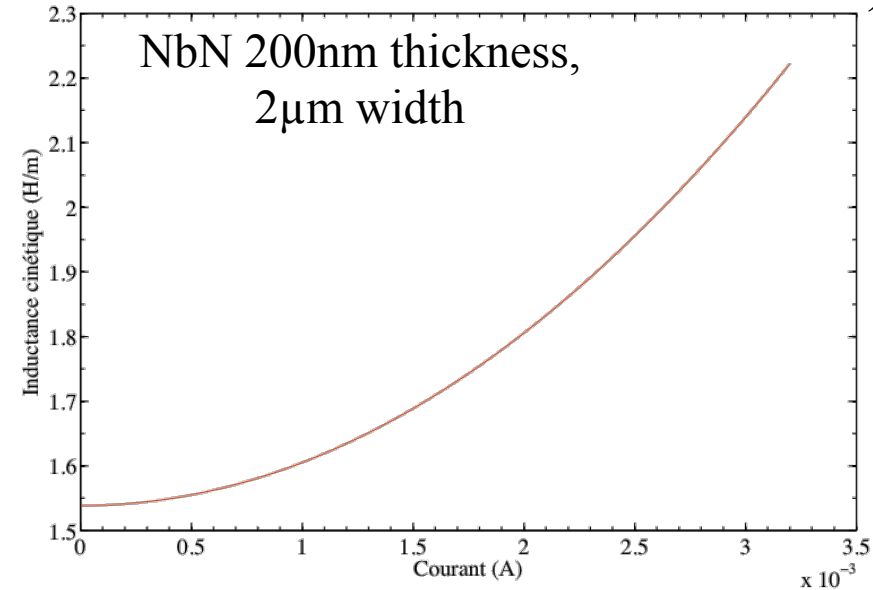
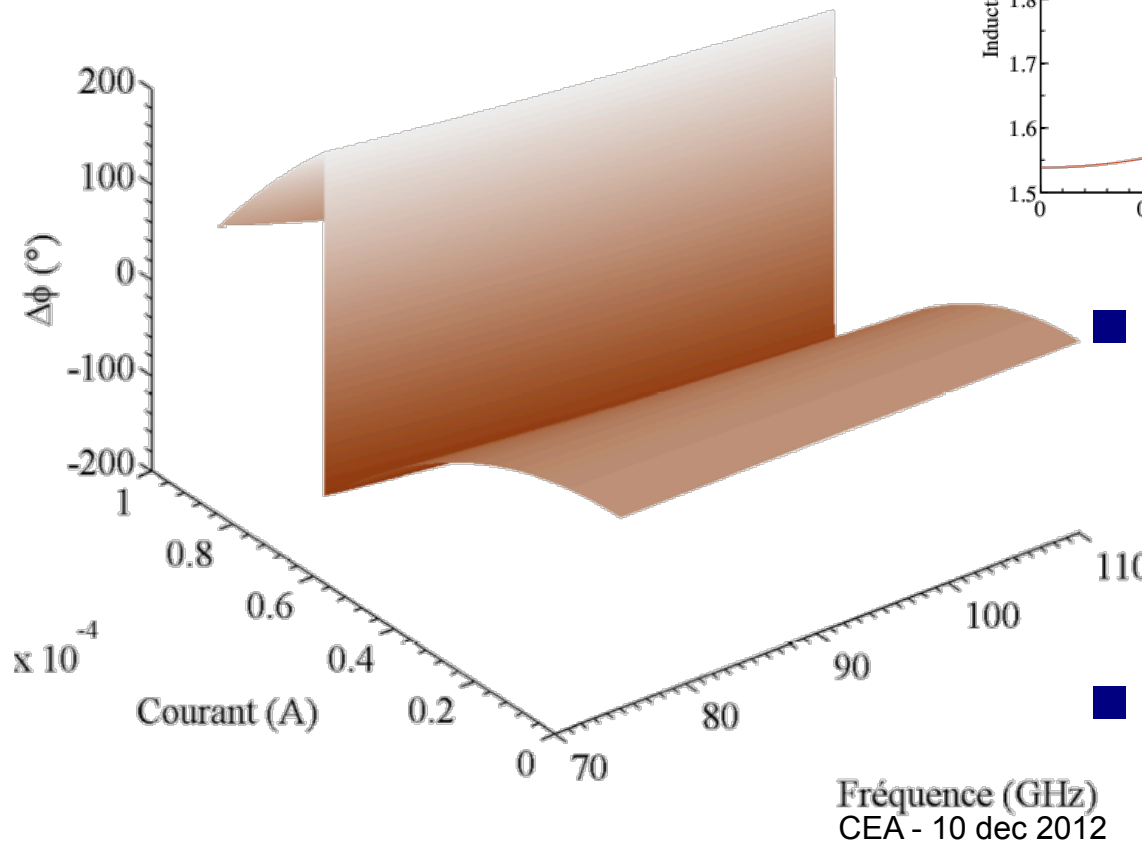
Nb	20 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbN(1)	200 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbN(2)	1000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbSiN	1000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
NbAlN	20000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$



Kinetic inductance phase shifter

(Thèse A. Ghribi,
G. Bordier)

- Kinetic inductance variation with current:



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

3. L'interférométrie bolométrique: motivations

- Interférométrie hétérodyne

- ↪ 1^{ère} détection des modes E (DASI)
- ↪ **Sensibilité limitée de la méthode hétérodyne**



- Intérêt de l'interférométrie:

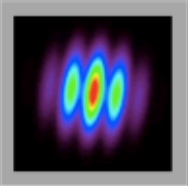
- ↪ **Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)**
- ↪ **Pas de différences entre détecteurs, pas de télescope**

- Bolomètres:

- ↪ **Détection de la puissance du rayonnement incident**
- ↪ **Sensibilité limitée par le bruit de photon (BLIP)**
- ↪ **Possibilité de faire de grandes matrices**

- Interférométrie bolométrique additive:

- ↪ **Pas de corrélateur :** $\langle |E_1 + E_2|^2 \rangle = \langle |E_1|^2 \rangle + \langle |E_2|^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- ↪ **Combinaison des avantages de l'interférométrie avec la sensibilité des bolomètres**



The QUBIC collaboration

A merging of MBI (USA/UK) with BRAIN (France/Italy/UK)



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



BROWN



MANCHESTER
1824
The University of Manchester

CSNSM



NUJ MAYNOOTH
National University of Ireland Maynooth



BICOCCA



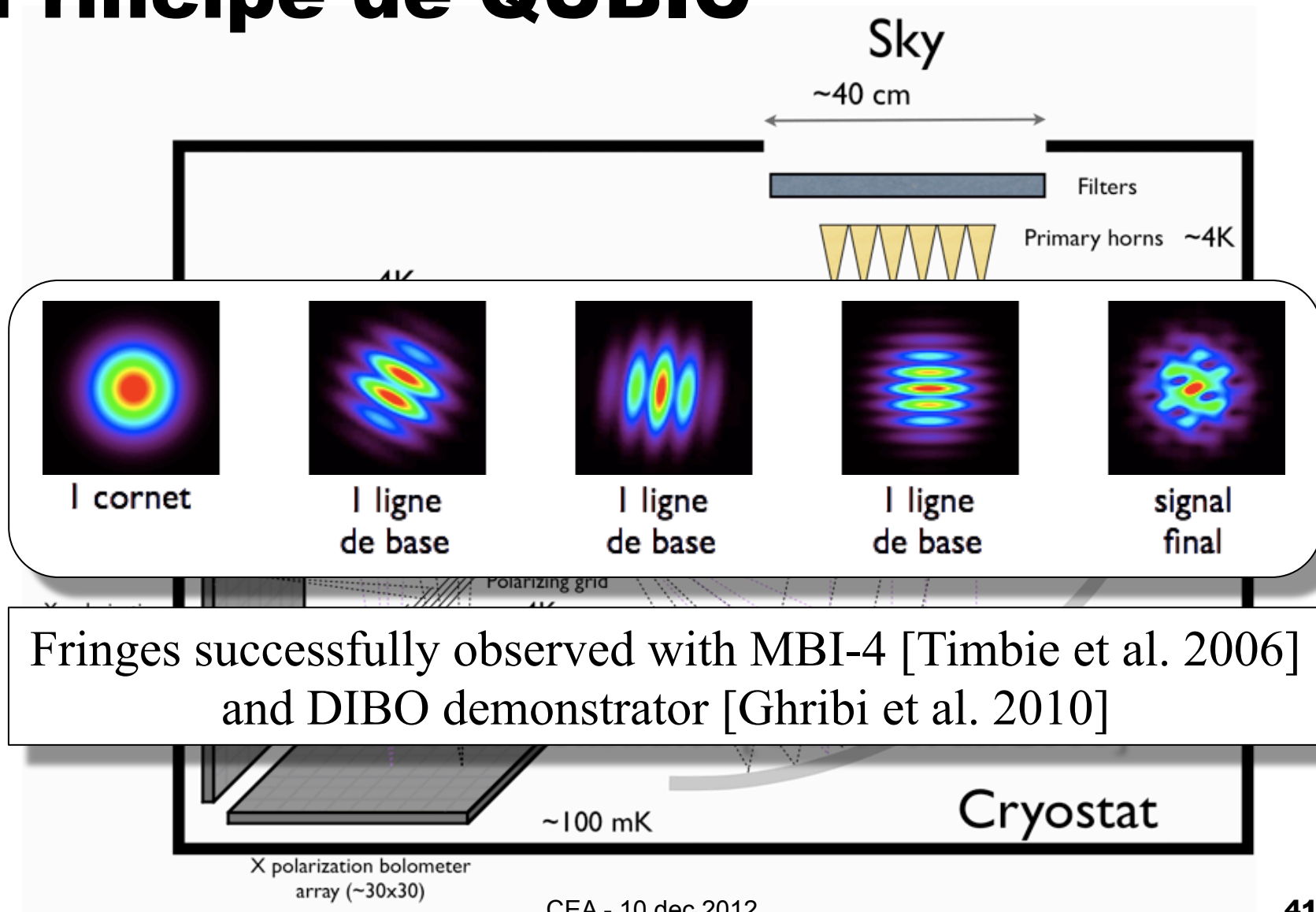
- APC Paris, France
- IAS Orsay, France
- CSNSM Orsay, France
- CESR Toulouse, France
- IUCAA, Pune, India
- Maynooth University, Ireland
- Università di Milano-Bicocca, Italy
- Università La Sapienza, Roma, Italy
- University of Manchester, UK
- Richmond University, USA
- Brown University, USA
- University of Wisconsin, USA

[arXiv:1010.0645](https://arxiv.org/abs/1010.0645)

Astropart. Phys. 34, 705 (2011)

CEA - 10 dec 2012

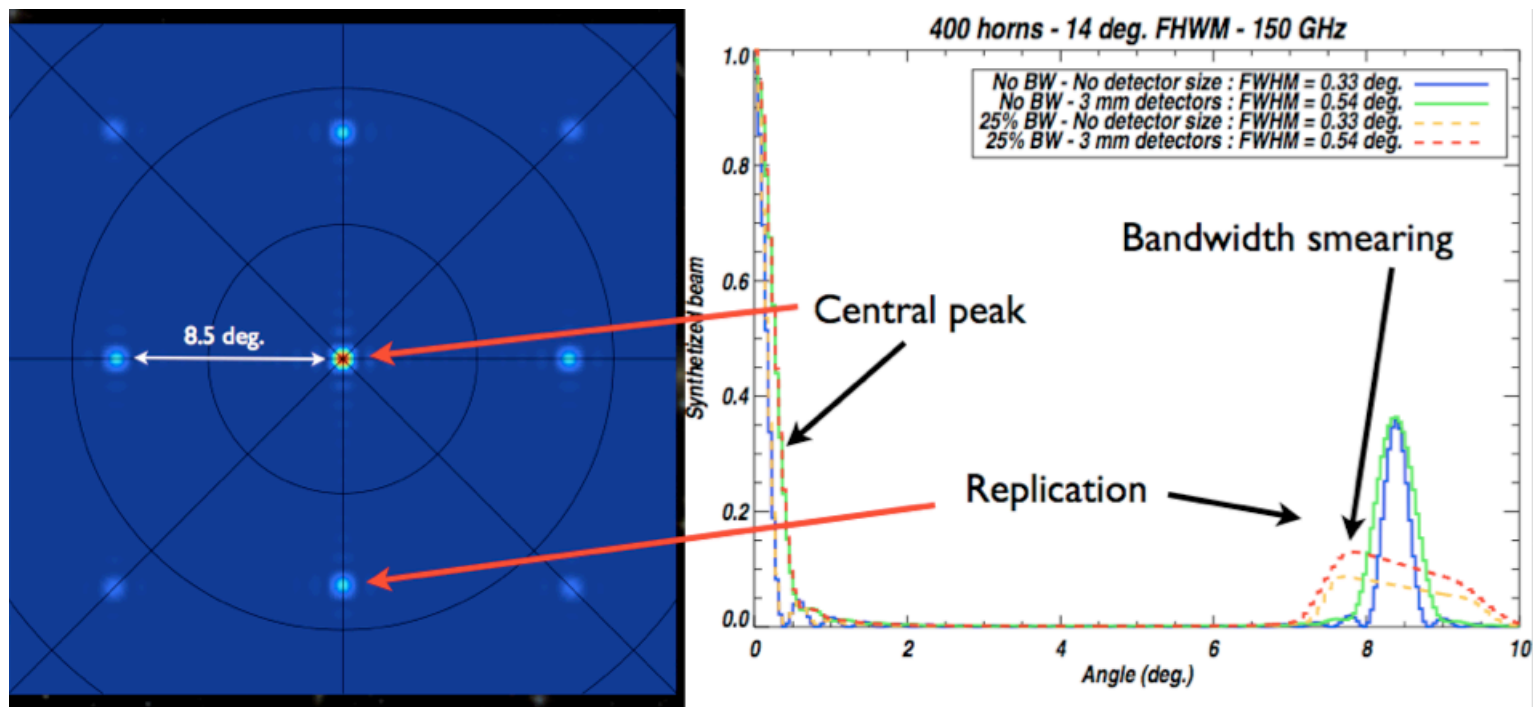
Principe de QUBIC



Imageur synthétique

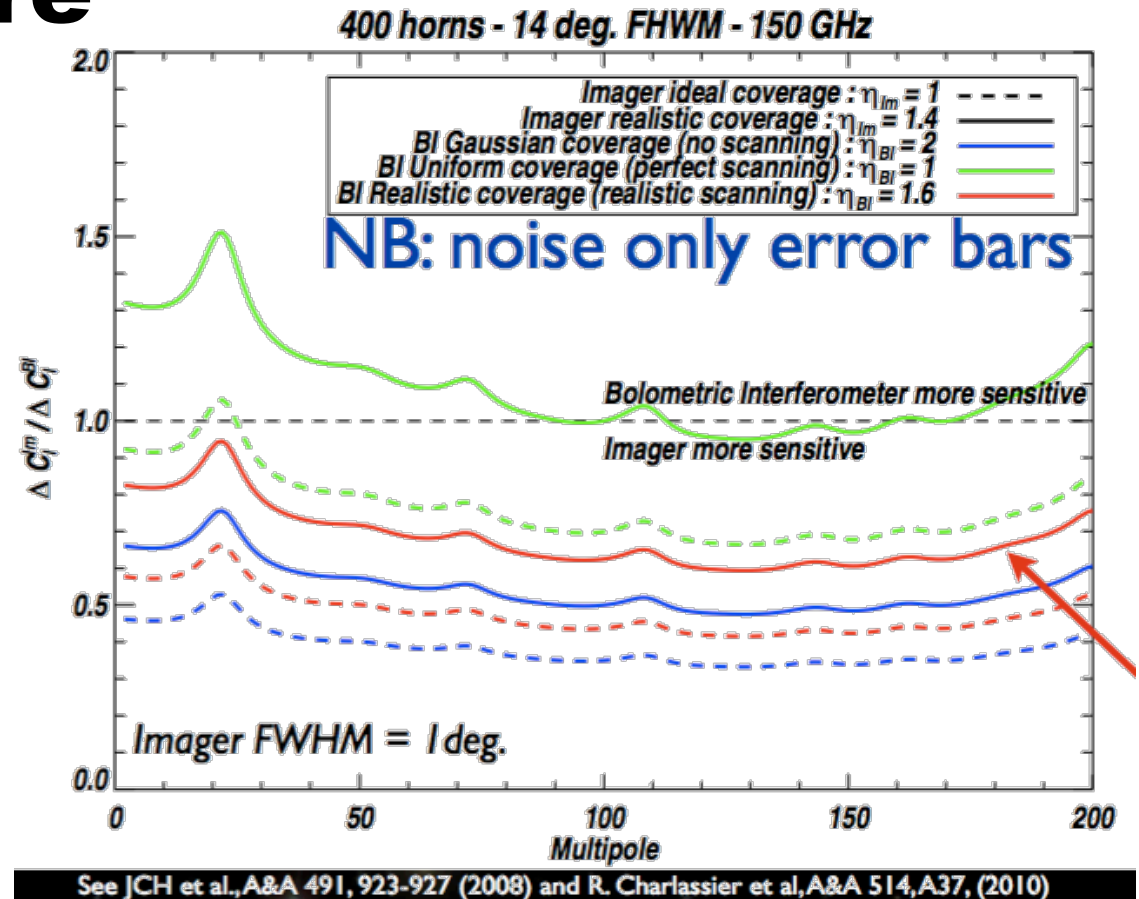
■ QUBIC =

- ↪ **Imageur dans lequel la pupille d'entrée est composée d'une matrice d'ouvertures gaussiennes**
- ↪ **Imageur avec un beam synthétique**



Comparaison imageur/ interféromètre

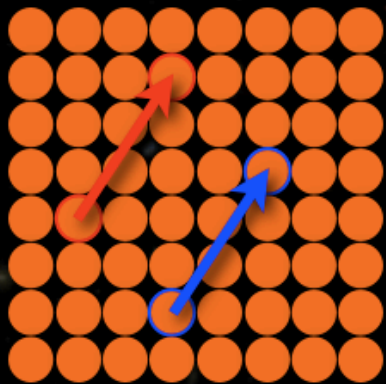
- Léger avantage pour l'imageur
- Et en terme d'immunité aux effets systématiques?



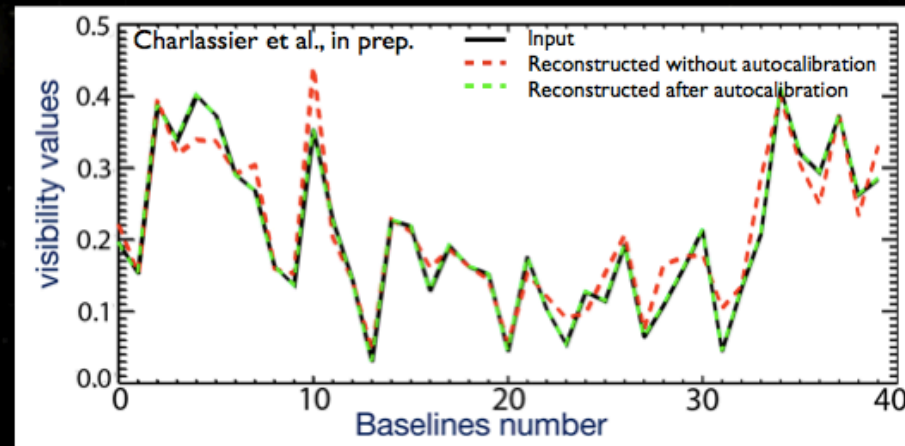
Autocalibration

- Autocalibration allows for systematics control

- ★ Use array redundancy [e.g. Wieiringa, 1991 - Tegmark & Zaldarriaga, 2010]
 - Redundant baselines: same visibility if no systematics
 - Model systematics using Jones matrices (gains and coupling / channel / pixel)
 - Open 2 horns at a time (close the rest: implies switches between back-to-back horns)
 - Construct a system of equations : overconstrained if $N_{\text{horns}} > 20$
- ★ recover systematics/channel/pixel with an unknown polarized source !



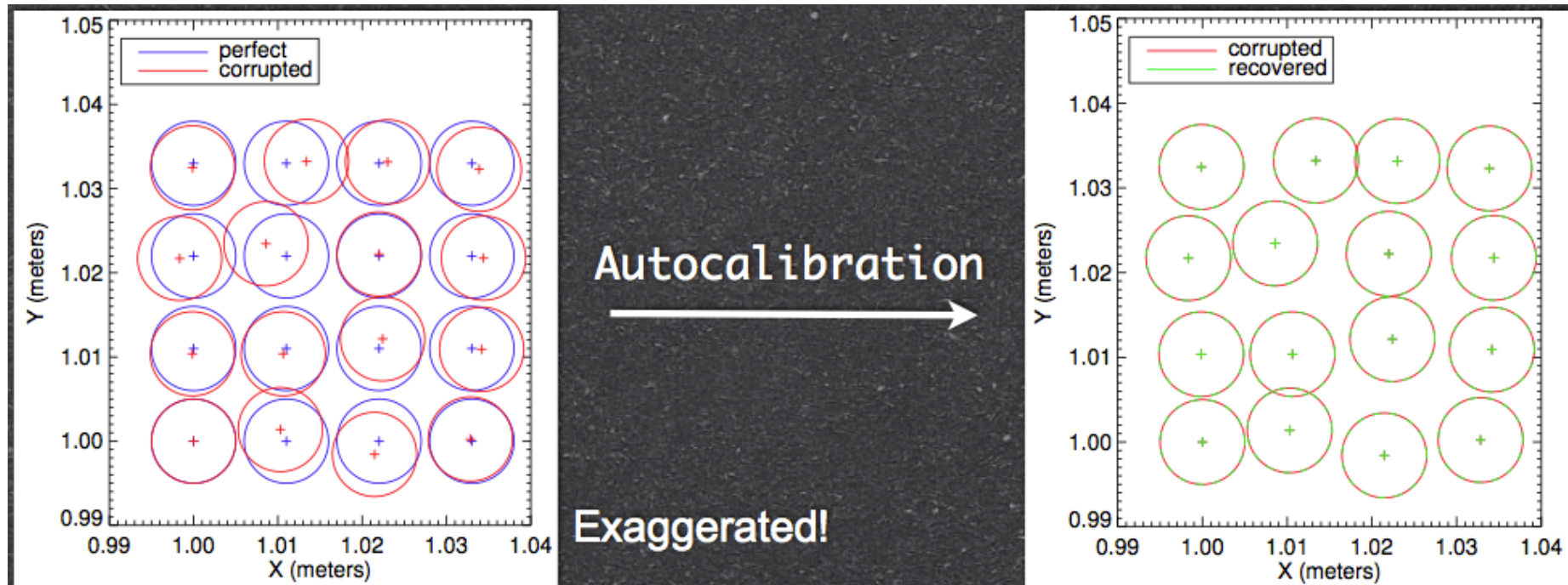
Redundant baselines : same visibility



Back of the envelope : $\text{NET} = 300 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ and 100 K source : $\sim 3 \times 10^{-6}$ on each syst. coeff. with 1 sec/baseline

B.I. allows for internal systematic effects measurement

Autocalibration: simulations



parameters	rms(perfect-corrupted)	rms(corrupted-recovered)
α_{iq}	0.0029	0.0007
$B_{prim,i}(\widehat{n}_p)$	0.0090	0.0005
\widehat{n}_p	0.0082	0.0019
\vec{x}_i (x1000)	0.0983	0.0114
$X(\widehat{n}_p)$	0.9951	0.0057

[Bigot-Sazy et al. 2012]

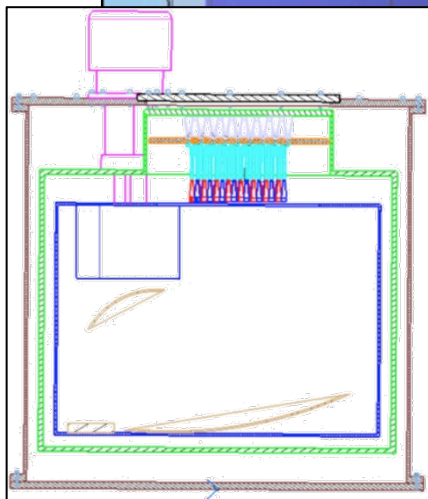
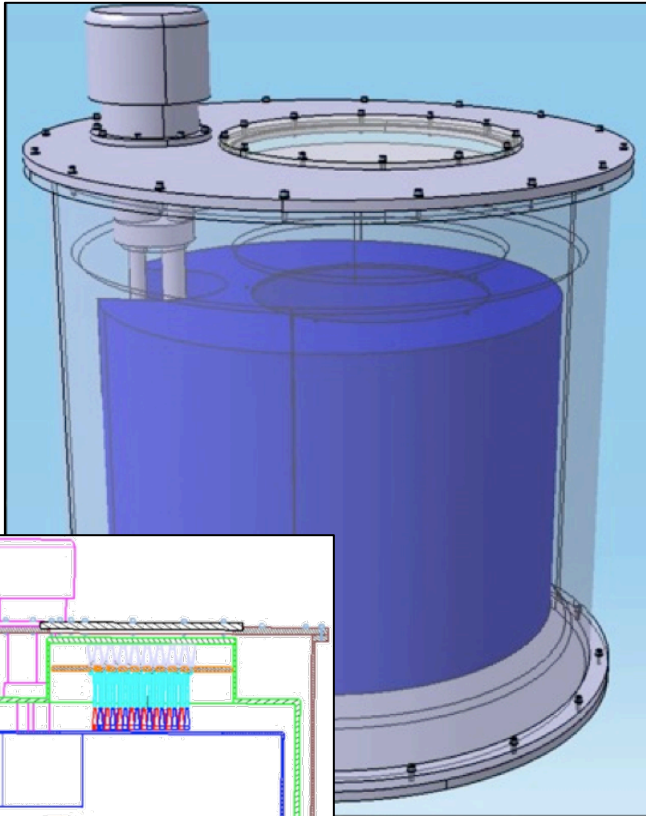


Motivations for a space BI instrument

- Sensitivity
 - ↳ **About the same as an imager**
- Systematic effects
 - ↳ **At least they are different than a classical imager**
 - ↳ **Auto-calibration is a unique feature**
- Architecture simplification
 - ↳ **Work going on...**

Design QUBIC en cours, 1^{ère} lumière 2014

Cryostat (Rome)

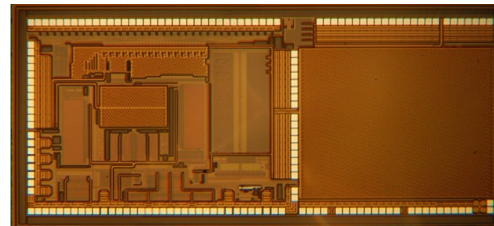


Optics
(Maynooth,
Manchester)

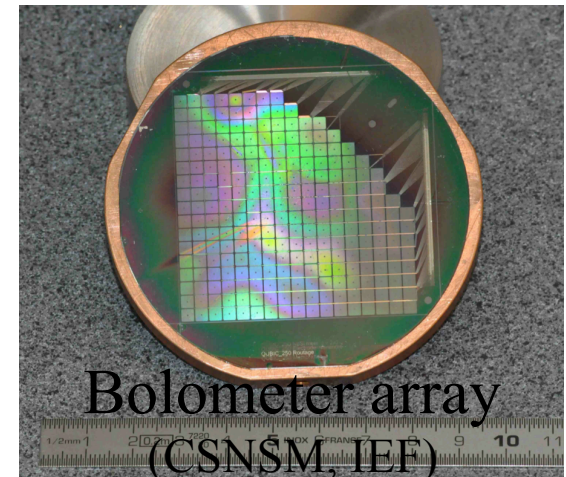
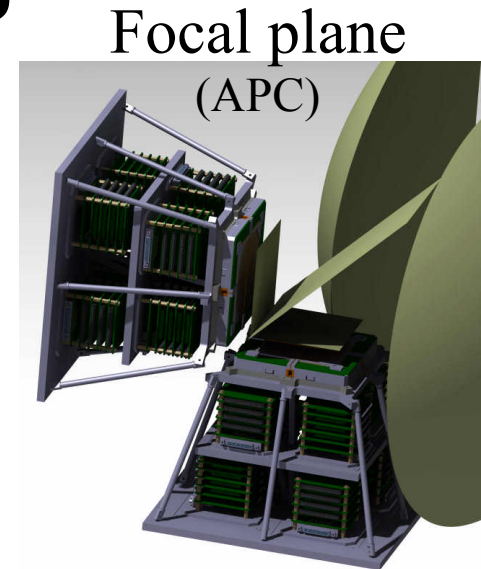
Platelet horns
(APC, Manchester)



RF switch
(APC, Manchester, Milan)

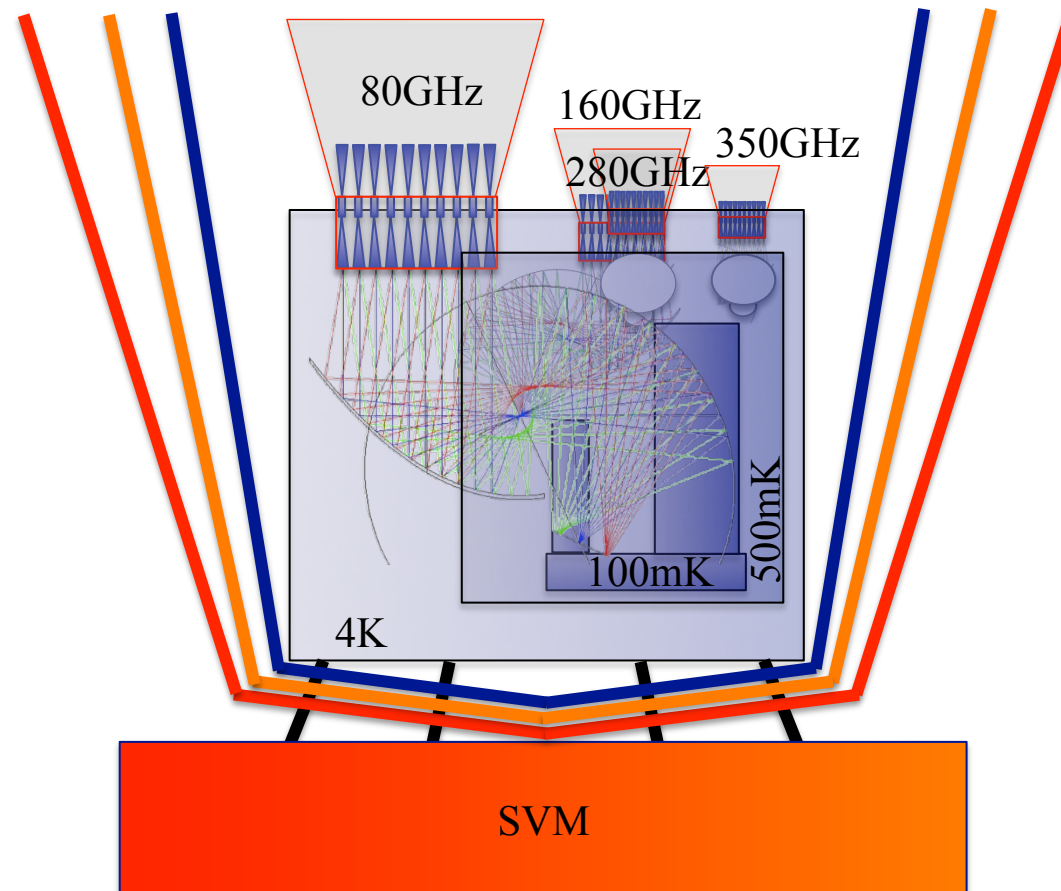


Bolometer readout
(APC, IRAP)



Bolometer array
(CSNSM, IEF)

QUBIC version spatiale



ITT ESA Polarimetric (Sub)Millimeter Wave Antenna Architectures (APC, ASTRIMUM, LERMA)

Conclusions

- Besoin instrumentaux pour la mesure des modes B:
 - ↳ **Matrices de bolomètres de grande dimension**
 - ↳ **Architectures de détection évolués**

**Technologie supraconductrice:
R&D BSD**

- Originalité de l'approche
 - ↳ **BSD: NbSi, ASIC SiGe @ 4K, déphaseur**
 - ↳ **QUBIC**
- Perspectives satellite ~2025?
 - ↳ **Objectif: avoir la technologie démontrée pour le prochain appel d'offre ESA (2014?)**