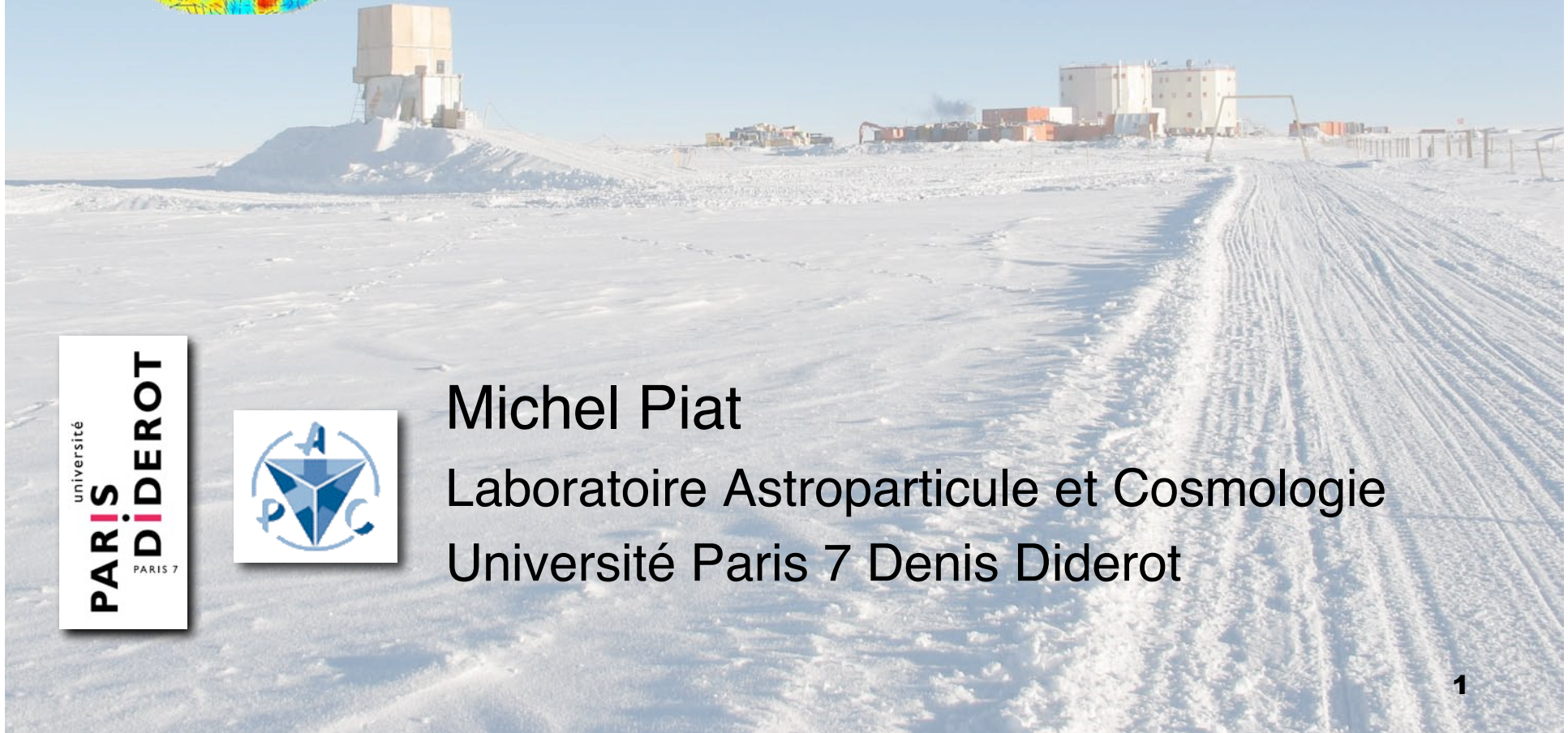
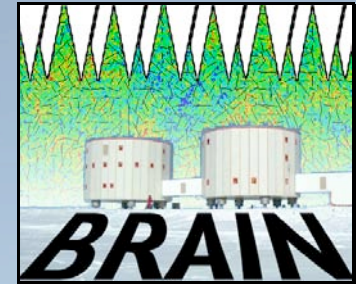


# Développement de l'interférométrie bolométrique : l'expérience BRAIN



Michel Piat

Laboratoire Astroparticule et Cosmologie

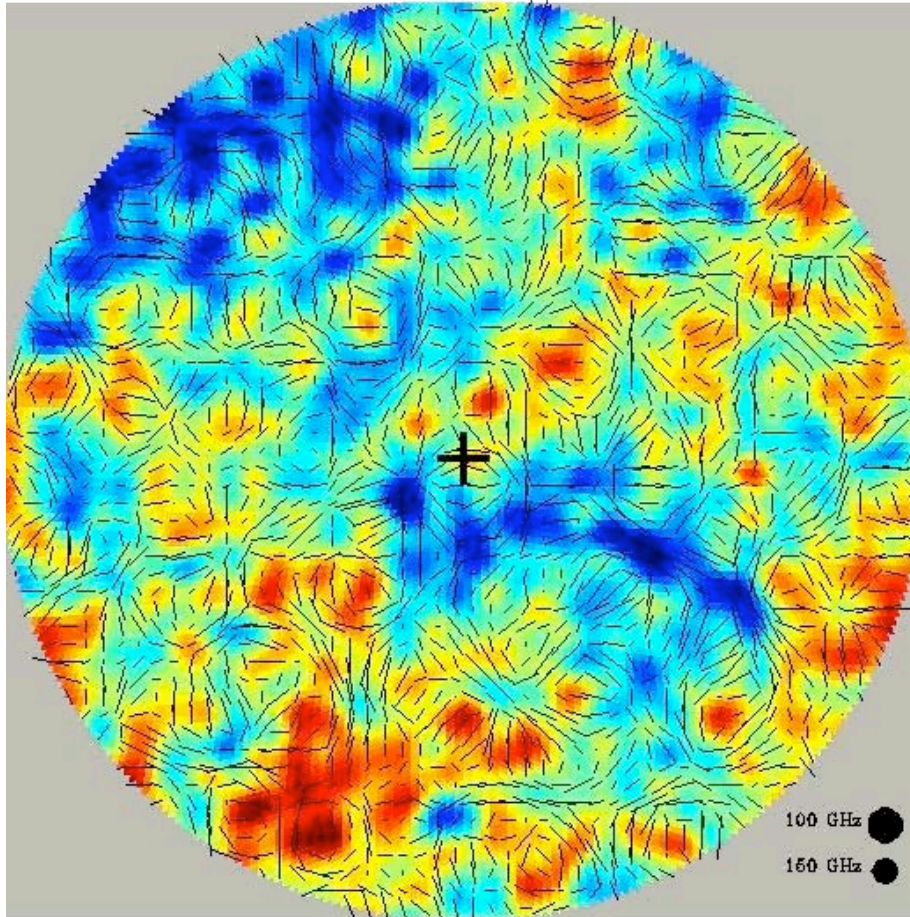
Université Paris 7 Denis Diderot



# Signaux polarisés du CMB (simulations)

Scalar+Tensor Perturbations

42' beam, 30deg. diam. polar cap



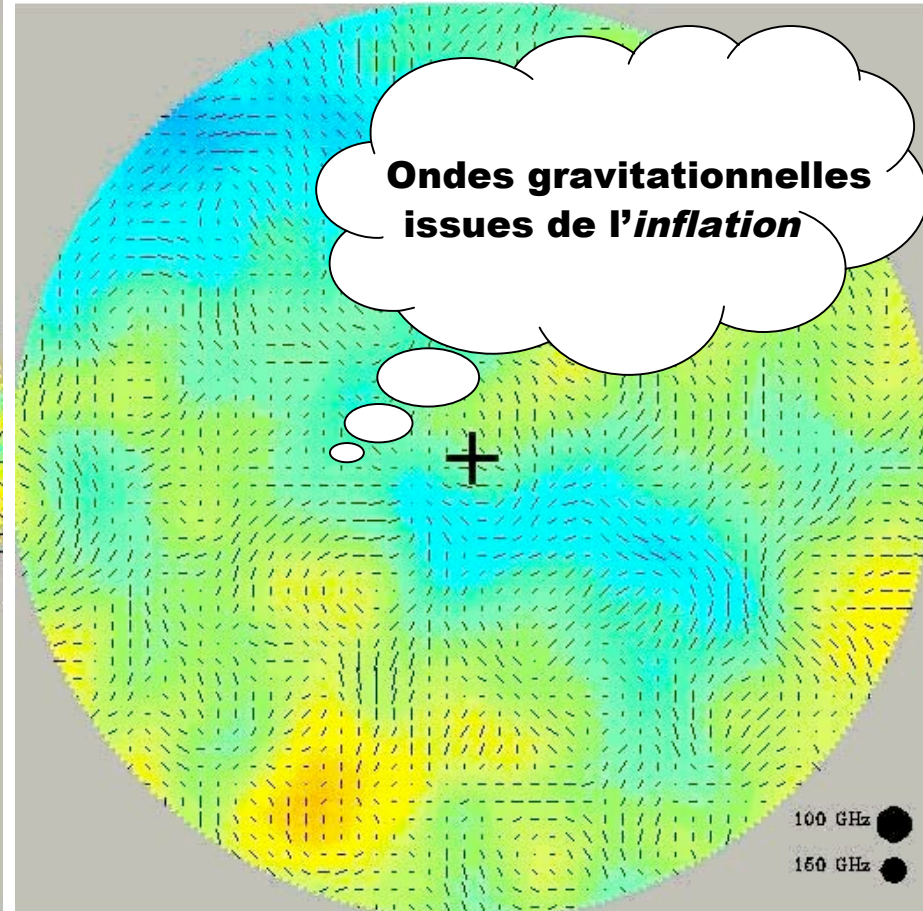
3.53 μK

-200 200 μK

$\sigma^T \sim 100 \mu\text{K}, \sigma^E \sim 4 \mu\text{K}$

Tensor Perturbations

42' beam, 30deg. diam. polar cap



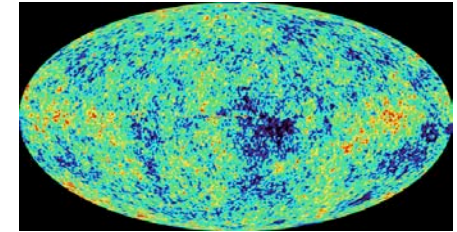
Ondes gravitationnelles issues de l'inflation

3.53 μK

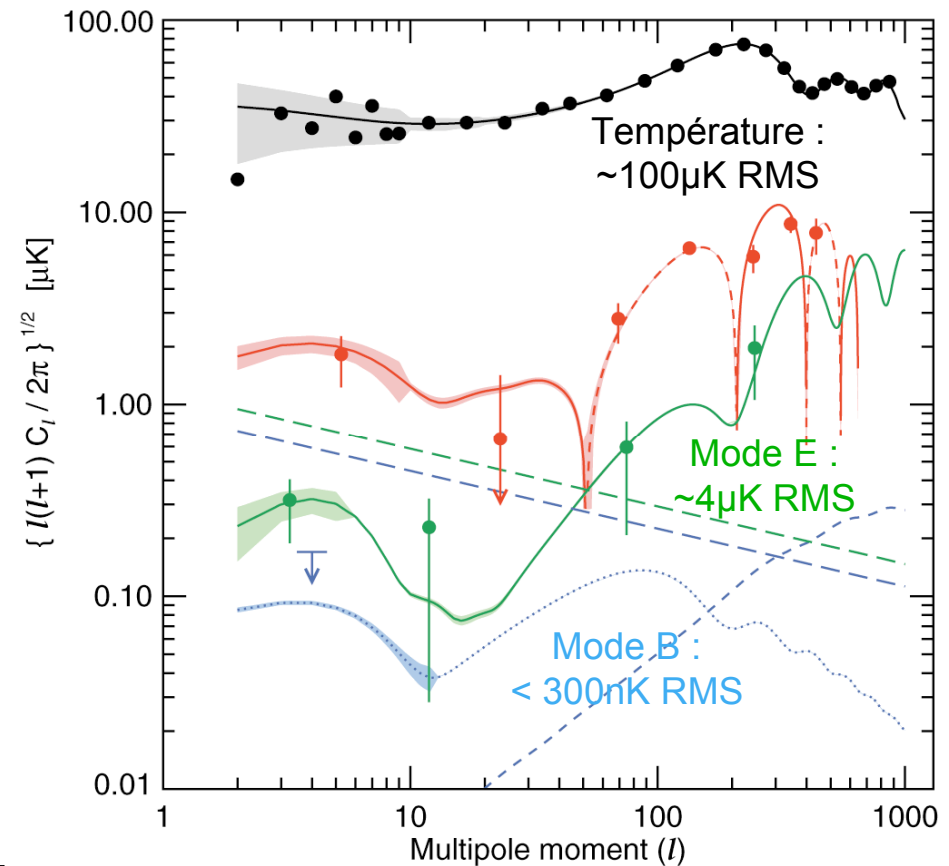
-200 200 μK

$\sigma^B \sim 0.3 \mu\text{K}$

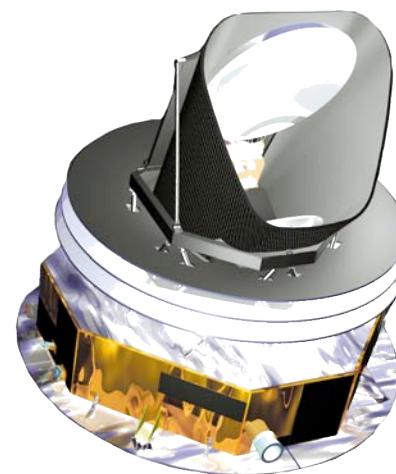
# Spectres de puissance du CMB



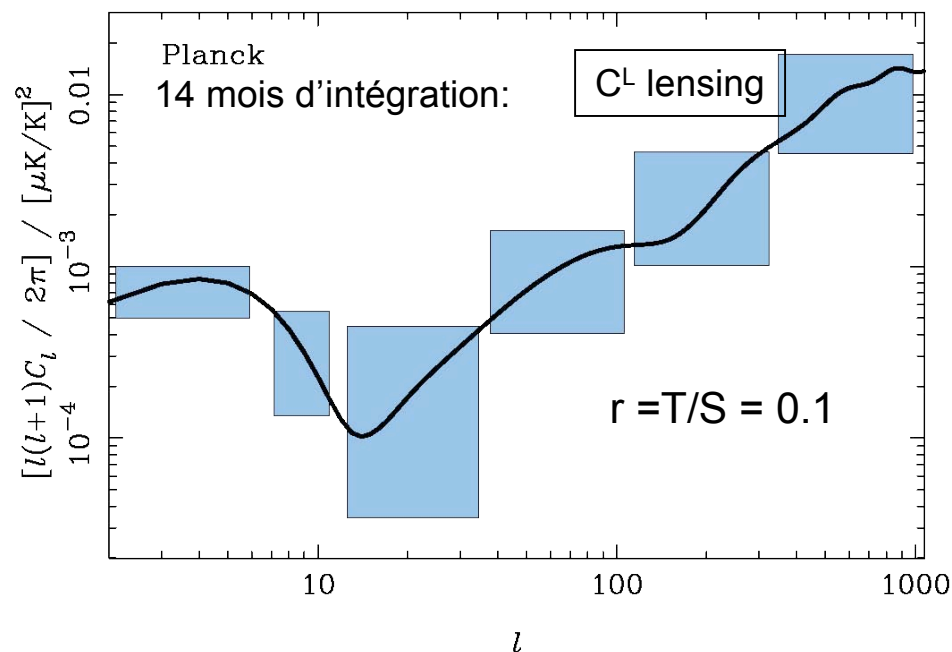
- Polarisation: signal très très faible...
  - ↳ **Fluctuations  $< 10^{-6}$  en relatif**
- Mode E détecté
  - ↳ **DASI, WMAP, Boomerang...**
- Mode B jamais détecté jusqu'à présent
  - ↳ **Dépend de  $r=T/S$**
  - ↳  **$r < 0.28$  at 95% CL (WMAP+SDSS, Spergel et al. 2006)**



# Le satellite Planck et les modes B



- Planck (lancement mi-2008)
  - ↳ **Conçu pour être limité par la limite de confusion des avant-plans non polarisés**
  - ↳ **“expérience ultime” pour les anisotropies en T**
- Sensibilité de Planck à la polarisation
  - ↳ **Limitée par le bruit instrumental**
- **Mesure marginale des modes B...**





# Comment mesurer la polarisation du CMB?

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

## ↪ Paramètres de Stokes :

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

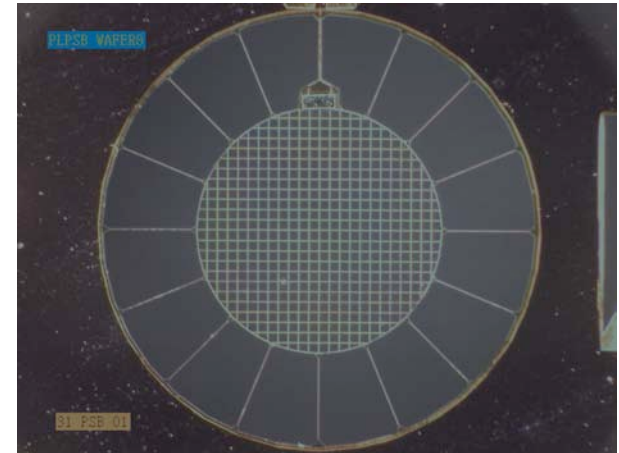
$$Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle$$

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

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

## ↪ 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

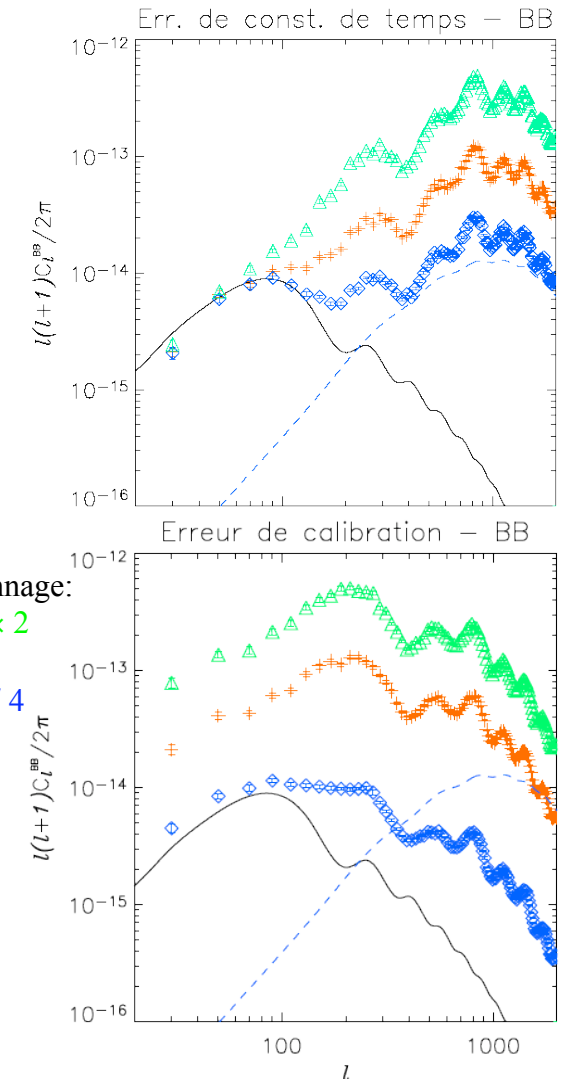
0.2ms

4 détecteurs, erreur d'étalonnage:

(0% +1% -0.8% 0.4%) × 2

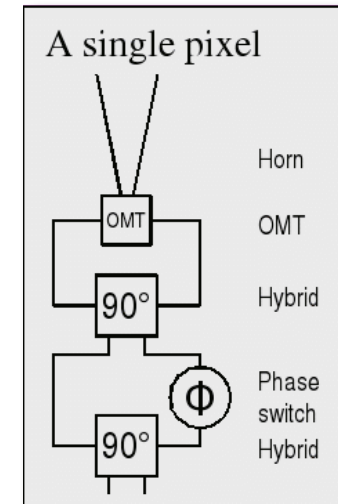
0% +1% -0.8% 0.4%

(0% +1% -0.8% 0.4%) / 4



# Architectures évoluées

- Mesure **directe** des paramètres de Stokes
- Pseudo-correlator scheme (CLOVER)
  - ↳ **Equivalent à un polariseur tournant**
- Interférométrie bolométrique (BRAIN)
  - ↳ **Coefficient de Fourier des paramètres de Stokes à une échelle spatiale donnée (ligne de base)**



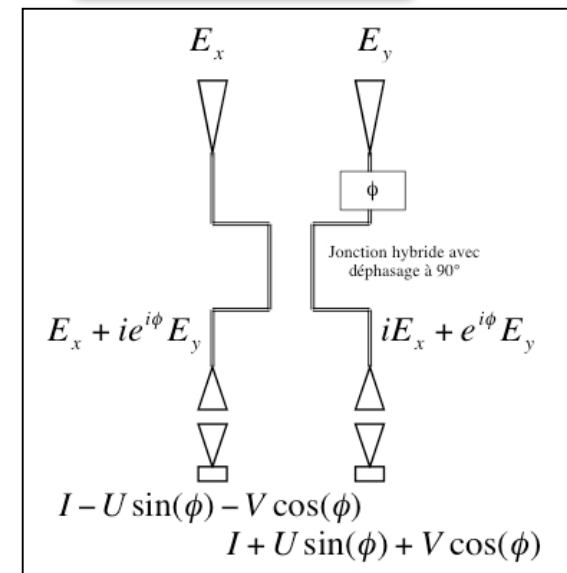
Paramètres de Stokes

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

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

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

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





# La collaboration **BRAIN** (**B**ackground **R**adiation **I**nterferometer)

## ■ Italy

- ↪ Università di Roma La Sapienza
- ↪ Università di Milano Bicocca

## ■ United Kingdom

- ↪ University of Wales Cardiff
- ↪ University of Manchester

## ■ France

- ↪ AstroParticule et Cosmologie (APC)
- ↪ Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR Toulouse)
- ↪ Centre de Spectroscopie Nucléaire et de Spectroscopie de Masse (CSNSM)
- ↪ Laboratoire Instrument et Système d'Ile de France (LISIF Paris 6)
- ↪ Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS Orsay)



# Le programme BRAIN

- Observation du ciel micro-onde depuis le Dôme-C

- ↳ **CMB et avant-plans**

- Pathfinder:

- ↳ **Test de site, logistique**

- ↳ **Caractérisation de l'atmosphère**

- ↳ **1ère installation en Janvier 2006**

- 370mK @ Dome-C!

- 1ère mesure à 150GHz

- ↳ **Seconde campagne en décembre 2006**

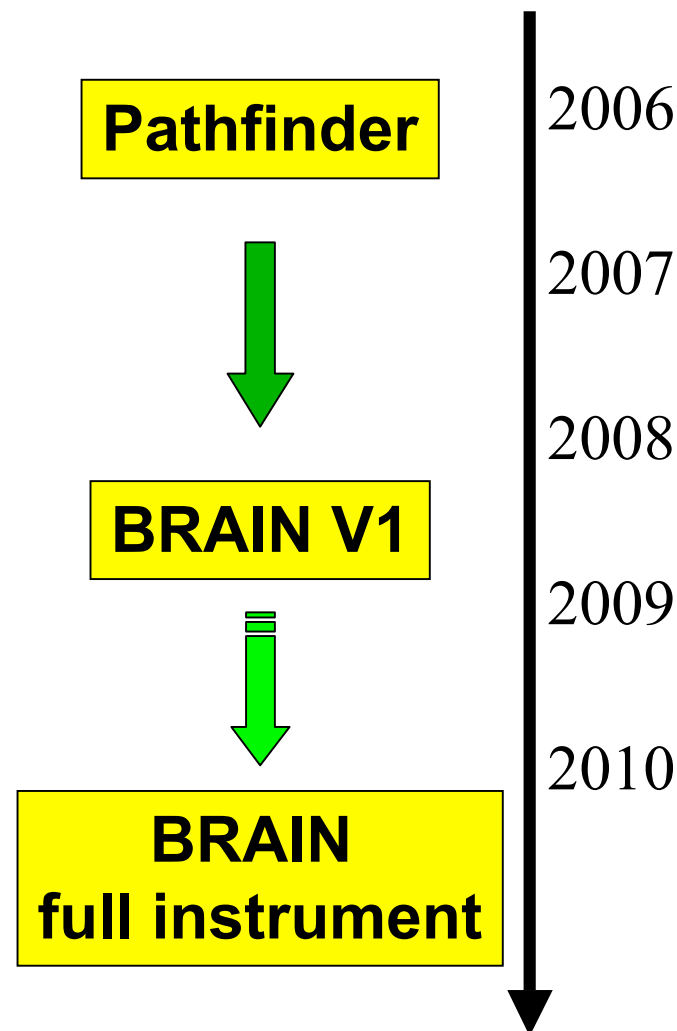
- Environ 1 mois d'observation!

- BRAIN

- ↳ **Modes B primordiaux**

- $50 < l < 200$

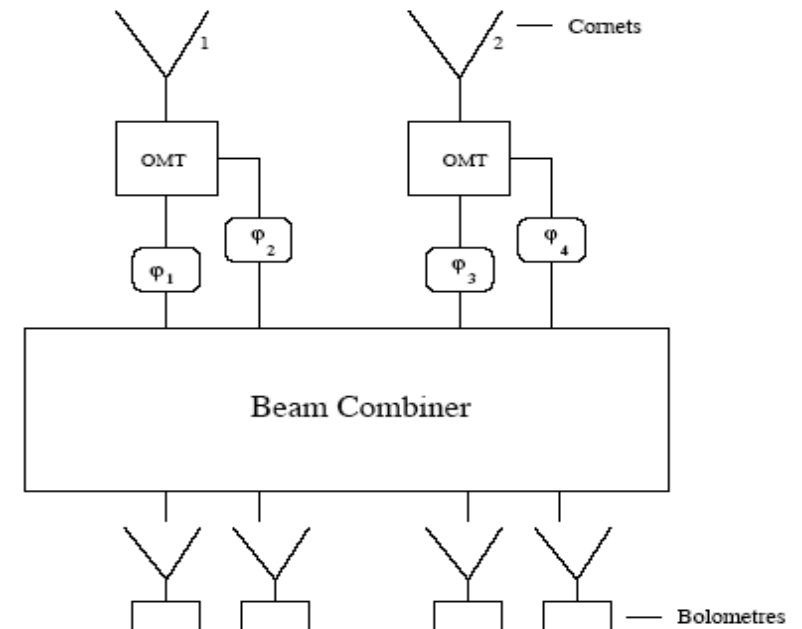
- ↳ **Interféromètre bolométrique**



# BRAIN: Principe de la mesure

- Pour une ligne de base:

$$\mathcal{P}_{B.C.} = \frac{1}{4} \left\{ 2I + U[\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \cos(\varphi_3 - \varphi_4)] \right. \\
+ V[\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(\varphi_3 - \varphi_4)] \\
+ |\mathcal{V}_Q|[\cos(\phi_Q - \varphi_1 + \varphi_3) - \cos(\phi_Q - \varphi_2 + \varphi_4)] \\
+ |\mathcal{V}_I|[\cos(\phi_I - \varphi_1 + \varphi_3) + \cos(\phi_I - \varphi_2 + \varphi_4)] \\
+ |\mathcal{V}_U|[\cos(\varphi_2 - \varphi_3 - \phi_U) + \cos(\varphi_1 - \varphi_4 - \phi_U)] \\
\left. + |\mathcal{V}_V|[\sin(\phi_V - \varphi_2 + \varphi_3) - \sin(\phi_V - \varphi_1 + \varphi_4)] \right\}$$

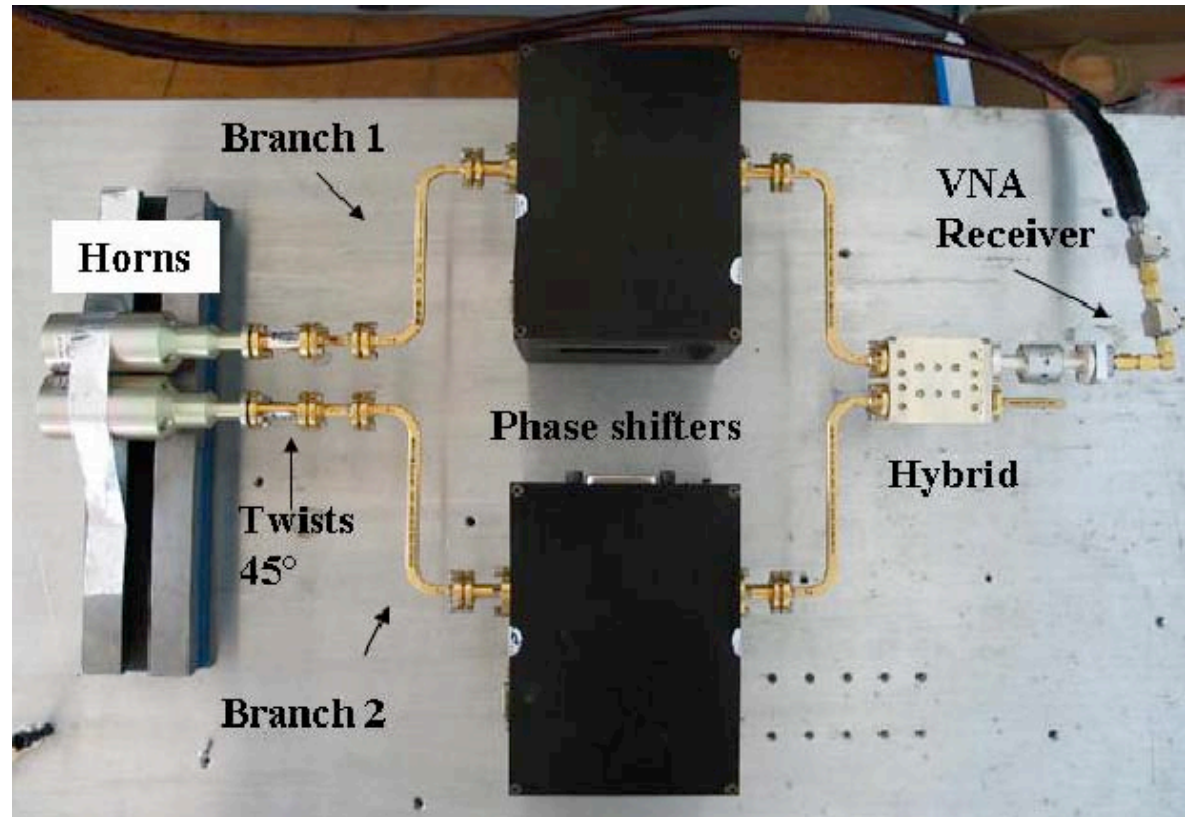


- Se généralise à N lignes de base

- Liens avec les modes B:  $\mathcal{V}_U \equiv a^B \left( \vec{v} = \vec{u} = \vec{D}_\lambda \right)$

# Démonstrateur d'Interférométrie bolométrique (DIBO)

- 1 ligne de base
- 1 polarisation
  - ↳ **Pas d'OMTs**
- Composants commerciaux
  - ↳ **300K**
- Détecteurs:  
bolomètre 4K  
ou VNA



# DIBO sur le VNA





# Validation de la méthode de détection

- Source mobile: Réponse du type trous d'Young

- ↪ **2.5s/cm, polarisation verticale**

- ↪  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$

- Ce que mesurerait un bolomètre:

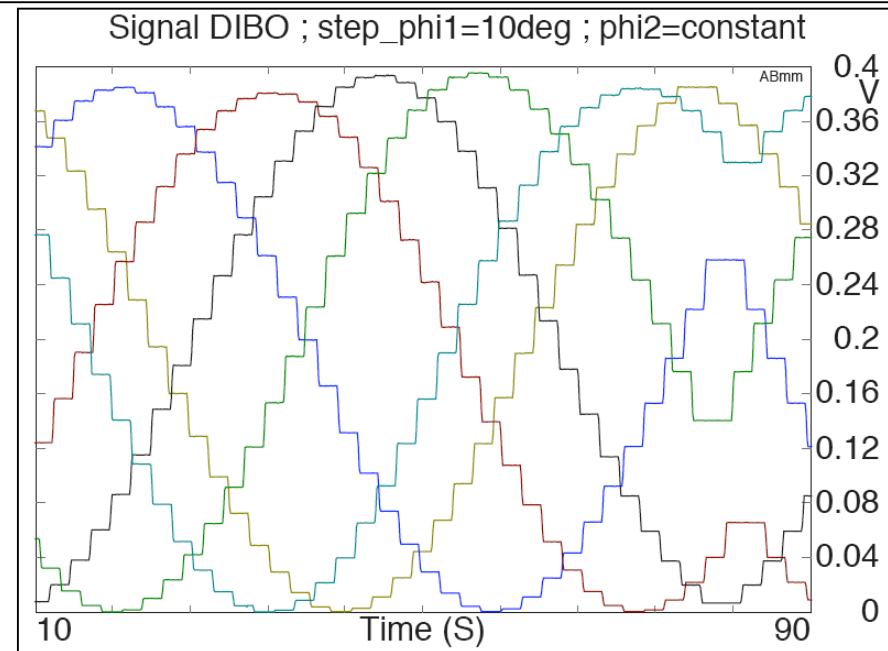
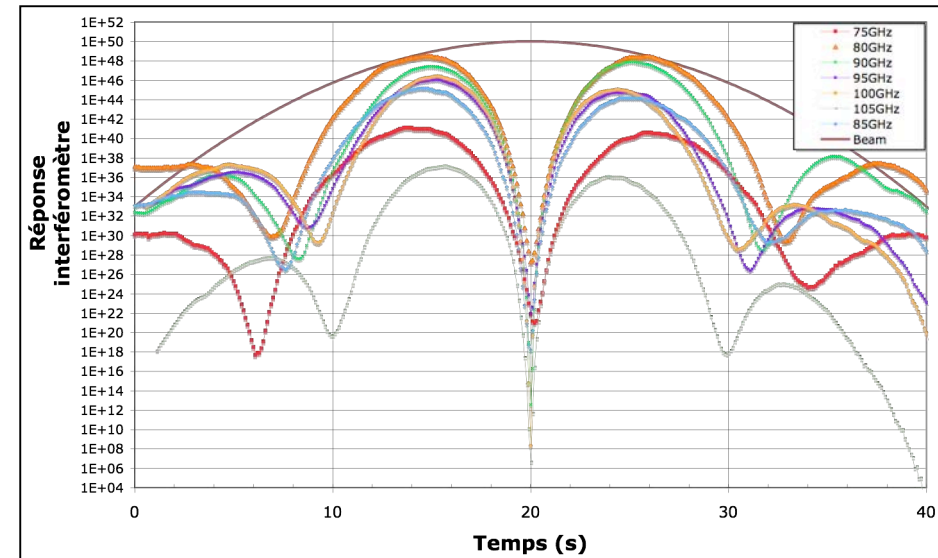
- ↪ **Source fixe, polarisation verticale, 90GHz**

- ↪  $\varphi_1 = \text{sweep entre } 0^\circ \text{ et } 360^\circ \text{ (par pas de } 10^\circ)$

- ↪  $\varphi_2 = \text{constant (par pas de } 30^\circ)$

- ↪ **Signal attendu donné par:**

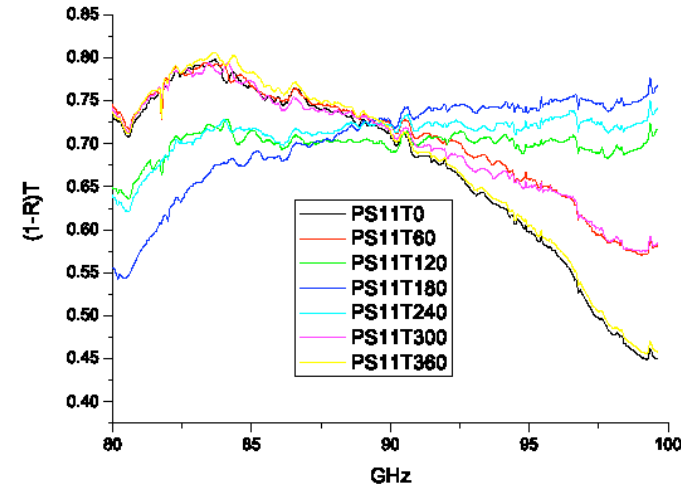
$$\frac{1}{2} E_2 y^2 (1 + \sin[\phi_1 - \phi_2])$$



# Analyse détaillée

(Stage M2 A&A Silvia Galli)

Component	Transmission
Twist B	$0.94 \pm 0.06$
Twist C	$0.91 \pm 0.05$
Bend 7	$0.85 \pm 0.02$
Bend 8	$0.86 \pm 0.02$
Bend 9	$0.85 \pm 0.01$
Bend 10	$0.85 \pm 0.02$
Ps 11	$T_{11}(\nu)\sin(\phi)+of$ $f_{11}(\nu)$
Ps 12	$T_{12}(\nu)\sin(\phi)+of$ $f_{12}(\nu)$
Hybrid	$0.28 \pm 0.01$



PS11	$\times \nu^0 (Hz^0)$	$\times \nu^1 (Hz^1)$	$\times \nu^2 (Hz^2)$
a	$(-8 \pm 4) \times 10^{-11}$	$(3.2 \pm 0.9) \times 10^{-21}$	$(-2.0 \pm 0.5) \times 10^{-32}$
b	$(8.2 \pm 0.3) \times 10^{-11}$	$(-1.88 \pm 0.06) \times 10^{-21}$	$(1.08 \pm 0.03) \times 10^{-32}$
off	$-4.5 \pm 0.3$	$(1.22 \pm 0.06) \times 10^{-10}$	$(-7.2 \pm 0.3) \times 10^{-22}$
PS12	$\times \nu^0 (Hz^0)$	$\times \nu^1 (Hz^1)$	$\times \nu^2 (Hz^2)$
a	$(-1.4 \pm 0.4) \times 10^{-10}$	$(4.4 \pm 0.8) \times 10^{-21}$	$(-2.6 \pm 0.5) \times 10^{-32}$
b	$(5.1 \pm 0.2) \times 10^{-11}$	$(-1.21 \pm 0.05) \times 10^{-21}$	$(7.1 \pm 0.3) \times 10^{-33}$
off	$2.4 \pm 0.5$	$(-3 \pm 1) \times 10^{-11}$	$(1.1 \pm 0.7) \times 10^{-22}$

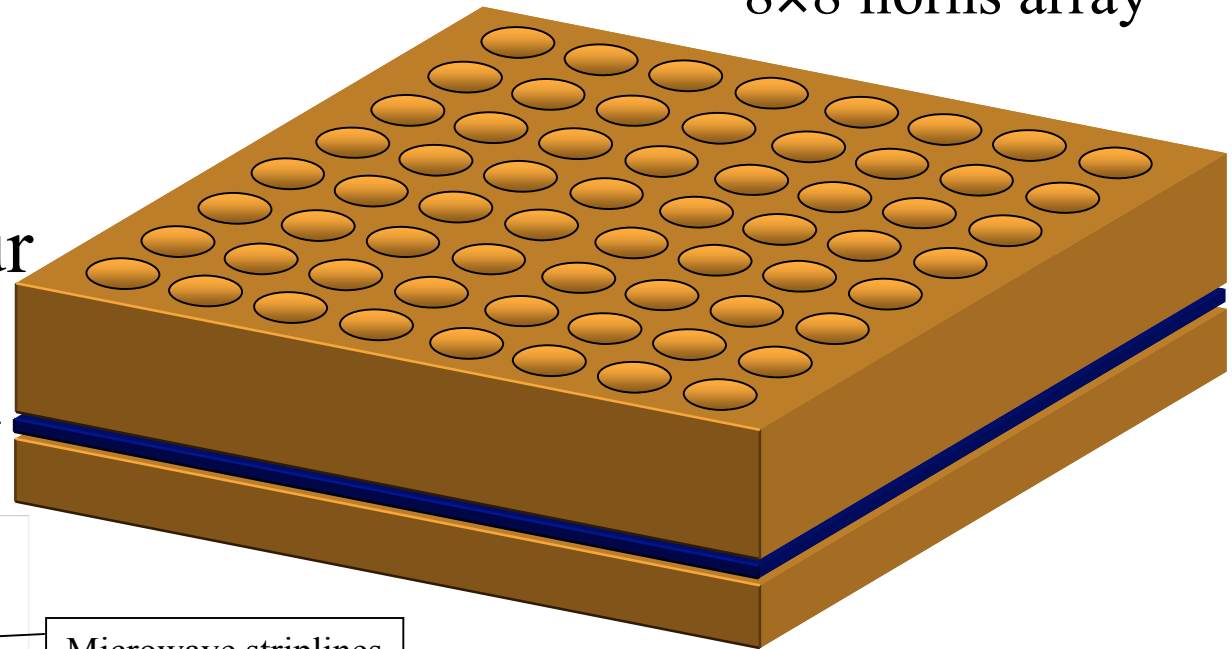
Transmission totale à 90GHz: **1,8%**

Compréhension des effets parasites  
instrumentaux

# En cours d'étude: bloc de détection BRAIN (MINT)

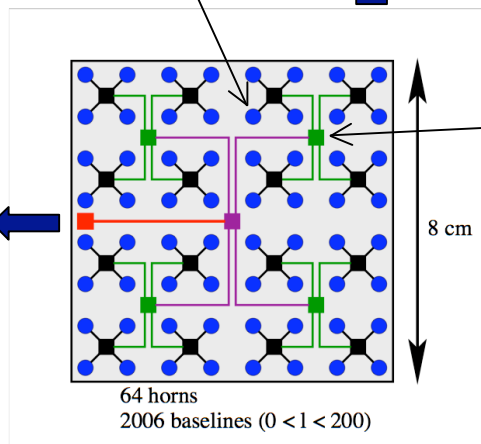
8×8 horns array

- Architecture coplanaire supraconducteur



Antennas + phase shifters

To bolometers



Microwave striplines

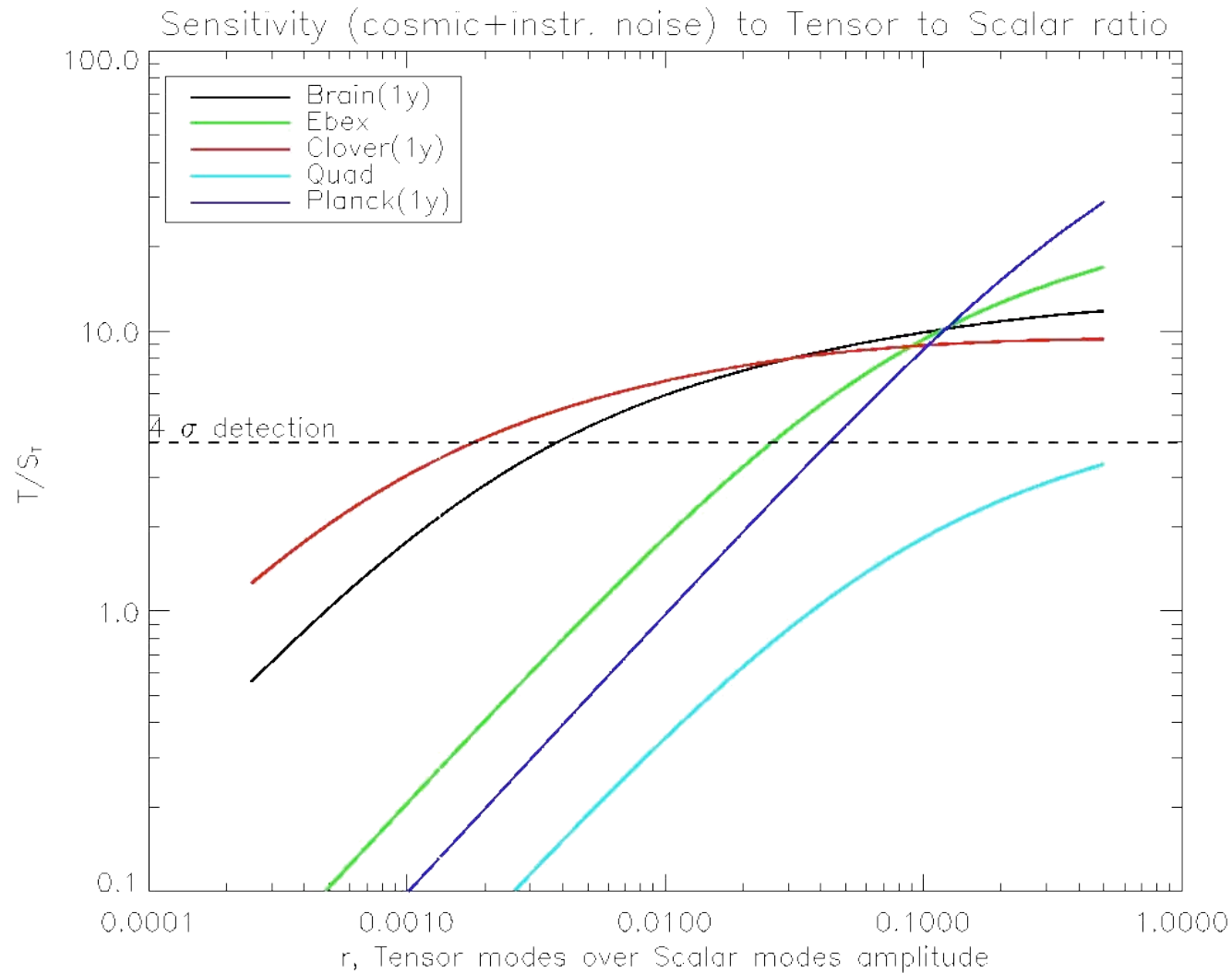
8 cm

- Multiplication des blocs dans le plan focal

(Déphaseur: Thèse A. Ghribi en cours)

# Sensibilité BRAIN

(Stage M2 A&A Clément Cressiot 2006  
Stage M2 NPAC Romain Charlasier 2007)



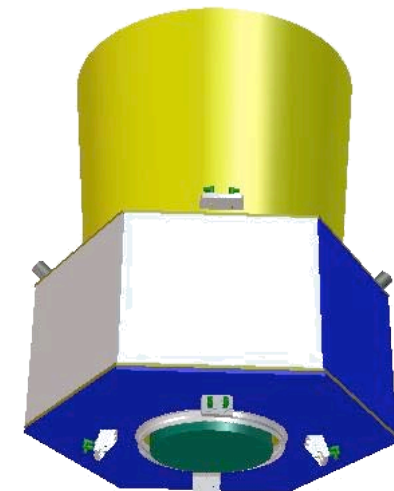


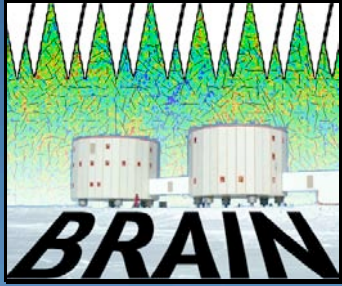
# Conclusions

- Interférométrie bolométrique:
  - ↪ **Une nouvelle méthode de détection de la polarisation du CMB**
- Préparation pour la future mission spatiale (~2020)
  - ↪ **Etude de faisabilité SAMPAN avec le CNES (2005)**
  - ↪ **Réponse BPol à l'appel d'offre Cosmic Vision de l'ESA (juin 2007)**
  - ↪ **Architecture évoluée envisagée pour BPol**
- Expériences sols:
  - ↪ **Défricher le domaine: première détection des modes B?**
  - ↪ **Mise au point des techniques de détection**



BPol





Pathfinder



(Dec. 11th 2006)



Observations done:

- Sky dips
- Moon
- CMB

