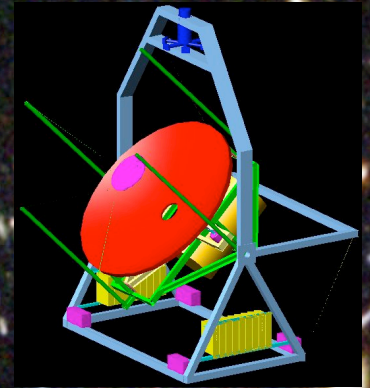


Plasma
Originel

Nous



*Mon bolomètre fait de la fièvre.
C'est grave docteur?*

*Dominique Yvon,
CEA-Saclay-DAPNIA/SPP*

Ou la nécessité d'une conception globale de l'instrument pour lire les détecteurs bolomètres

Objectif Scientifique.

Fond diffus cosmologique - Planck - Ordres de grandeurs

Un bolomètre qu'est ce que c'est?

*Intérêt, Principaux ingrédients - **Ordre de grandeurs.***

Un bolomètre c'est Sensible -Exigent!

Notion de signal - Notion de bruit - Spectre de bruit

Bruits « Fondamentaux »

Bruit de photon, Thermodyn., Bruit thermométrie.

Bruit de lecture.

*Le cas Planck/HFI. C'est Grave, **Pas de panique!***

Mécanismes de bruits et leurs solutions

Microphonie, EMI mode conduit, EMI rayonné

La beauté du résultat! On espère pour bientôt.....

Objectif Scientifique

*Fond diffus cosmologique
Planck - Ordres de grandeurs*

Fond Diffus Cosmologique (FDC, CMB)

Univers Initial dense et chaud

Equilibre Thermique Photon - Matière.

Expansion:

=> T décroît < 0.2 eV.

Recombinaison Electron-Noyaux

Libre parcourt moyen γ devient infini:

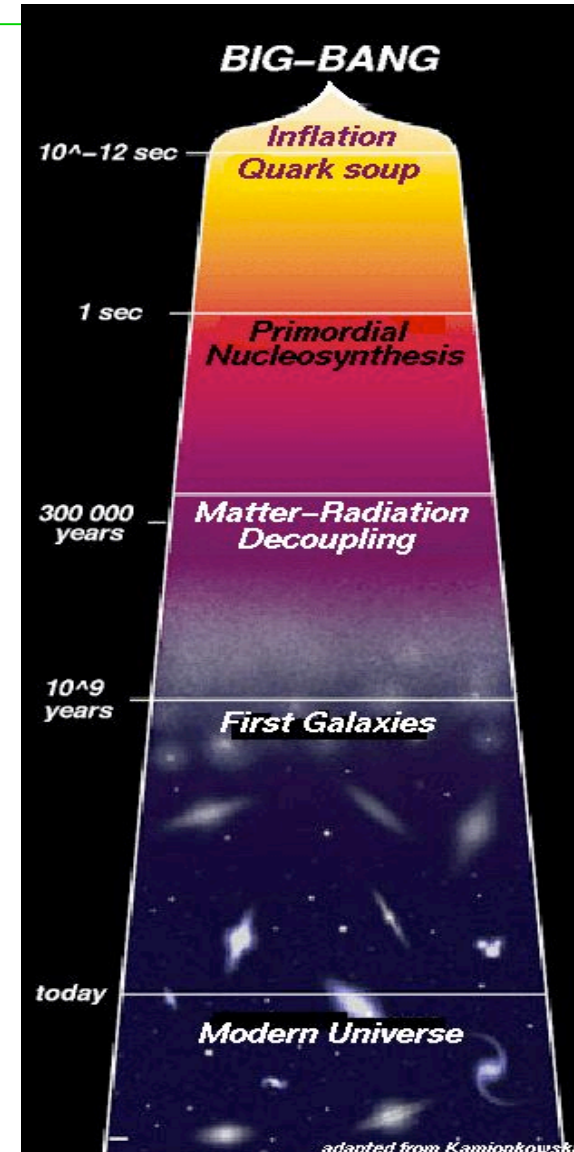
Découplage $e^- \gamma$.

Emission du FDC (« Photo »)

T = 3000 K, $z = 1100$.

Aujourd'hui:

Observé à T = 2.728 K



Fond Diffus Cosmologique Uniforme ?

Fluctuation de Tempé du CMB:

« *Photo* » des *Fluct. Densité* et
Pression du Plasma *primordial*.

Germes de la formation de
structures de l'univers

Dipôle Effet Doppler :

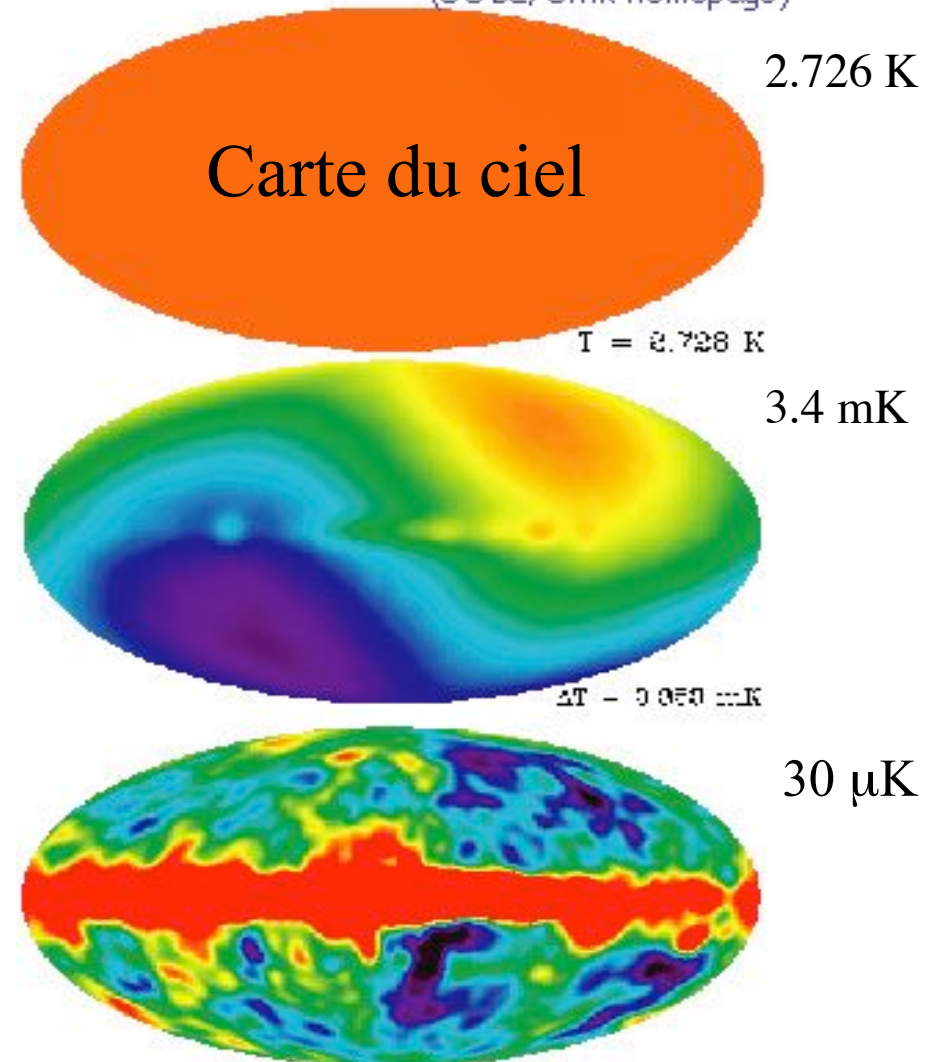
V_{terre} / repère CMB isotrope

COBE/DMR:

Découverte des anisotropies 1992

$\Delta T/T = 10^{-5}$ avec FWHM de 7°

(COBE/DMR homepage)



Ordres de grandeur

$$T_{\text{CMB}} = 2.728 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{rms}} \sim 2.8 \text{ mK}$$

Brillance de surface Dipole:

$$B \sim 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ W/deg}^2$$

Cobe:

$$7', P_{\text{pix}} \sim 8 \cdot 10^{-12} \text{ W}$$

Boomerang/WMAP:

$$20', P_{\text{pix}} \sim 2 \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

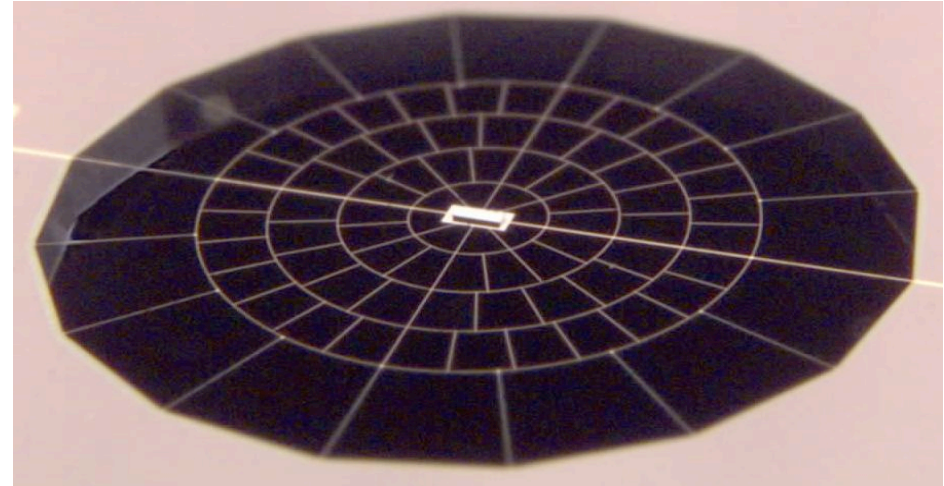
Planck Dipole:

$$5', P_{\text{pix}} \sim 1 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

Planck Objectif:

$$5', 5 \mu\text{K}: P \sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ W}$$

$L < 1 \text{ cm}$



(JPL and Mauskopf et al. Appl. Opt., 36, 1997)

Bolomètres (Calorimètres)

Mesure variation de Flux (W)

100-300 mK, qq nW.

$$\tau = C_{\text{th}}/g \sim 1-10 \text{ ms}$$

$$\text{NEP}_{\text{Planck}} \sim 10^{-17} \text{ W s}^{1/2}$$

$$\sim 100 \mu\text{K s}^{1/2}$$

Une bougie sur la lune : -), limite thermodynamique

Un bolomètre qu'est ce que c'est?

*Intérêt - Principaux ingrédients
Ordre de grandeurs.*

Modèle Thermique de Bolomètre

Calorimètre

Élévation de température

Trois constituants principaux

Absorbeur: C

Thermomètre: $R(T)$

Fuite Thermique:

$$g = \frac{d(P_e + P_{ph})}{dT}$$

Constante de temps: $\tau_{th} = C/g$

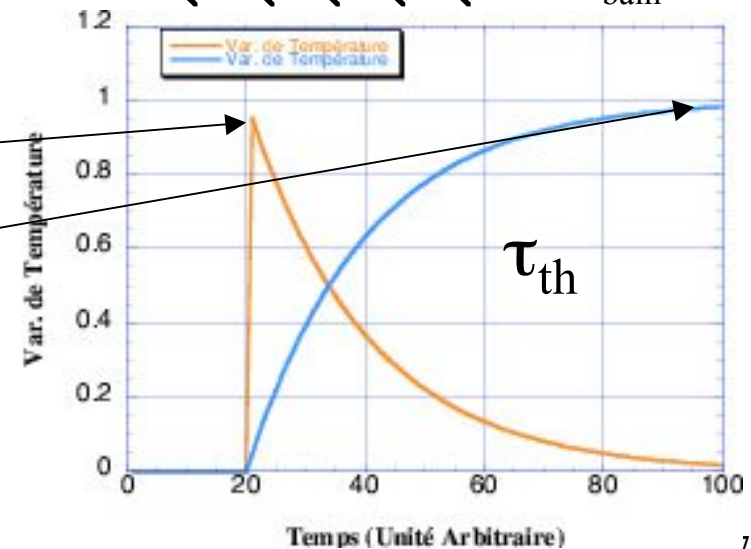
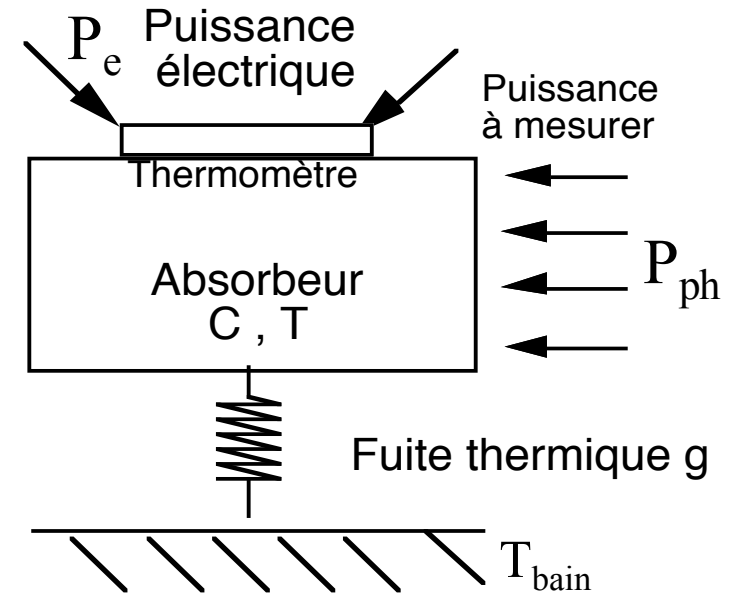
Amplitude en impulsion:

$$\Delta T = E/C$$

Mesure de puissance:

$$\Delta T = \Delta P_{ph}/g$$

Un peu de Thermodynamique?



L'absorbeur

Soit un métal, soit un diélectrique

Capacité calorifique d'un diélectrique monocristallin

Modèle du gaz de phonons.

====> vibrations du réseau.

n atomes dans la maille cristalline

$$C_v(T) = 1944 n \frac{M_{\text{cristal}}}{M_{\text{molaire}}} \left[\frac{T}{\theta_D} \right]^3 \quad T \ll \theta_D$$
$$= 2.1 \cdot 10^{-6} T^3 \text{ (JK}^{-1}\text{)}$$

24 g saphir

Capacité calorifique d'un métal

Modèle du gaz d'électron

(n nombre de moles, γ en $\text{J mole}^{-1} \text{K}^{-2}$)

$$C_{el} = \frac{1}{3} \pi^2 N k_B \frac{T}{T_F} = n \gamma T \quad T \ll T_F$$

Ordre de grandeurs.

1g de Cuivre à $T = 0.1 \text{ K}$:

$$C_v = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ J/K}$$

1g de silicium à $T = 0.1 \text{ K}$:

$$C_v = 2.6 \cdot 10^{-11} \text{ J/K}$$

1g d'eau à $T = 300 \text{ K}$:

$$C_v = 4.2 \text{ J/K}$$

Le thermomètre

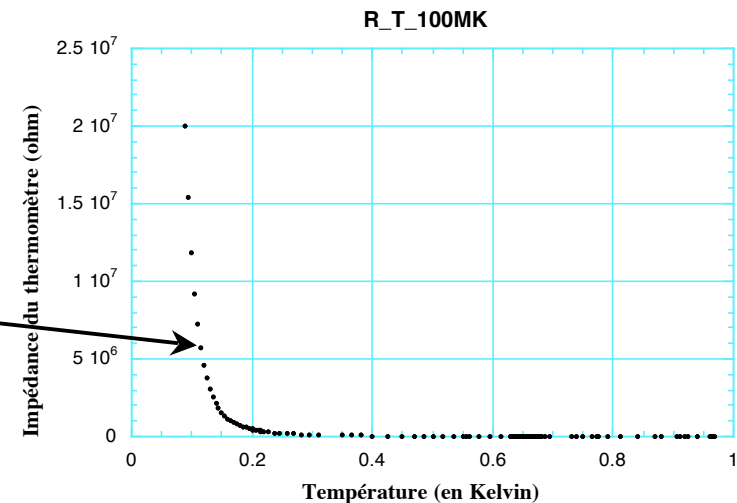
La pente:

$$\alpha(T) = \frac{dR/R}{dT/T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$$

Transition Métal Isolant (MIT)

$$R(T) = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{\Delta}{T}}\right); \quad \alpha(T) = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta}{T}}$$

$$\alpha = 2-10, \quad R \sim 1-10 \text{ M}\Omega$$



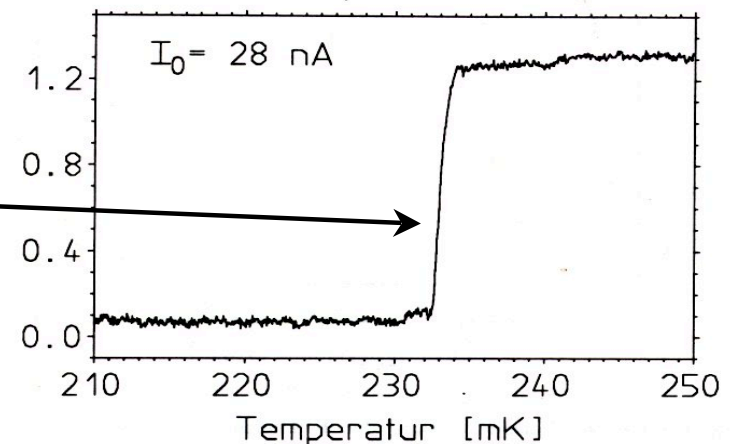
Trans. Métal-Supraconducteur

$$\alpha = 2-1000$$

$$R \sim 10 \text{ m}\Omega \rightarrow 10 \text{ k}\Omega.$$

Ordre de grandeur:

$$\Delta T \sim 1 \mu\text{K}$$



Un bolomètre c'est Sensible!

Notion de signal

Notion de bruit - Spectre de bruit

Bruit de photon, Thermodyn.

Bruit thermométrie - Bruit de lecture.

Signal sur un bolomètre IR

Echelle de temps: $\Delta t > \tau_{th}$

Signal Scientifique: P_{ph}

Fréq: 0.01 -> 100Hz

$$S_{ph} = \sqrt{\frac{P_e}{R}} \alpha \frac{R}{T} \frac{P_n}{g} = \alpha \frac{\sqrt{R P_e}}{P_e + P_L + T_0} \frac{\Delta P_{ph}}{g} \text{ (Volt)}$$

Mais bruits

- *Optiques*: Le signal est bruité!
- *Thermiques*: Fluctuations de température du Bolo
- *Thermomètre ==> Signal Electrique*
- *Thermométrie résistive*:
Bruit Johnson (Electrique, fondamental)
- *Bruits de lecture*
Lecture, *parasitages* (Electriques instrumentaux)

Notion de Bruit

Signal Scientifique

P_{sig} = petit Signal W ou keV

Série de mesure imprécises

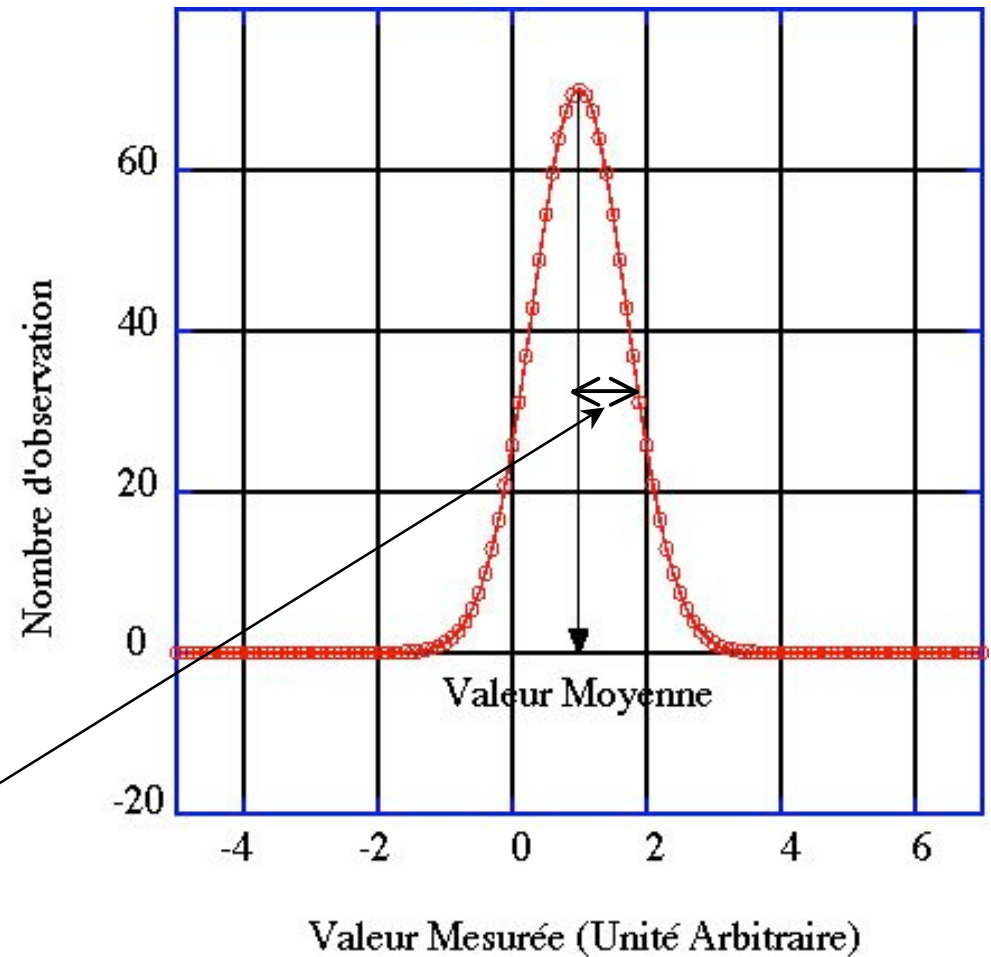
On dit « bruitées »

Valeur Moyenne:

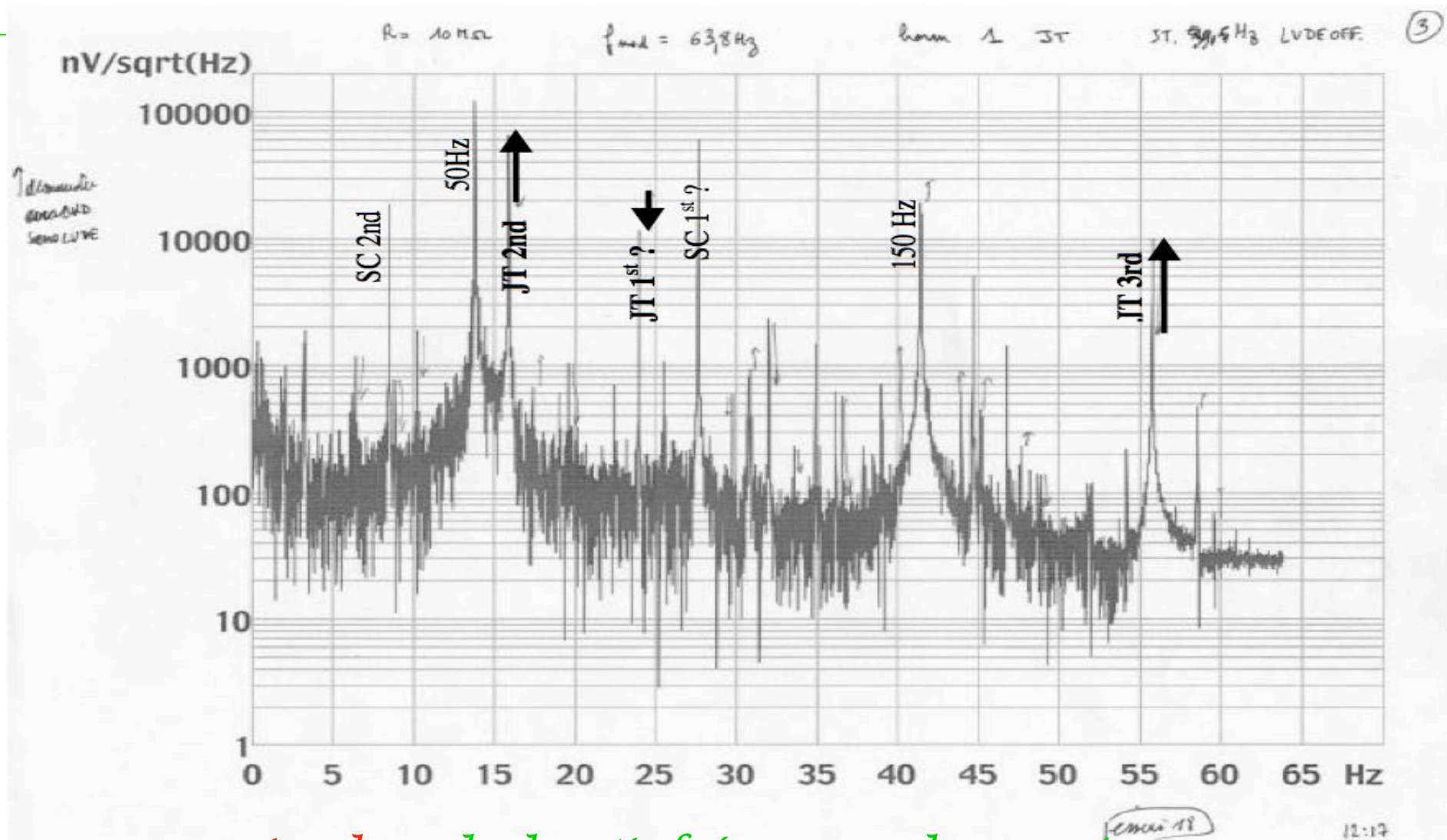
Moy ==> Valeur Vraie

Dispersion: « Bruit »

$$\text{Bruit} : \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (\text{Mes}_i - \text{Moy})^2}$$



Notion de Spectre de bruit



Analyse du bruit: fréquences bruyantes

Mécanisme de Bruit: Bruit optique

La lumière est véhiculée par des Photons

Flux moyen macro. + fluctuations aléatoires (Poisson):

Bruit "de Photons": $P_{ph} = (P_{opt}(\nu) h\nu / \Delta t)^{1/2} \text{ W/Hz}^{1/2}$
Spectre « blanc » (plat)

Sources de bruit:

Le signal (:-)! Constant à l'échelle de la vie de l'observateur

Rayon IR de l'environnement

1. Miroirs et optique froide
2. Cryogénie
3. Atmosphère

Ces *sources* peuvent être *variables!*

Mécanisme de bruit: bruit thermique du bolomètre

Bolomètre Isotherme

Capa. Calo. C

Fuite Thermique g

Méca. Stat. + ensemble
canonique

Fluct. de tempé. Thermodyn.

Puis. Eq. de bruit

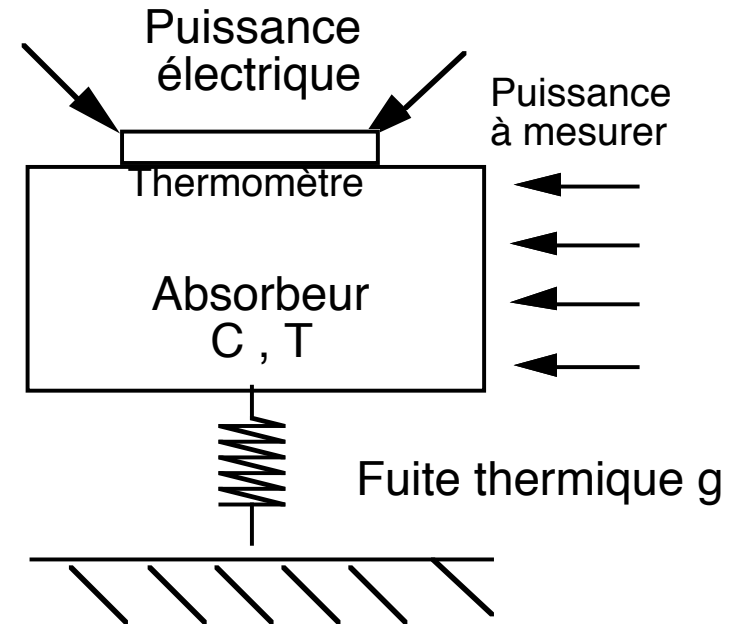
$$P_{th} = (4k_b T^2 g)^{1/2} \text{ W/Hz}^{1/2}$$

Bruit « blanc »

+ Tout ce qui chauffe!

Parasites optiques, radioactif,
électrique

Bruits « structurés »



$$\sigma_{nth} = \sqrt{\frac{P_e}{R}} \propto \frac{R}{T} \frac{P_n}{g} = \alpha \frac{\sqrt{R P_e}}{\frac{P_e + P_L}{g} + T_0} \frac{P_n \sqrt{B_d}}{g}$$

Mécanisme de bruit:

Bruit Thermométrie - bruit de lecture

Thermomètre résistif: R_b

Agitation therm e-

$$e_{nth} = (4kTR_{th})^{1/2} \text{ V/Hz}^{1/2}$$

$$\dot{i}_{nth} = (4kT/R_{th})^{1/2} \text{ A/Hz}^{1/2}$$

Ordre de grandeur:

100 mK, 10 M Ω

qq nV/Hz^{1/2} et 1 fA/Hz^{1/2}

Bruit « blanc »

Bruit propre élec. Lecture.

e_{nel}, \dot{i}_{nel} nominal: « blanc »

Composante 1/f.

Ordre de grandeur: JFET

$$e_n \sim 1 \text{ nV/Hz}^{1/2},$$

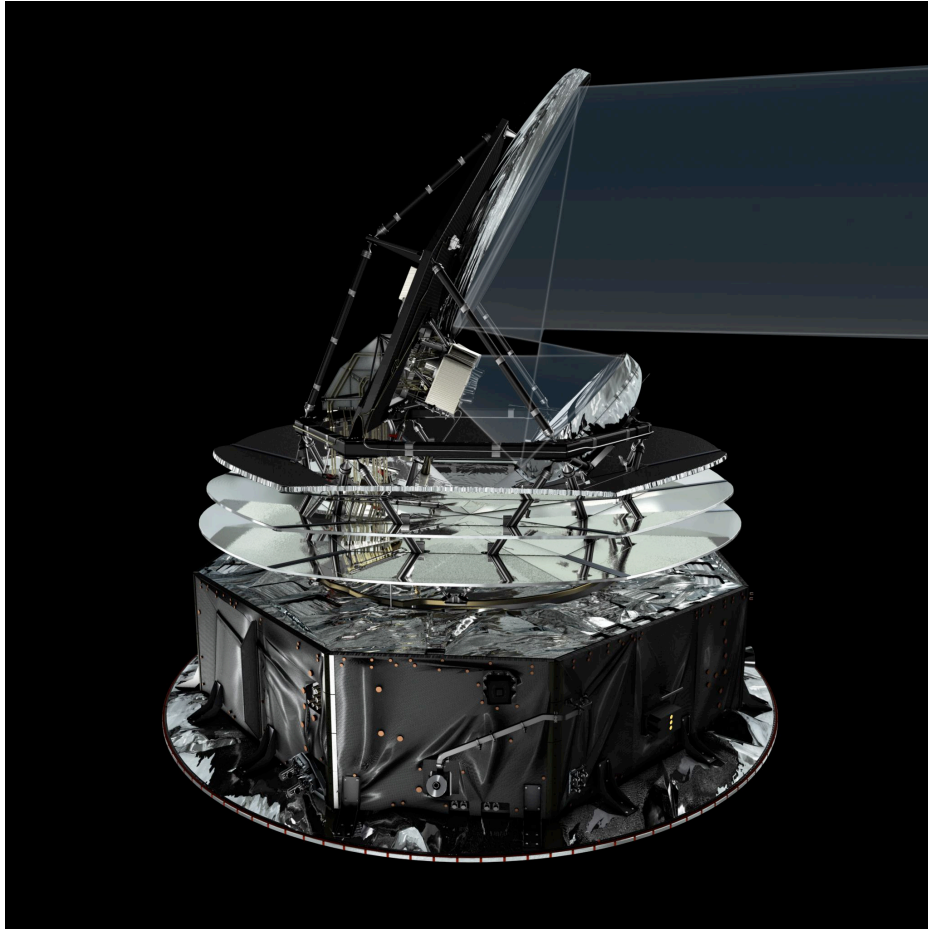
$$\dot{i}_n \sim 0.1 \text{ fA/Hz}^{1/2}$$

Genou $\geq 10\text{Hz}$, Détec.

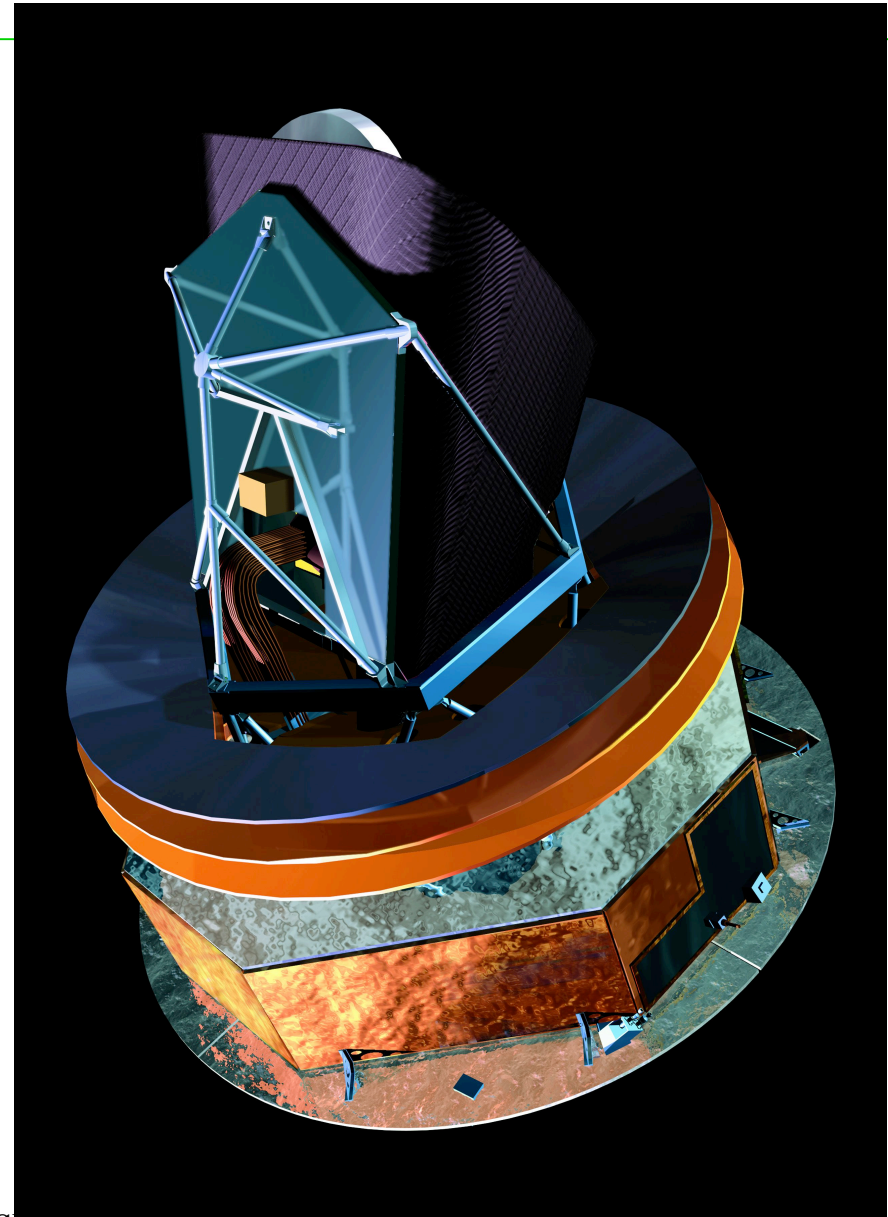
Synchrone

$$\sigma_{nel}^2 = e_{nth}^2 + e_{nel}^2 + (R_{th} i_{nel})^2$$

Le satellite Planck/HFI



Vues d'artistes ESA/Planck



La chaîne de lecture Planck/HFI

Vue d'ensemble

Un constat alarmant

Mécanismes de bruits et leurs solutions

Chaîne de lecture Planck/HFI

Bolos

50 nV rms

1 fA rms

Câbles: 1,5 m

JFET Box

50 nV rms

1 pA rms

Câbles: 7 m

PAU

Ampli. $\times 1000$

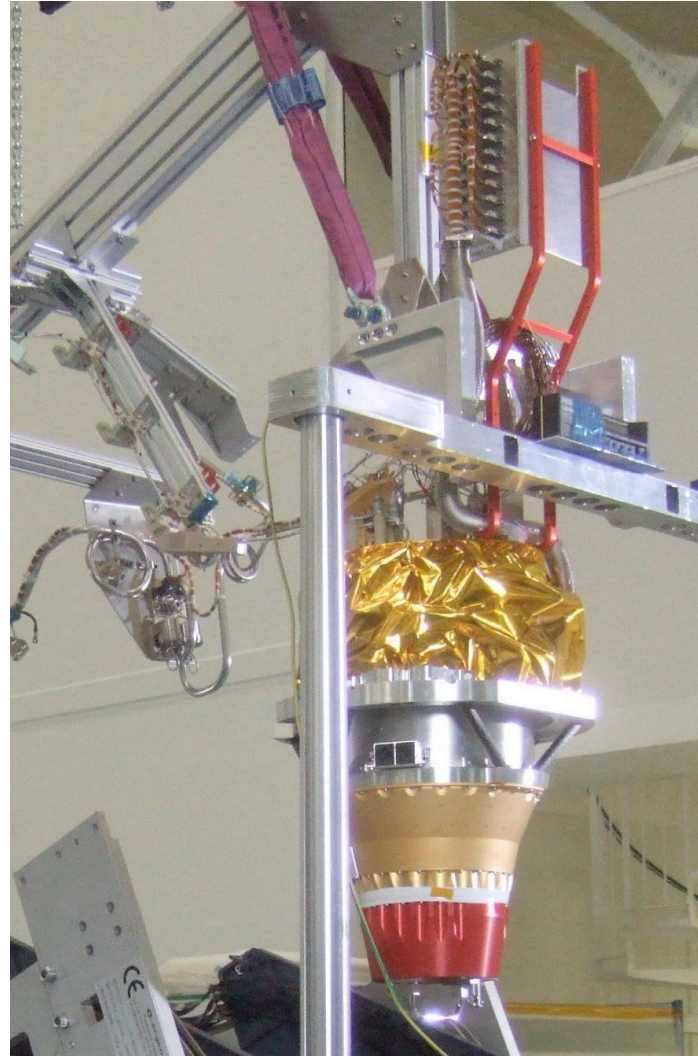
50 μ V rms

Câbles: 5 m

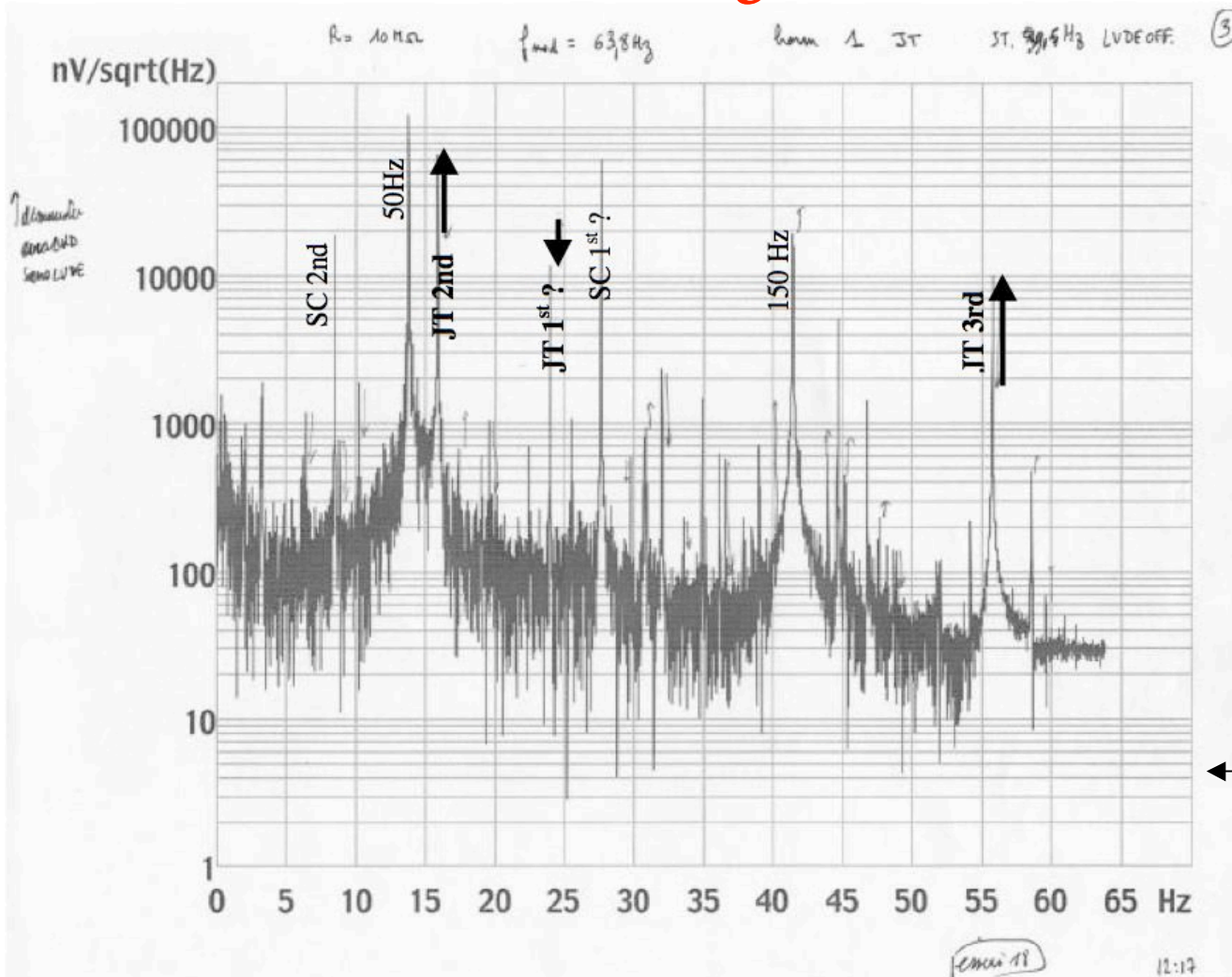
REU

Post-Ampli

Numérisation



Mon bolomètre fait de la fièvre C'est grave docteur?



Premier démonstrateur
Planck/HFI ~ Juin 2000

Bruit Nominal
Bolos Planck/HFI

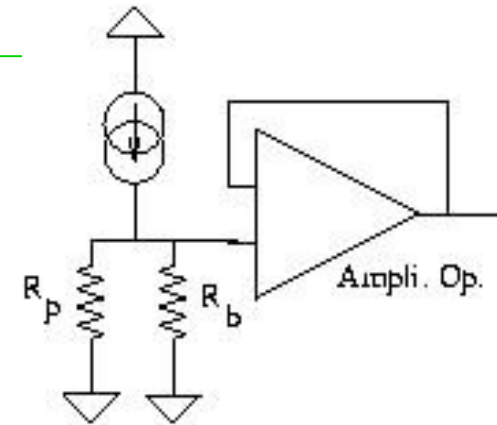
J'ai une bien mauvaise nouvelle: La réponse est*oui*...

Parasitage: Microphonie Tribo-électricité

Onde mécanique => signal électrique

Flux Coupé, Couplage capacitif

Rigidifier les câbles, la lecture



Triboélectricité

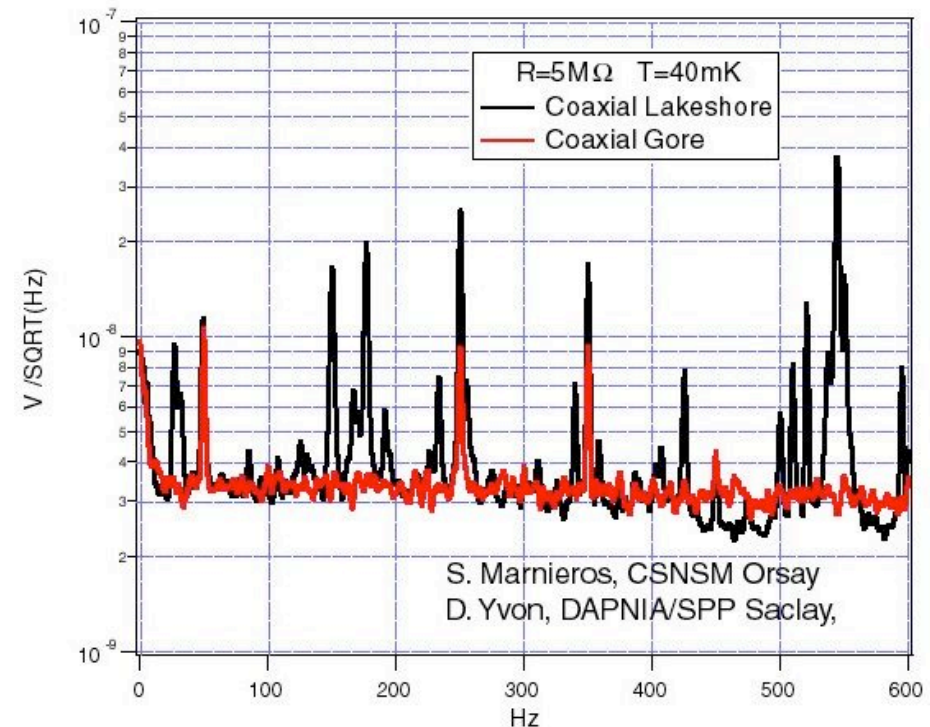
Effet peau de chat

=> Traitement de surf. sur
isolants des câbles

Contraintes de Cryogénie

=> Fab. sur mesure

Ca marche!



Parasitage (EMI) en mode conduit

Satellite Bruyant:

qq kW, Alim. Conv. DC/DC, Moteurs (80Hz), bus info.

Appels de courant $< 1A$ à n'importe quelle fréquence

Couplage capacitif ou conception maladroite

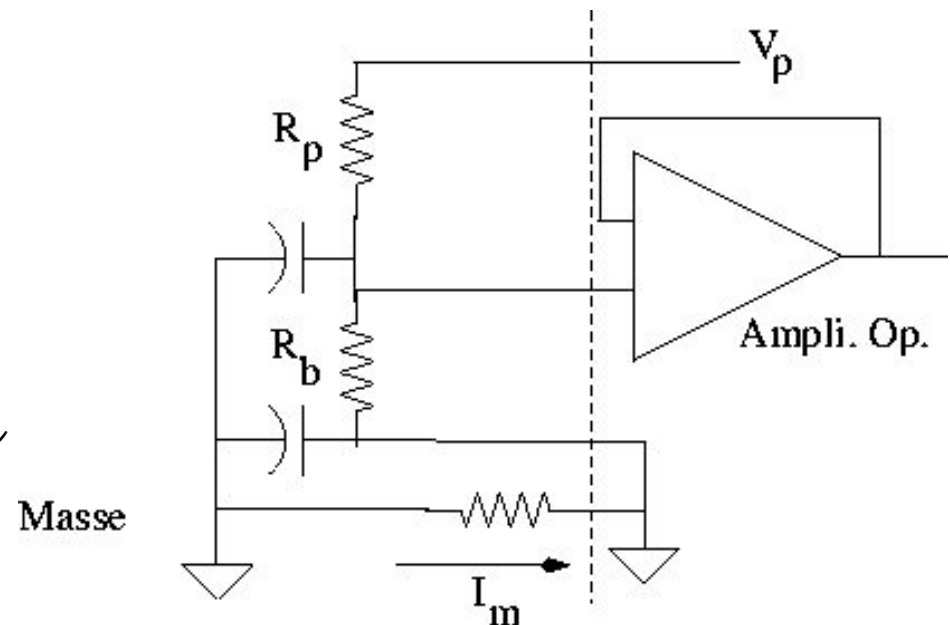
Propagation dans structures mécaniques et blindages.

La masse est bruité et résistive

Notre mesure:

$\sim 10^{-16} W$, qq. fA, 12nV.

Quelques mécanismes de parasitage.



Parasitage en mode conduit

Lecture différentielle.

Lecture différentielle:

Plus robuste

Symétrie méticuleuse de la chaîne de lecture.

Identifier

les sources : Liste de « Menaces »

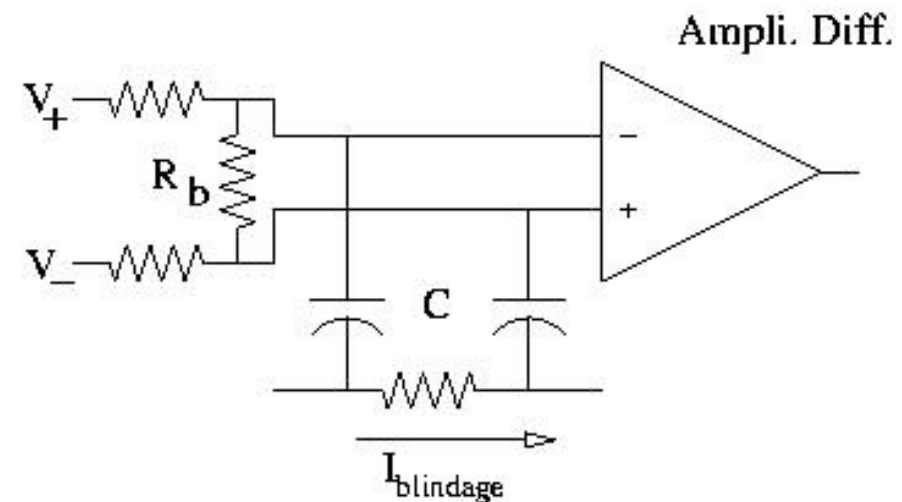
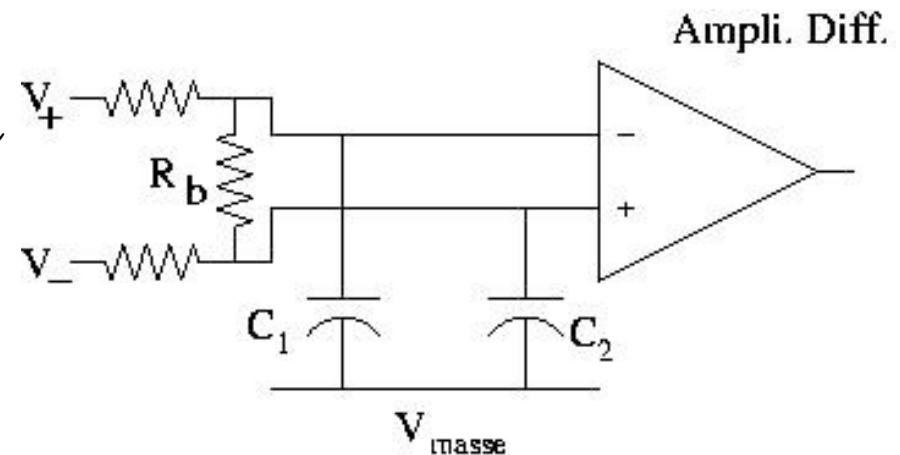
les zones susceptibles (Ou ça fait mal)

Batir une électronique robuste

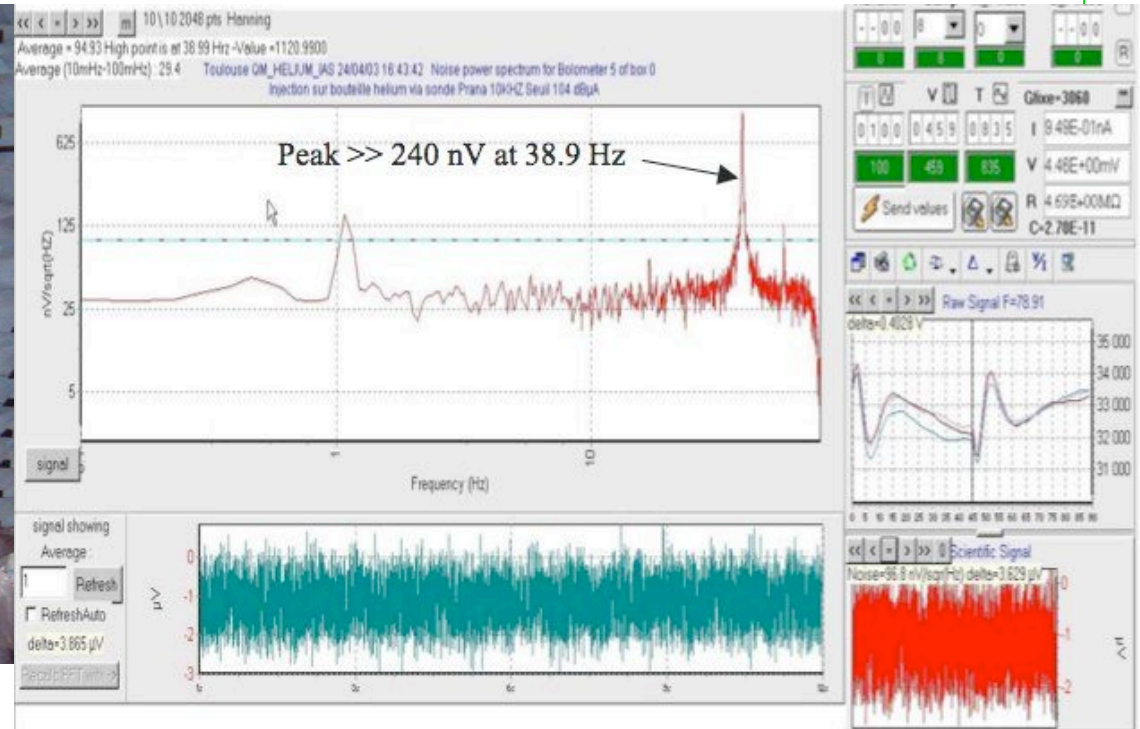
Méthodes EMC

La tester: Spec. satellites.

Raffiner....



Test - chaîne de lecture



Modèle d'instrument représentatif (heum!)

Module de service: On excite les alims

Courants sur alims, les blindages, $I \leq 1A$ (Spec. Satellites)

PAU, REU + Bouchons OK.

On regarde plus loin:

Plus simulateur Bolo non! 10 nA sur bouteille => pic

Que faire de plus?

Minimiser

Courants de masse, Susceptibilité (Toute la chaîne!)

Identifier

les « Menaces » : LFI, Machines cryos, Moteurs (10 A @ 80Hz), antennes.

les zones susceptibles : Hautes impédances, petits signaux.

Calculer (Modèle qualitatif, pifométré)

Propagation Courants de masse: Plan méca. du satellite ==> Plan électrodyn.

==> Mécanismes de parasitages: Lesquels sont importants.

Intervenir

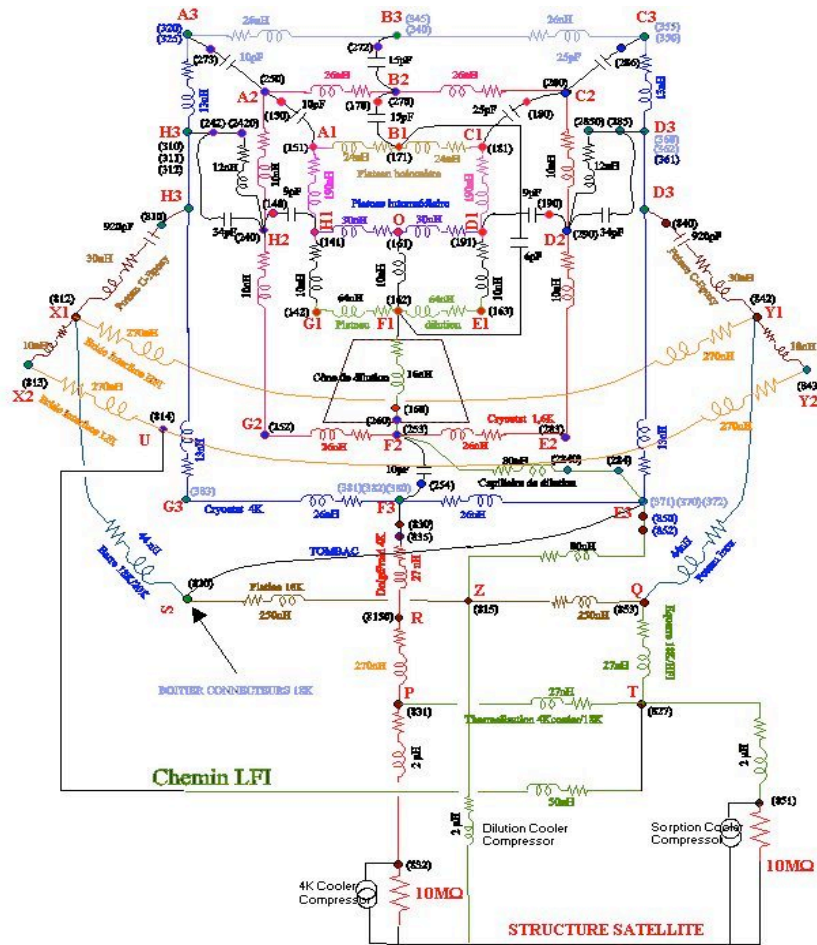
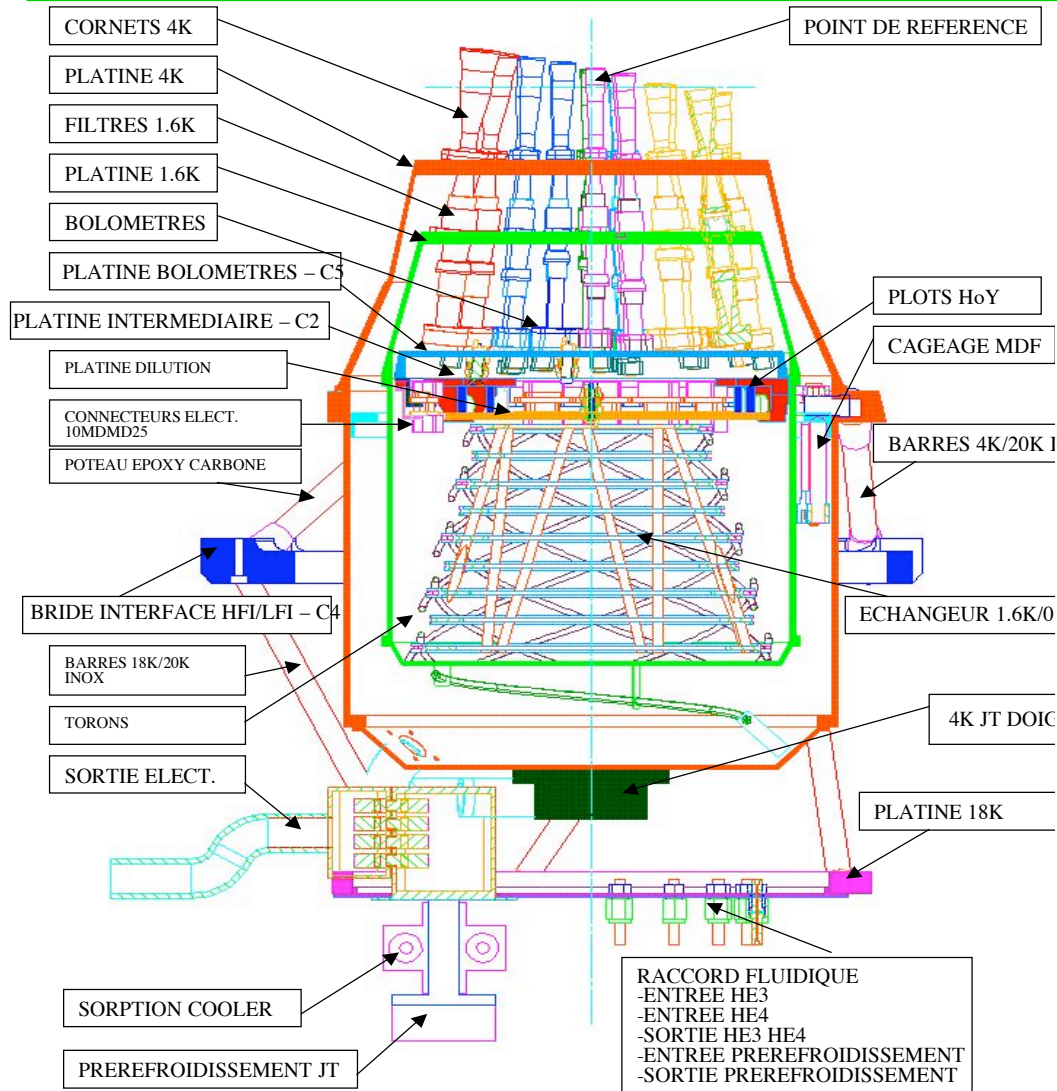
Mécanique, cryogénie (Isolations électriques)

Electronique, câblage,

Autres manips (HFI), Satellite (placement des sources),

Compromis!: Groupe Système

Circulation de courant - Structure mécanique



J. Panh, J. Demas (CNES/EMC)
D. Yvon, CEA-Saclay

Quelques réalisations/isolations

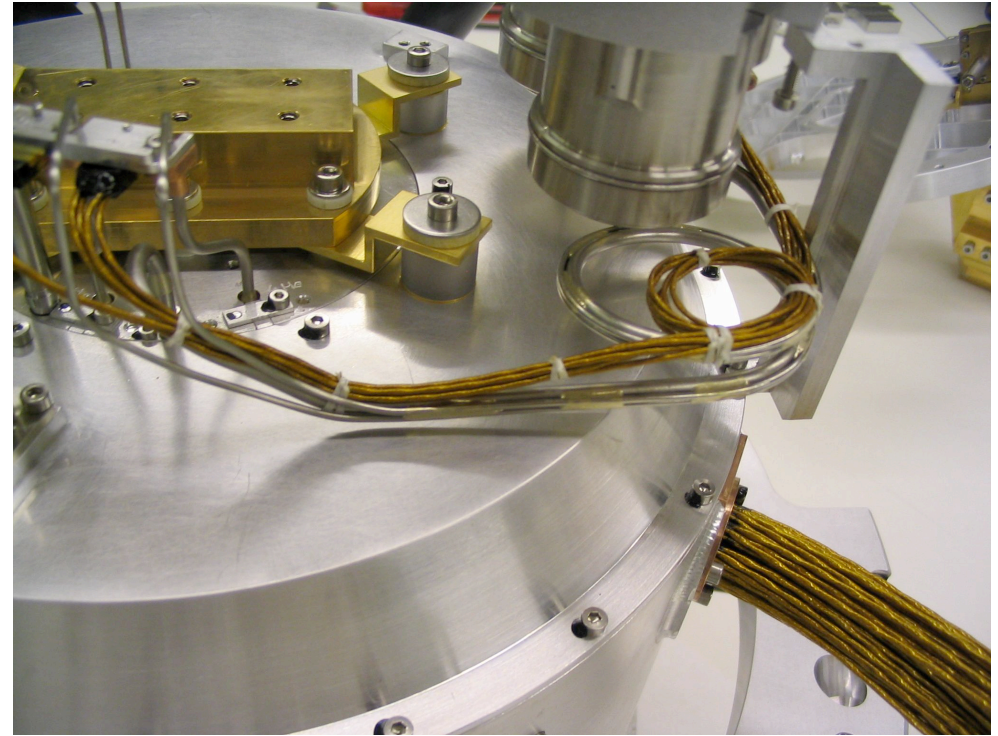
Trois murailles défensives

- Isolation sortie module de Service
- Plaquage masse sur écrans thermiques
- Isolation du plan focal

~20 ruptures de continuité masse

Cas particuliers

Isolation Electrique, *Mais*
Contact thermique
Circulation Gaz 100 bar..



Contamination en mode rayonné

Onde EM dans blindage ==> Courant ==> EMI Conduit

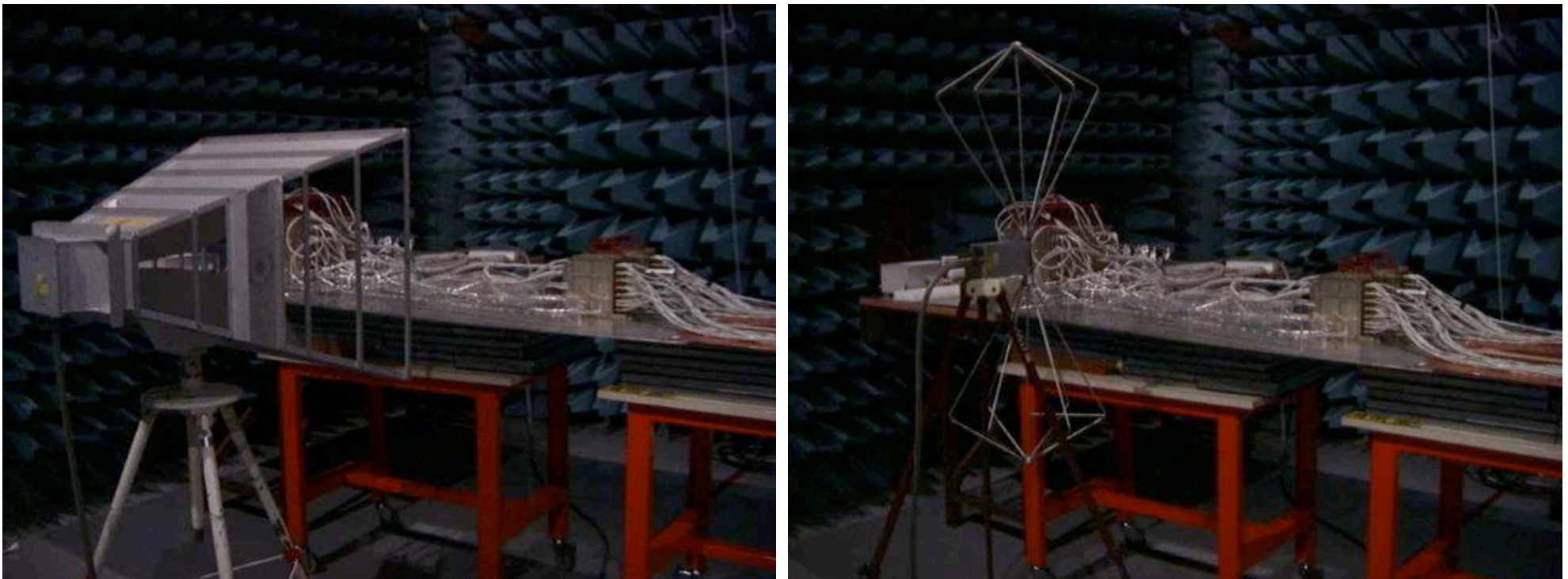
1_ Avoir de bon blindage (Pb en cryogénie).

2_ Bien traiter les EMI conduites.

3_ Tests antennes, E, B, 30Hz ----->300 MHz et plus!

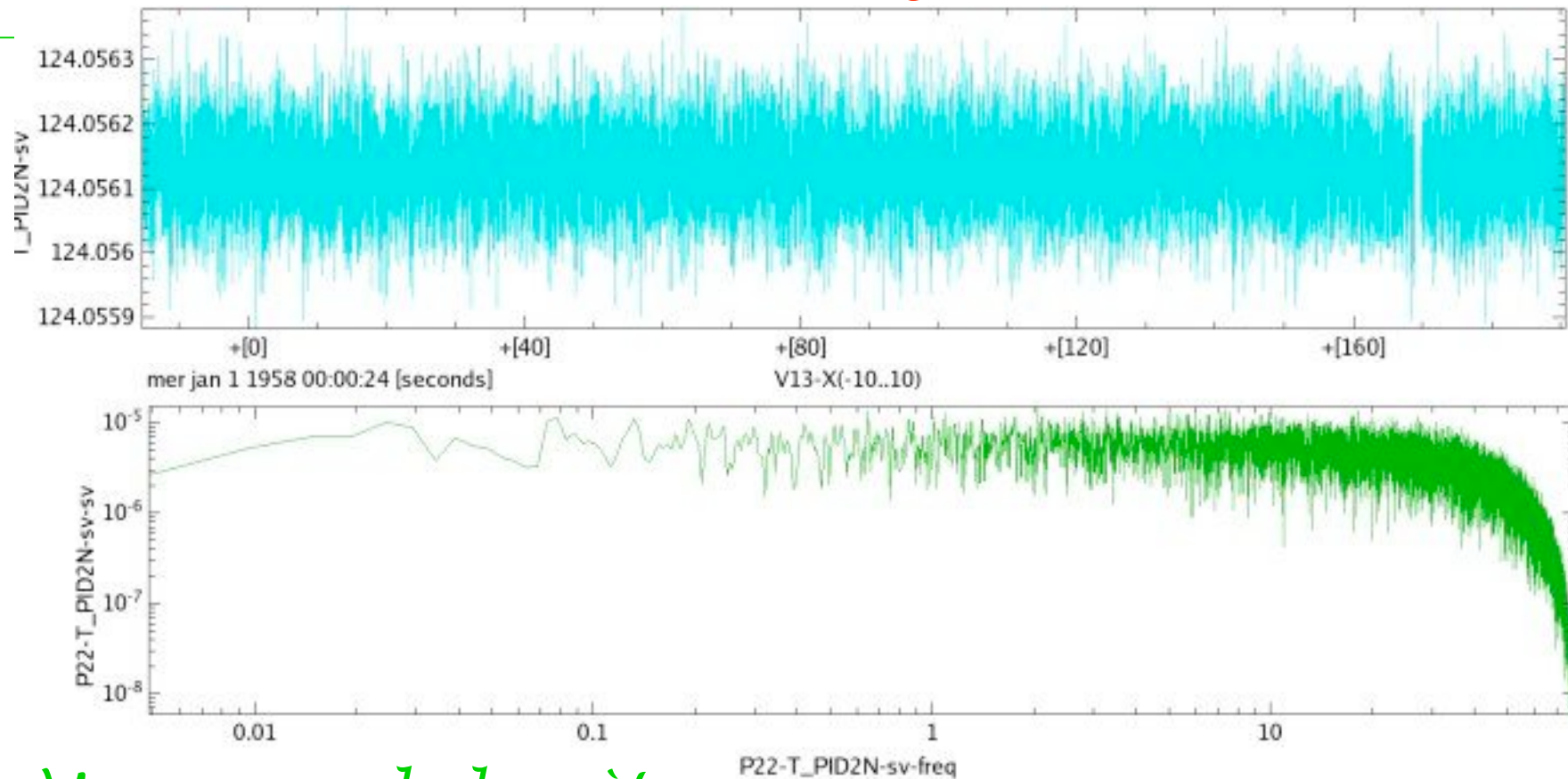
Jusqu'à 10V/m!, 1 Tesla au REU

En final, (3 itérations) non susceptible (REU limitée!)



La beauté du résultat!

Banc de étalonnage Planck/HFI

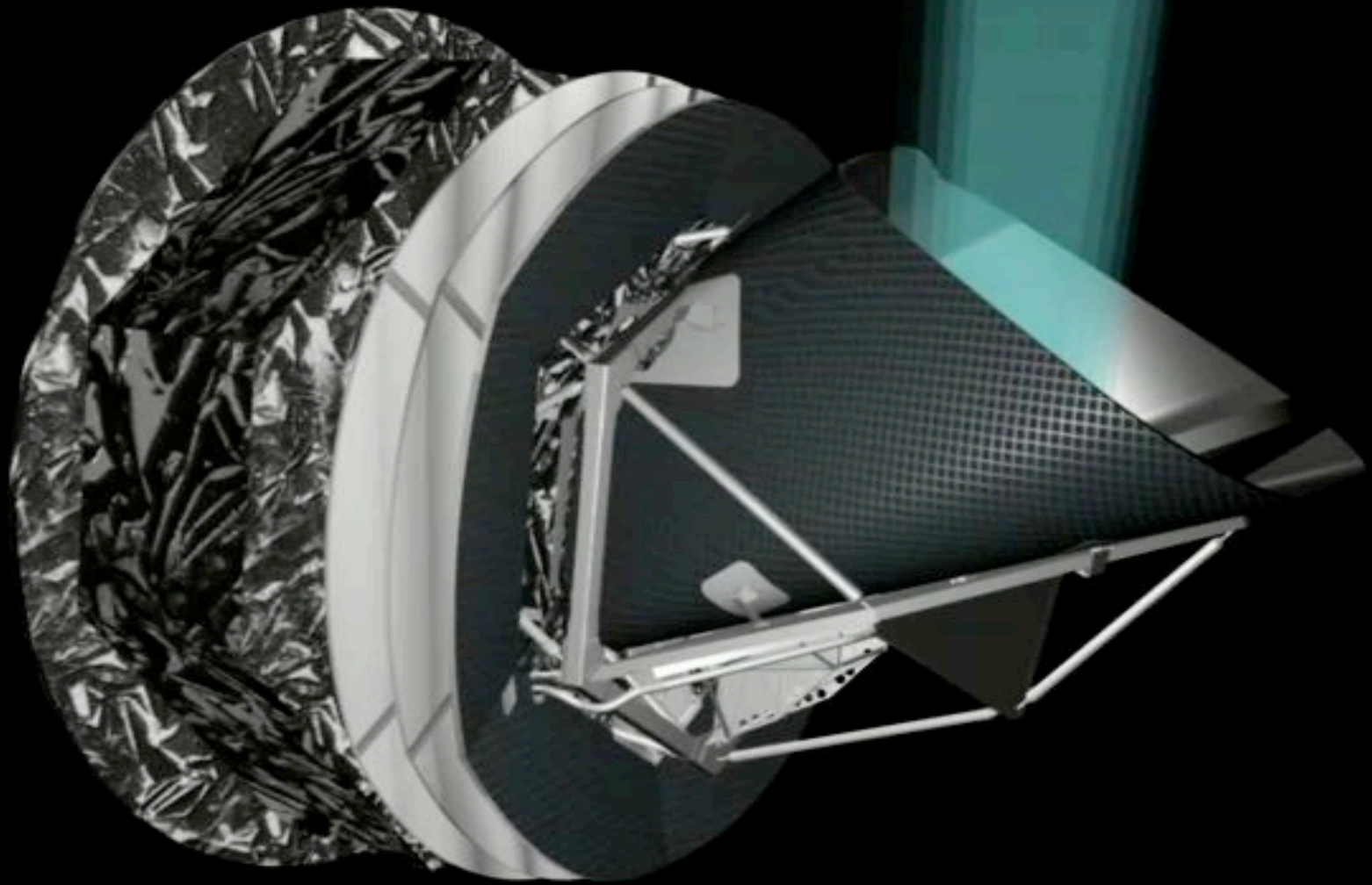


Mesure sur bolomètre

Bruit blanc, nominal entre 0.01 Hz et 80 Hz

On est content!!!!





Avant Plans



Propagation ~ 15 Gans: **Avant Plans**

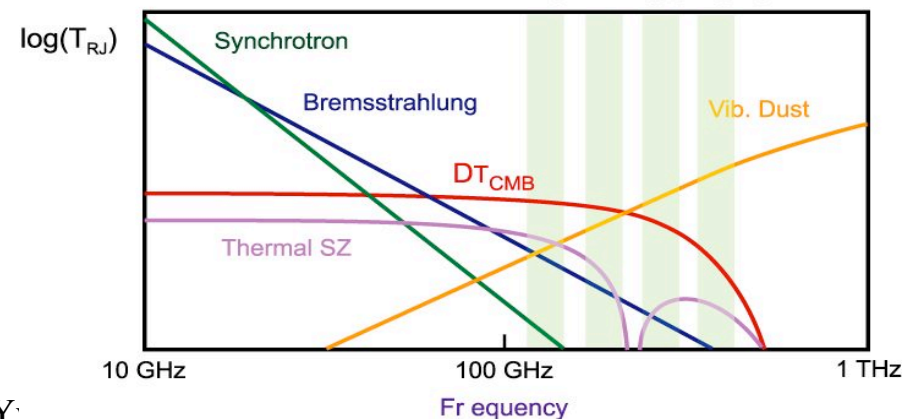
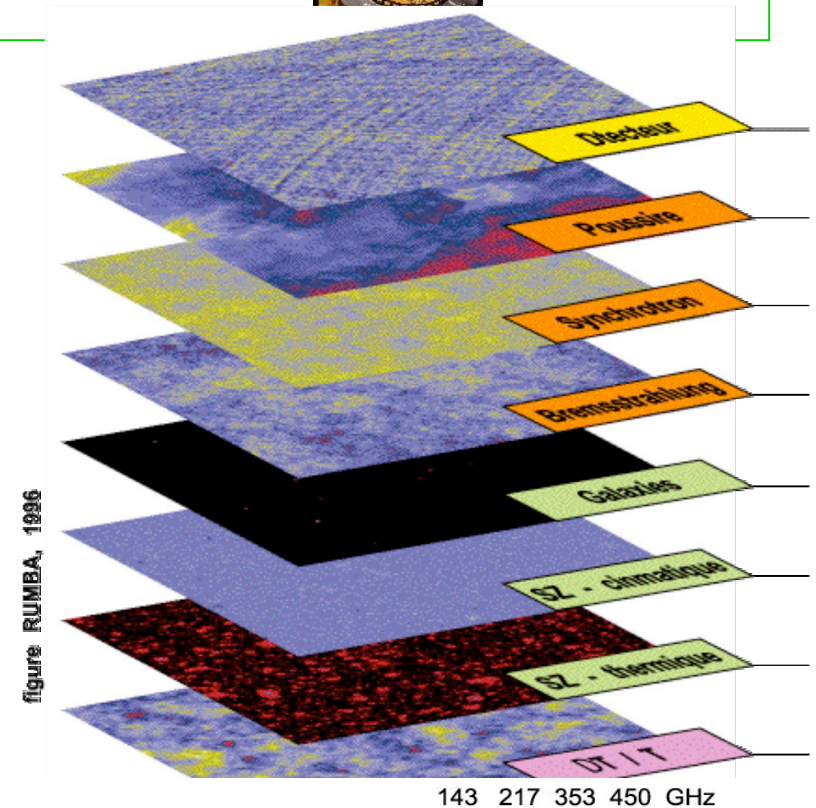
- Poussière Galactique C. Gris, 20K
- e^- dans champ B Galactique
- Rayon. Freinage $e^- - e^-$
- Galaxies IR
- Gaz Chaud Amas de Galaxie (SZ)

+ Effets instrumentaux

Séparation des composantes Physiques

Spectre freq. (Obs. Multifreq.)

Corrélations Spatiales.



Carte Plein Ciel WMAP (2003)

Météologie du FDC non polar

Notre Univers paramétré:

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.00 \pm 0.02$$

$$\Omega_{\text{m}} h^2 = 0.22 \pm 0.003$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73 \pm 0.04$$

$$\Omega_{\nu} h^2 < 0.0076 \quad (95\%)$$

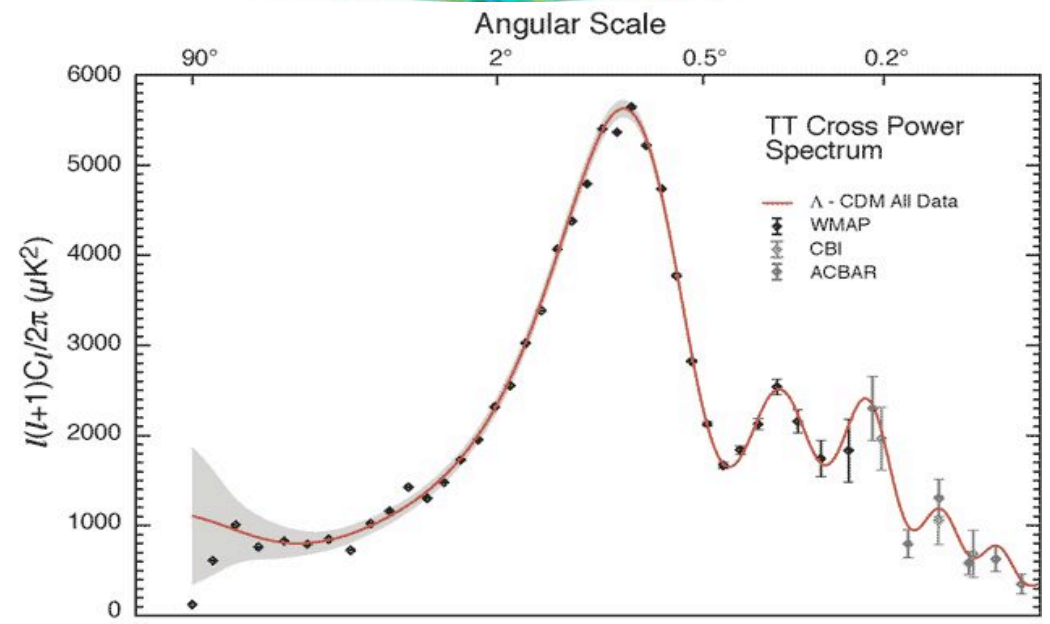
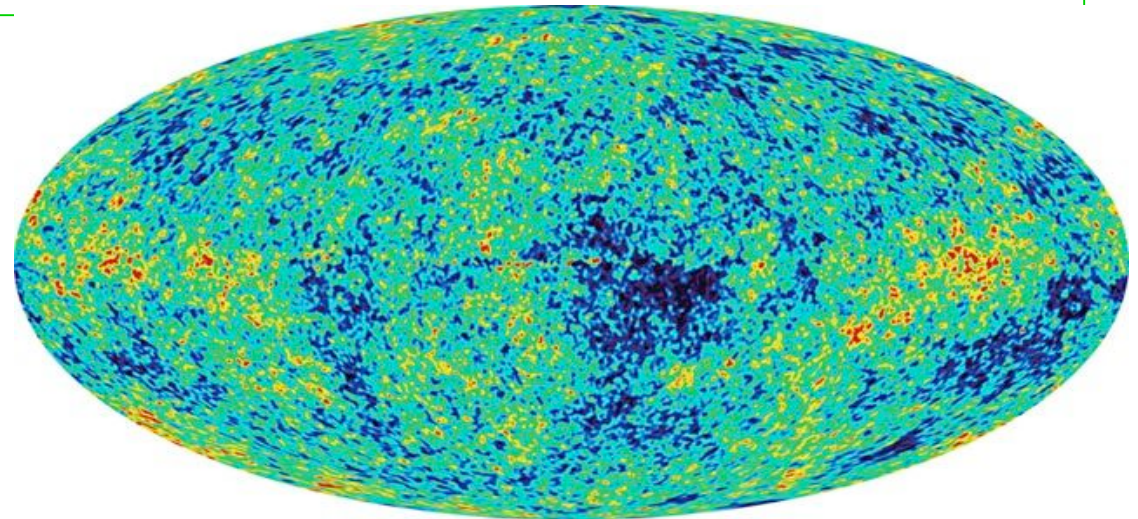
$$\tau_c = 0.17 \pm 0.04$$

$$n_s = 0.97 \pm 0.03$$


$$n_s = 0.93 \pm 0.07$$

$$dn_s/d\ln k = -0.047 \pm 0.04$$

+ *HST*



Pour conclure

- Les *bolomètres* sont d'une sensibilité phénoménale et exigeants.
- Exploiter leur qualités demande une conception globale.
instrument Electronique, EMI/EMC, Cryo., etc...
- C'est aussi un travail de physicien, mais pas seul!
- Johan Panh, Jean ud, Guy Guyot, Cydalise Dumesnil.

• IAS: *Pascal Eng, Maryse Charra, Antoine Arondel, Véronique Hervier, Jean-Jacques Fourmond, Jean-Pierre Torre... et bien sur Jean-Michel Lamarre*

- CESR: *Jacques Landé, Roger Pons, Julien Demas, Jacques Narbonne, Christophe Marty, Damien Rambaud.....*
- Mille excuses à ceux *nombreux* que j'ai oublié!