

Cosmologie : Expériences

Compte-rendu et Prospective
Groupe de travail Cosmologie

R. Ansari, P. Astier, M. Arnaud, J. Bartlett,
F. Bernardeau, F. Couchot, J. Delabrouille,
L. Dumoulin, Y. Giraud-Héraud, J. Kaplan,
M. Moniez, R. Pain, C. Pigot, J. Rich,
J.L. Sauvageot, D. Santos, G. Smadja,
R. Teyssier, D. Yvon

J. Delabrouille
PCC - Collège de France
et
Fédération de recherche APC

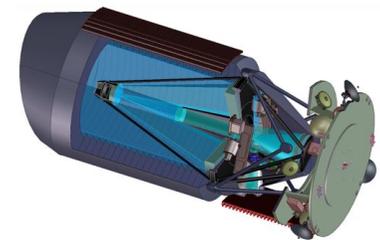
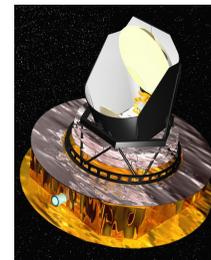
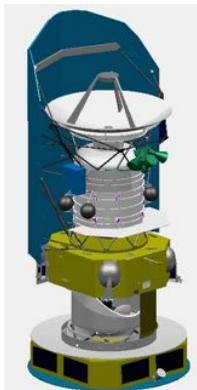
Observations

Problématiques du domaine de la physique fondamentale

- Nature de la matière noire (particule supersymétrique?)
- Inflation (quel inflaton?)
- Nature de l'énergie noire ?

(Existence de défauts topologiques? Universalité des lois de la physique? Topologie de l'Univers? ...)

Méthodes observationnelles

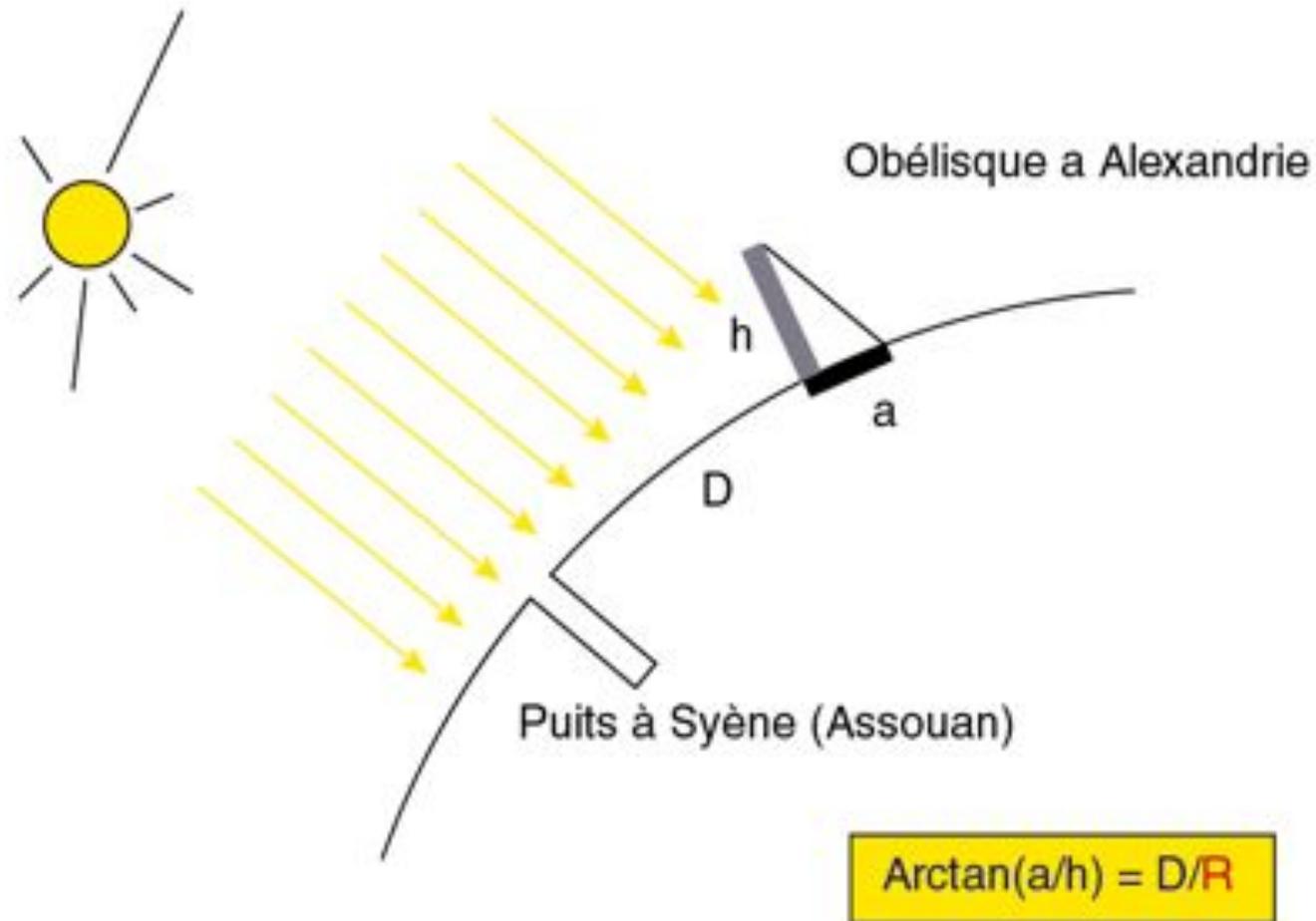


Plan de l'exposé



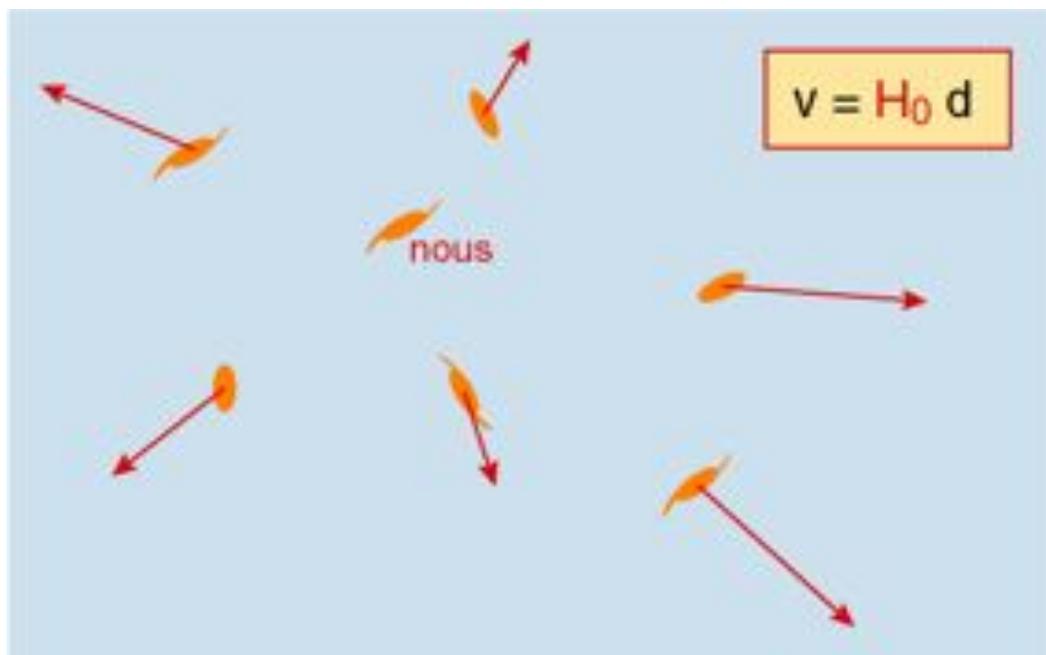
- Observations en Cosmologie
- Les Supernovae
- Grandes structures et amas de Galaxies
- Le Fond Cosmologique
- Quels développements pour la Cosmologie?
- Conclusion

Érathostène et la mesure du rayon terrestre



Mesure par Érathostène, IV s. av. J.-C.
précision 2/1000 !

Expansion



Redshift
 $z = \delta\lambda/\lambda$



Vitesse
 v



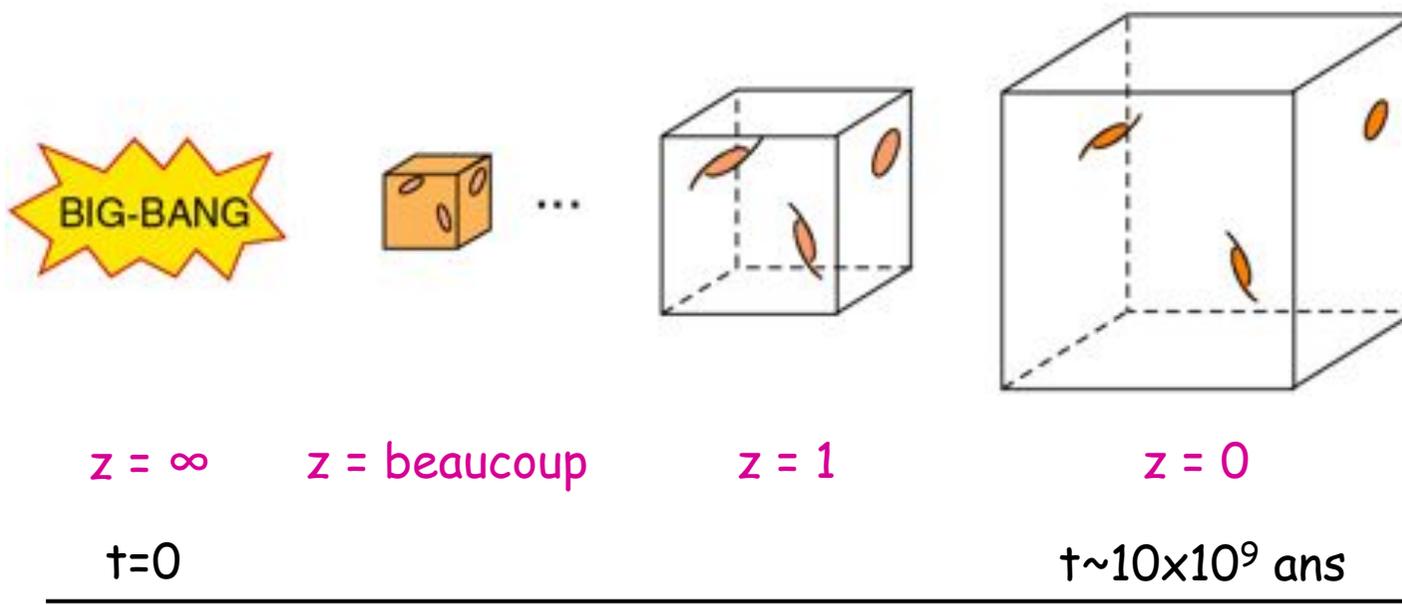
Distance
 d



Temps
 t

z observable

Modèle du Big-Bang



- Univers dense, chaud
 - Univers homogène
- expansion
- gravité
- Univers ténu, froid
 - Univers structuré

Métrie FRW

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right]$$

temps

facteur
d'échelle

espace

$$H^2 = \frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Constante de Hubble

Densité d'énergie

Courbure

Constante cosmologique

$$1 = \sum_x \Omega_x + \Omega_k + \Omega_\Lambda$$

Genèse et évolution des perturbations

INFLATION

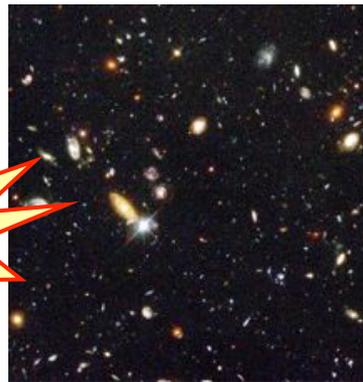
$$\text{Perturbations : } g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + h_{\mu\nu}$$

Évolution

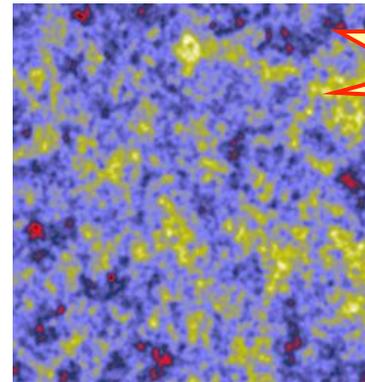
Matière :
Effondrement
gravitationnel

découplage

Photons :
Libre propagation



Grandes structures



CMB



Paramètres Cosmologiques

Expansion :

H, q

Quelle CDM?

Contenu :

$$\Omega_x = 8\pi G\rho_x/3H^2$$

$\Omega_B, \Omega_{CDM}, \Omega_v$

Ω_{total}

Énergie noire :

$$w = P/\rho$$

Λ, w

Nature de l'énergie noire?

Premières fluctuations :

S, n_s, T, n_t

Quelle inflation?

Comment se forment les structures ?

Quelles fluctuations initiales ?

Quelles observations ?

Historique de l'expansion

$H_0, q_0, \Omega_B, \Omega_{CDM}, \Omega_v, \Lambda, w$

- distance de luminosité (SN Ia)
- distance angulaire (taille des amas, comptage d'objets, CMB)
- ...

Mesure directe du contenu

$\Omega_B, \Omega_{CDM}, \Omega_v$

- fraction de gaz dans les amas de galaxies
- pics acoustiques du CMB

Fluctuations

S, T, n_s, n_t

- anisotropies CMB
- polarisation CMB
- grandes structures
- lentilles gravitationnelles

Quelles observations ?

Historique de l'expansion

$H_0, q_0, \Omega_B, \Omega_{CDM}, \Omega_v, \Lambda, w$

- distance de luminosité (SN Ia)
- distance angulaire (taille des amas, comptage d'objets, CMB)
- ...

Mesure directe du contenu

$\Omega_B, \Omega_{CDM}, \Omega_v$

- fraction de gaz dans les amas de galaxies
- pics acoustiques du CMB

Fluctuations

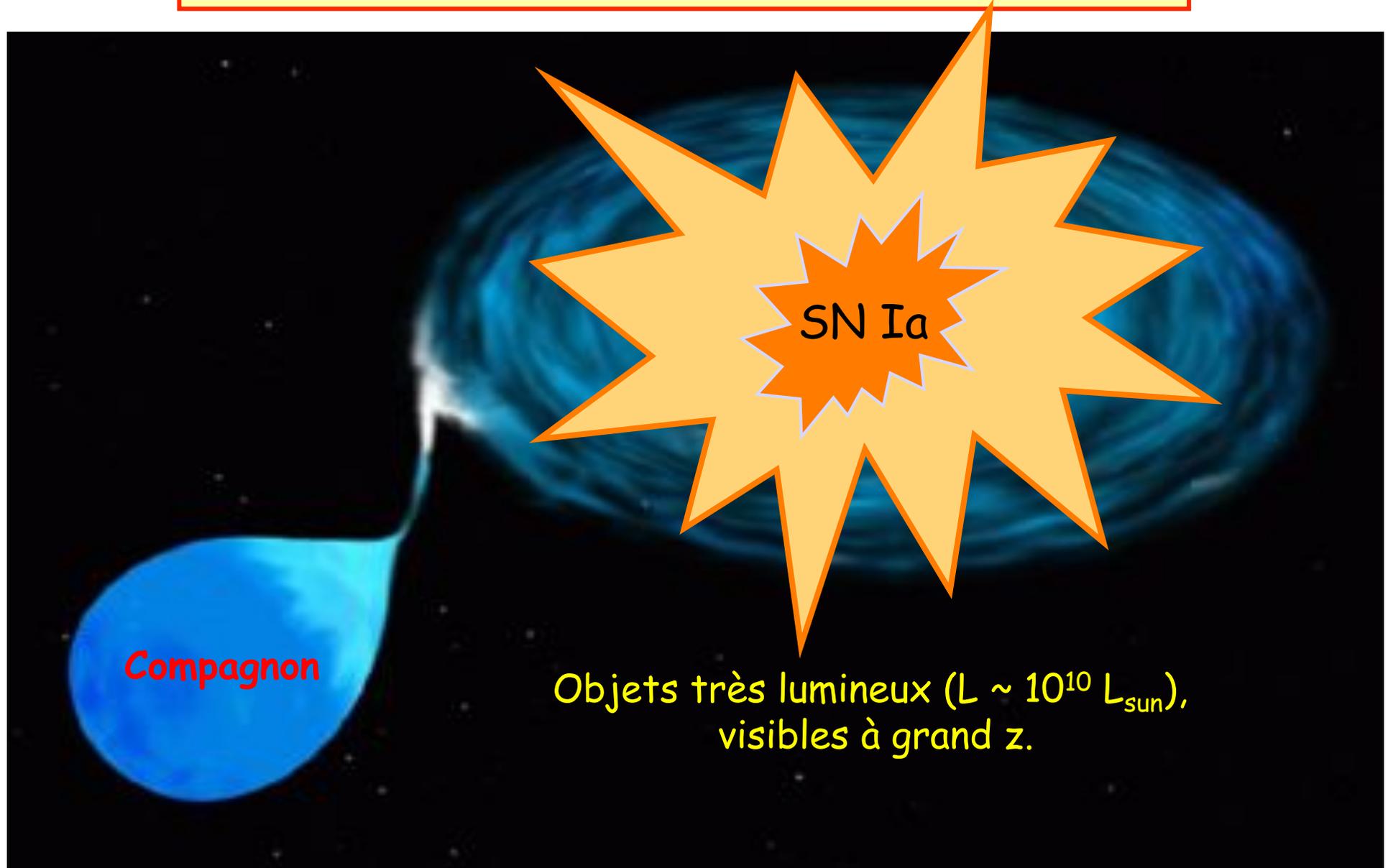
S, T, n_s, n_t

- anisotropies CMB
- polarisation CMB
- grandes structures
- lentilles gravitationnelles

Plan de l'exposé

- Observations en Cosmologie
- • Les Supernovae
- Grandes structures et amas de Galaxies
- Le Fond Cosmologique
- Quels développements pour la Cosmologie?
- Conclusion

Les Supernovae de type Ia



Objets très lumineux ($L \sim 10^{10} L_{\text{sun}}$),
visibles à grand z .

Des SN Ia pour la cosmologie



$$D_L = f(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda \dots) / H_0$$

Distance de luminosité

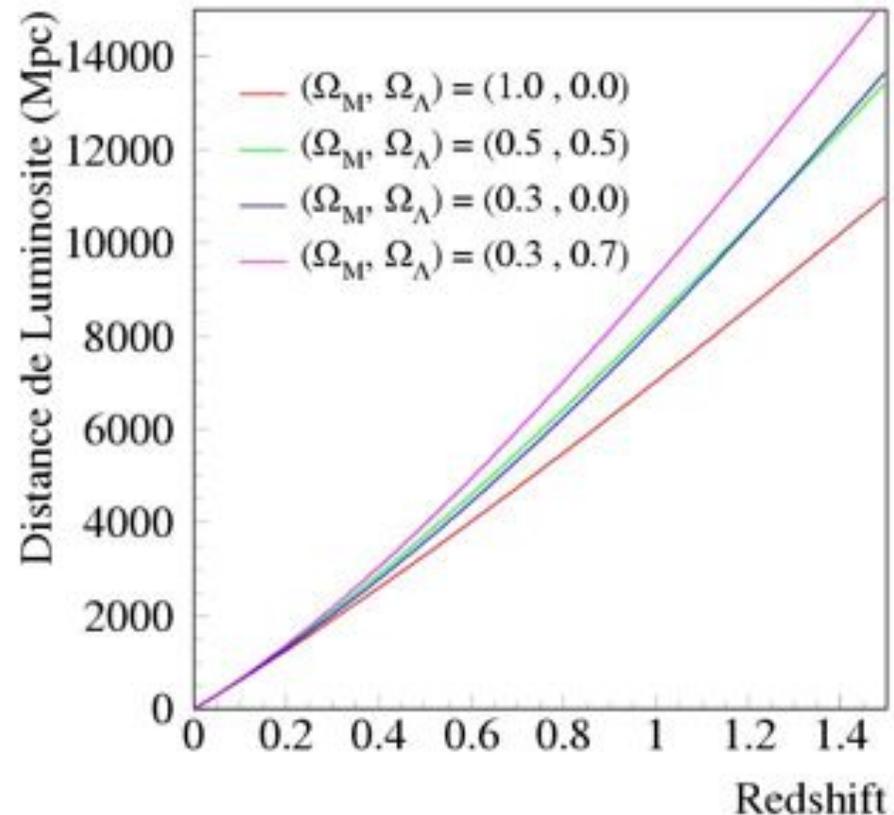
z petit : $D_L \rightarrow cz/H_0$
mesure de H_0

z grand (H_0 libre ou fitté) :
mesure de Ω_m, Ω_Λ

$$D_L^2 = \mathcal{L} / 4\pi F$$

connu

mesuré



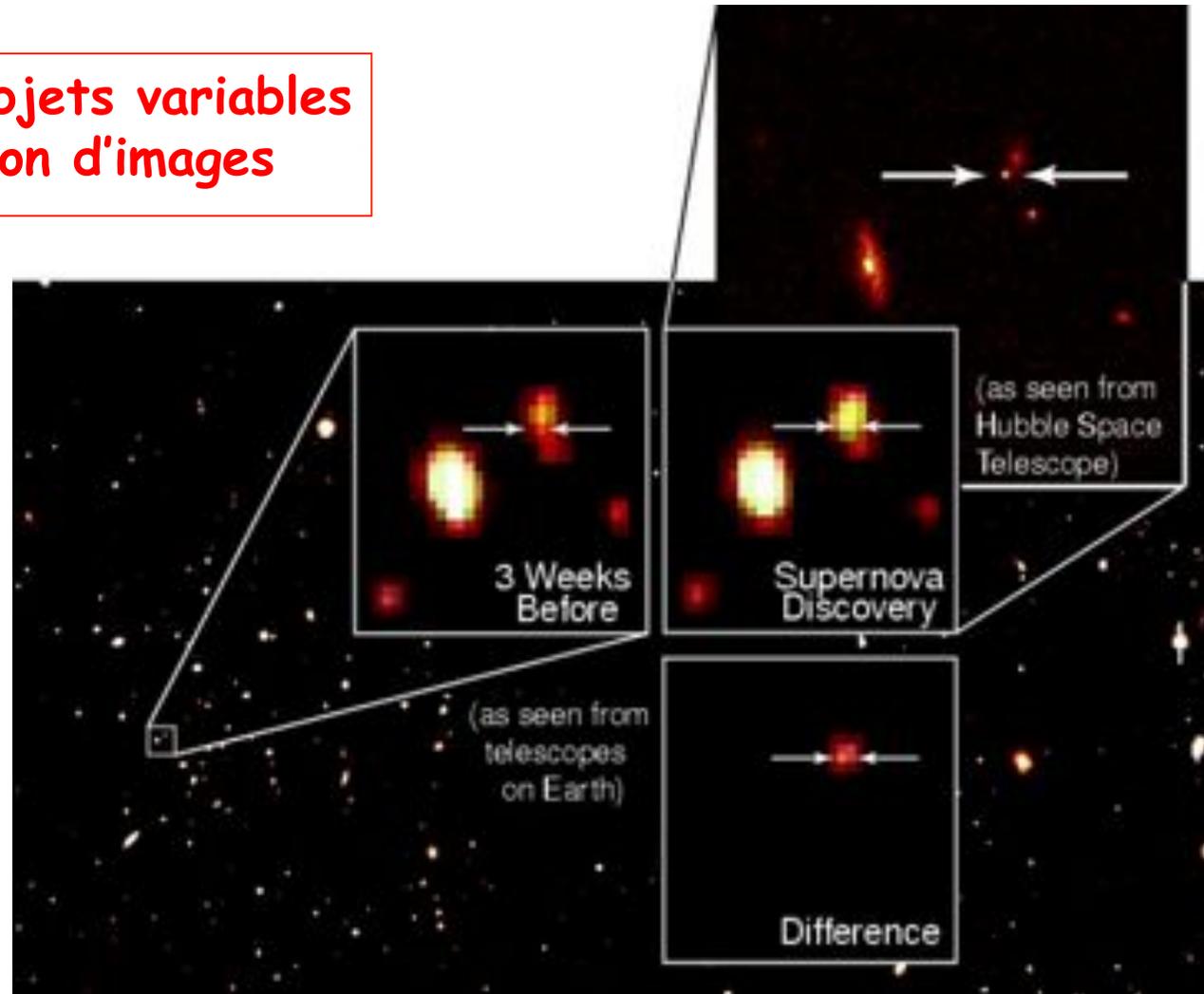
Principe de détection

recherche d'objets variables
par soustraction d'images

- 1/ référence
(galaxies)
- 2/ galaxie + SN

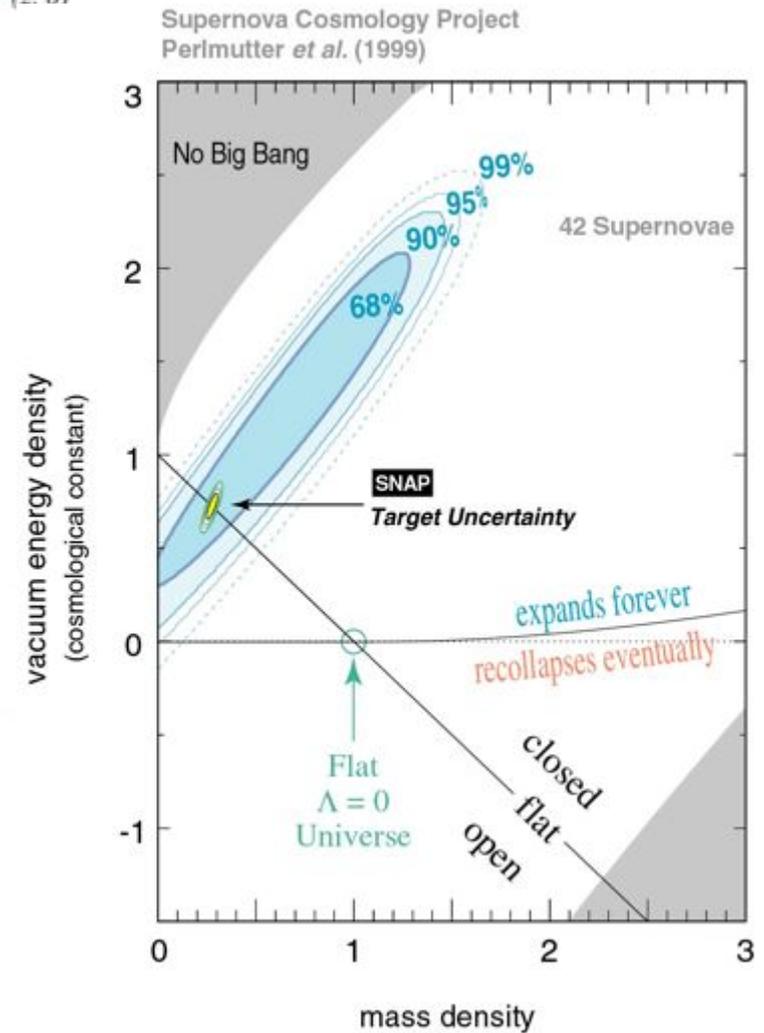
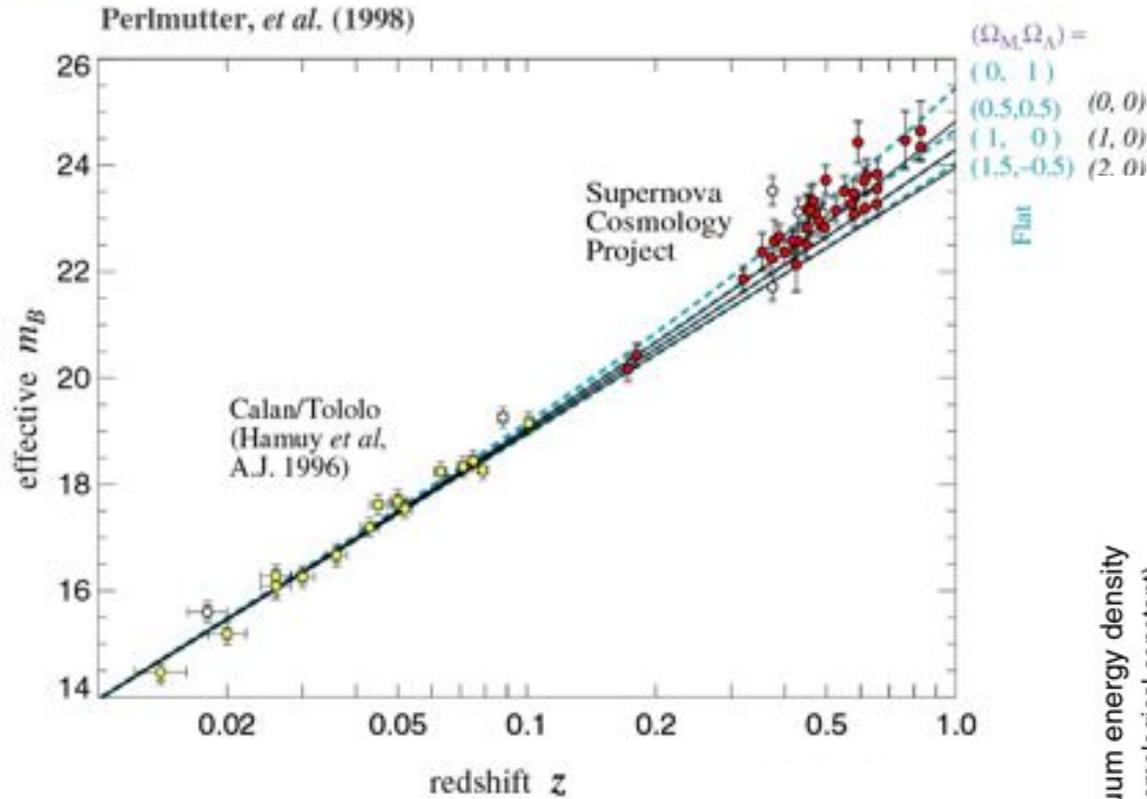


SN
sur image
soustraite



Supernova 1998ba (Supernova Cosmology Project)

Résultats actuels



Si $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$:

$\Omega_M = 0.28 [\pm.085 \text{ stat}][\pm.05 \text{ syst}]$

Améliorer la statistique

à petit z (<0.1) ...

SNF : améliorer la standardisation des SN Ia

300 SN Ia (2003-2006)

- bonne couverture temporelle et spectrale

Classification des SN Ia

- métallicité, type galaxie hôte, temps de montée, ...

... et à grand z (0.3 - 1.2)

SNLS : équation d'état de l'énergie noire

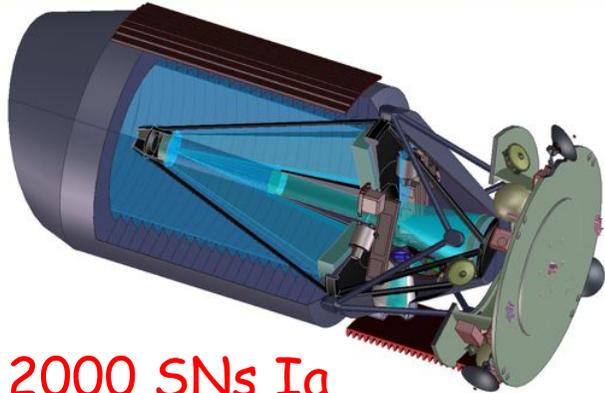
700 SN Ia (2003-2007)

couverture temporelle assurée (prise « continue ») + spectro

→ **Cosmologie à ~10%
Mesure de w**

Équation d'état $p = \rho w$
 $w = -1$: constante cosmologique Λ

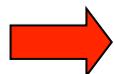
3^{ème} génération : SNAP



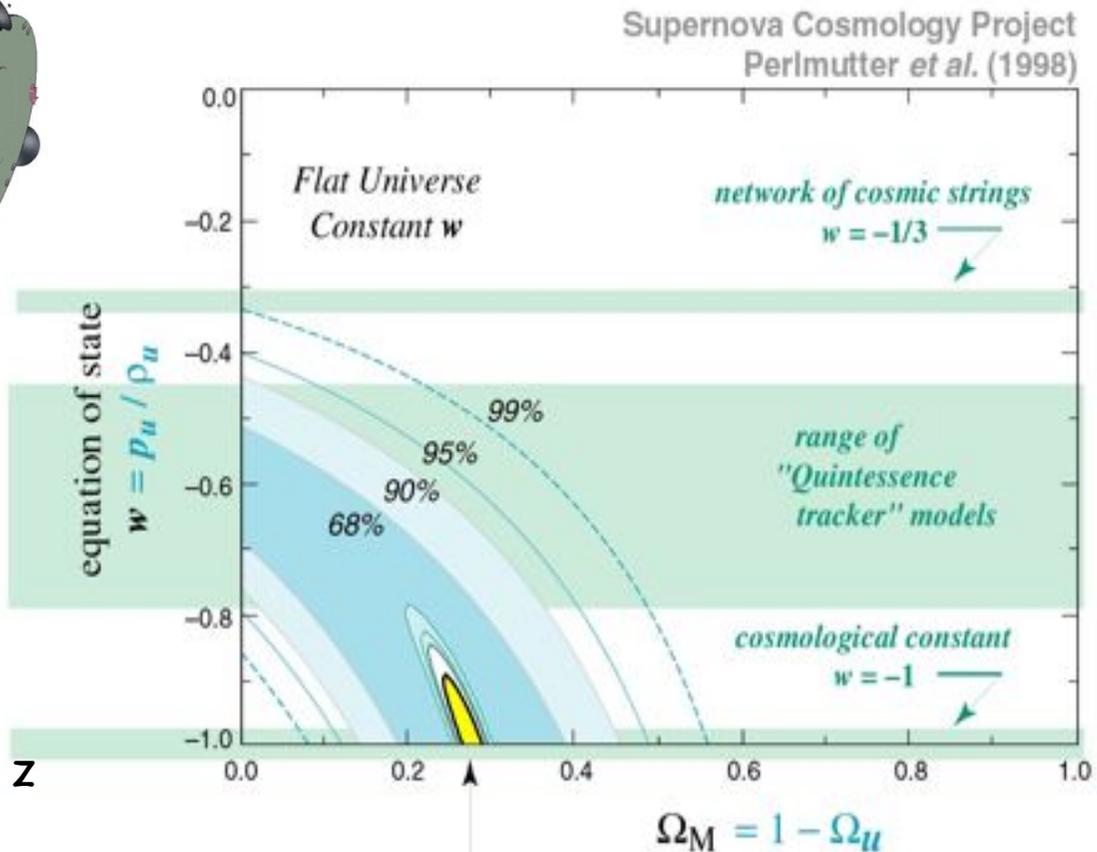
~ 2000 SNs Ia
jusqu'à $z \sim 1.7$

Contrôle des systématiques

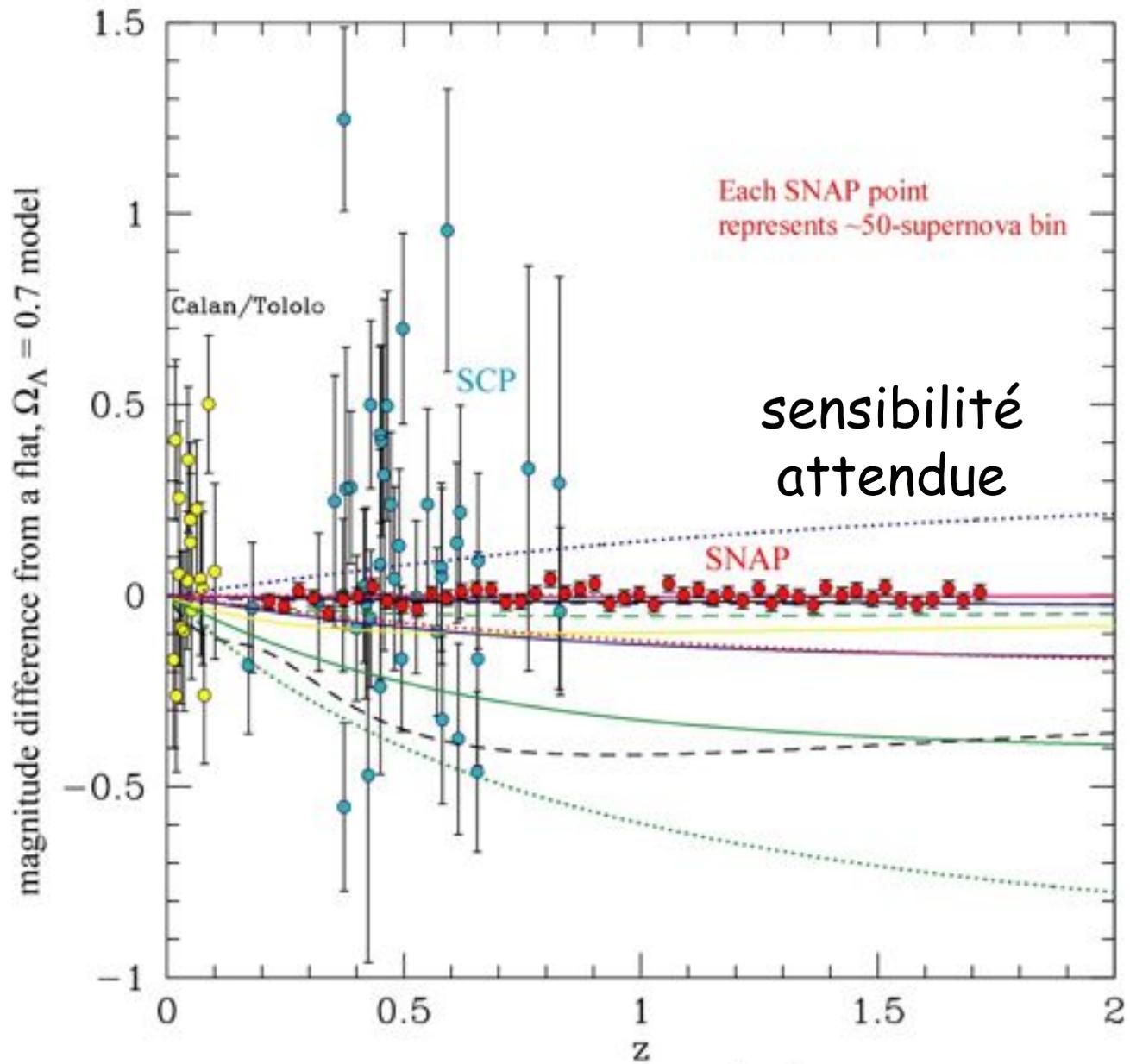
- classification spectrale
- absorption par la poussière
- évolution des SNs
- effets de lentilles $P(k) f^n$ de z



Cosmologie de précision



SNAP Satellite
Target Uncertainty



based on
Weller & Albrecht (2001)

Le programme Supernovae

~25 chercheurs (LPNHE, IPNL, DAPNIA, CRAL, LAM, ...)

1)

Programme sol 2003-2008

- SNIFS
 - Instrument construit par la France (CRAL + IPNL + LPNHE)
- SN Legacy Survey (SNLS)
 - MEGACAM caméra CCD DAPNIA au CFHT
- Collaboration internationale (USA-UE) suivi spectroscopie

2)

SN Acceleration Probe (SNAP) 2009-2012+

- Expérience spatiale (CNES)
- Phase R&D financée (DOE) jusqu'en 2004 (détecteur + électronique)
- DÉCISION en 2004
- Contribution française envisagée: Spectromètre (20M€ consolidé)
- Participation INSU pour les lentilles faibles en cours de discussion

Plan de l'exposé

- Observations en Cosmologie
- Les Supernovae
-  • Grandes structures et amas de Galaxies
- Le Fond Cosmologique
- Quels développements pour la Cosmologie?
- Conclusion

Amas de galaxies



XMM-NEWTON SCIENCE RESULTS

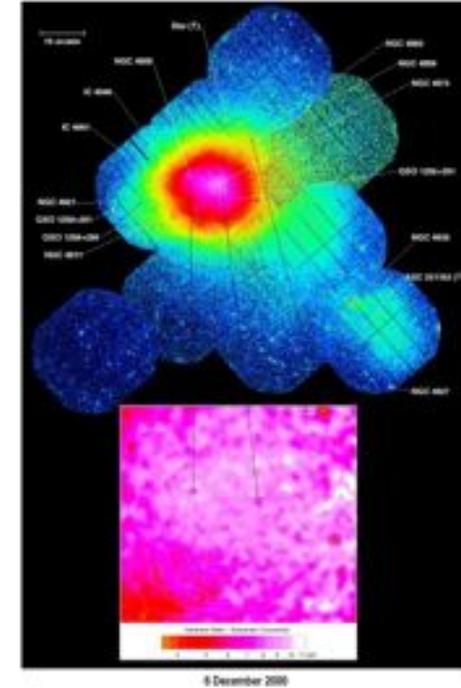


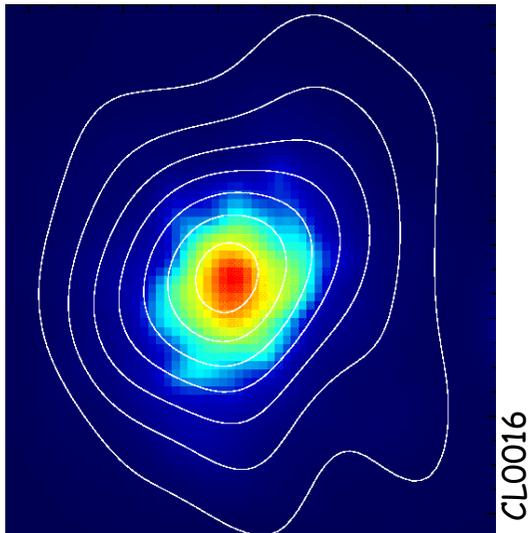
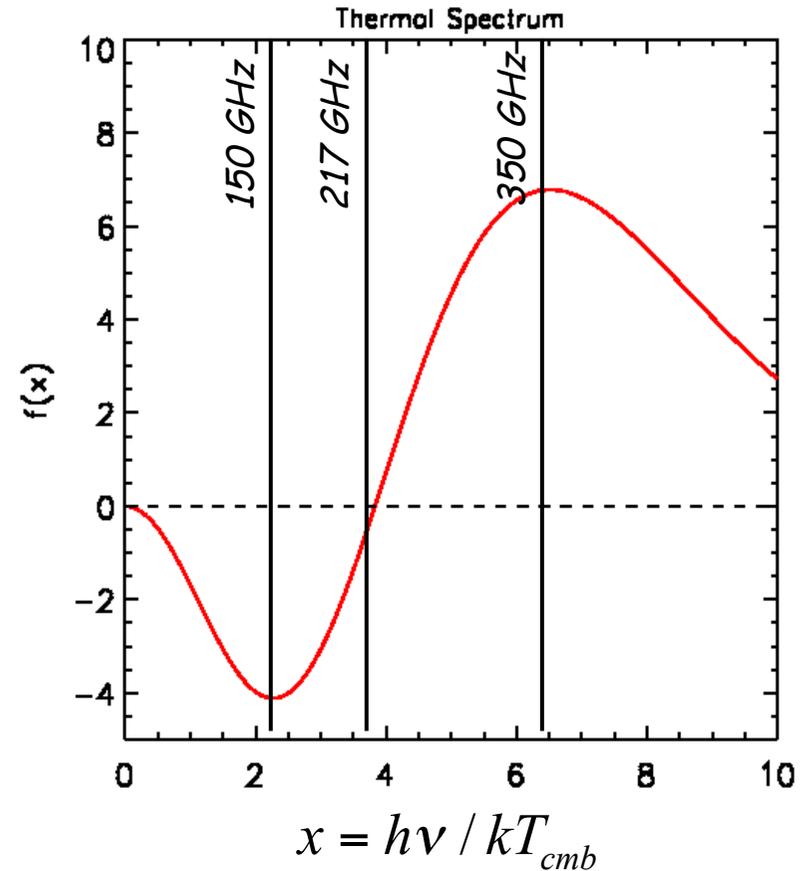
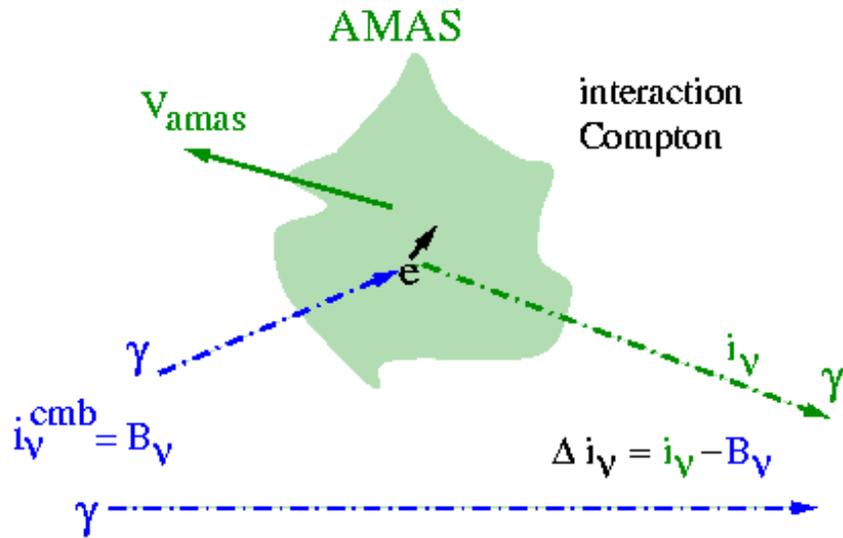
Fig. 6

Masse visible $\sim 2-7\%$ (optique)

Masse de gaz $\sim 10-30\%$ (X et millimétrique)

Masse autre $\sim 60-85\%$ (lentilles ou viriel ou équilibre hydrostatique)

L'effet Sunyaev Zel'dovich



$$\Delta T = \int n_e T_e dl \cdot f(x)$$

Fraction de gaz d'un amas

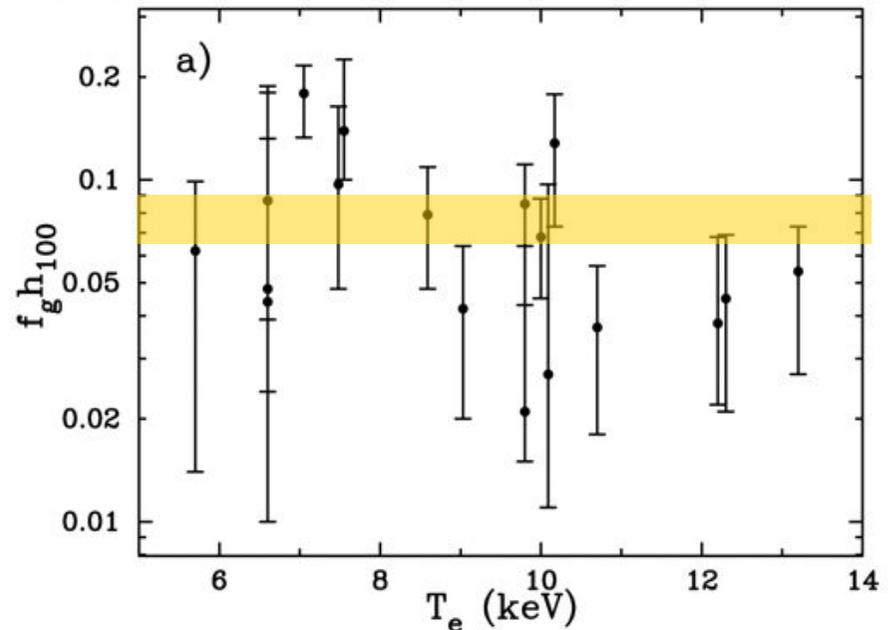
$$f_{\text{gaz}} = \frac{M_{\text{gaz}}}{M_{\text{tot}}} \leq \frac{\Omega_B}{\Omega_M}$$

f_{gaz} : mesuré (SZ ou X)
 M_{tot} : connu par ailleurs (lensing, vitesses, simulations)
 $\frac{\Omega_B}{\Omega_M}$: connu par ailleurs (BBN)

$$\Omega_M \leq 0.4$$

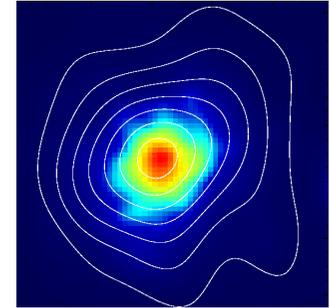
Pour $\Omega_{\text{tot}} = 1$
 $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$
 68% conf.

Grego et al. 01, ApJ 552, 2



Distance angulaire d'un amas

On part d'un modèle de profil $n = n_0 \left(1 + r^2 / r_c^2\right)^{-3\beta/2}$



SZ



$$\Delta T = n_0 r_c f_{sz}(T_e, \beta)$$

X



$$S_x = n_0^2 r_c f_x(T_e, \beta)$$

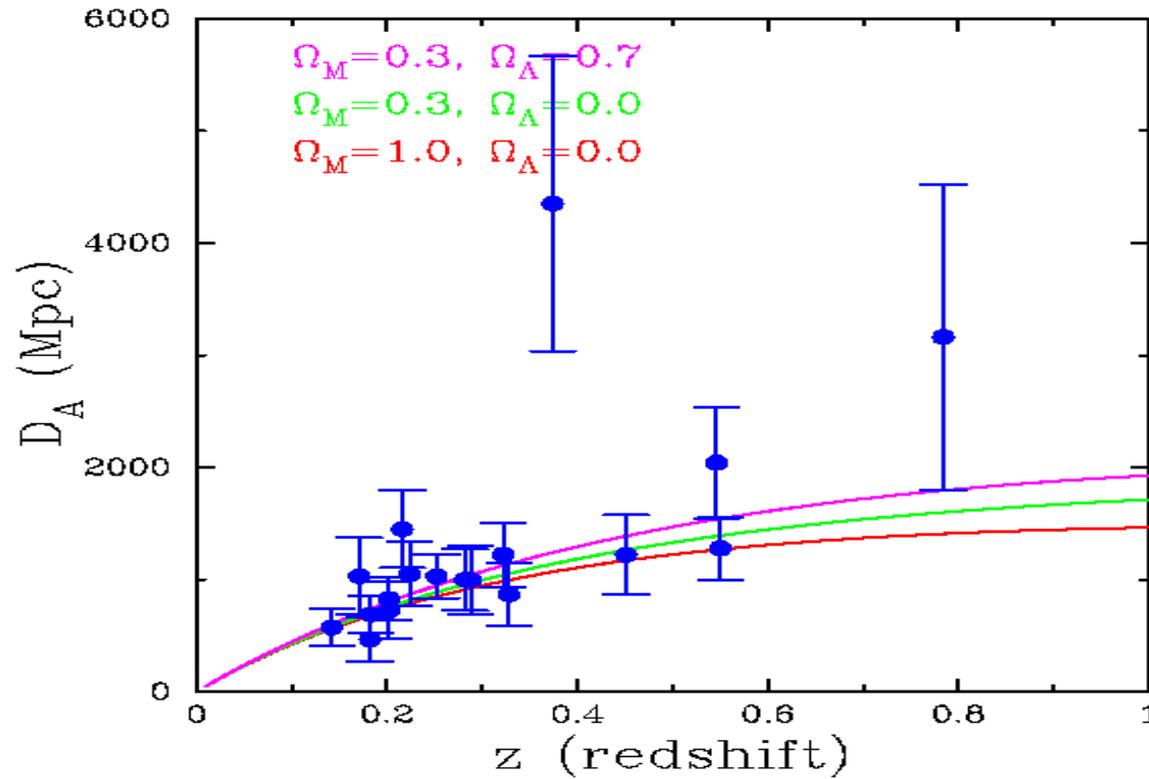
$$r_c \propto \Delta T^2 / S_x$$



Objet de taille connue

Reese et al. 2002,
astro-ph/0205350

$$H_0 = \begin{cases} 60^{+4}_{-4} {}^{+14}_{-19} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}; & \Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7 \\ 56^{+4}_{-4} {}^{+13}_{-17} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}; & \Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.0 \\ 53^{+4}_{-3} {}^{+12}_{-17} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}; & \Omega_M=1.0, \Omega_\Lambda=0.0 \end{cases}$$



Jones et al. 2001, astro-ph/0103046

$$H_0 = 65 \pm_7^8 \text{ km/s/Mpc}$$

Mason et al. 2001, ApJ 555 L11

$$H_0 = 65 \pm_{11}^{14} \pm 15(\text{sys}) \text{ km/s/Mpc}$$

Autres aspects ...

- Comptages d'amas
- Champs de vitesse
- Lentilles faibles
- Corrélations dans la distribution des galaxies
- Premiers objets
- ...

Expériences majeures

XMM (DAPNIA)

- Observatoire spatial X actuellement opérationnel
- Observation sur programmes (demande de temps)



Olimpo (DAPNIA)

- 2004-2005
- Ballon stratosphérique dédié à l'effet SZ et au CMB petite échelle
- Contribution DAPNIA : câblage bas bruit, calibration

HERSCHEL (DAPNIA)

- 2007
- Observatoire spatial dédié essentiellement aux structures lointaines

PLANCK (CdF, ISN, LAL, DAPNIA, INSU, ...)

- 2007-2009
- Mission spatiale dédiée essentiellement au CMB
- Participation forte de l'IN2P3 et du DAPNIA



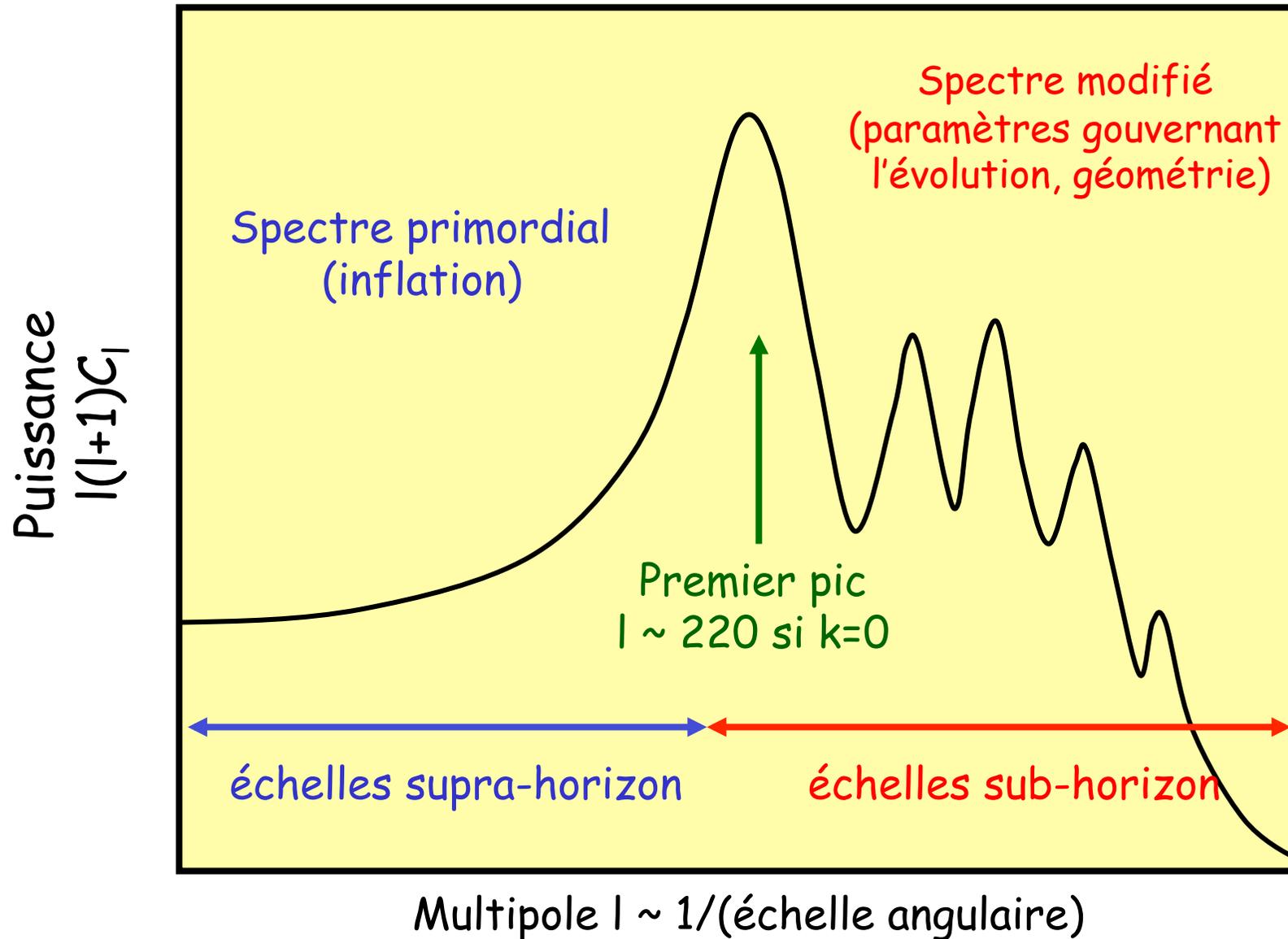
Plan de l'exposé

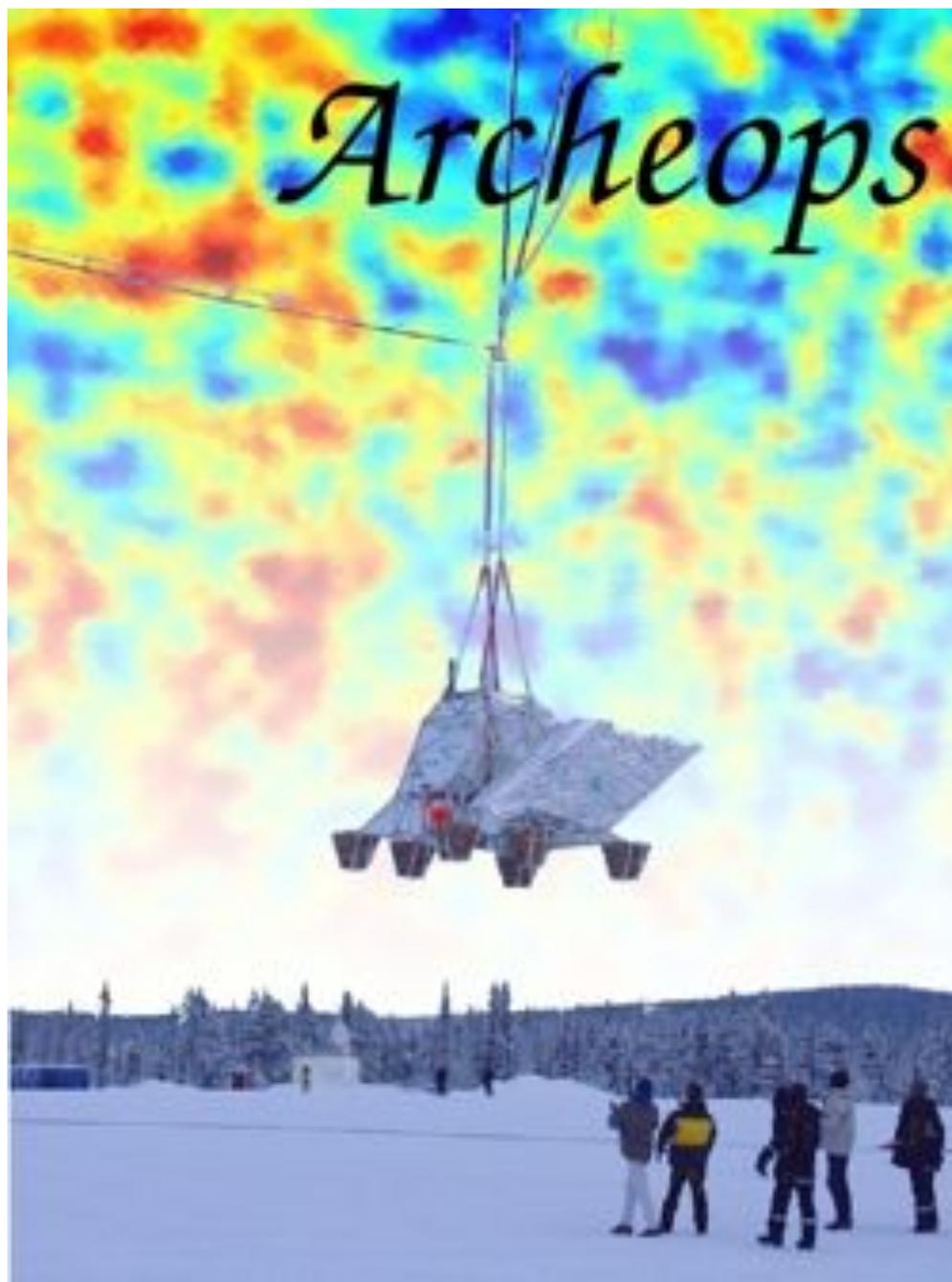
- Observations en cosmologie
- Concepts et méthodes observationnelles
- Les Supernovae
- Les Amas de Galaxies
- • Le Fond Cosmologique
- Simulations et traitement de données
- Moyens futurs

Le fond cosmologique (CMB)

- Fond de rayonnement micro-ondes émis au moment de la combinaison p-e
- Spectre d'un corps noir à 2,725 K environ
- Petites fluctuations de température $\Delta T(\theta, \varphi)$ de l'ordre de 100 μK
- Petites fluctuations de polarisation de l'ordre du μK
- Archeops, Olimpo, Planck

Anisotropies du CMB





CRTBT, CESR, IAP, IAS, LAOG, OMP,
Caltech, Cardiff, Rome, Florence, Landau
Institute, Maynooth, Minnesota

**IN2P3 (CdF-PCC, CSNSM, ISN, LAL),
DAPNIA,
APC-P7
~ 15 physiciens IN2P3/DAPNIA**

- Télémétrie (CdF-PCC)
- Enregistreur de bord (CdF-PCC)
- Étalonnage (ISN, CdF-PCC)
- Thermomètres (CSNSM)
- Traitement de données

Le concept Archeops

- Concept semblable à Planck HFI
- Résolution angulaire : $\sim 8-12$ arcmin
- Grande couverture du ciel : 20-30%



Test pour
Planck HFI



Grands l (<800)



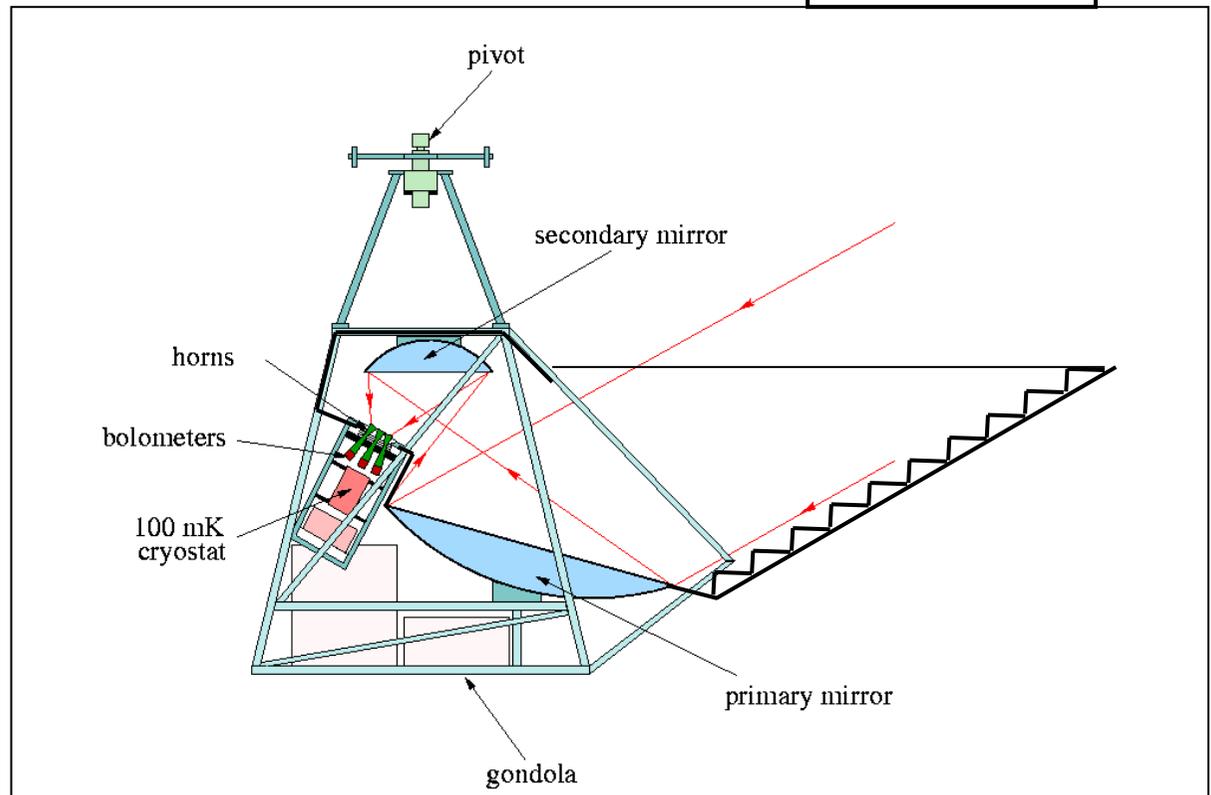
Bas l (>10)

Miroir primaire :
1.5 m

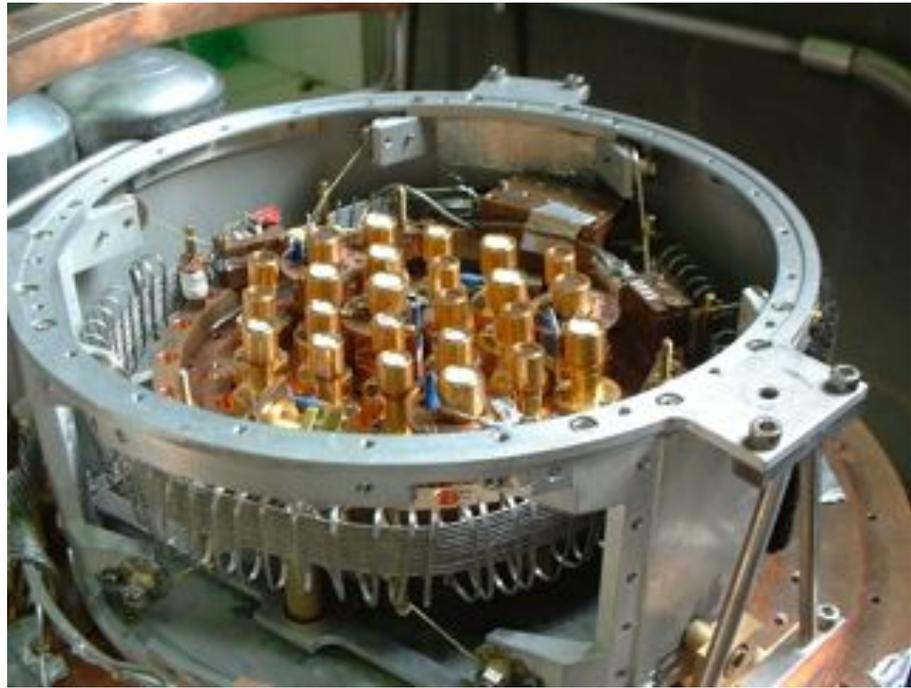
Altitude :
30-40 km

Elevation :
 41°

Rotation :
2 tours/mn



Archeops



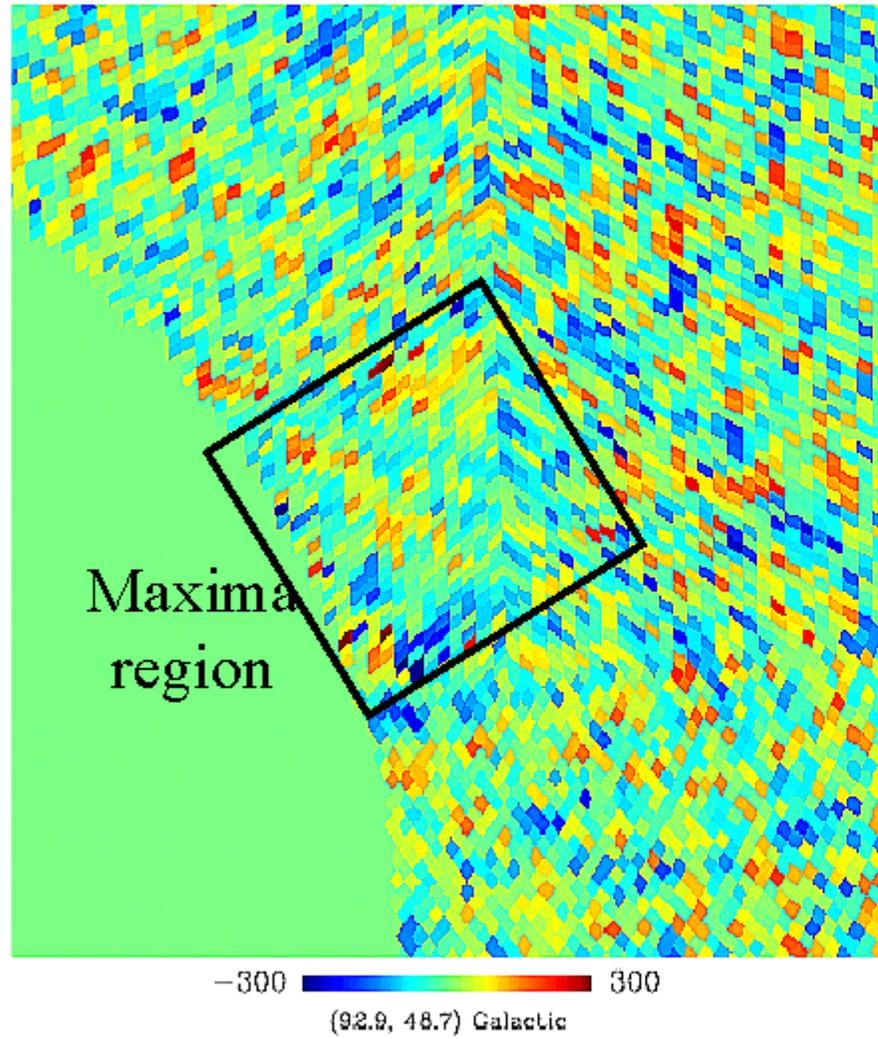
Vol scientifique KS3 (7-8 février 2002)

- Lancement
12h44 UT
7 février
- Atterrissage
10h20 UT
8 février
- Altitude plafond
34 km

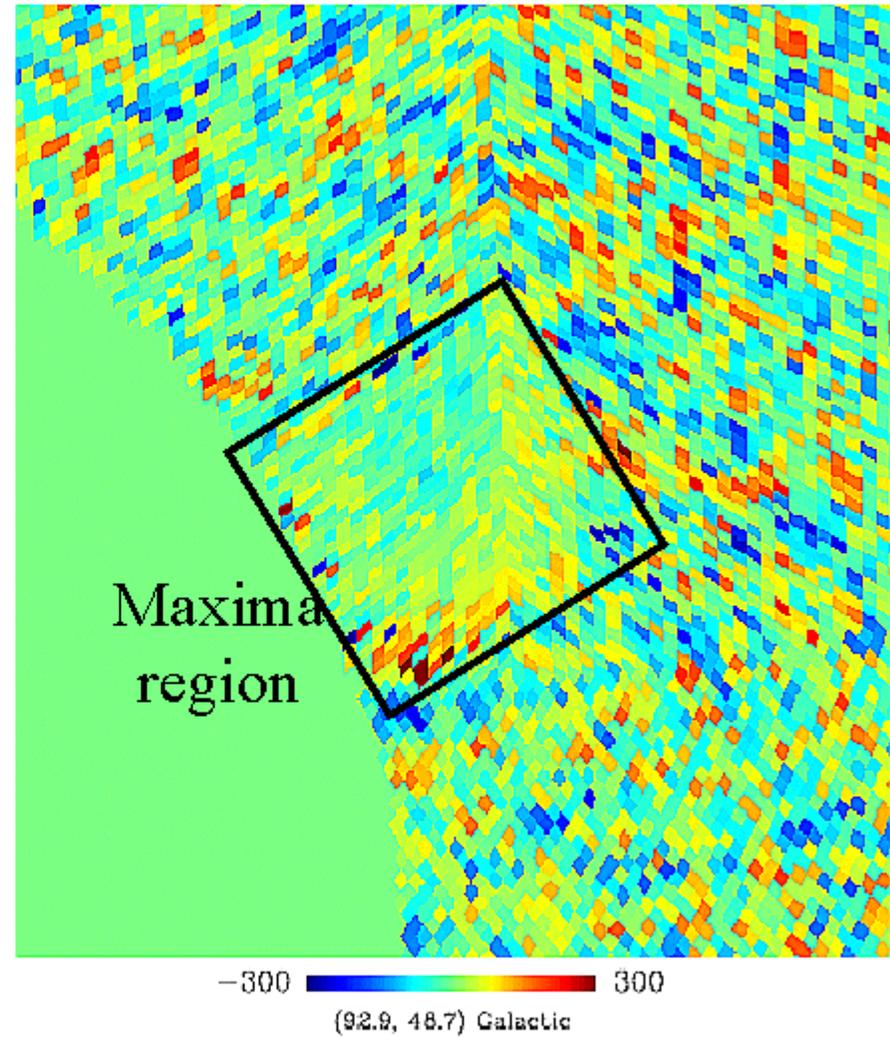


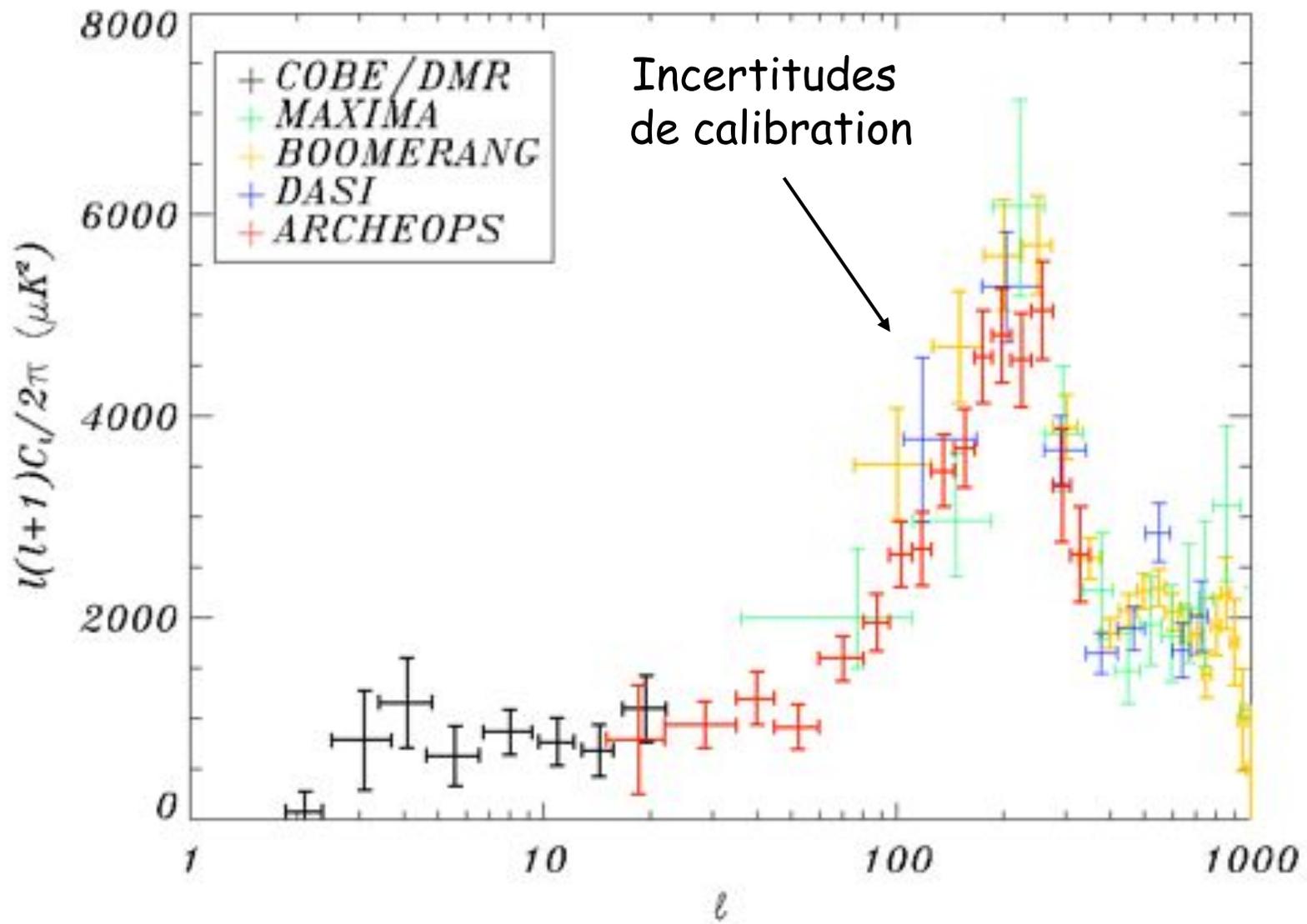
Atterrissage du côté de
Noril'sk (Sibérie)

Archeops + Maxima

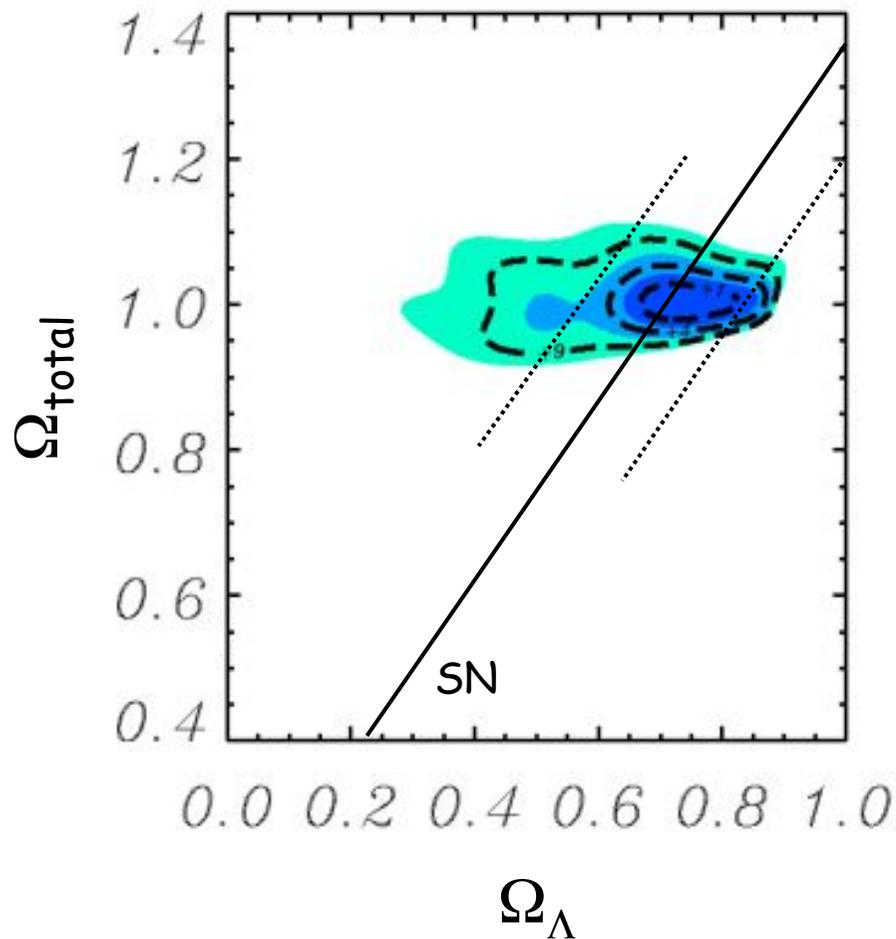


Archeops - Maxima

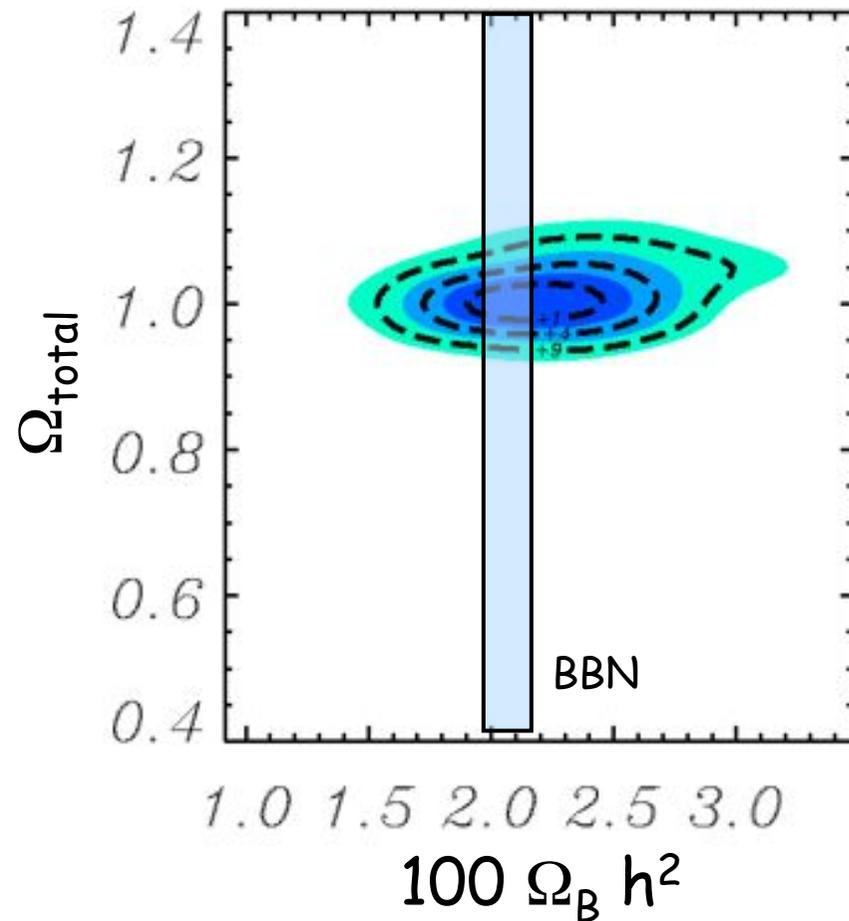




Résultats CMB pour $H_0 = 72 \pm 8$ km/s/Mpc (HST)

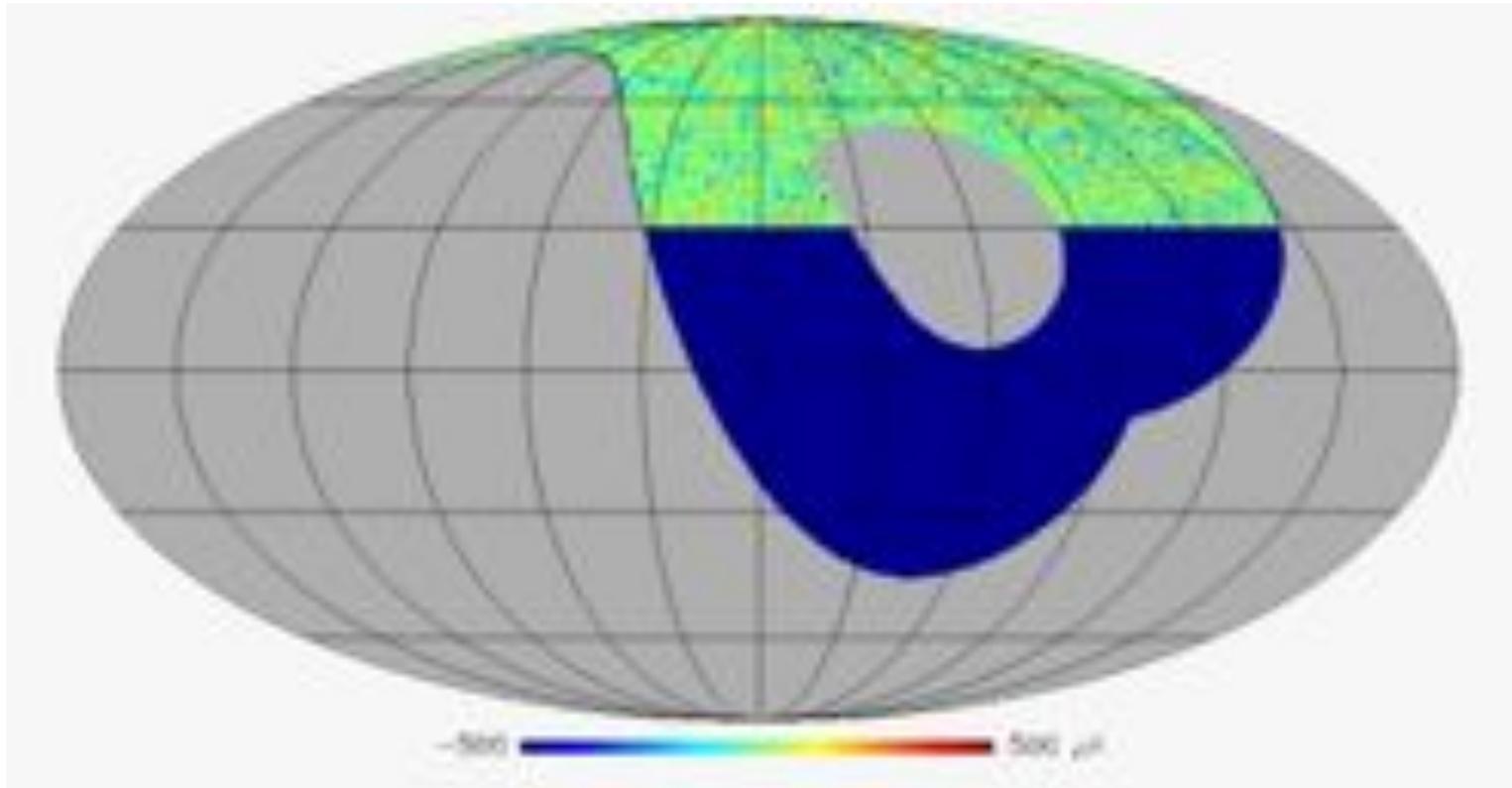


$$\Omega_{\text{total}} = 1.00^{+0.03}_{-0.02}$$



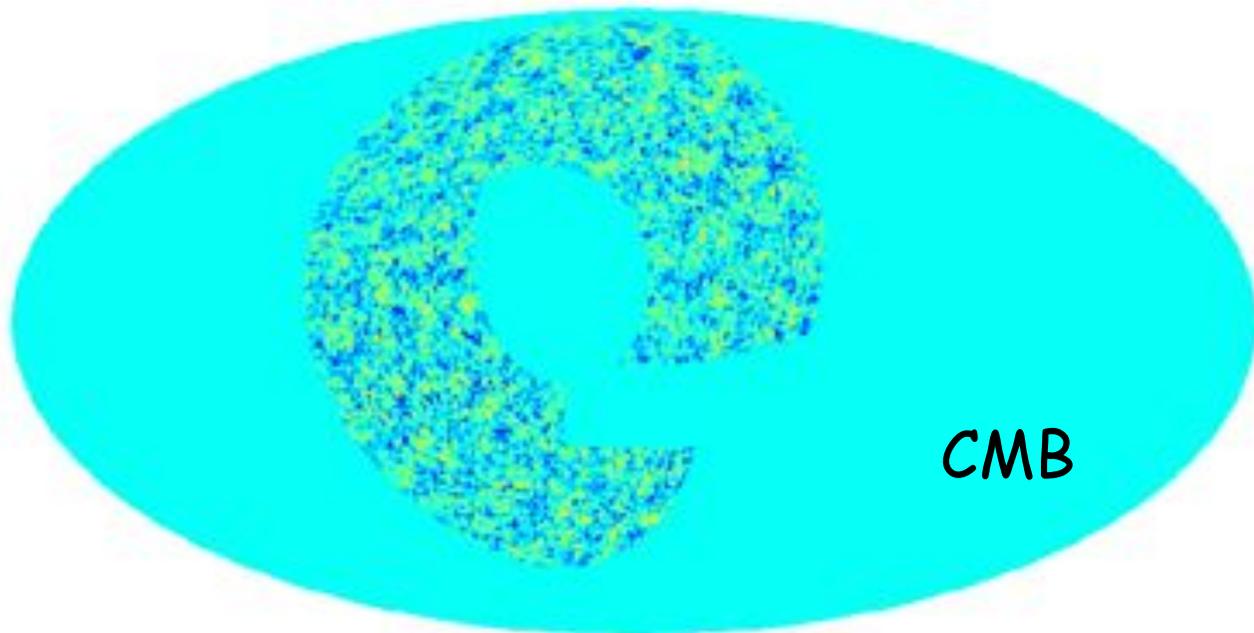
$$\Omega_B h^2 = 0.022^{+0.003}_{-0.004}$$

Ciel couvert et ciel analysé

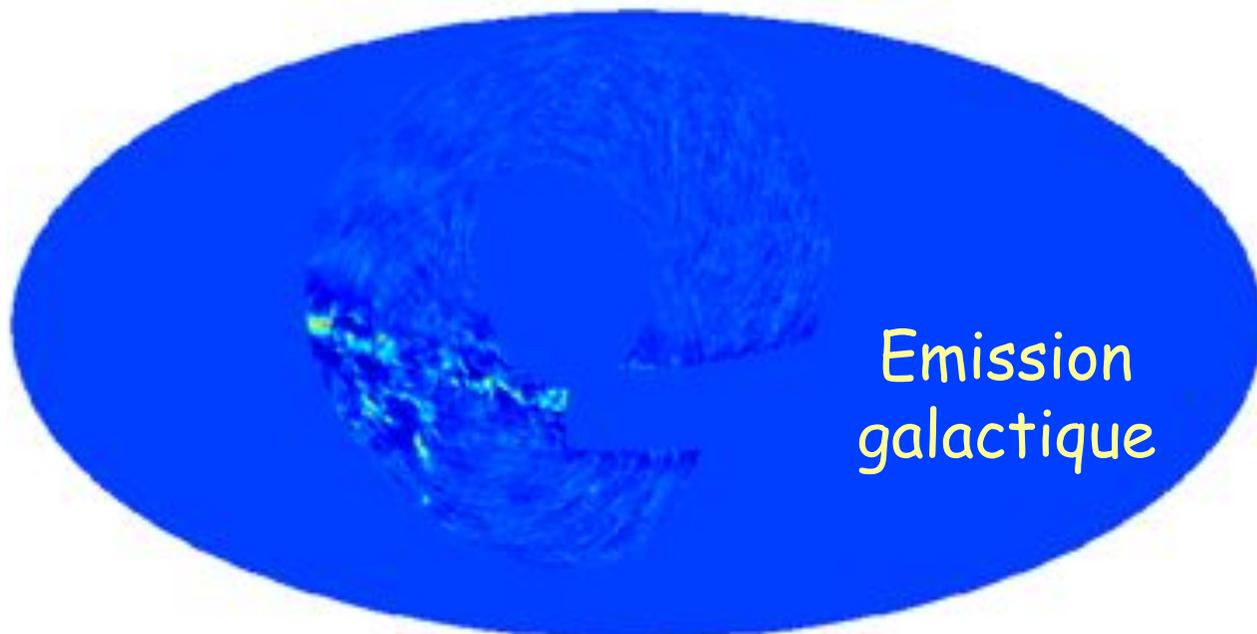


Couvert : 30%

Analysé : 12.5%, 2 bolomètres sur 15 seulement

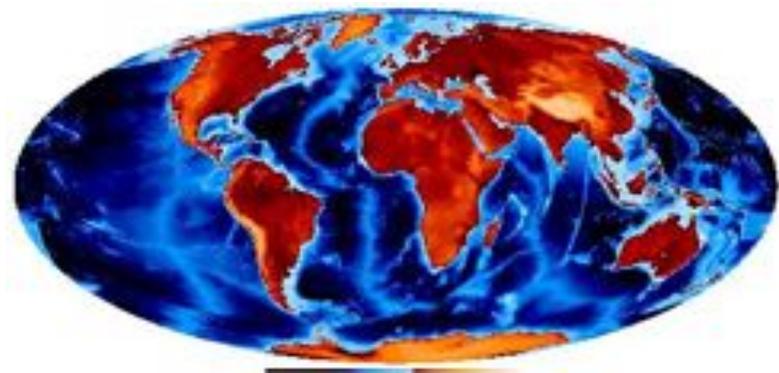
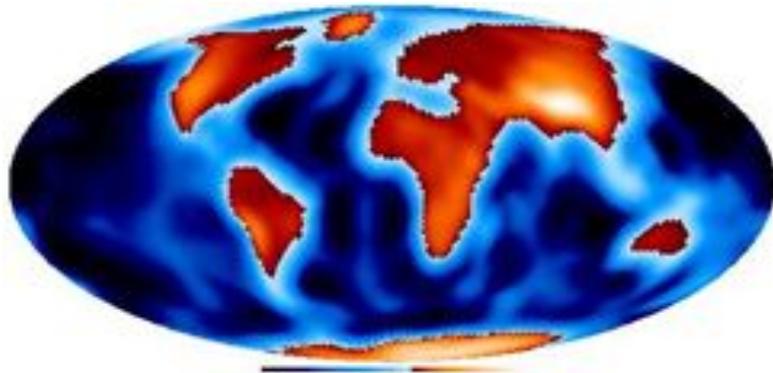
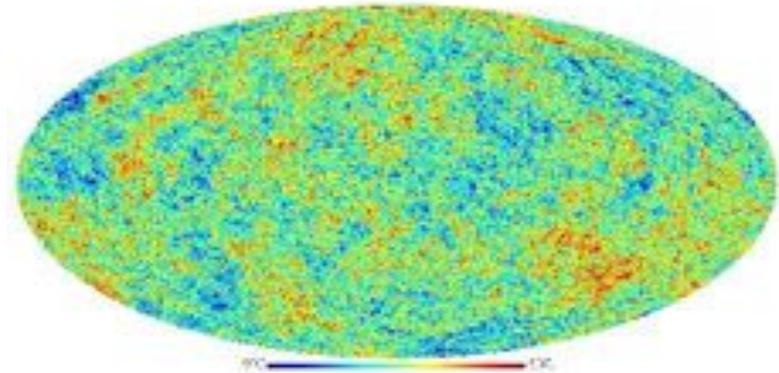
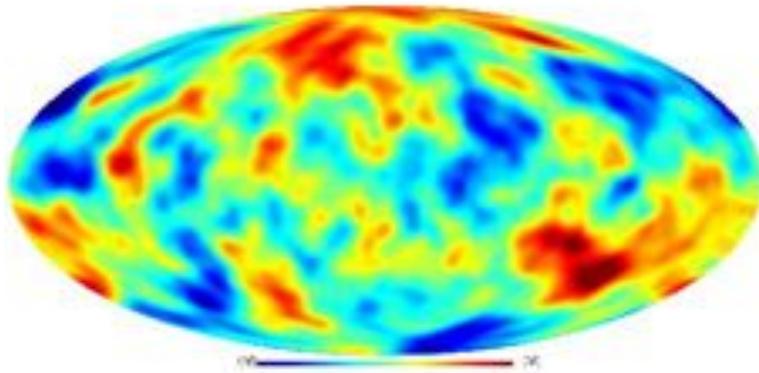


$-9.88e-05$  $1.58e-04$



$-9.47e-05$  $4.19e-04$

Cartographie haute-résolution du CMB



La mission Planck (2007)

Participation IN2P3/DAPNIA
~20 physiciens



Mesure des principaux paramètres cosmologiques à quelques % près.

CdF-PCC

ISN

LAL

DAPNIA

L1

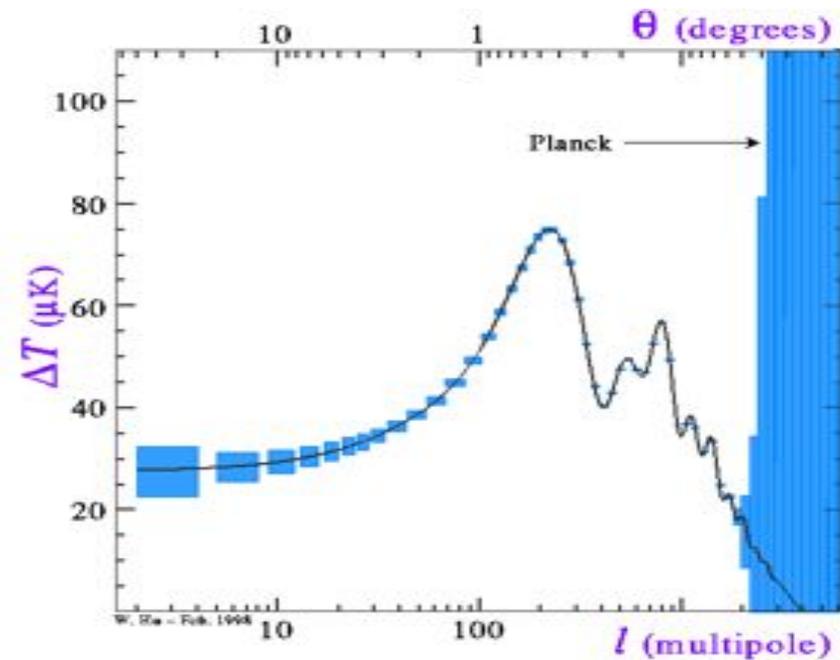
part. calibration, part. L2

électronique 20K, 0.1K

part. L2

DPU, part. L2

EMC, part. L2



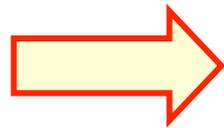
Polarisation

Limitations actuelles aux mesures en Cosmologie :

- Dégénérescences (levées par la complémentarité des observations)
- Paramètres inaccessibles : modes tenseur T , n_t

Une observable de plus : la polarisation du CMB

- Seule possibilité de mesurer des perturbations de type tenseur (ondes gravitationnelles primordiales prédites par les modèles d'inflation)

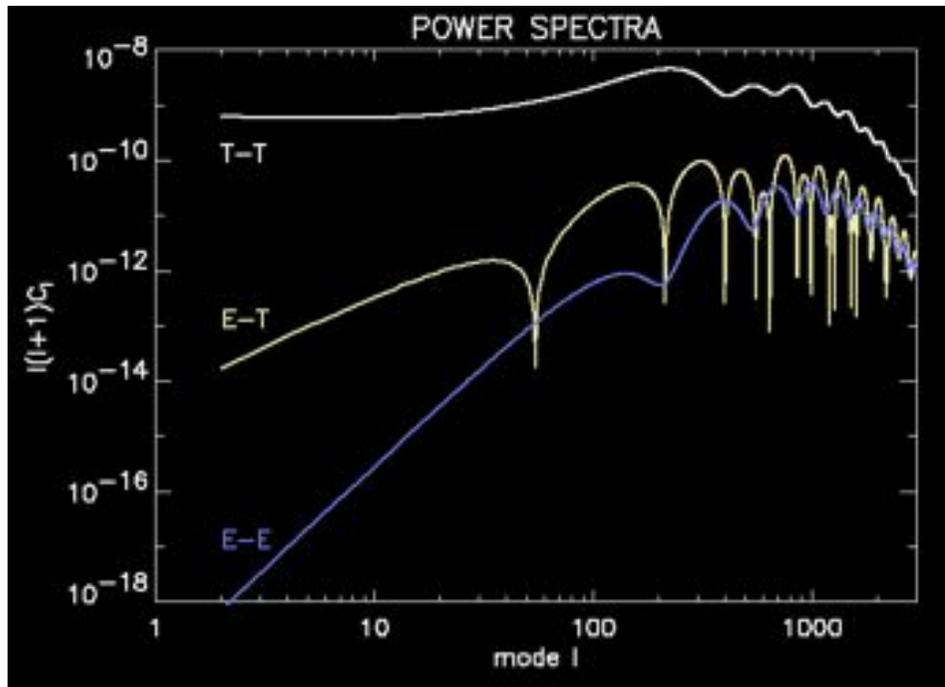


Test de l'inflation

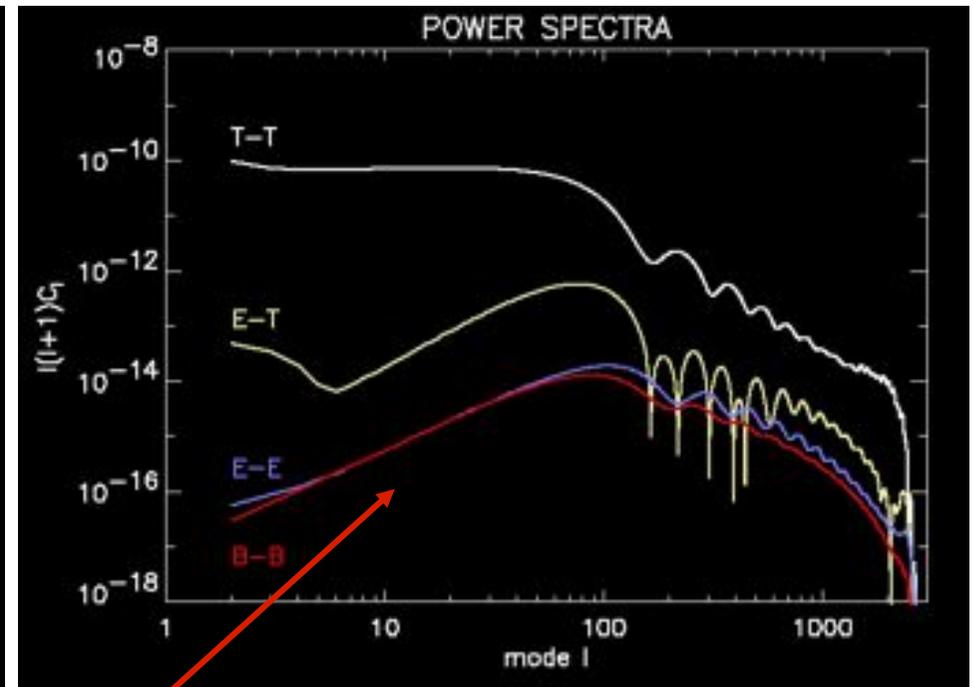
Première détection (5σ) septembre 2002 (DASI)

Prédictions typiques

$$H_0 = 65, \Omega_B = .05, \Omega_{\text{tot}} = 1, \Omega_\Lambda = .65, n_s = 1, n_t = 0, T/S = 0.15$$



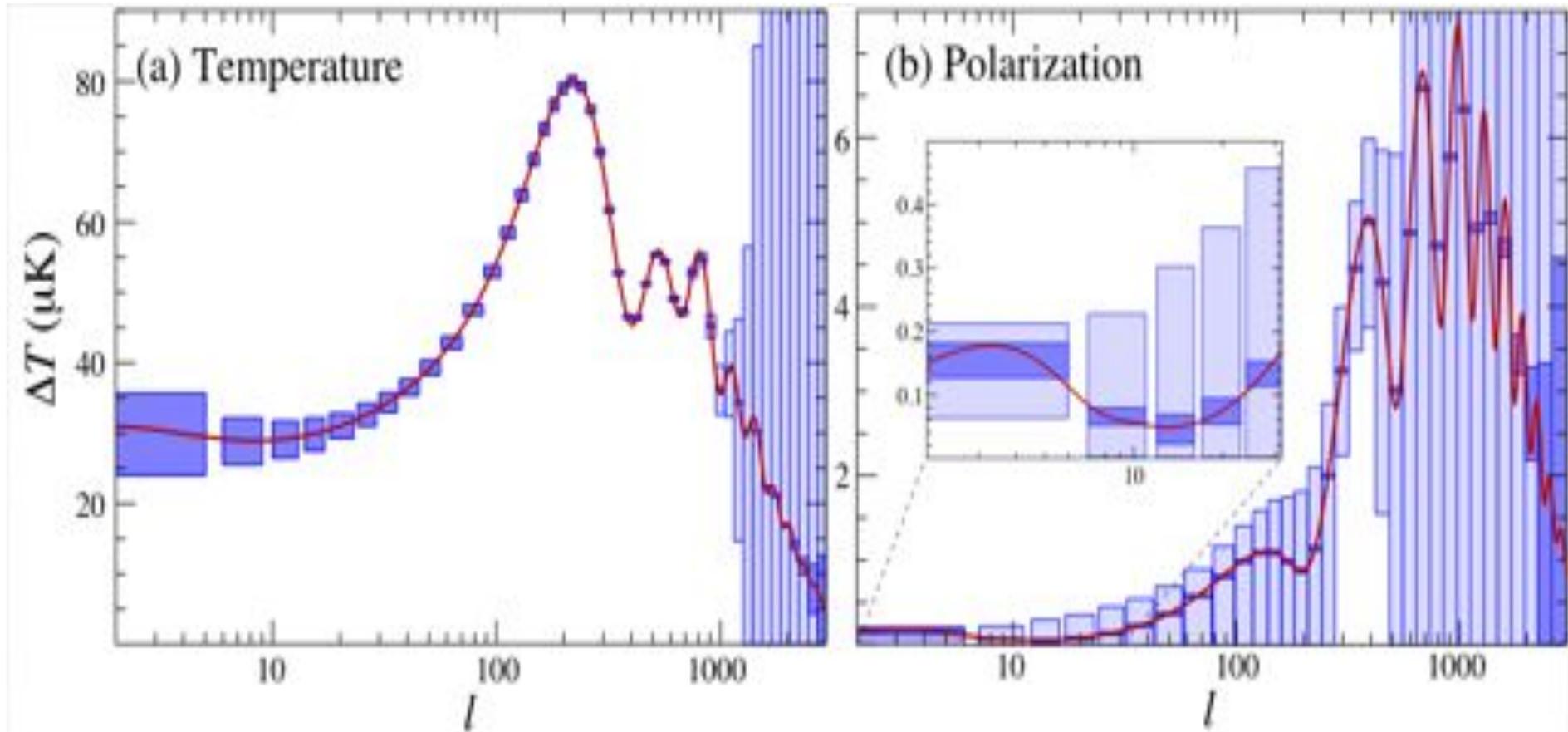
Modes scalaires



Modes tenseurs

Contribution des modes B
uniquement due aux modes tenseur

Sensibilité comparée MAP/Planck



MAP (2003)

Planck (2008)

Plan de l'exposé

- Observations en Cosmologie
- Les Supernovae
- Grandes structures et amas de Galaxies
- Le Fond Cosmologique
- • Quels développements pour la Cosmologie?
- Conclusion

Quels développements pour la cosmologie?

1) Détecteurs

- Les observations du futur nécessitent des instruments sensibles, capables de détecter (cartographier) des objets très lointains et/ou des émissions très faibles

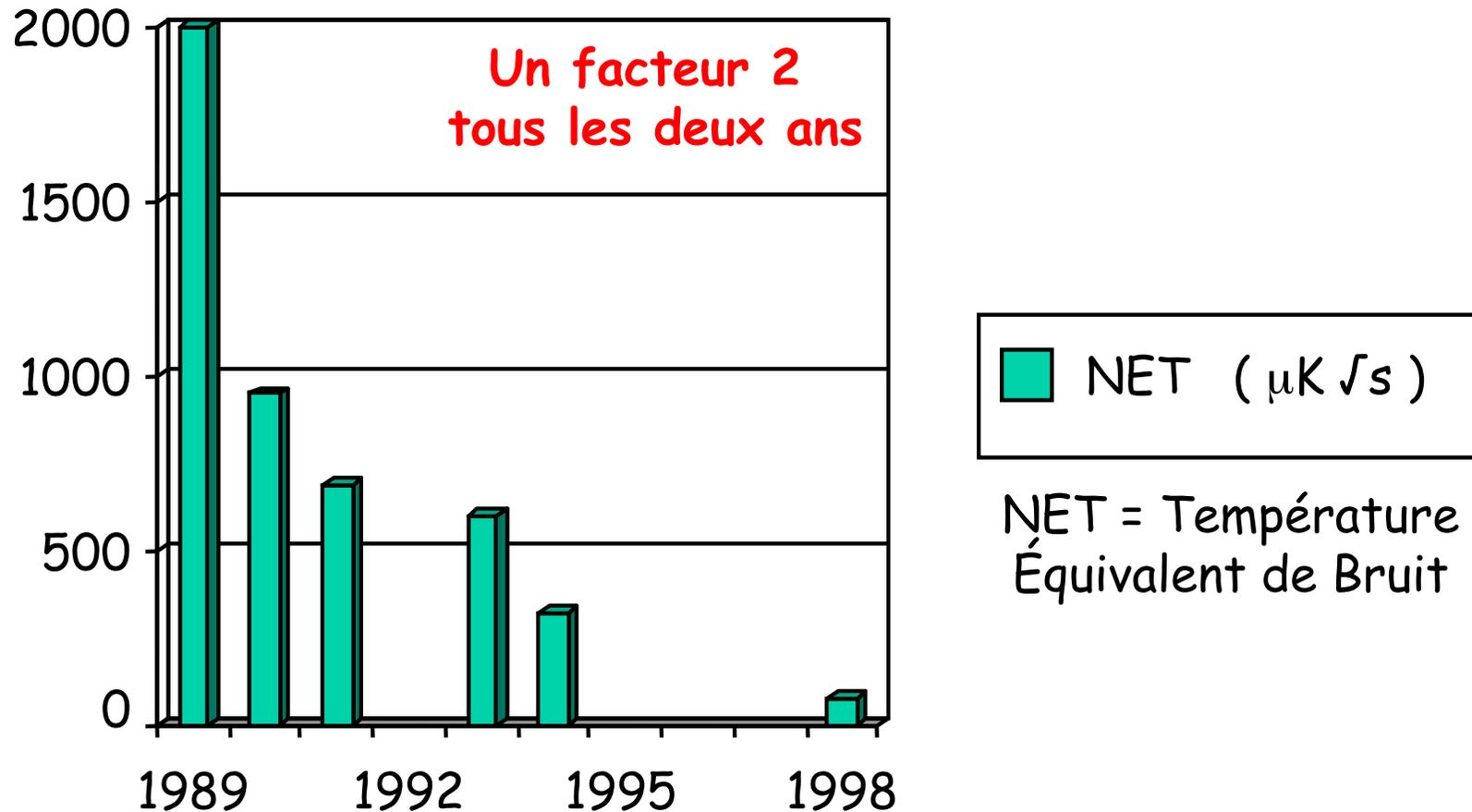
2) Simulations

- Une science observationnelle
- "Manipulation" des objets par simulation numérique lourde

3) Méthodes de traitement / Fusion de données

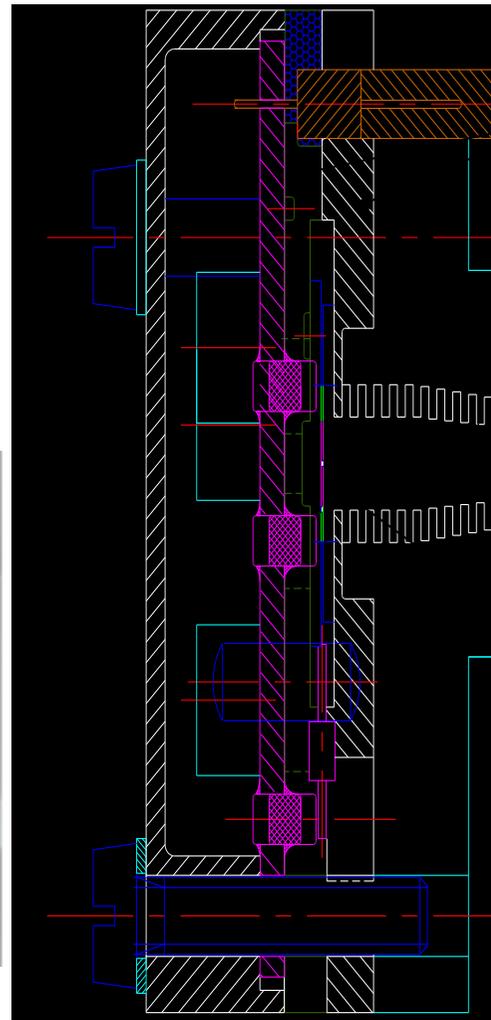
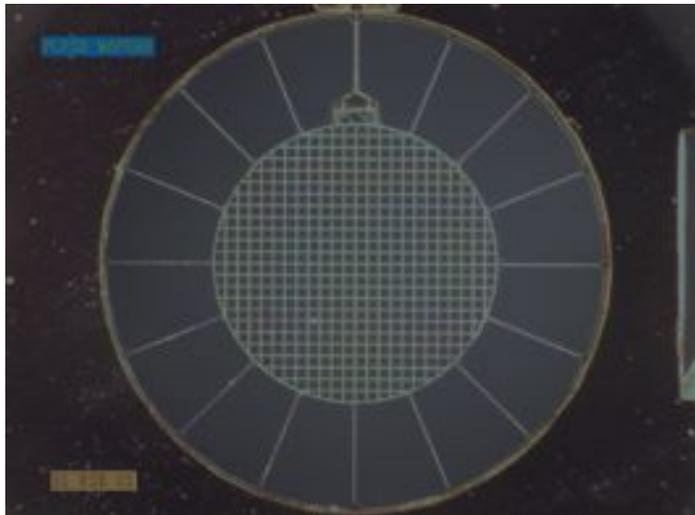
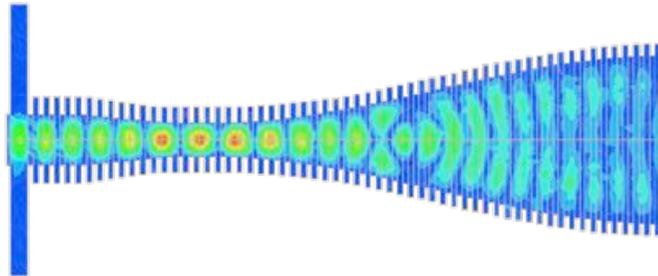
- Une science observationnelle
- Fusion de données de nature et d'origine diverses pour accéder à l'information de haut niveau (dont elles dépendent de façon complexe)

Sensibilité des bolomètres



Aujourd'hui, on a atteint la limite quantique
liée au bruit de photons

Récepteurs polarisés



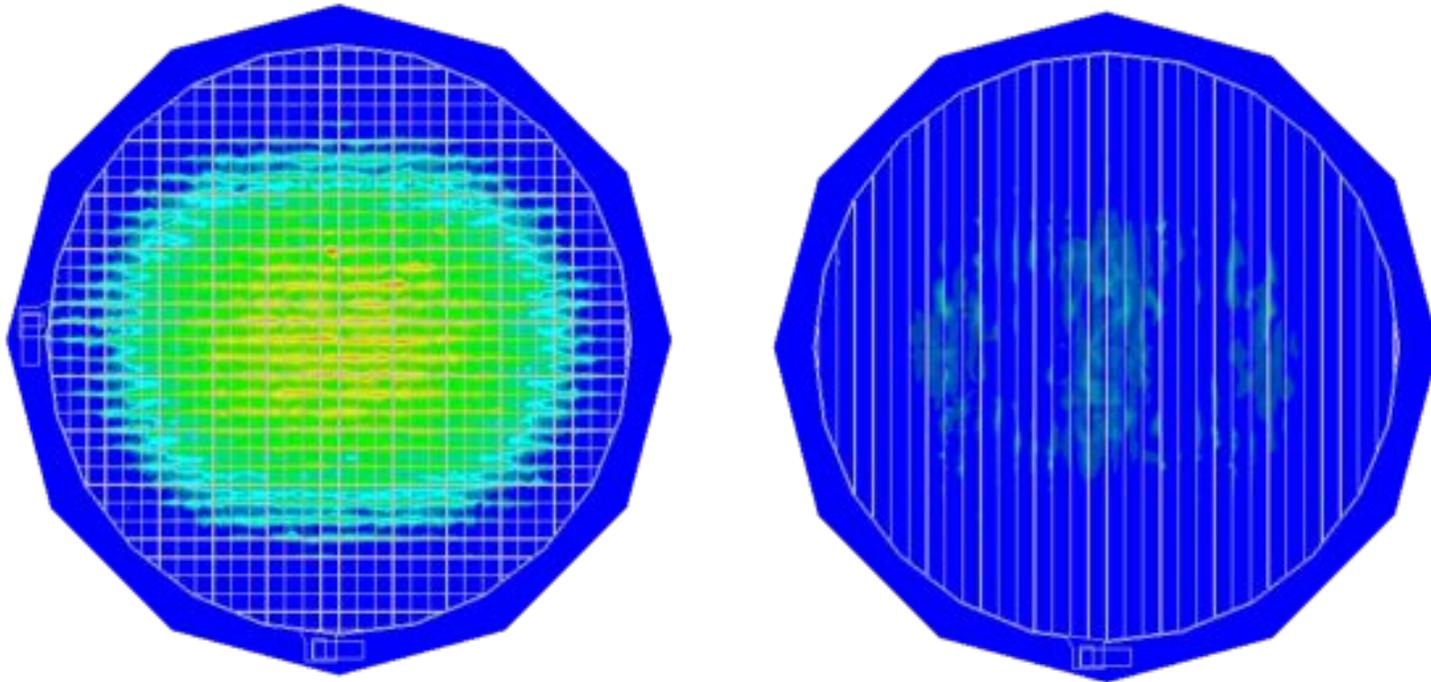
Support des bolomètres

Cornet corrugué

**absorbeurs
(diamètre 2.6 mm,
Séparation $\sim 100 \mu\text{m}$)**

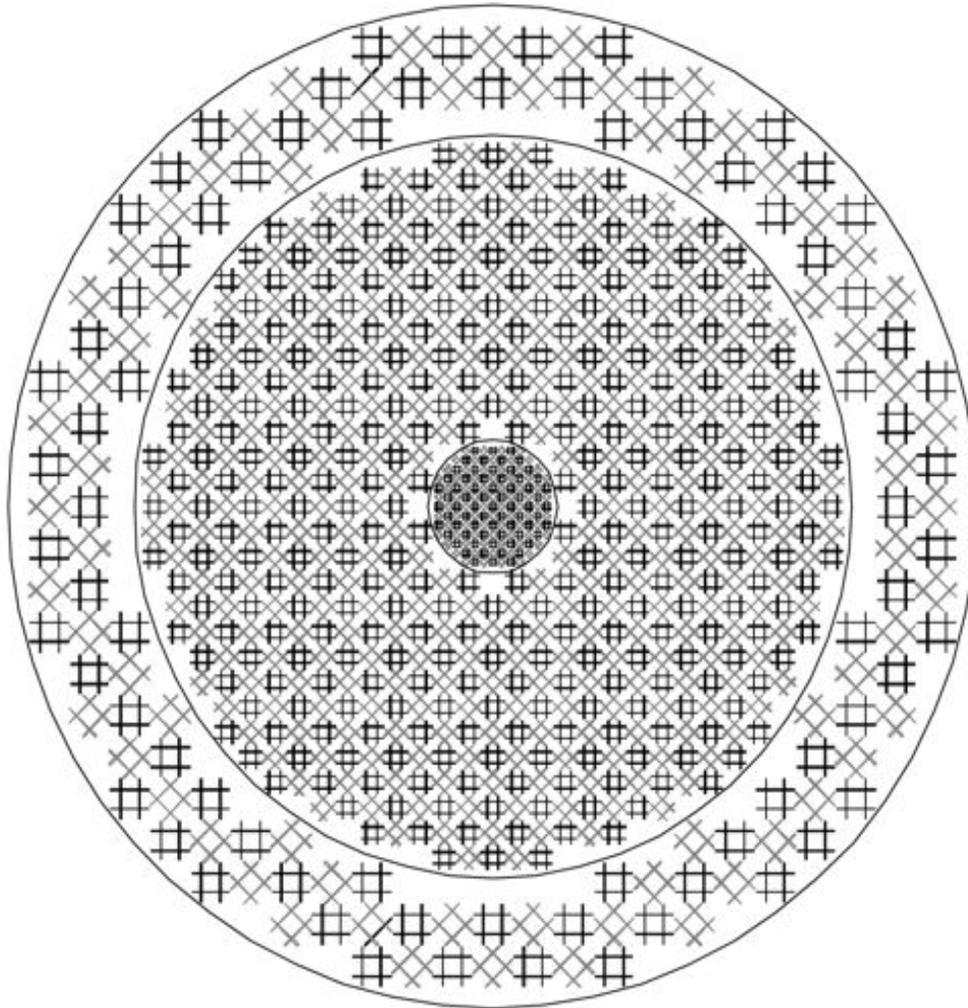
Polarisation Sensitive Bolometer (PSB)

absorbeur \varnothing 3.4 mm



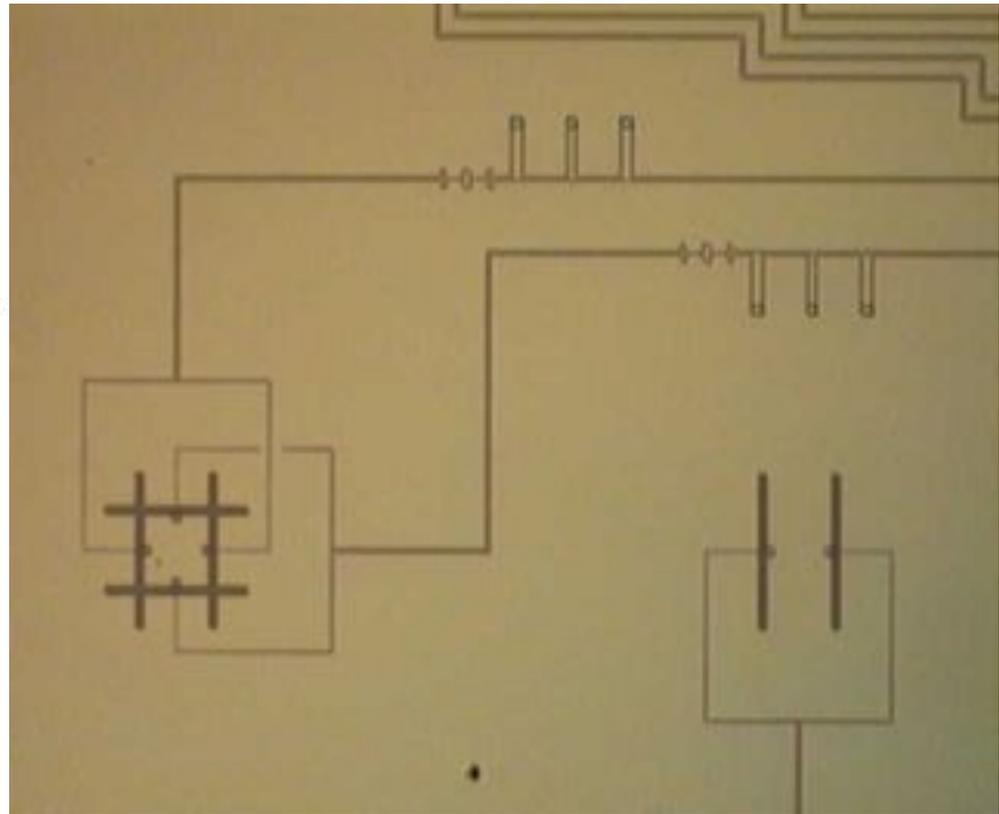
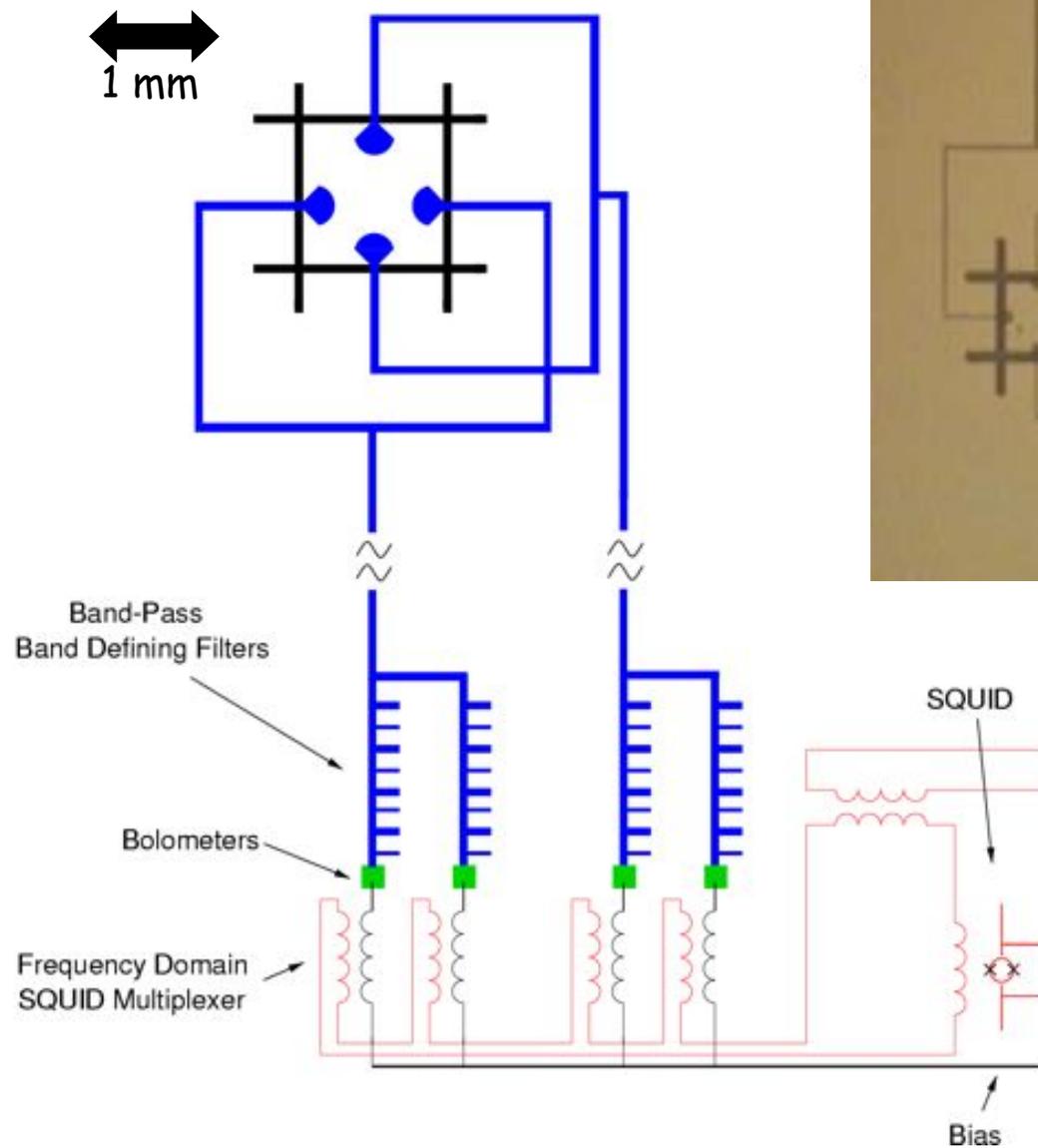
dépolarisation $\sim 1.3\%$

Le futur : exemple (Polarbear)



- Paramètres
 - 900 pixels @ 150 GHz, 3000 bolomètres
 - Tout le plan focal est utile
- Calendrier (?)
 - 2004: 100 canaux, 1 SQUID/bolo
 - 2006: 3000 canaux lecture par multiplexage

Prototype



Prototype (Berkeley)

Détecteurs

- **Domaine X : spectro-imagerie**
 - Matrices de Senseurs STJ (Superconducting Tunnelling Junction)
 - Matrices de Bolomètres TES
 - STJ à soutenir au niveau Européen (ESTEC)
- **Domaine millimétrique et submillimétrique**
 - Matrices de Bolomètres: Transition Edge Sensors (TES) lus par SQUID
 - Europe 6^{ème} PCRD et/ou Centrale de Technologie (ex: Minerve)
- **LETI**
 - Bolomètres: Suite des développements pour Herschel (PACS)
- **Suite logique de Mégacam : extension au proche IR**

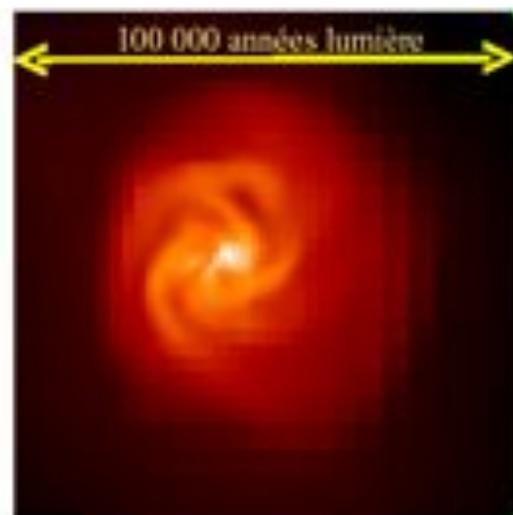
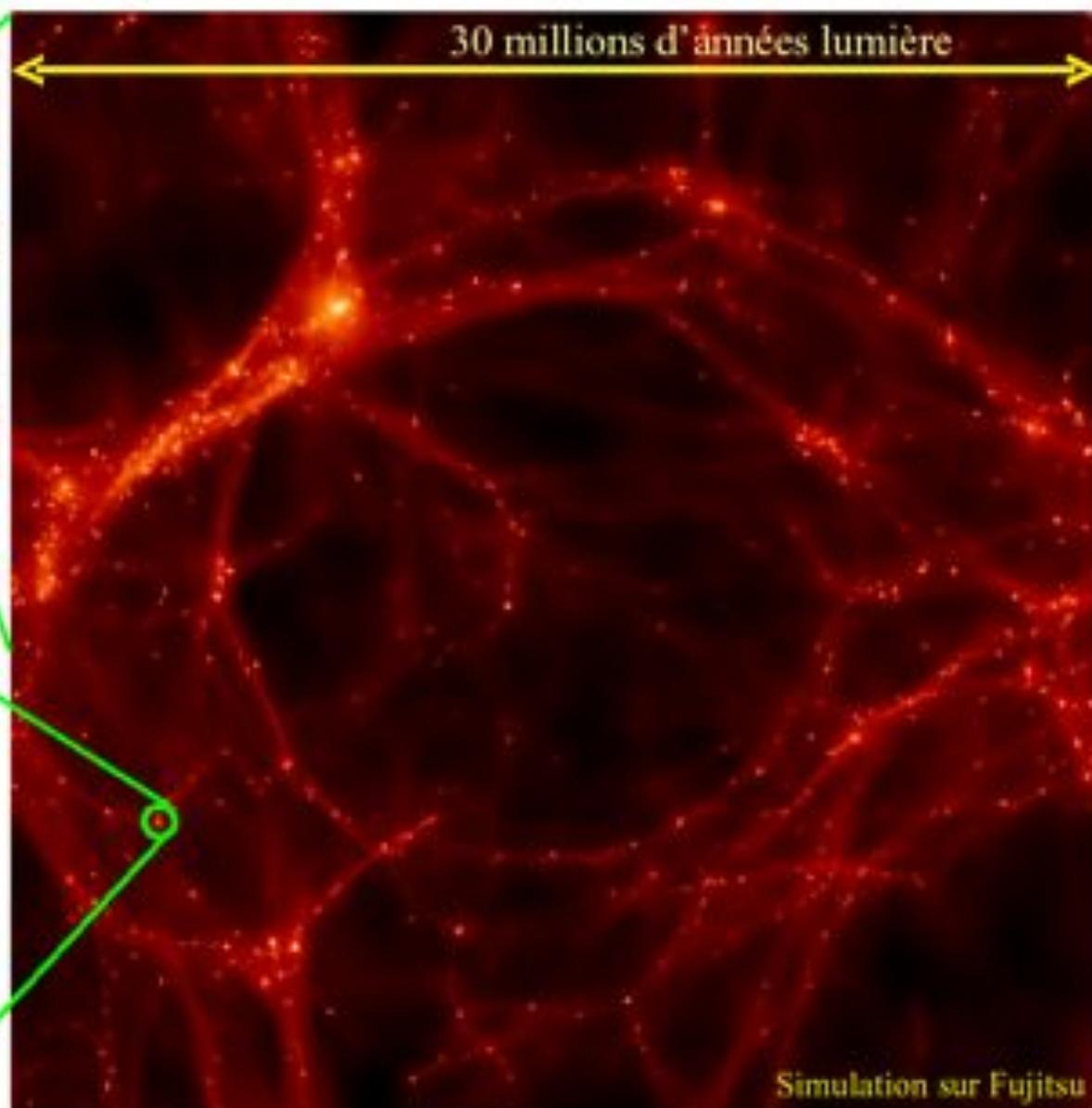
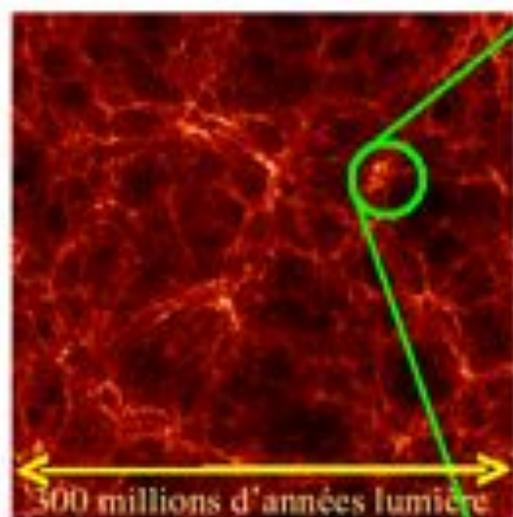
Simulations numériques

Formation des grandes structures = astrophysique complexe

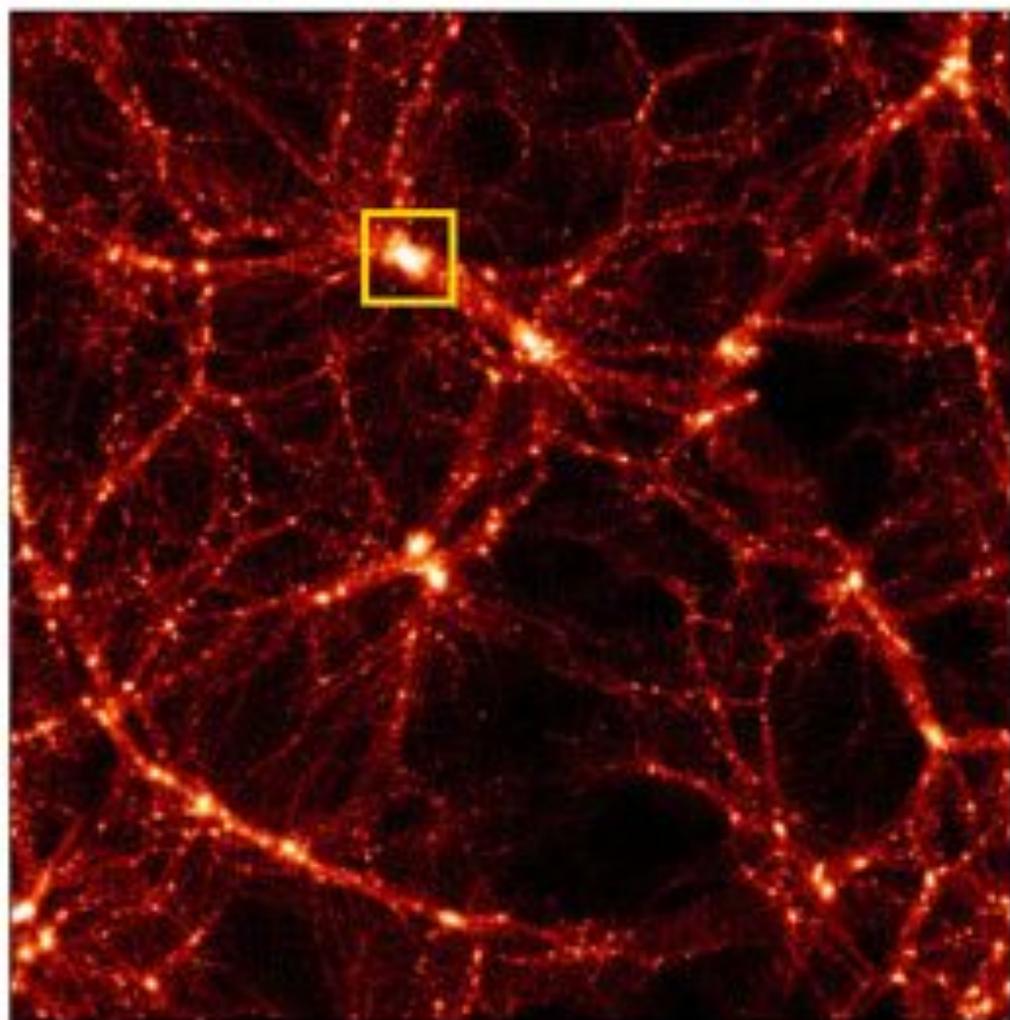
- Gravité non-linéaire d'un fluide non collisionnel
- Pression, physique des ondes de choc
- Formation d'étoiles et chauffage par les SN
- Transfert de rayonnement
- MHD

Simulations numériques

- "Expérimentation" numérique
- Modélisation
- Interprétation des résultats
- (DAPNIA) 3 chercheurs
- Sous-équipement hardware pour ces simulations



Formation des grandes structures: une dynamique spatiale de 10^5 et plus...

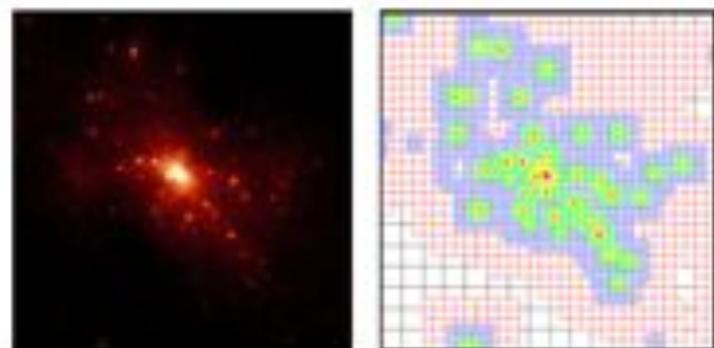


Boite périodique de $100 h^{-1}$ Mpc

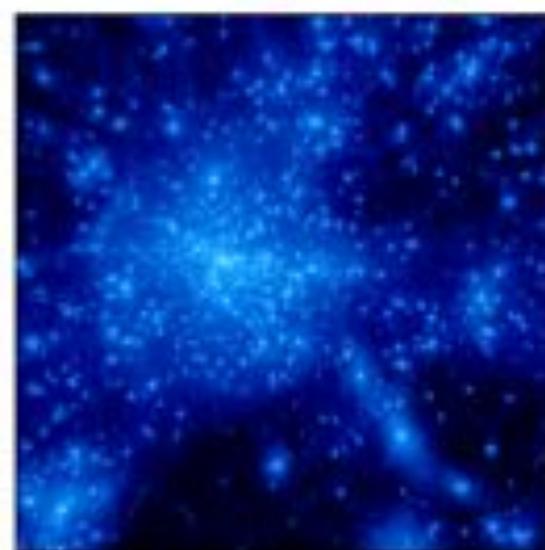
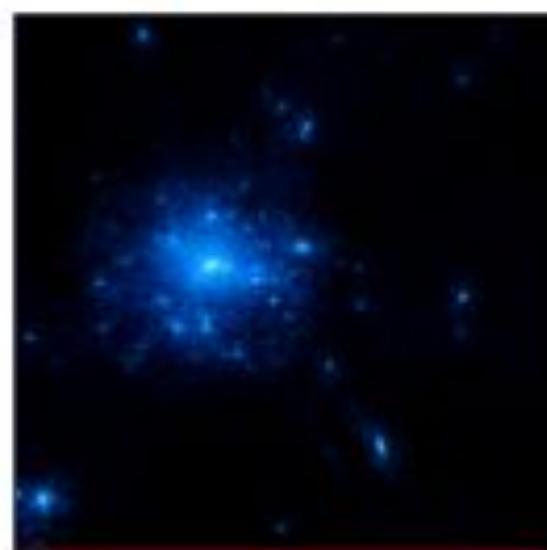
Simulation "grandes structures" avec 17×10^6 particules et 200×10^6 cellules AMR sur 7 niveaux de raffinement.

16 Gb de mémoire et 150 h CPU (VPP)

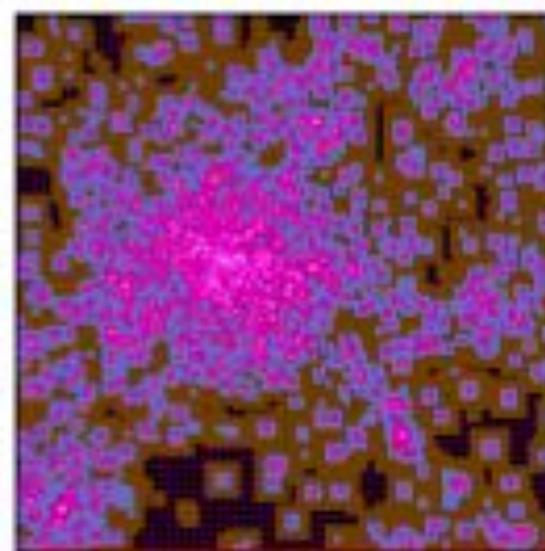
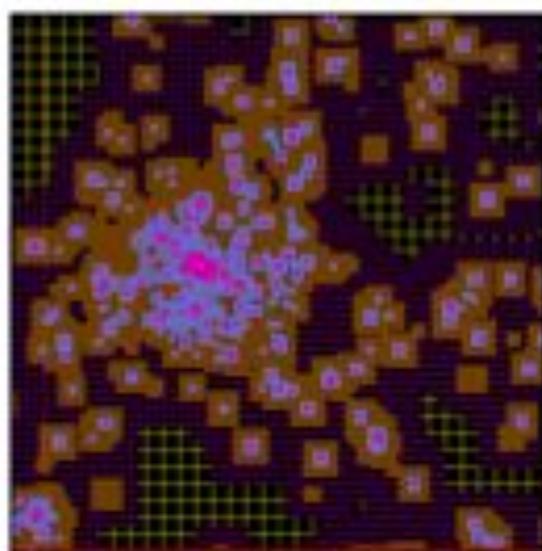
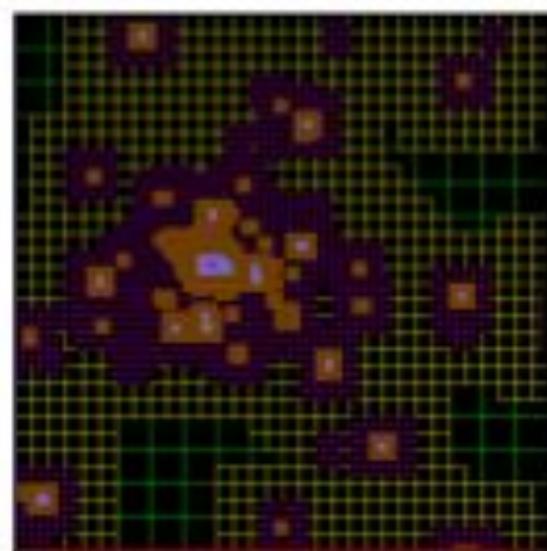
Zoom sur un amas de 5×10^4 particules avec une dizaine de sous-structures. Les amas observés contiennent plus de 1000 galaxies !



Le même amas à résolution croissante: vers les échelles galactiques ?



Taille de l'image $12 h^{-1}$ Mpc



$$N \simeq 5 \times 10^4$$

5 heures et 0.3 Gb

$$N \simeq 4 \times 10^5$$

40 heures et 1 Gb

$$N \simeq 3 \times 10^6$$

450 heures et 10 Gb

Méthodes d'analyse jointe ...

Des "observations" très diverses (en termes d'instrumentation, de type de données) permettent d'accéder à une partie de l'information de plus haut niveau

- Observation à différentes longueurs d'onde (radio, optique, X...) ou de manière plus générale par des porteurs d'information différents (photons, ondes gravitationnelles...)
- Observation de différents phénomènes dépendant chacun de façon non-triviale d'un ensemble commun de paramètres globaux
- Exemple : les SN, la statistique des fluctuations du CMB, les propriétés des amas de galaxies, des galaxies... dépendent tous d'un petit nombre (mal délimité) de paramètres cosmologiques

Évolution qualitative

Données rares et incomplètes



Données riches, complexes, diverses
et complémentaires, réparties dans des bases de données
distribuées (y compris données de simulation)

Observatoires virtuels / fouille de données ...

➡ Accès à des observatoires virtuels (data bases)

Objectif :

de fusion d'information à haut niveau

à fusion de données à un niveau assez fondamental
pour un traitement joint

➡ Parallèlement à l'implémentation technique des bases de données, nécessité de développer les méthodes de traitement adaptées.

➡ Avec des spécialistes du traitement statistique de l'information (inter-disciplinarité)!

Conclusion

- Programme fortement motivé par la physique fondamentale
 - Énergie noire et/ou constante cosmologique
 - Matière noire
 - Inflation
- **Supernovae**
 - SNF/SNLS : 2003-2008 en phase de démarrage
 - SNAP : 2009? Au stade de R&D
- **Amas et grandes structures**
 - Activité surtout DAPNIA
 - Contraintes indépendantes sur les paramètres cosmologiques
 - Étude de la formation des premières structures

Conclusion

- CMB

- Archéops : un succès de la communauté française (et de l'IN2P3/DAPNIA)
- OLIMPO : 2004-2006 mesures à haute résolution (DAPNIA)
- Planck : Le grand projet pour 2007, cosmologie de précision
- Le futur : La polarisation (contrainte de l'inflation)

- Moyens pour cette science

- Détecteurs : Matrices de Bolomètres (X, CMB, infrarouge lointain)
- Simulation : rôle de plus en plus important
- Virtual observatories, data mining, fusion de données