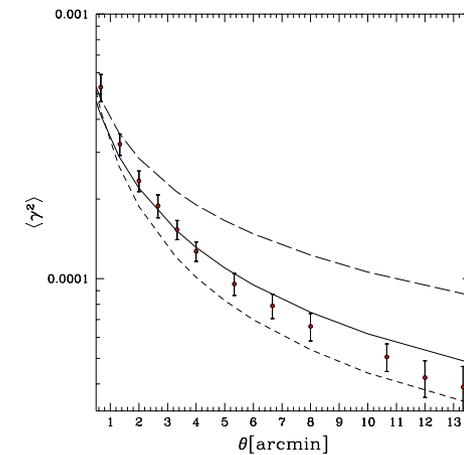
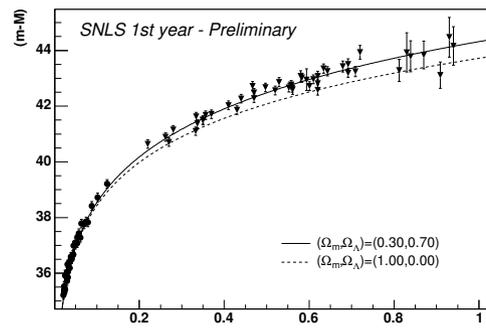
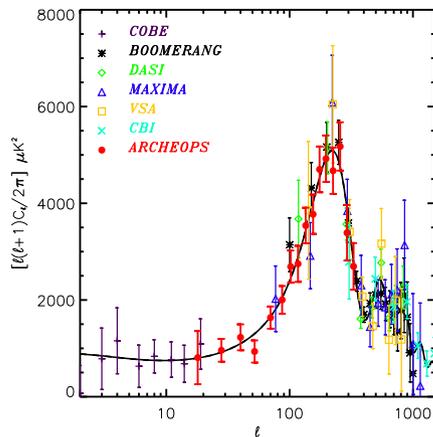


Paramètres Cosmologiques



Pierre Astier, LPNHE

Cadre

Un paradigme:

- Un univers en expansion,
- homogène et isotrope,
- dont la matière est sombre,
- à peu près plat,
- avec une “Energie Noire”
- ayant connu une phase d’inflation.

paramétré par:

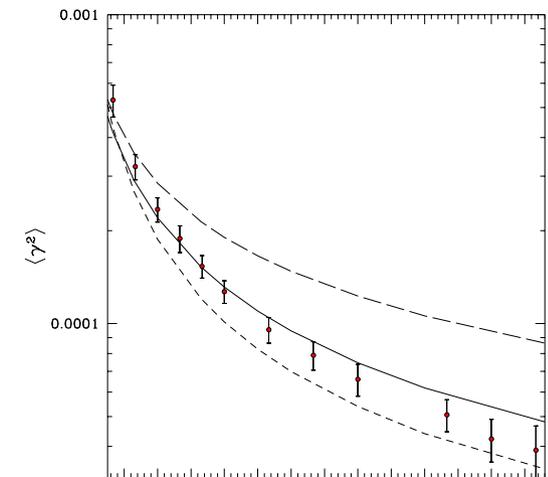
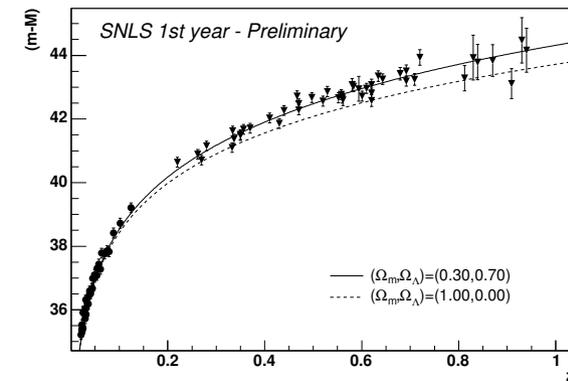
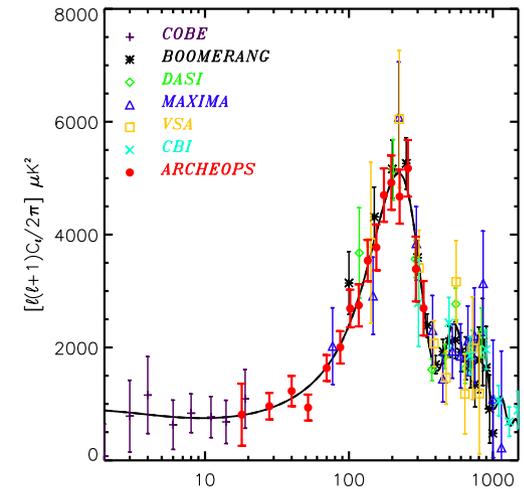
- H_0 (taux d’expansion)
- Densité(s)
- $\Omega_M, P(k)$
- $\Omega_k \simeq 0, \Omega_{tot} \simeq 1$
- $\Omega_\Lambda > 0, w, w' \dots$
- indice spectral, variation de l’indice spectral...

Lexique

- $h = H_0/100 \text{ km/s/Mpc}$: Constante de Hubble.
- z : décalage vers le rouge. $1 + z = \frac{\lambda_{\text{observe}}}{\lambda_{\text{emis}}} = \frac{R(t_0)}{R(t_{\text{emission}})}$
- $\Omega_X = \rho_X/\rho_c$: densité réduite.
- Ω_M : matière (i.e. $\rho_M \sim (1 + z)^3$).
- Ω_b : baryons (fraction de la matière...)
- Ω_Λ densité de constante cosmologique. $\rho_\Lambda = (1 + z)^0$
- w_X défini par $\rho_X \sim (1 + z)^{-3(1+w_X)}$.
matière : $w_M = 0$, Λ : $w = w_\Lambda = -1$
- $w = w_0$: eq. d'état de l'énergie noire.
- $w(z) = w_0 + w'z$: paramétrisation (très) empirique de la variabilité de l'équation d'état de l'énergie noire.
si Energie noire = Λ alors $(w_0, w') = (-1, 0)$.
- n_s : indice spectral des fluctuations (scalaires) initiales
 $P(k) \sim k^{4-n_s}$. Modèles d'inflation: $n_s \simeq 1$

Approches observationnelles/paramètres

- **CMB**
Spectre de puissance des anisotropies
 $h, \Omega_{\text{tot}}, \Omega_{\text{M}}h^2, \Omega_{\text{b}}h^2, n_s, n_t, w$.
- **diagramme de Hubble des SNe Ia**
luminosité apparente comme fonction de z
 $\Omega_{\text{M}}, \Omega_{\Lambda}, w, w'$
- **Cisaillement gravitationnel**
correlation spatiale des distortions d'images de galaxies
 $\Omega_{\text{M}}, \sigma_8, P(k, z)$
- **Abondance des éléments légers**
 $\Omega_{\text{b}}h^2$
- **Amas de galaxies**
 $\Omega_{\text{M}}, \Omega_{\text{b}}/\Omega_{\text{M}}, \dots$



Rayonnement de fond cosmologique

CMB

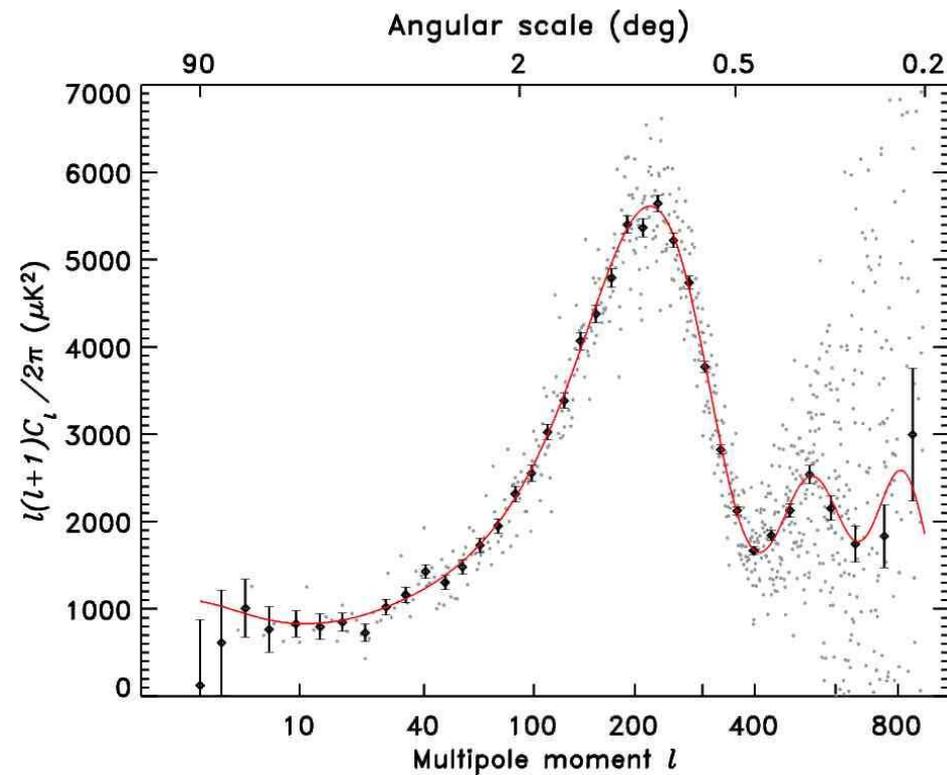
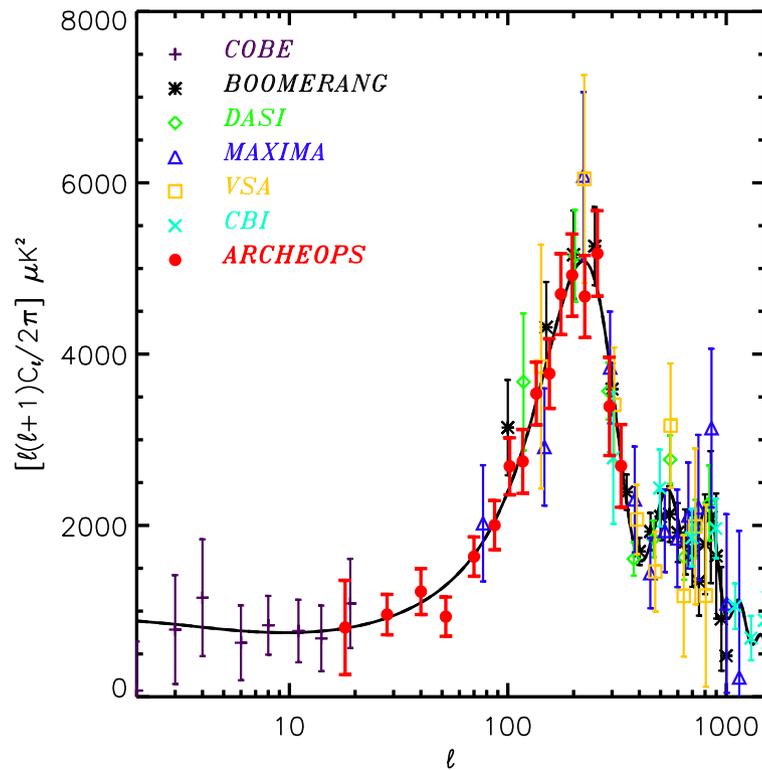
CMB: résultats récents

Archeops

WMAP

vol ballon (CNES), 12h, bolomètres

satellite, 1an, radiomètres



CMB: résultats récents: suite

Archeops

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.00 \pm 0.03$$

Pas d'hypothèse de courbure.

- $\Omega_b h^2 = 0.019 \pm 0.006$
- $n = 1.04 \pm 0.11$

WMAP

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.03 \pm 0.03$$

Hypothèse : $\Omega_{\text{tot}} = 1$

- $h = 0.72 \pm 0.05$
($h^2 = 0.52$)
- $\Omega_b h^2 = 0.024 \pm 0.001$
($\Omega_b = 0.046 \pm 0.006$)
- $\Omega_M = 0.14 \pm 0.02$
($\Omega_M = 0.27 \pm 0.07$)
- $n_s = 0.99 \pm 0.04$

$\Omega_b \simeq 0.045$ (très compatible avec BBN)

$\Omega_b/\Omega_M \simeq 0.17$ (très compatible avec amas)

$\Omega_M \simeq 0.27$ (très compatible avec amas)

Planck : la messe n'est pas (encore) dite

Promesses:

- aller jusqu'à $l \simeq 3000$ sur tout le ciel.
- Ω_{tot} à 1%, h à 1%.
- Test des modèles les plus simples d'inflation.

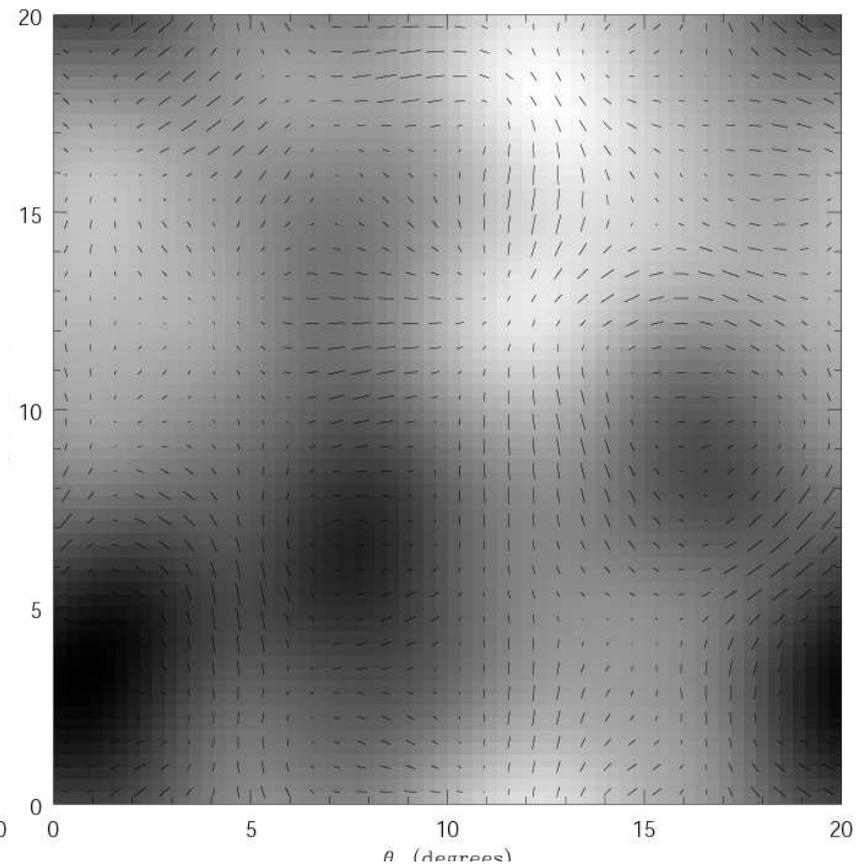
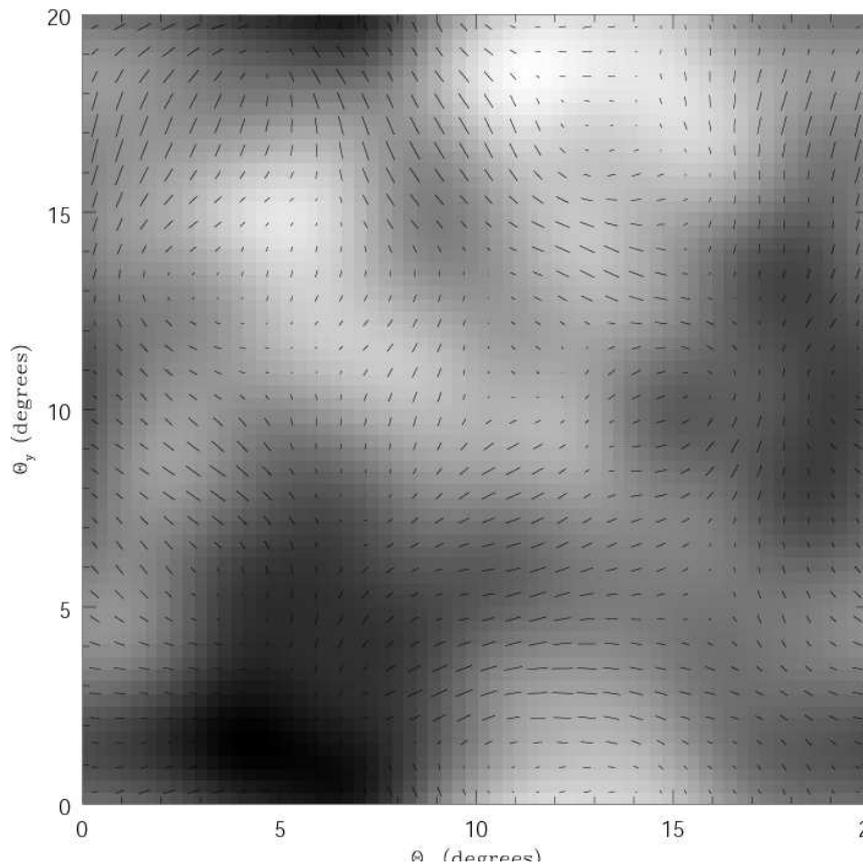
paramètre	MAP	Planck HFI
$\Omega_b h^2$	5%	1%
$\Omega_M h^2$	15%	1%
n_s	0.03	0.005
n_t	0.7 (?)	0.57

Bonus: polarisation:

- tests de consistence entre température et polarisation
- Lève des dégénérescences.

Température et polarisation du CMB

Cartes de 20 X 20 degrés, avec en fond le champ de température, avec la polarisation corrélée superposée

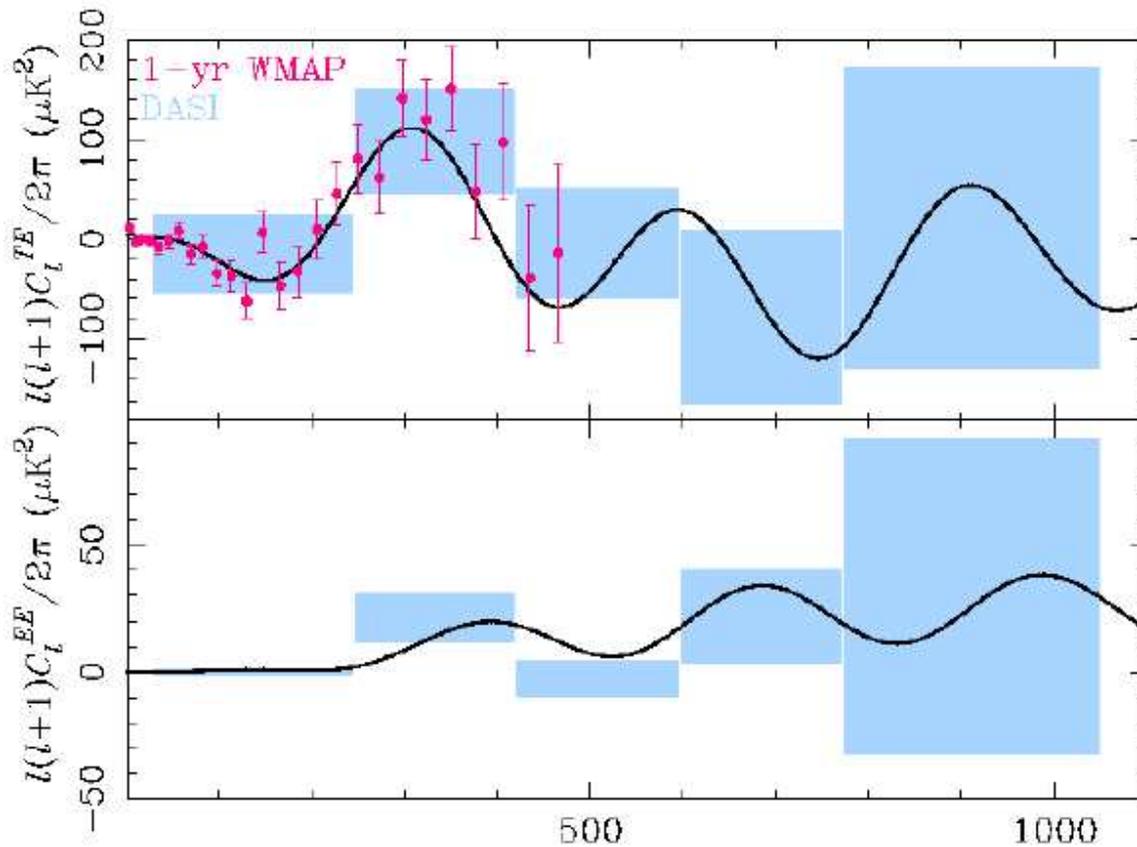


Perturbations scalaires adiabatiques

Perturbations tensorielles

l'association point chauds \leftrightarrow motifs tangentiels s'inverse

Détection du signal : DASI puis WMAP



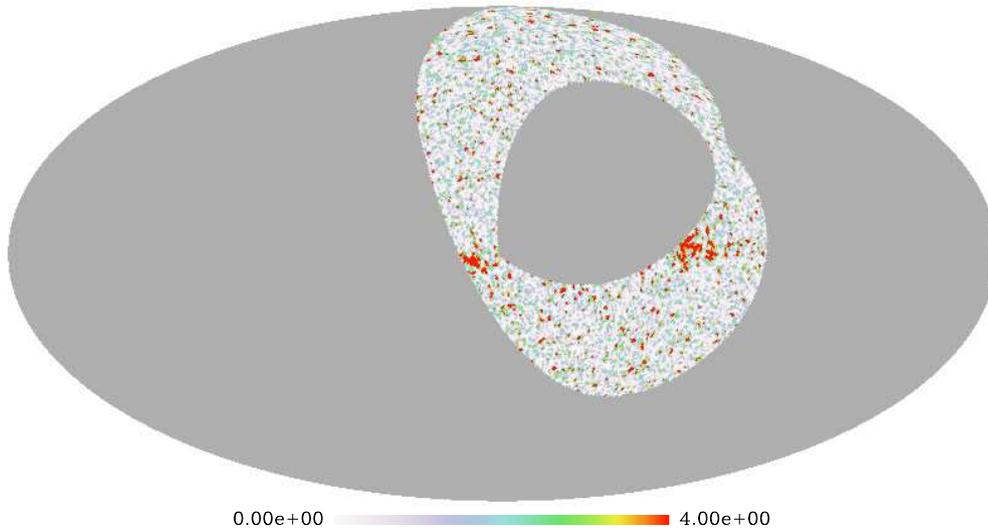
DASI suppose la dépendance en l

astro-ph 0209478, 0306048

- anisotropies de polarisation détectées
- la forme favorise les perturbations adiabatiques

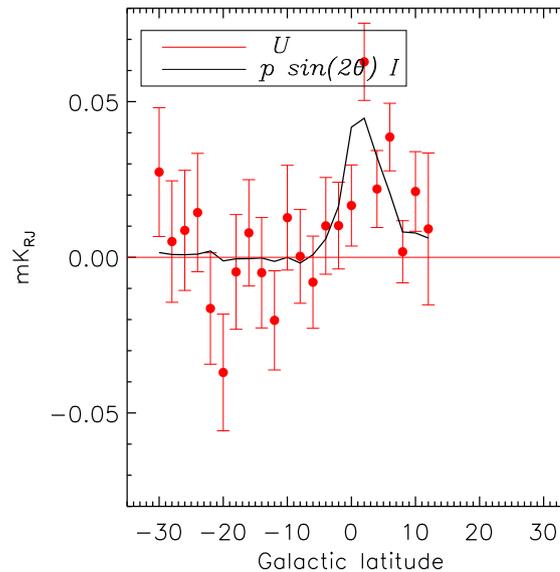
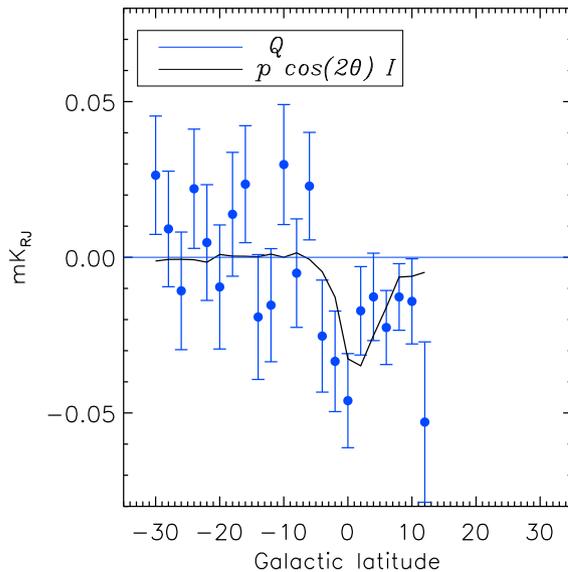
Polarisation avec Archeops

(astro-ph/0209478)



$$\leftarrow (Q^2 + U^2) / (\sigma_U^2 + \sigma_Q^2)$$

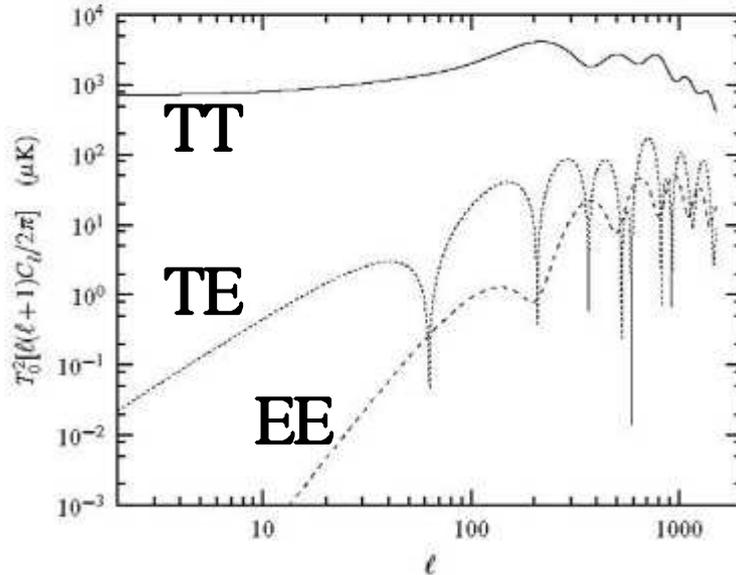
Recherche de signal galactique
à l'échelle de ~ 1 degré ($l \sim 200$)



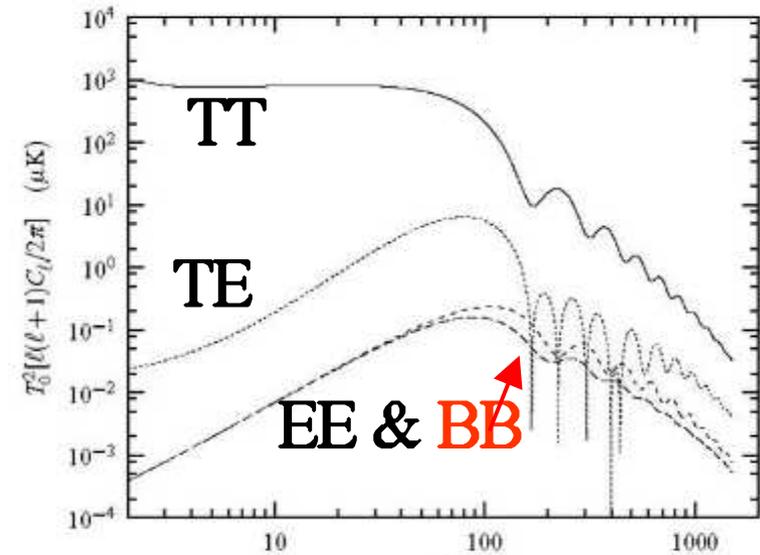
signal Galactique
de 5 a 10 %
de l'amplitude
du signal cos-
mologique

La polarisation de type B

Modes Scalaires



Modes Tensoriels



thèse de A. Riazuello

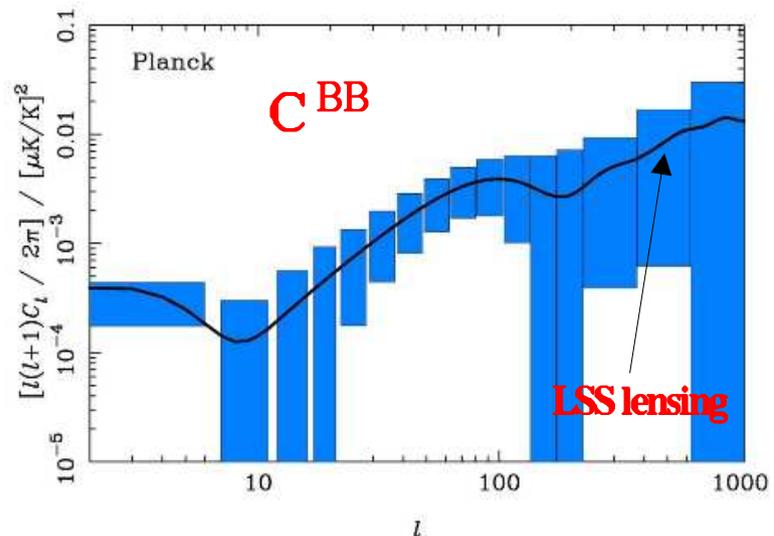
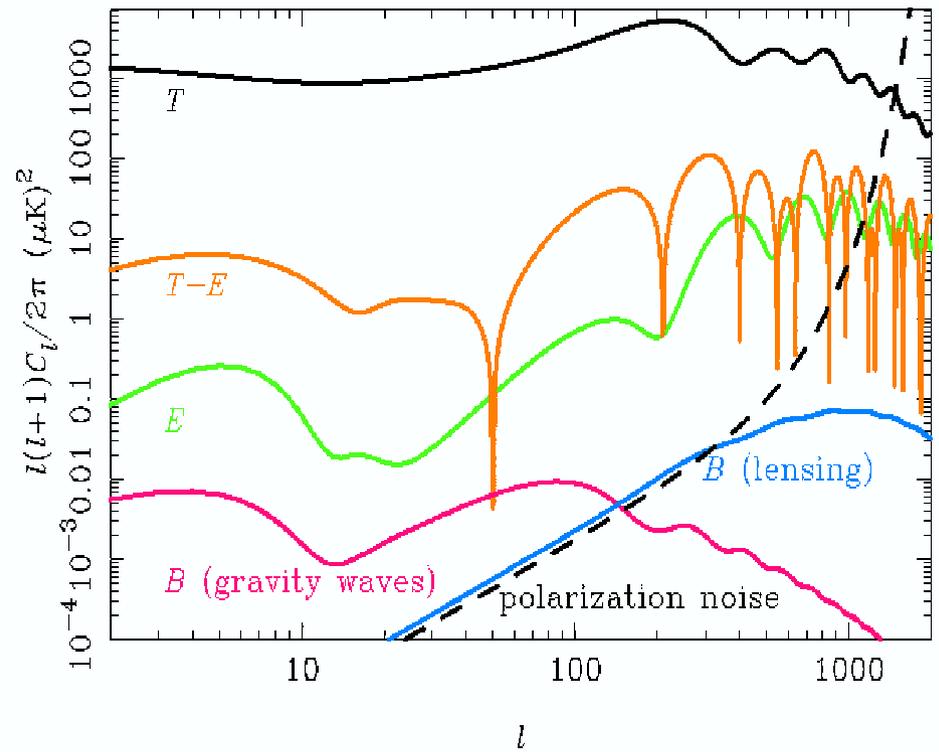
Q,U (Stokes) vs E,B

- Q,U: polarisation selon 2 axes (mesure)
- E,B : décomposition du champ de vecteurs en une composante potentielle (scalaire) et une composante rotationnelle (pseudo-scalaire)
- les perturbations scalaires n'engendrent que du E...

⇒ Les modes B signent un fond d'ondes gravitationnelles primordiales

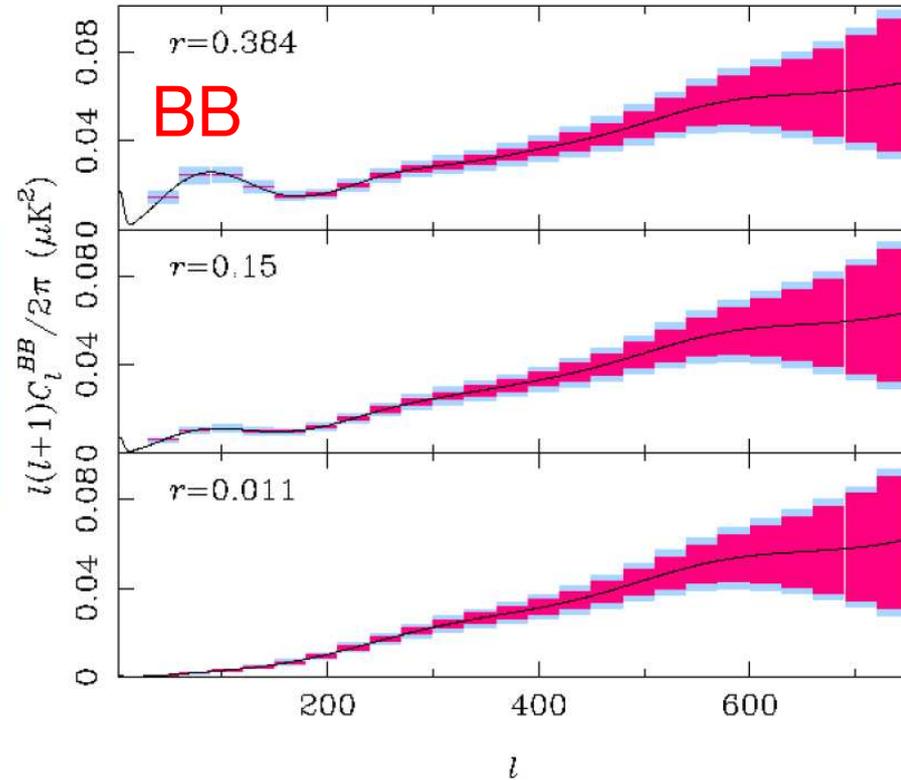
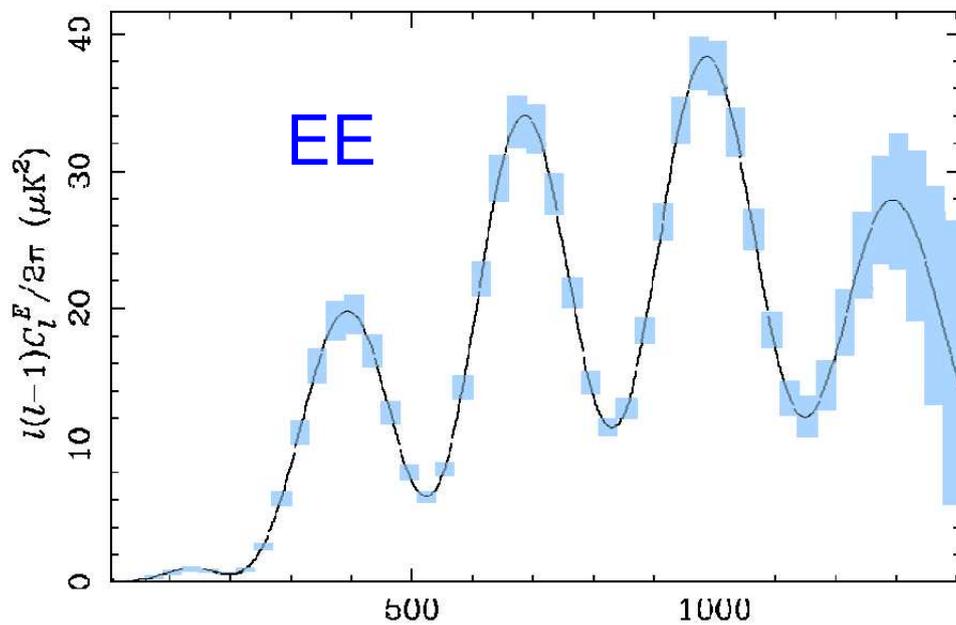
L'après Planck

- BB: Accès aux fond primordial d'ondes gravitationnelles ($l < 150$)
- Mais signal dépendant de l'échelle de grande unification.
- Sensibilité de Planck marginale au signal BB
- C'est donc très difficile!
- Signal aux grandes échelles: il faut couvrir tout le ciel



CLOVER : polarisation B au sol

Projet britannico-français de télescope mm dans l'antarctique.



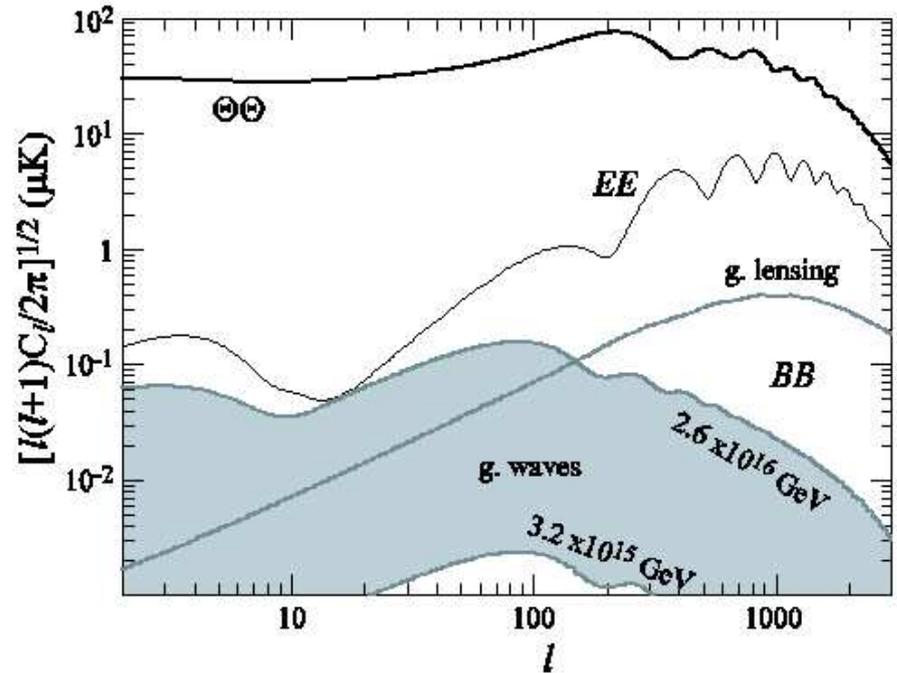
Observations vers 2008 (?)

BRAIN: projet de d'interféromètre bolométrique (test rapidement)

Polarisation B dans l'espace

Deux projets, EPIC(ex CMBPol) & SAMPAN:

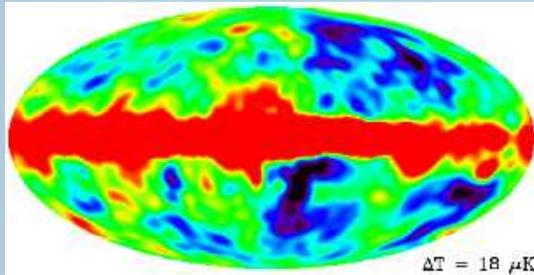
- mesurer les modes B à très bas l .



- mesurer le lensing du mode E par les grandes structures ($l > 200$).
- mesurer ou mettre une limite sur la masse (moyenne) des neutrinos (0.05 eV)

Polarisation B dans l'espace (CMBPoL)

The sensitivity increase required

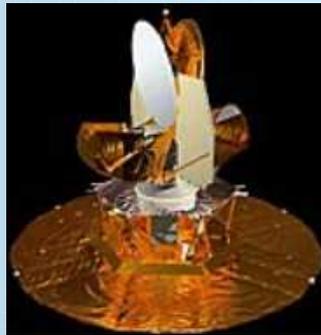


CMBPoL

x 20-100

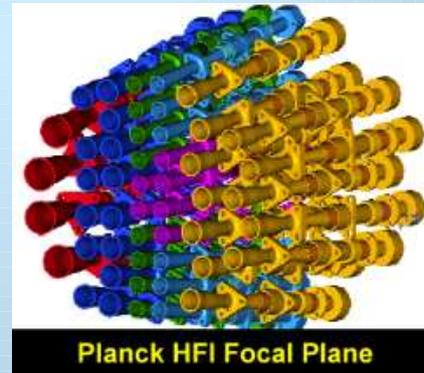
Exact number will be the result of studies

x 40



MAP

x 20†



Polarization sensitivity
 $30 \mu\text{K}^\dagger$ per 5 arcmin pixel to Q and U

A lot of the sensitivity increase for MAP and Planck has come from improvements in detector sensitivity, but Planck is close to the background limit

†Planck spec. Mission-realized sensitivity is expected to be much better

EPIC & SAMPAN

	EPIC	SAMPAN
miroir primaire	2m	30 cm
échelles angulaires	$0 < l < 2000$	$0 < l < 200$
où	point de Lagrange L2	
durée	4 ans	
détecteurs	bolomètres 300 mK	
Contexte	Einstein probes NASA	autre
point dur	plan focal dense	

Gagner un facteur **30** en sensibilité par rapport à Planck:

- gain marginal sur le bruit de l'électronique
- ⇒ il faut **1000** fois plus de photons
- **2** fois plus de temps.
- plus de **100** fois plus de détecteurs dans le plan focal.
- ⇒ matrices (denses) de bolomètres.

R&D matrices de bolomètres

Projet: développer des matrices de bolomètres mm et sub-mm, sensibles à la polarisation.

Leadership: A. Benoit (CRTBT, Grenoble)

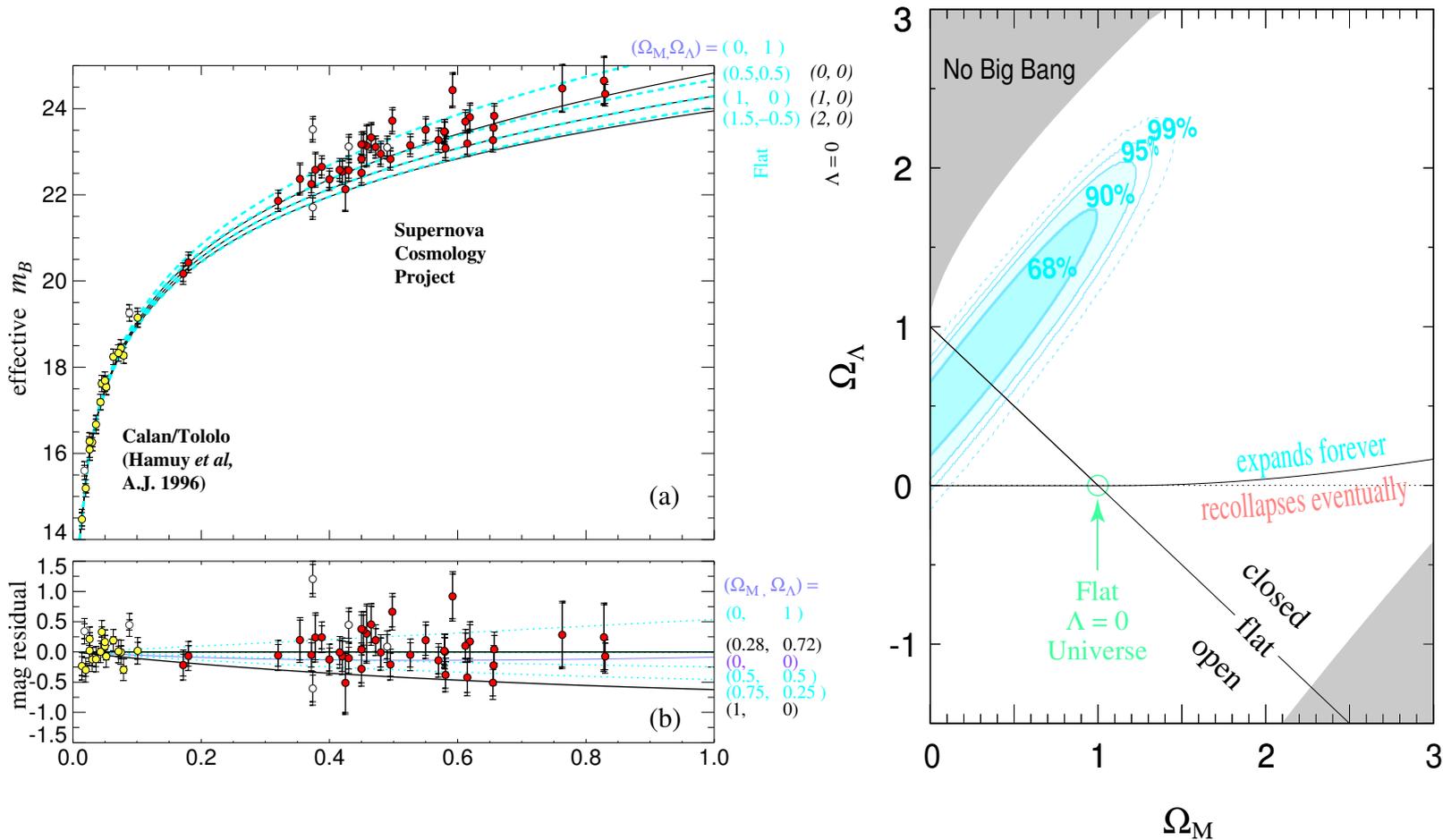
Parties prenantes: IN2P3/INSU et autres

Soutien: CNES IN2P3

Effort de développement indépendant du contexte de réalisation

Diagramme de Hubble des Supernovae Ia

L'histoire

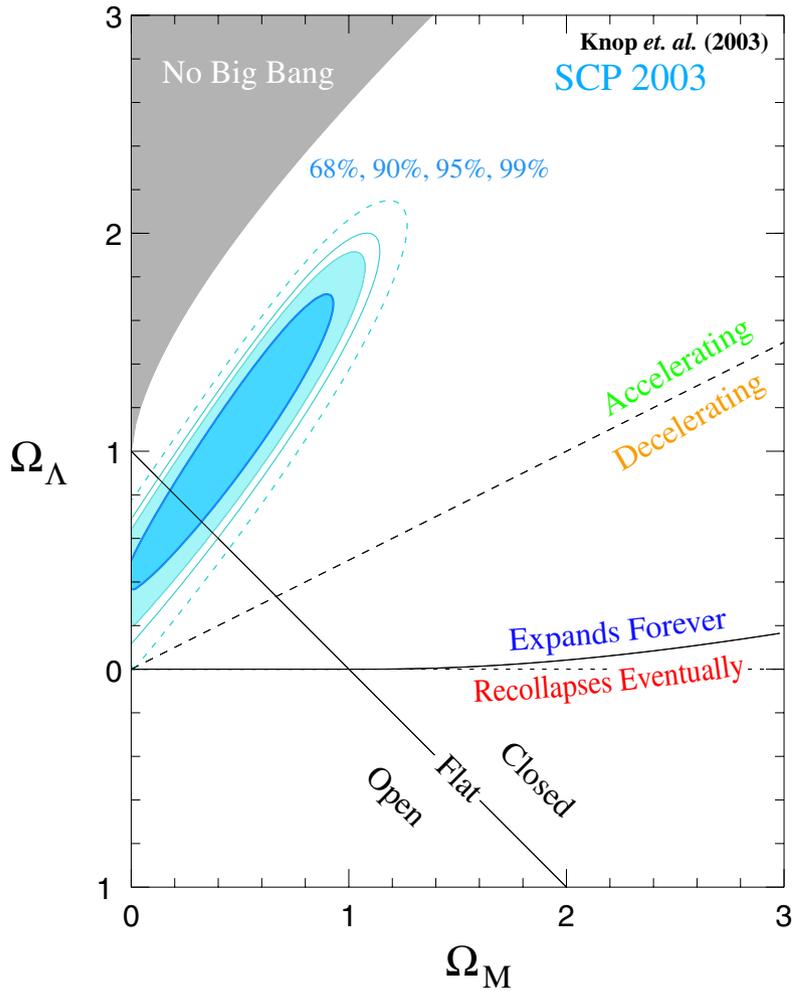


Les SNe lointaines apparaissent plus faibles qu'attendu avec $\Omega_M = \Omega_{\text{tot}} = 1$

⇒ L'expansion s'accélère ($\Omega_\Lambda > 0$)

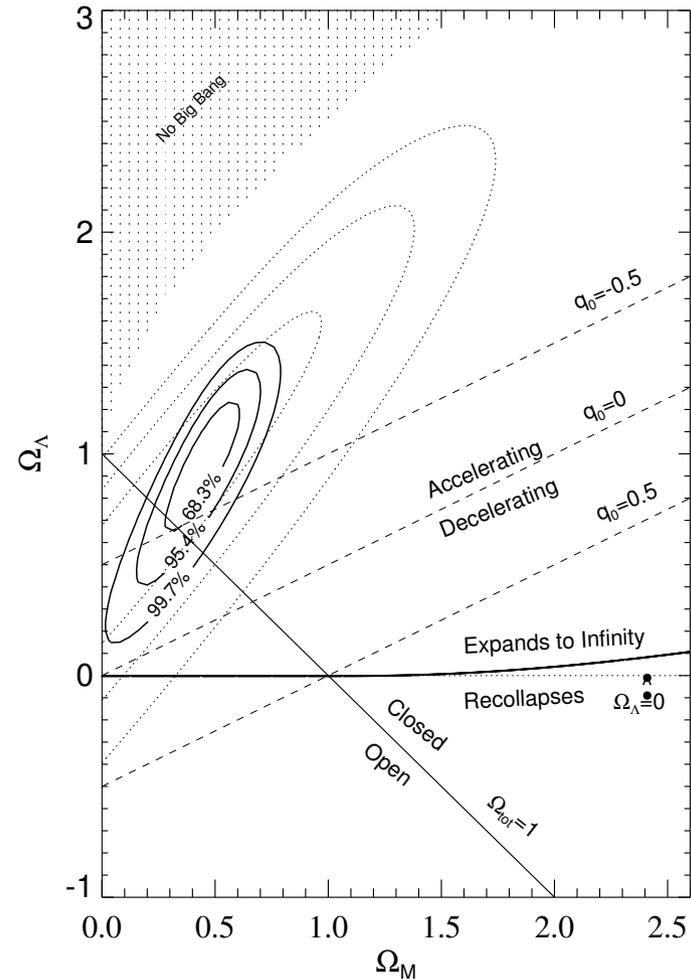
(Perlmutter et al, Riess et al, 1999)

Résultats récents



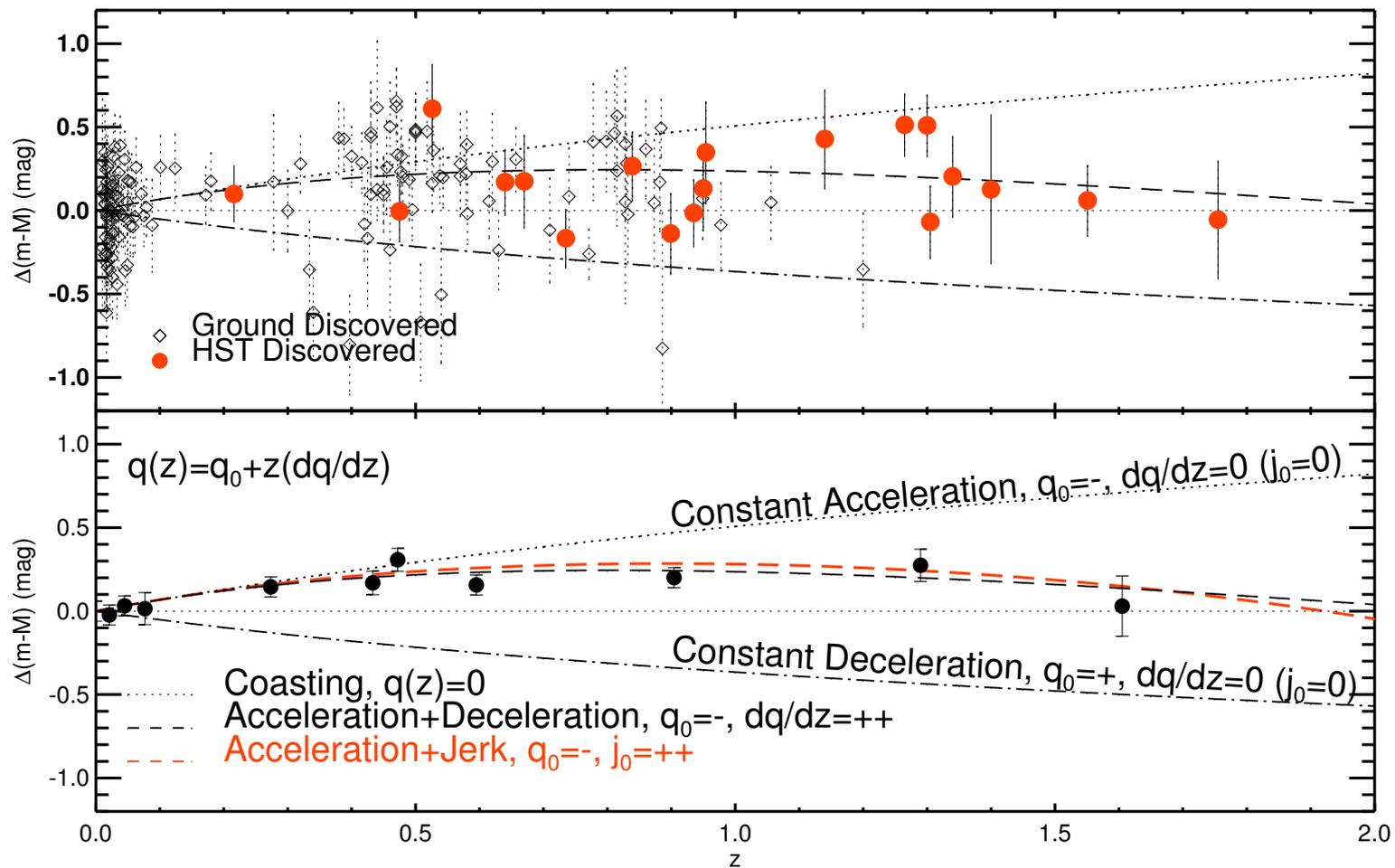
SCP:

$$\Omega_M = 0.25 \pm 0.07(stat) \pm 0.04(sys)$$



Riess *et al*

Mesure de SNe à $z > 1$ avec le HST



(Riess 2004)

- L'expansion décellerait avant $z \sim 0.5$
- Confirme l'interprétation en terme d'énergie noire/ Λ

Une constante cosmologique...

LE problème de la constante cosmologique:

- On attend:

$$\frac{\Lambda}{8\pi G} \sim M_{\text{planck}}^4$$

- On mesure 10^{120} fois moins.

Why now?

- On trouve $\Omega_M \simeq \Omega_\Lambda$ **aujourd'hui**
- hors $\rho_M \sim (1+z)^3$ et $\rho_\Lambda = C^{ste}$

Une constante cosmologique variable

(la quintessence en 1 transparent)

Un champ scalaire ϕ :

- homogène, potentiel $V(\phi)$
- satisfait l'équation de Klein-Gordon: $\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$
- Equation de Friedman (RG):

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_M + \rho_\phi + \rho_{rad})$$

- pression, densité, et équation d'état de ϕ :

$$p_\phi = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi)$$

$$\rho_\phi = \dot{\phi}^2/2 + V(\phi)$$

$$w_\phi = \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \frac{\dot{\phi}^2/2 - V(\phi)}{\dot{\phi}^2/2 + V(\phi)}$$

Zoologie de l'équation d'état

1. Constante cosmologique ou **autre chose**: Par exemple :

type	w
matière	0
radiation	1/3
constante cosmologique	-1
<champ scalaire> ₀	-1
champ scalaire $\dot{\phi} \neq 0$	[-1,1]
parois de domaines	-2/3
cordes cosmiques/ textures	-1/3

2. Eq. d'etat **constante ou variable**, e.g. $w(z) = w_0 + w_1 z$

$w?$

- Hypothèses : univers **plat** et w_x **constant**:

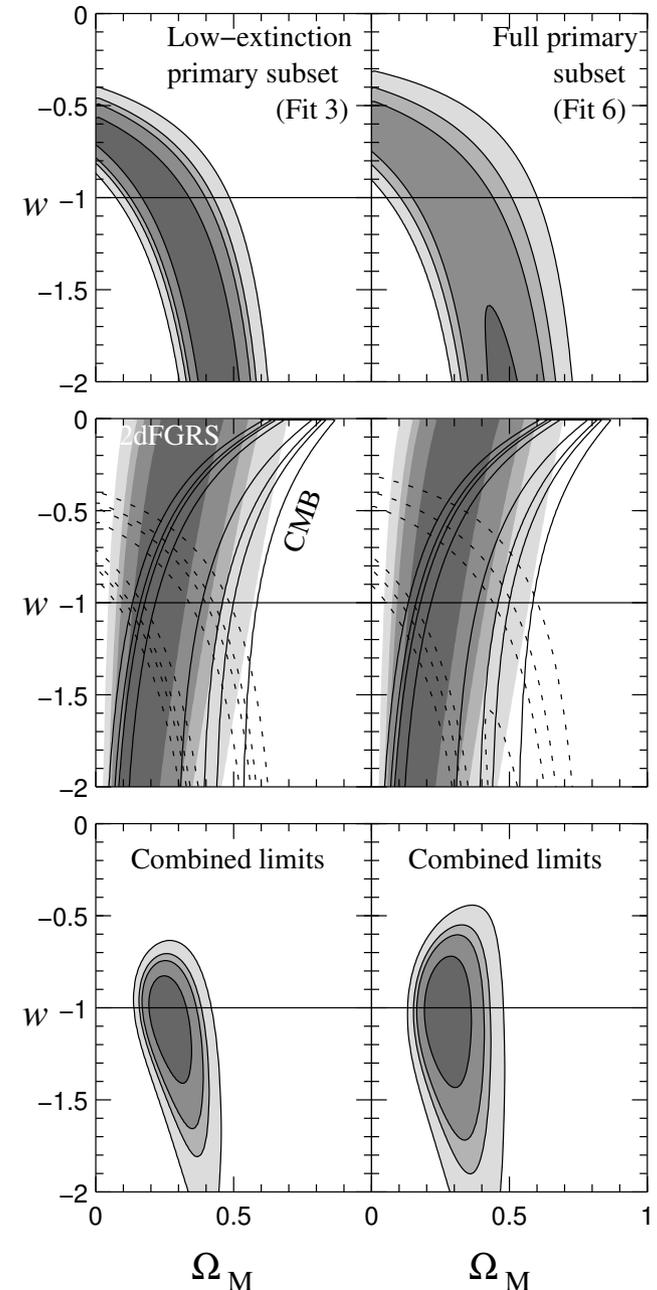
$$P_x = w_x \rho_x$$

- contribuant à la distance de luminosité :

$$\Omega_x (1+z)^{(1+3w_x)}$$

- Contraintes dans le plan (Ω_M, w) dans l'hypothèse d'un univers plat.
- Combinaison avec les données du **CMB** (WMAP) et des **grandes structures** (2DFGRS).

$$w = -1.05_{-0.20}^{+0.15}(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$$



Knop *et al.*, 2003

Supernovae par centaines: SNLS

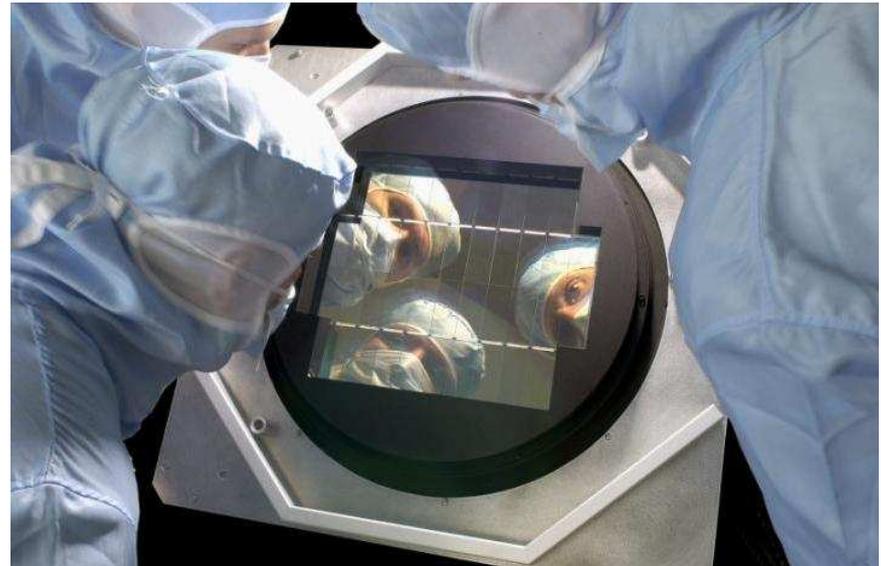
les SN dans le CFHT Legacy Survey

SNLS

- observations en 4 bandes toutes les 4 nuits
- Collaboration France-Canada
- >200 heures/an de 8 m pour la spectroscopie
- ~ 120 SNe Ia/an pendant 5 ans.
- Début : aout 2003.

Megacam

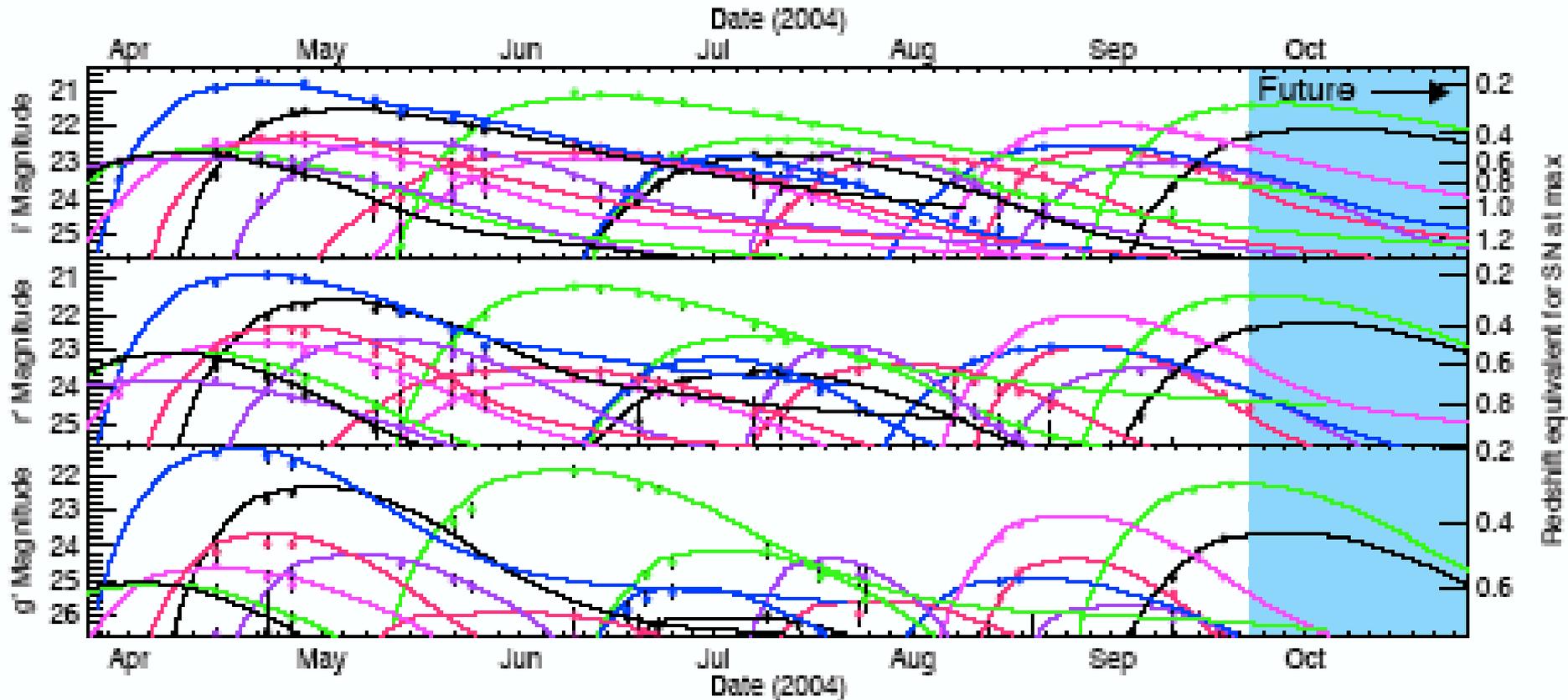
- 36 CCD 2k x 4.5k pixels
- 1 degré carré au total
- FWHM ~ 3-5 pixels



made in Saclay

SNLS: Le multiplexage

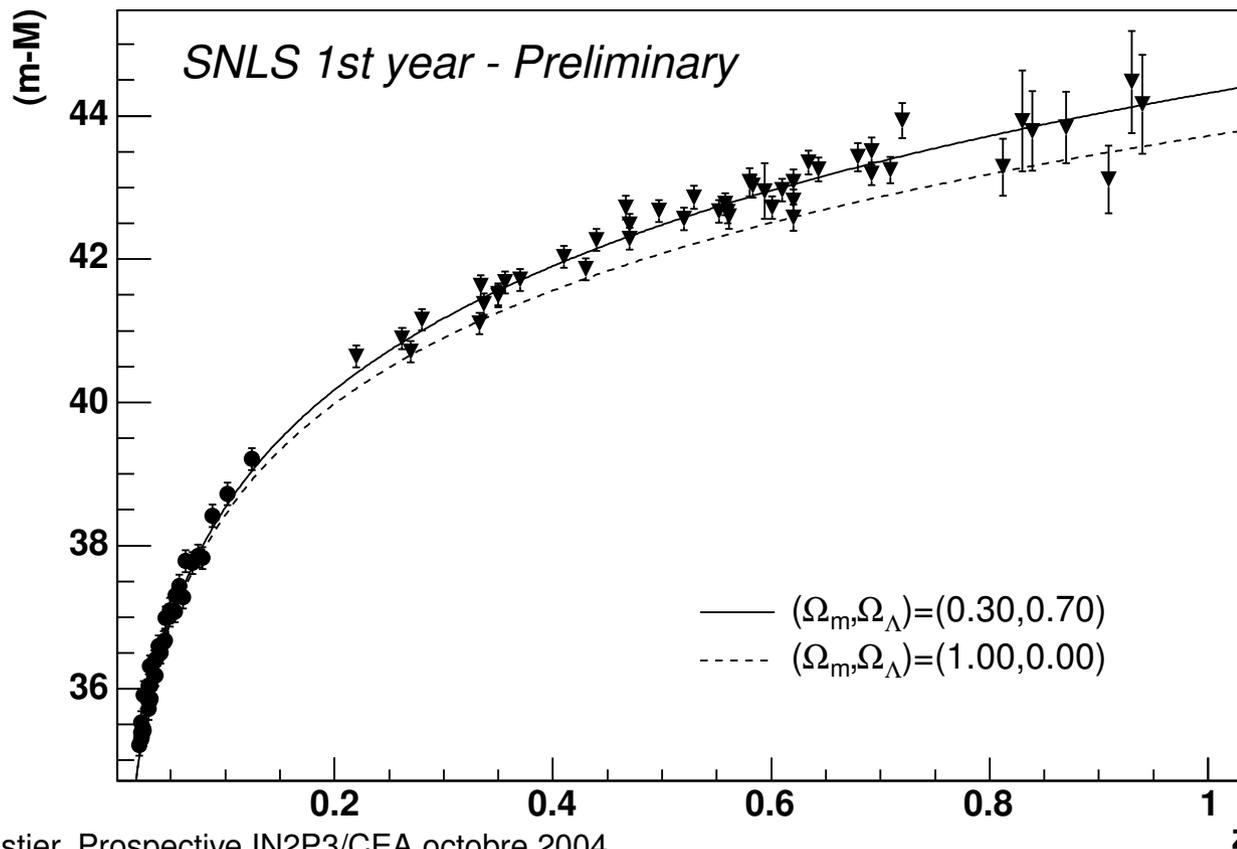
On revient toujours sur les mêmes 4 champs:



Chaque image produit au moins **5** points de photométrie.

SNLS : un an de données

- Statistique : **110** SNe Ia confirmées spectroscopiquement $0.2 < z < 1.01$
- **46** SNe Ia ont déjà assez d'images sans la supernova dans 2 bandes:



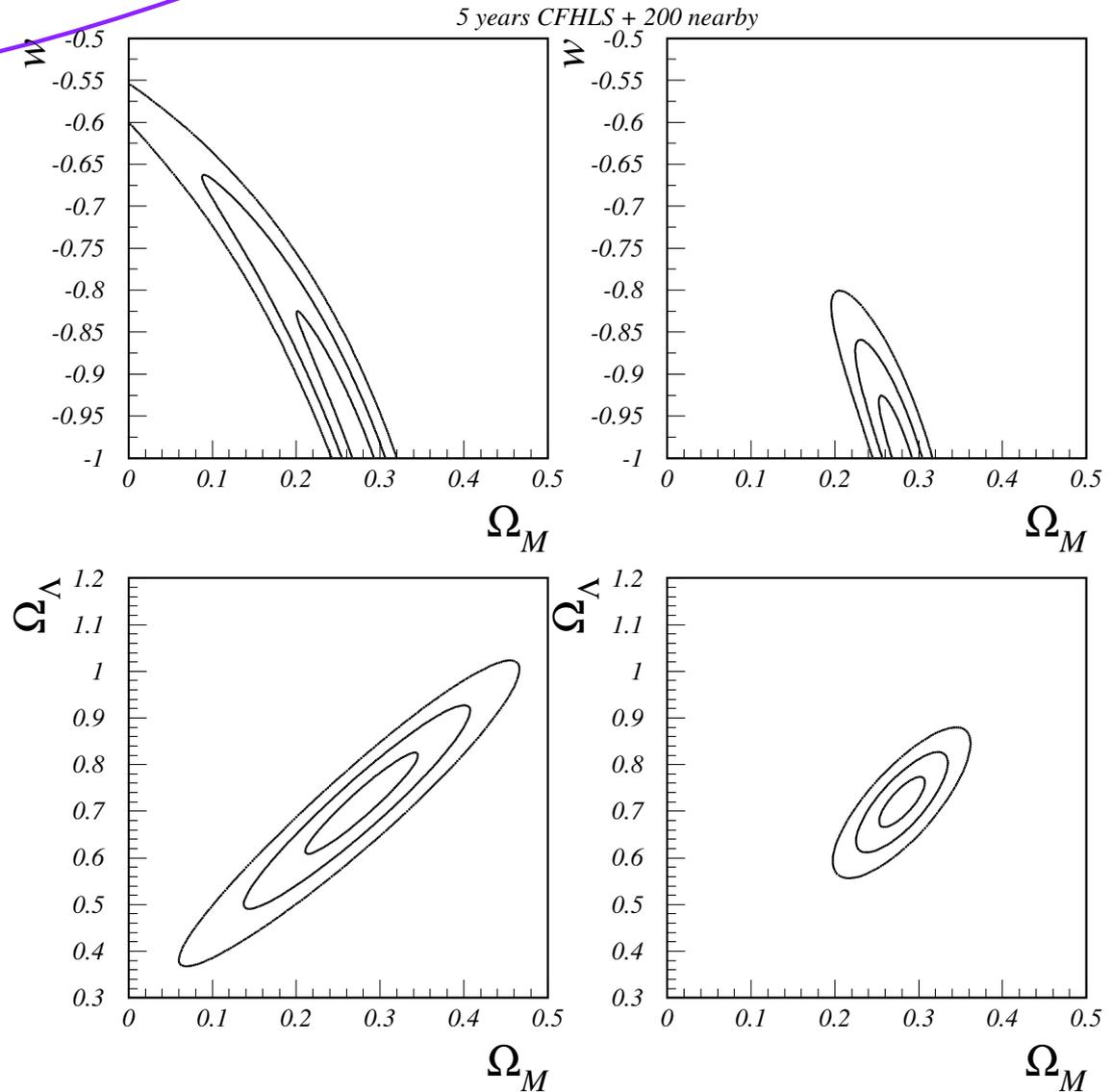
A suivre...

Cosmologie: précision espérée

$$\sigma(\Omega_M) = 0.03$$

600 SNe
($0.25 < z < 0.95$)

+ 200 SNe proches
($z < 0.1$)



SNe proches:Supernova Factory

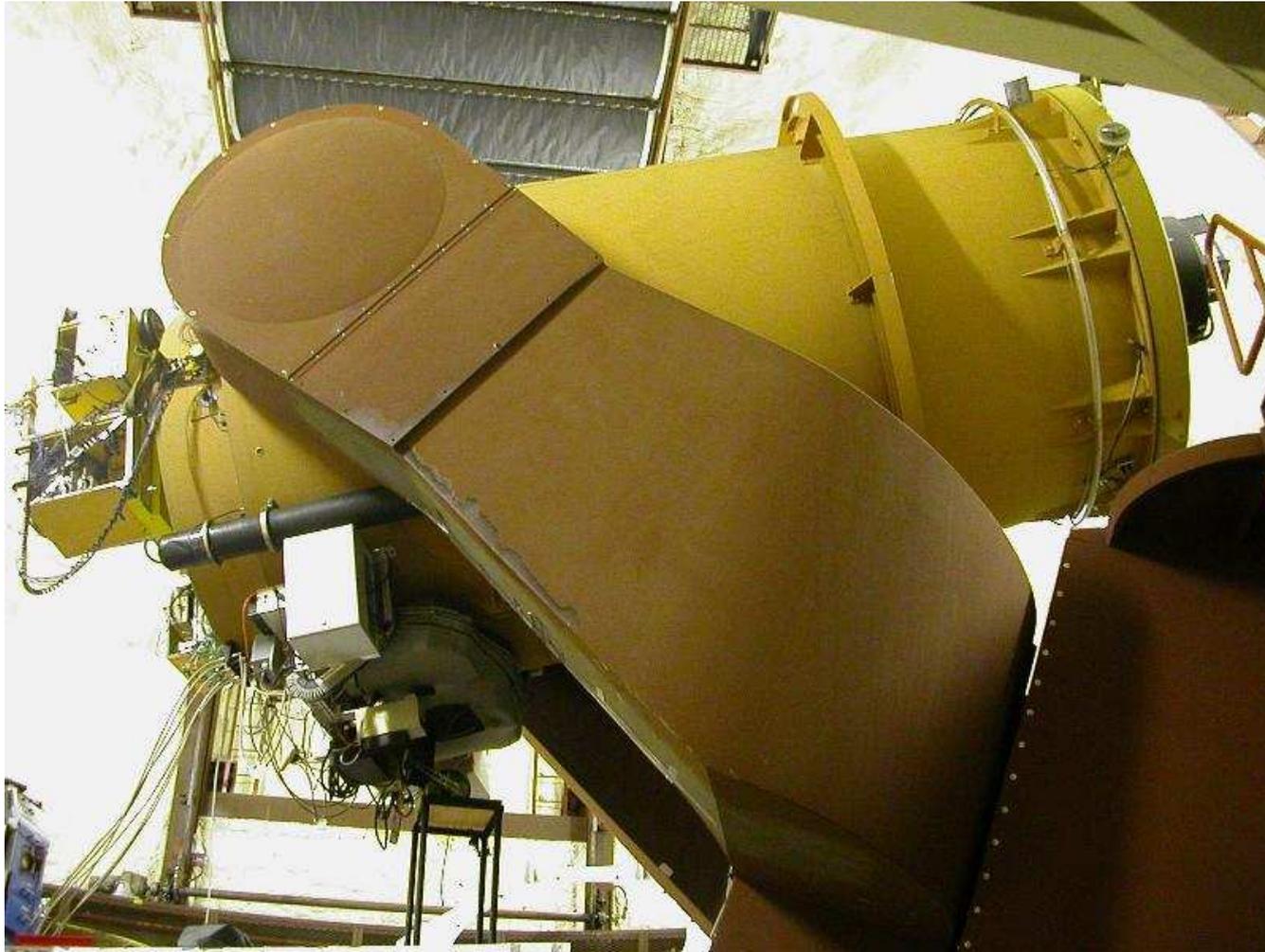
Buts

- mesurer quelque centaines de SNe proches et dans le flot de Hubble.
 - mesures spectro-photométriques
 - ⇒ diagramme de Hubble à petit z et étude des SNe Ia.
 - construction d'un instrument dédié
SNIFS(INSU/PNC/IN2P3)
-
- monté sur le 2.2m
UH au Mauna-Kea:
 - Collab franco-américaine (LBL).

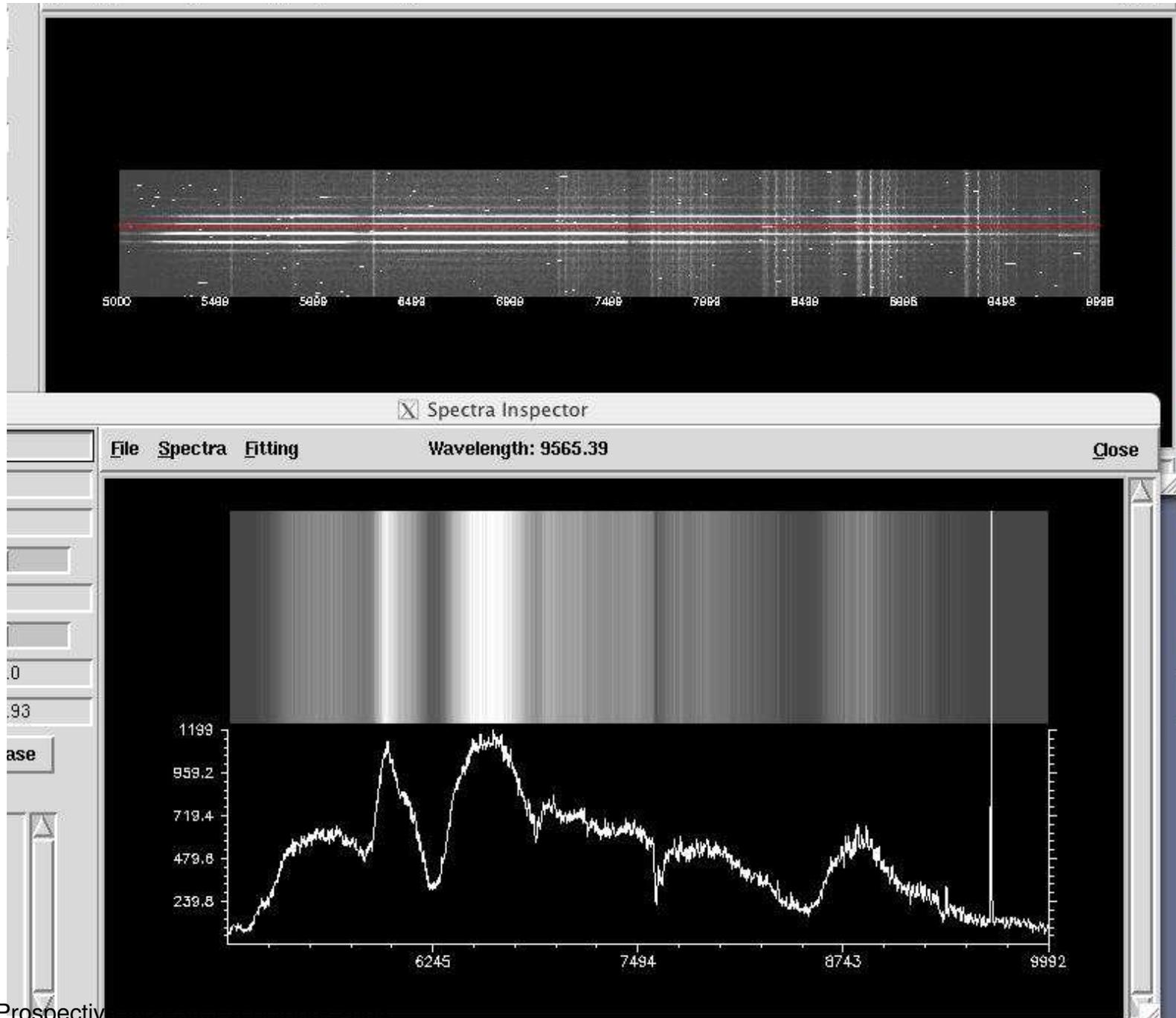


Première lumière de SNIIFS

Avril 2004: monté sur le télescope.



SNIFS: première SNe Ia suivie



Futur : SNe dans l'espace

Cas scientifique (Energie Noire)

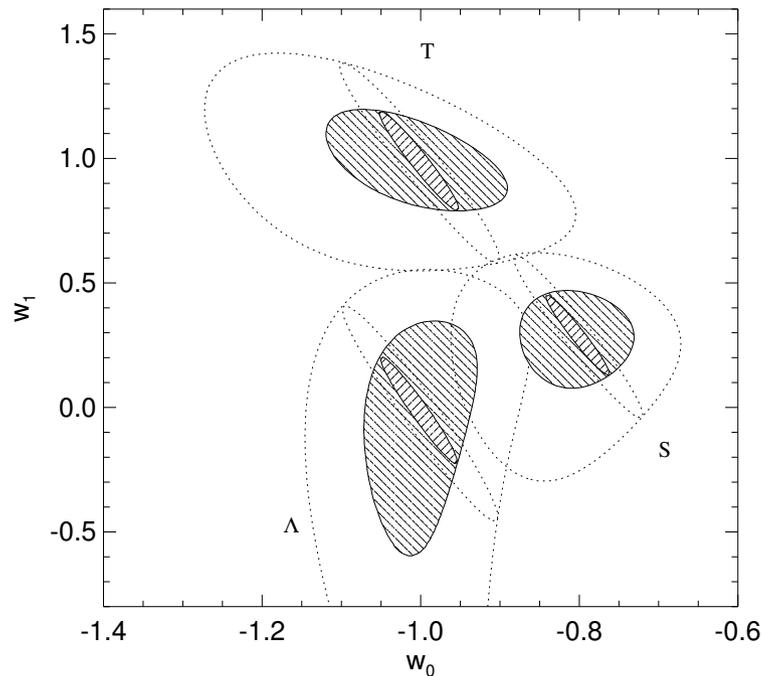
Mesurer l'équation d'état suffisamment précisément pour pouvoir séparer Λ d'un modèle dynamique.

⇒ plusieurs milliers de SNe $z < 2$

⇒ Une mesure du cisaillement gravitationnel sur au moins 300 degrés carrés.

2000 SNe Ia

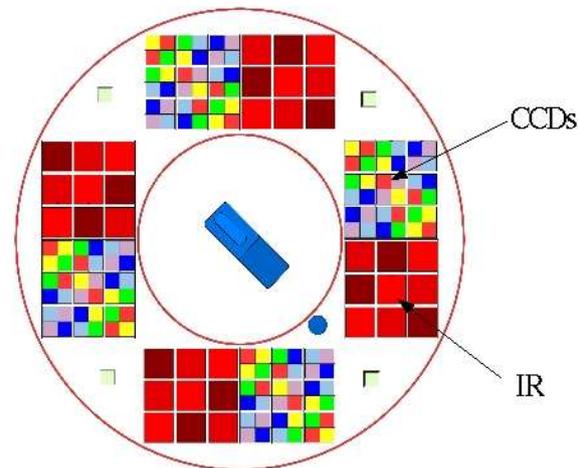
$0 < z < 1.4$



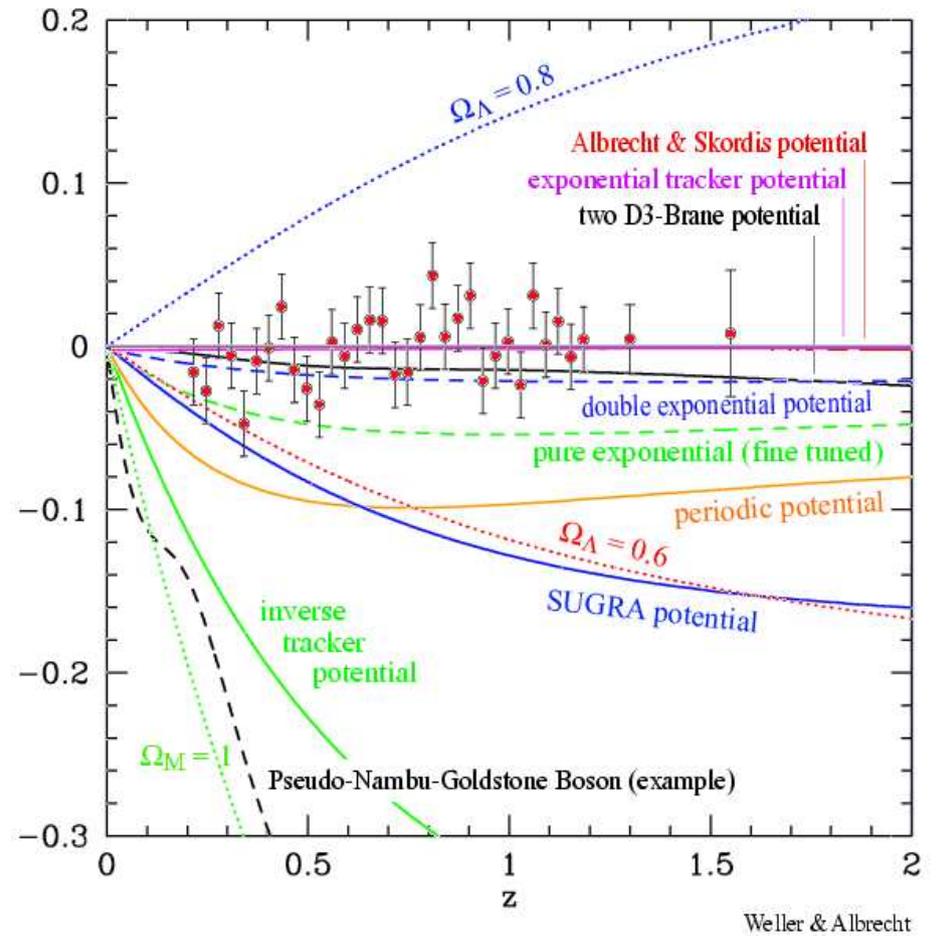
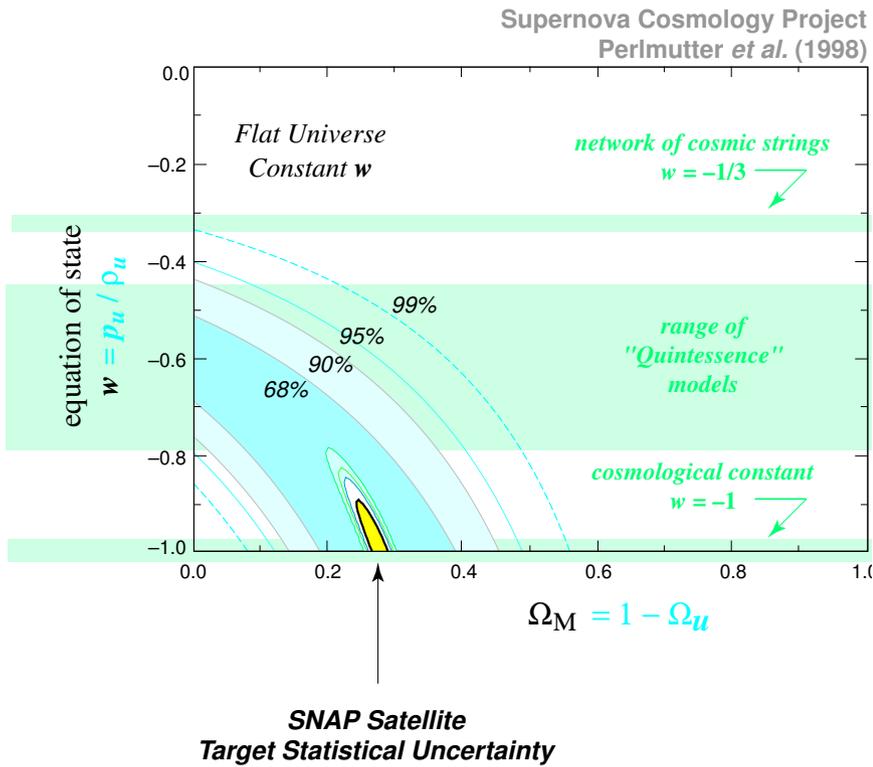
Concepts de mission

	SNAP/JDEM	DUNE
miroir primaire	2m	1.3m
couverture spectrale	350nm → 1700nm	
imageur	0.6 deg ²	0.5 deg ²
spectro	IFU	non
réalisation	NASA/DOE	autre
point dur	réalisation de l'imageur	

concept imageur SNAP:



Potentialités



Activités en France

SNAP/JDEM

- Collaboration formée depuis 2001.
- Etudes scientifiques
- Développements :
 - spectrographe
 - études des détecteurs et de l'électronique associée (imageur & spectro)

DUNE

- Etudes scientifiques engagées.
- Définition du concept en cours.
- Développements imageur similaires.

Résumé : présent et futur

	CMB	SNE Ia
Engagements	Planck	SNLS SNFactory
Projets (court terme)	Brain/Clover Olympo	-
Long terme	EPIC SAMPAN	SNAP/JDEM DUNE
R&D	matrices de bolomètres	Détecteurs et électronique

Deux projets spatiaux majeurs
et ambitieux!