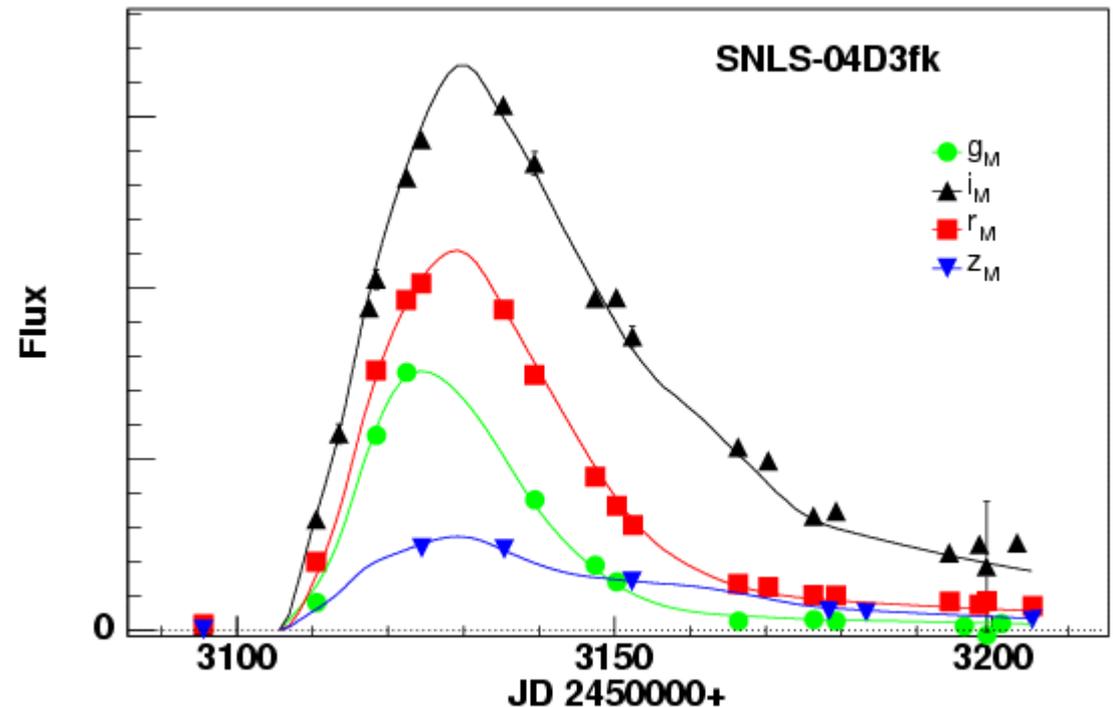
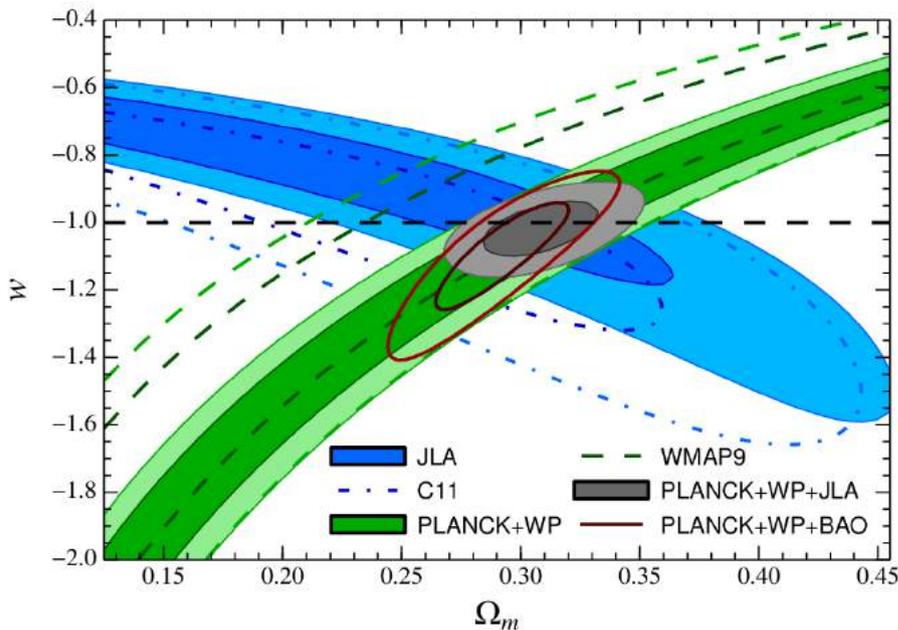


Energie Noire: Supernovae et cisaillement gravitationnel (séminaire au Collège de France)

Pierre Astier (LPNHE-Paris)
(IN2P3/CNRS/UPMC)

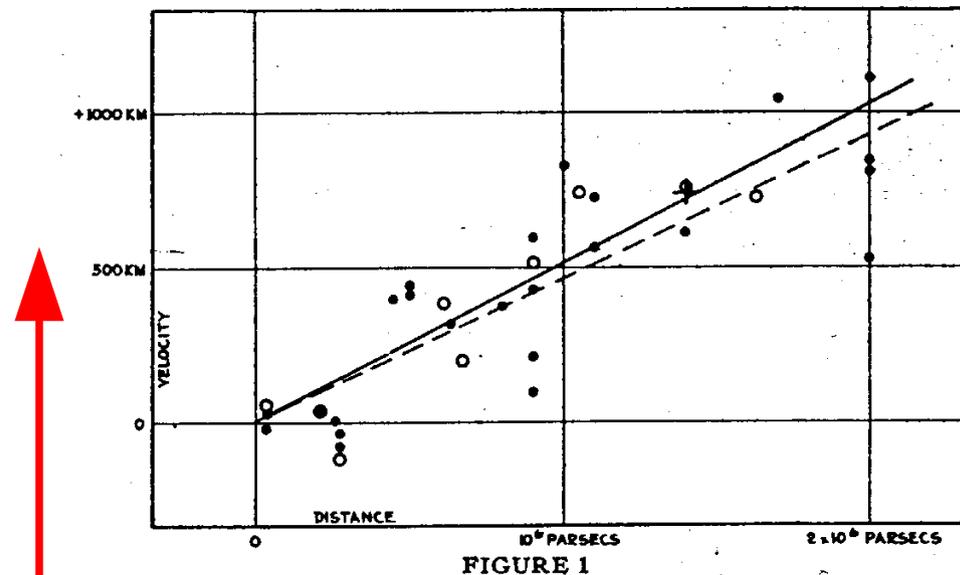


L'expansion (de l'univers)

1929 : Edwin Hubble : « plus ça va vite, moins ça brille »

Vitesse de récession
de galaxies
vs leur « distance »

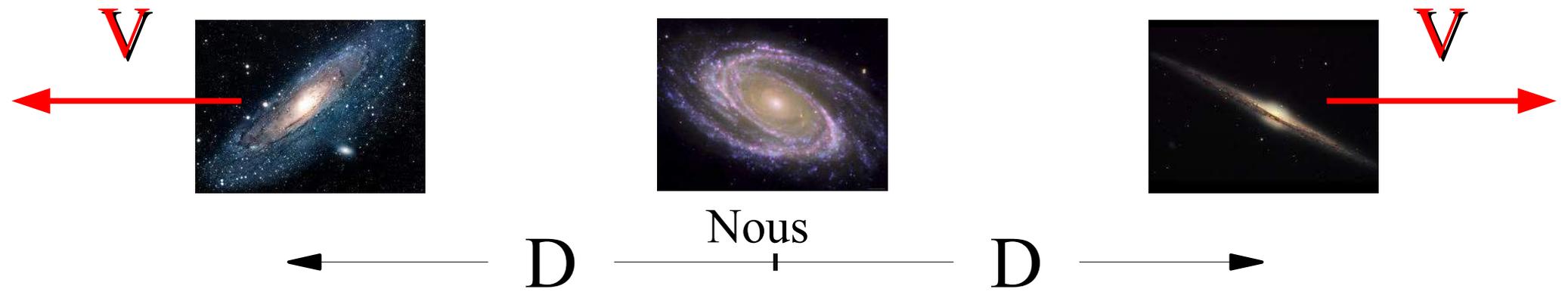
vitesse



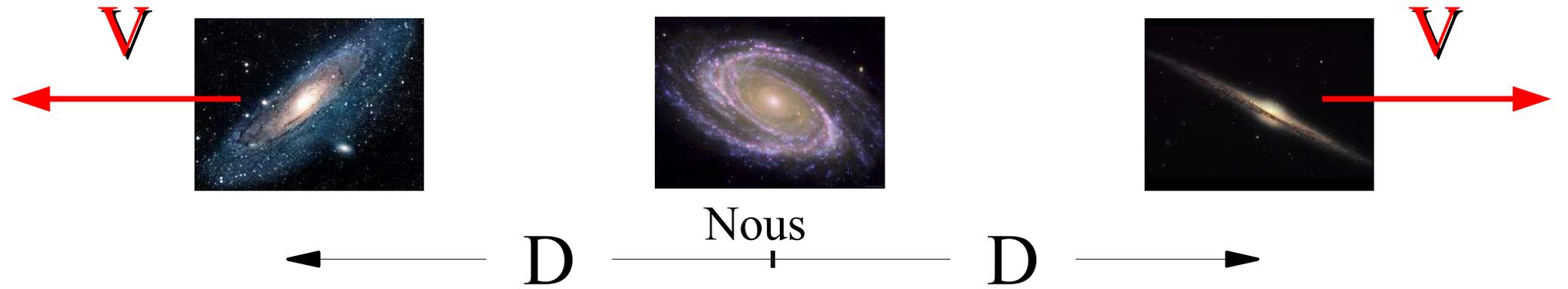
Distance (d'après leur flux)

En fait, un article de l'abbé Lemaître de 1927 décrit la même chose, en utilisant les mêmes données, en français, et sans graphique....

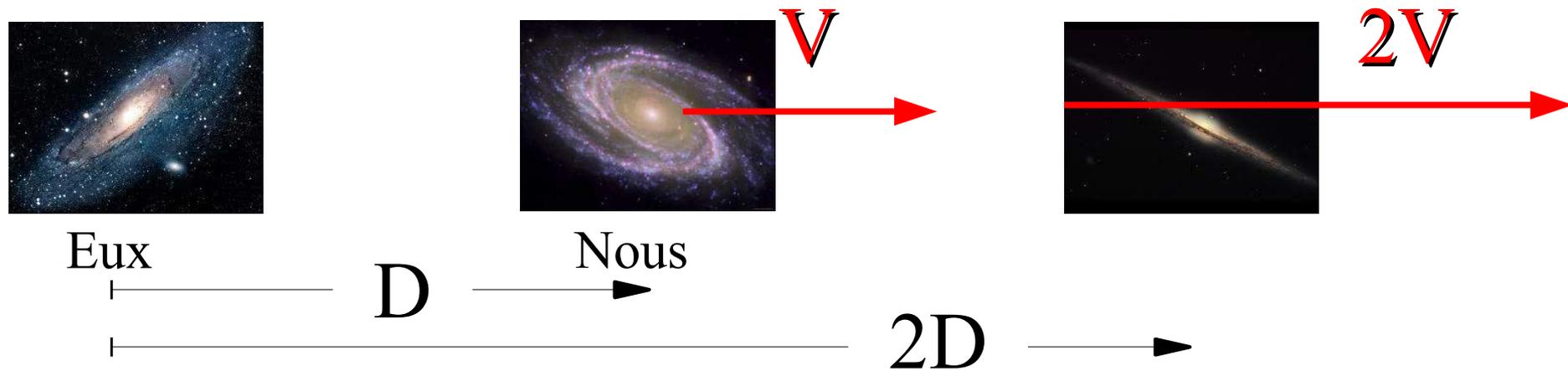
L'expansion



L'expansion



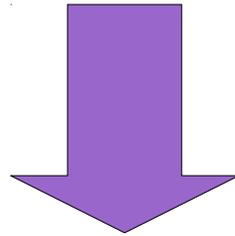
Changeons de point de vue



L'expansion :

Principe cosmologique :

Pas de direction ni de position privilégiée

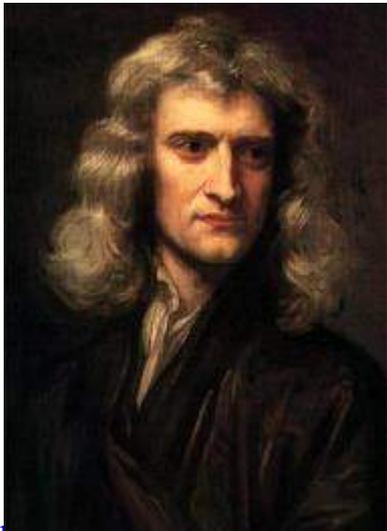
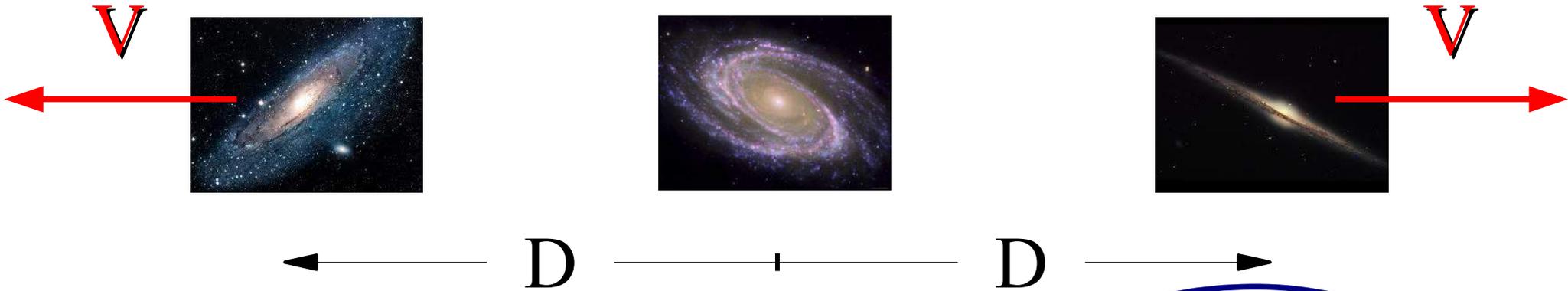


Vitesse et distance sont proportionnelles

(au moins pas trop loin de nous)

Aucun argument dynamique : uniquement les symétries.

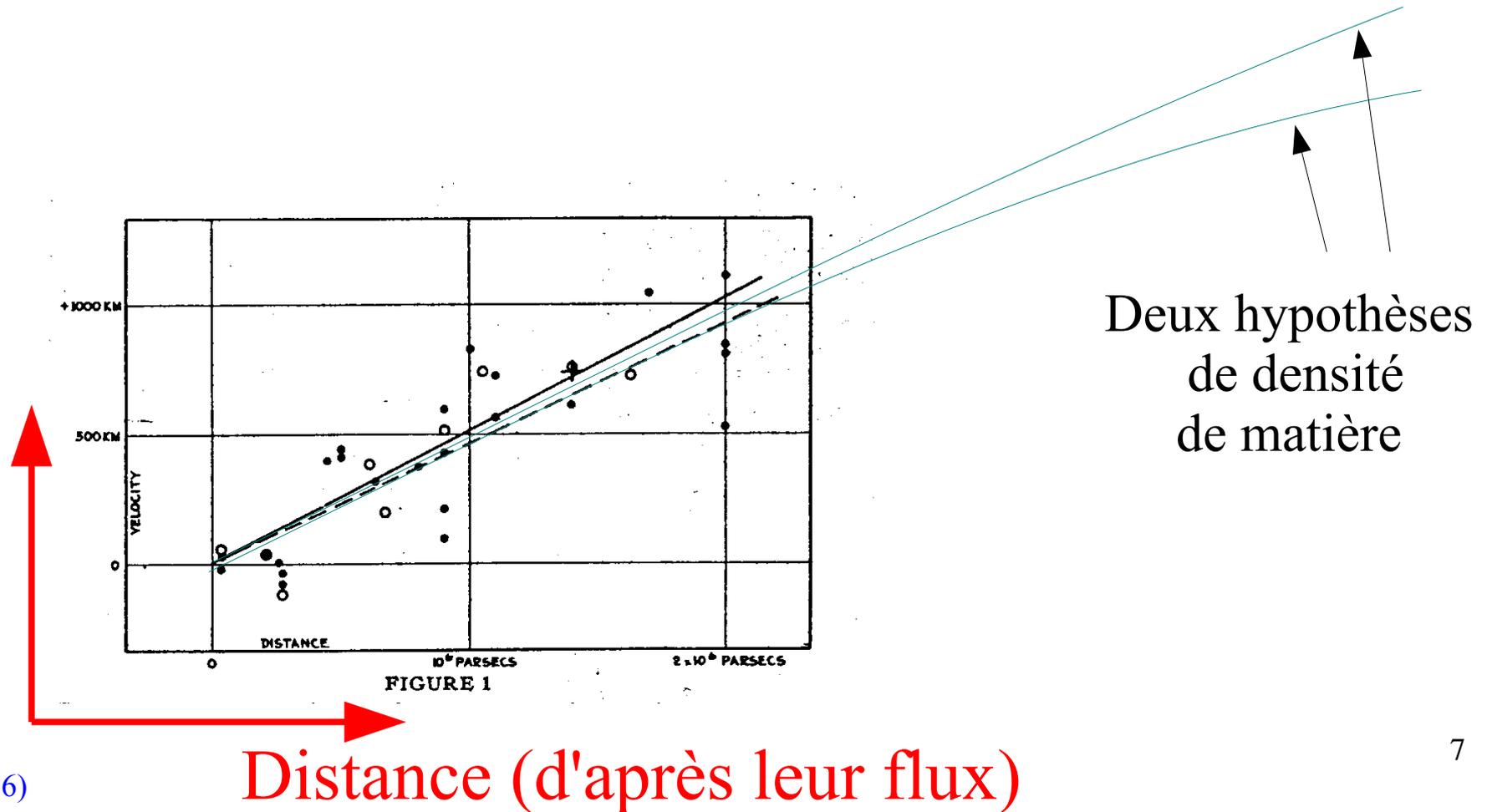
L'expansion : variation de la vitesse



« Attraction universelle » :
les galaxies s'attirent
et leur vitesse relative
diminue avec le temps

Donc

- $V = H d$ est une signature de l'expansion de l'univers
- La variation de la vitesse d'expansion avec le temps (ou la distance) encode les forces en jeu.



L'équation de Friedman

- La **Relativité Générale** relie les trajectoires dans l'espace-temps et les densités d'énergie des fluides qui peuplent l'Univers.
- Equations d'Einstein + principe cosmologique

→ Equation(s) de Friedman

$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2}$$

Expansion

Densités d'énergie

“Constante Cosmologique”

courbure

The diagram shows the Friedmann equation with four terms highlighted in colored ovals: a red oval for the energy density term, a blue oval for the cosmological constant term, and a green oval for the curvature term. Arrows point from the labels 'Expansion', 'Densités d'énergie', '“Constante Cosmologique”', and 'courbure' to their respective terms in the equation.

Histoire de l'expansion et contenu de l'univers

- Il faut mesurer des couples (vitesse, distance)
- Pour les vitesses, c'est (presque) facile :
 - décalage spectral (« Doppler »)
- Pour les distances, c'est plus difficile :
 - Distance de luminosité : « chandelles standards »
 - Distance angulaire : « règles standard »

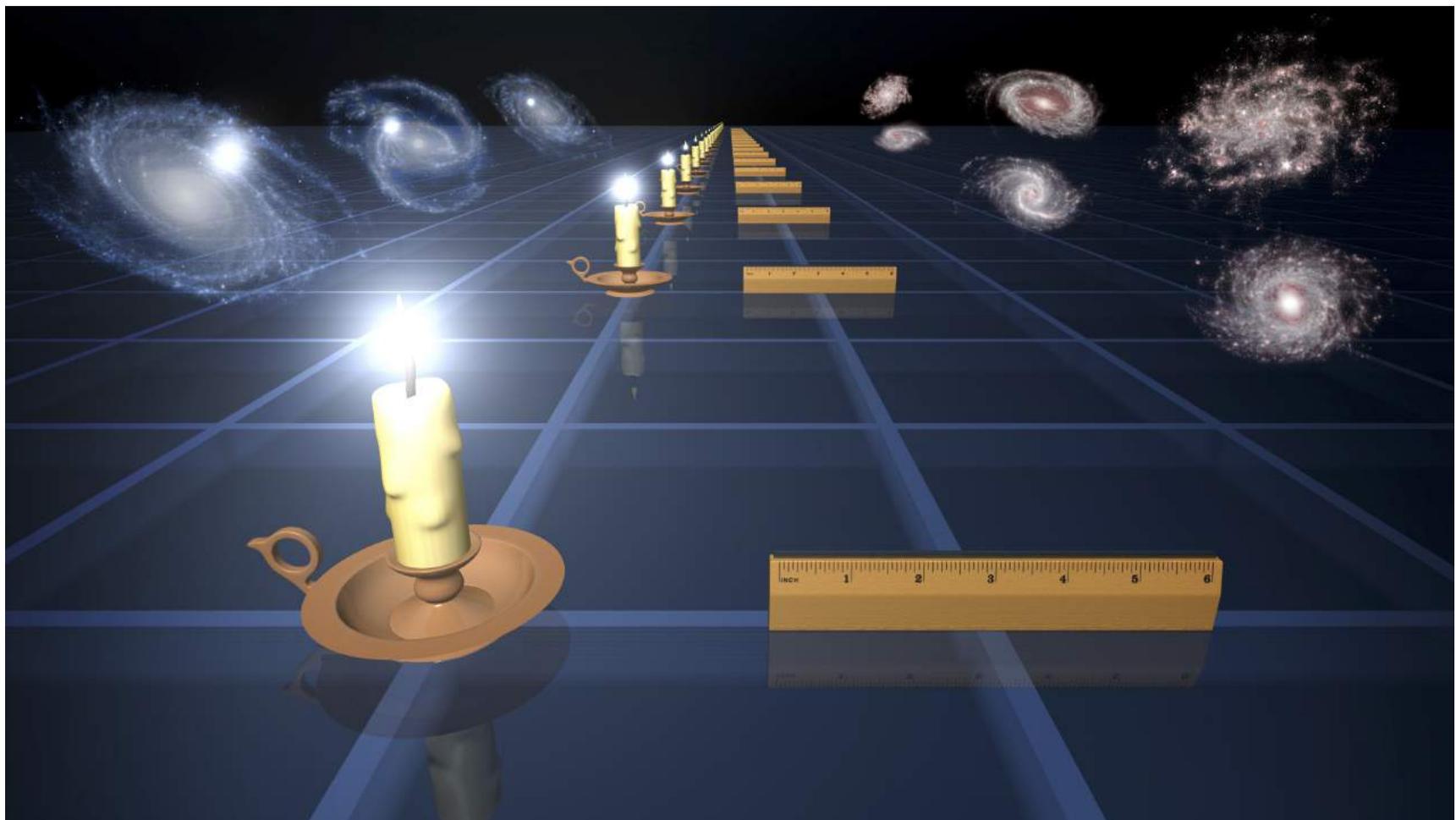
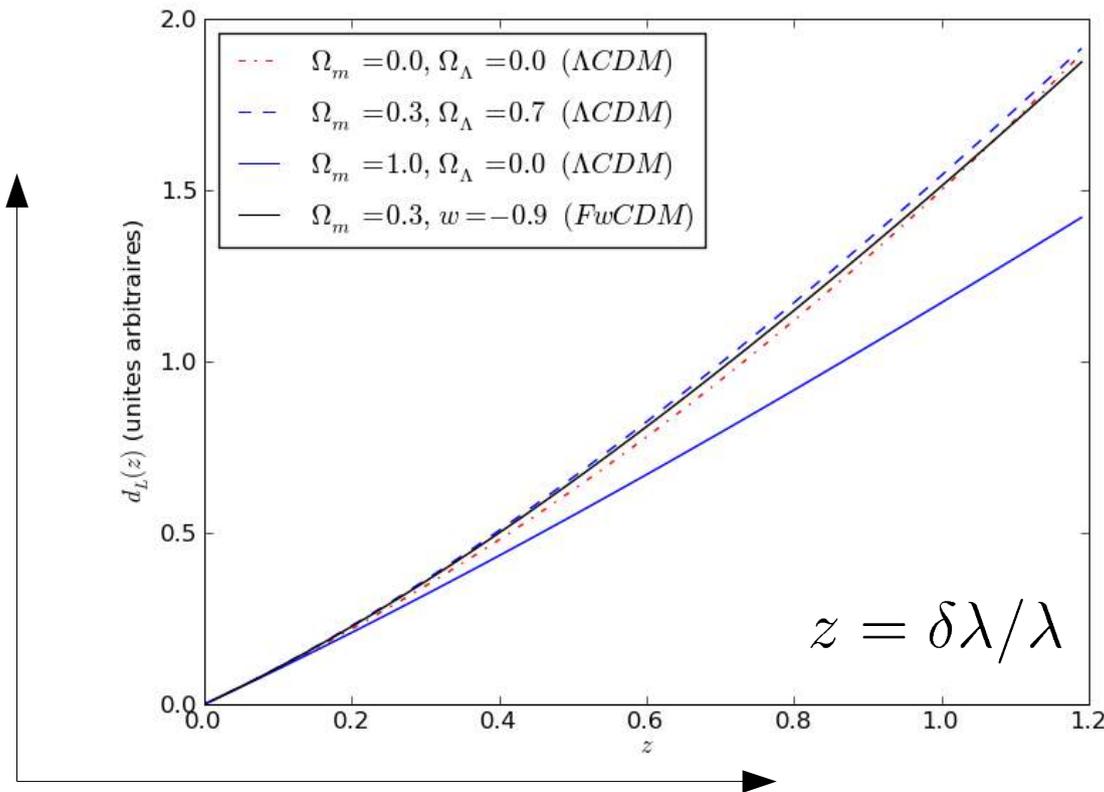


Image credit: NASA/JPL-Caltech

Chandelles standard :
« supernovae »

Règles standard :
« Oscillations acoustiques
des Baryons » (BAO)

Le programme



distance

Mesurer
- des distances
- ... et les « z »
correspondants

Pour évaluer les forces
de gravitation en jeu
et donc le contenu

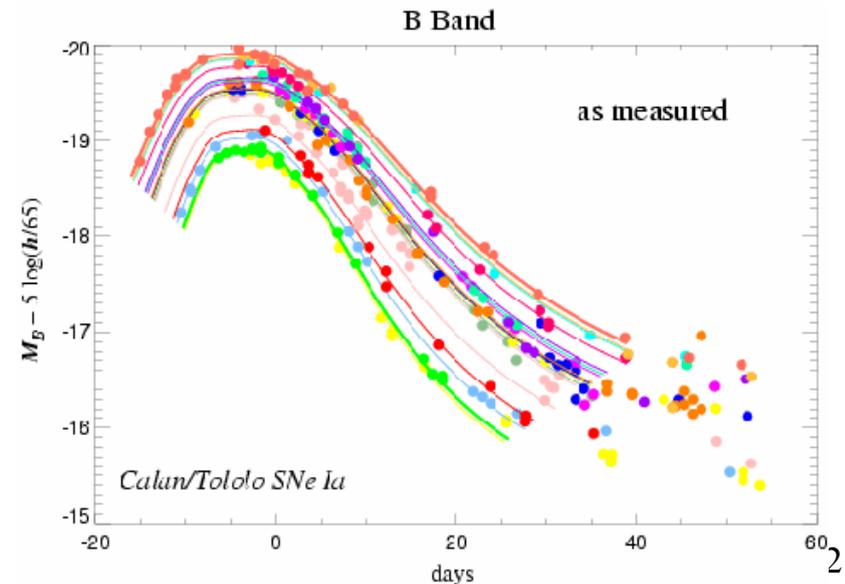
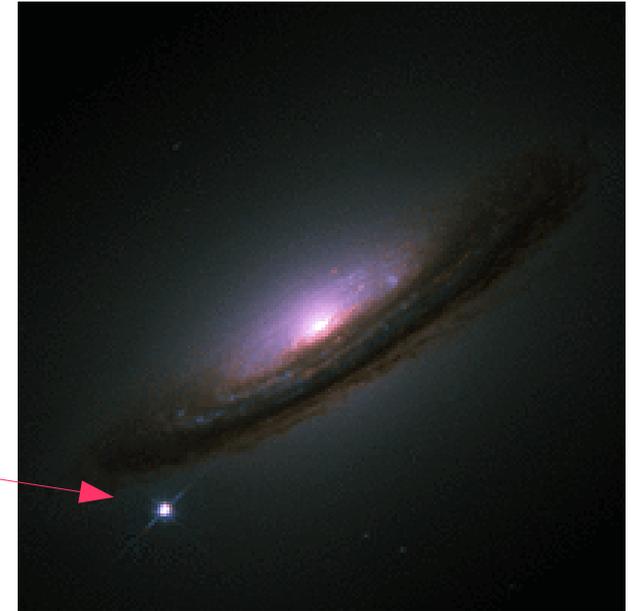
$z \sim$ décalage vers le rouge

$$z \equiv \frac{\lambda_{réception}}{\lambda_{émission}} - 1$$

Supernovae « de type Ia »

Explosion thermonucléaires d'étoiles
qui apparaissent reproductibles

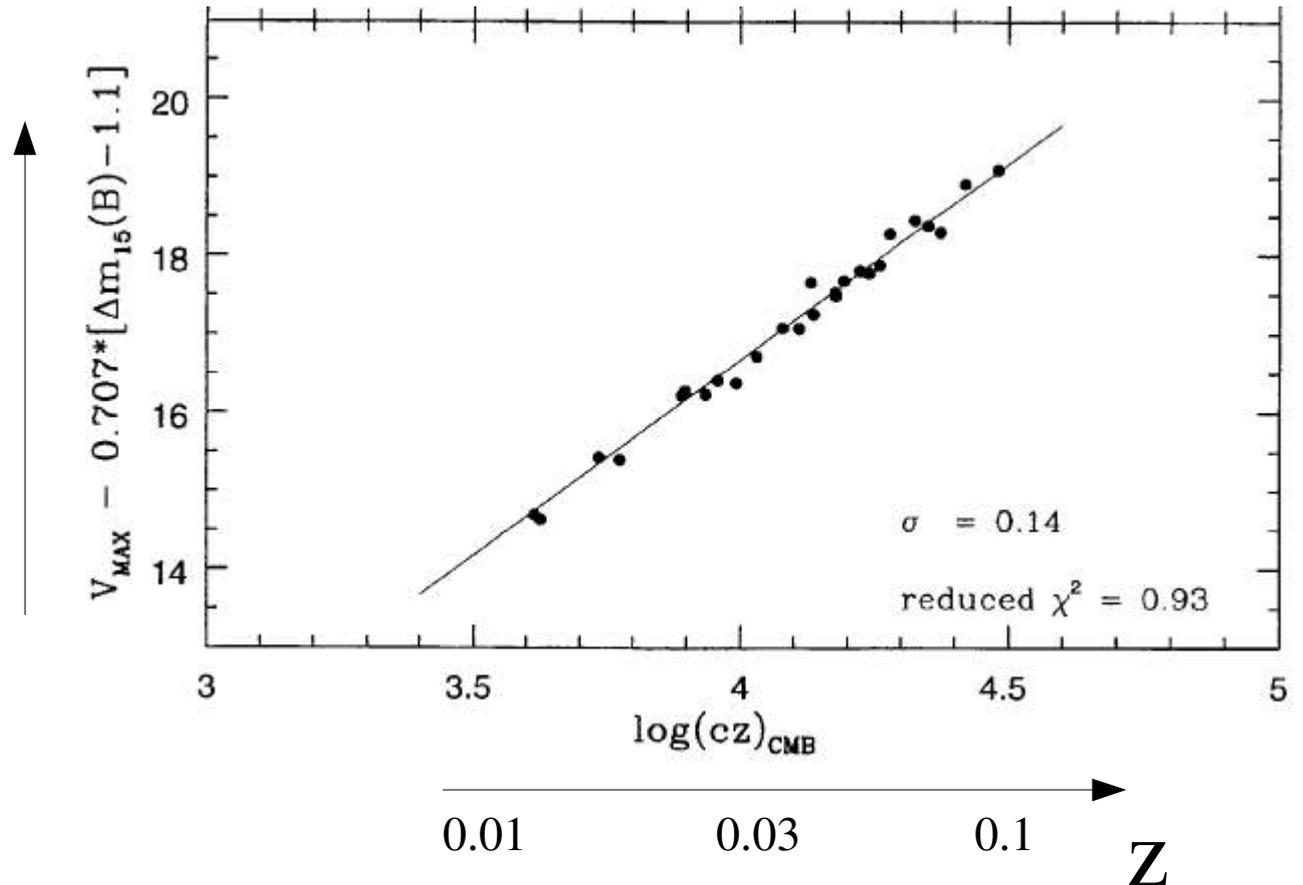
- Extrêmement lumineuses
- Transitoires (montée ~ 20 jours)
- Rares (~1/galaxie/millénaire)
- Fluctuations de luminosité
au pic : ~ 40 %
- Avec des indicateurs de luminosité
~14 %



Le premier diagramme de Hubble de précision

M. Hamuy +
(1996)

« distance »



Chaque distance est
mesurée à mieux que
10 %

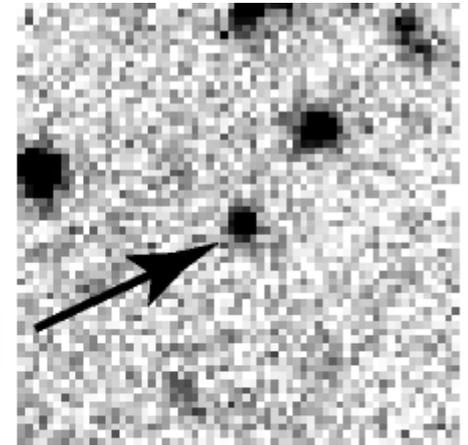
Trouver des supernovae



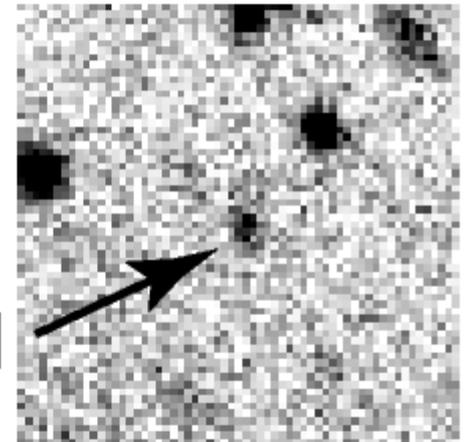
supernova proche

SN lointaine :
soustraction
d'images.

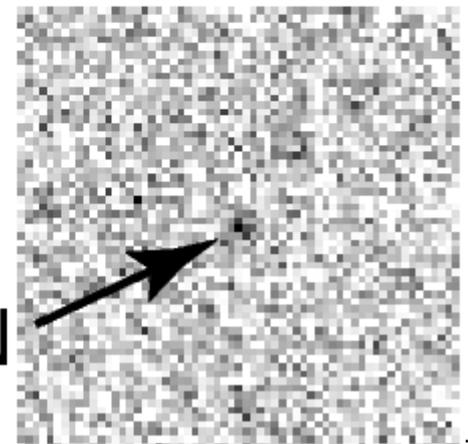
SN+Gal



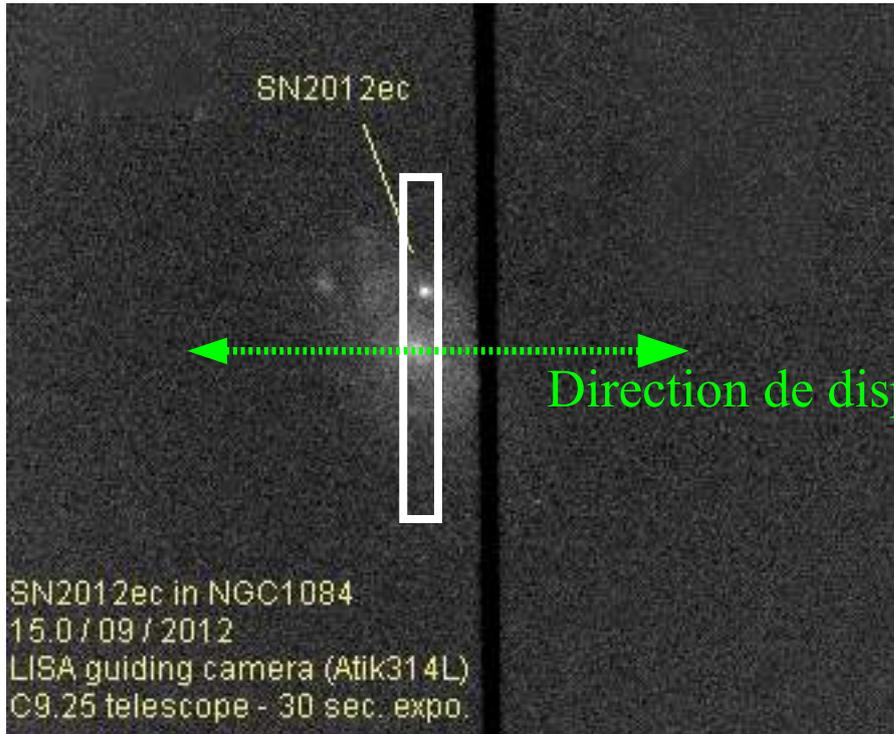
- Gal



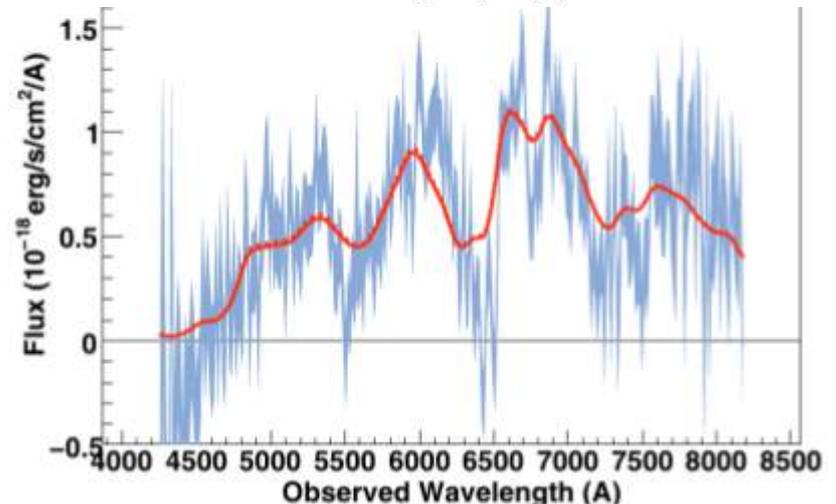
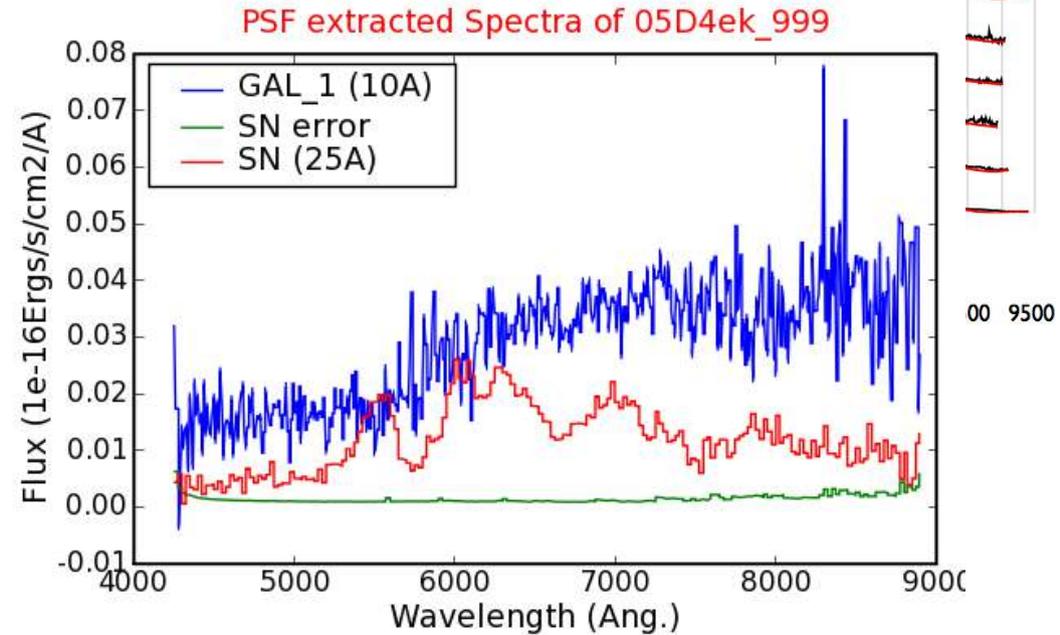
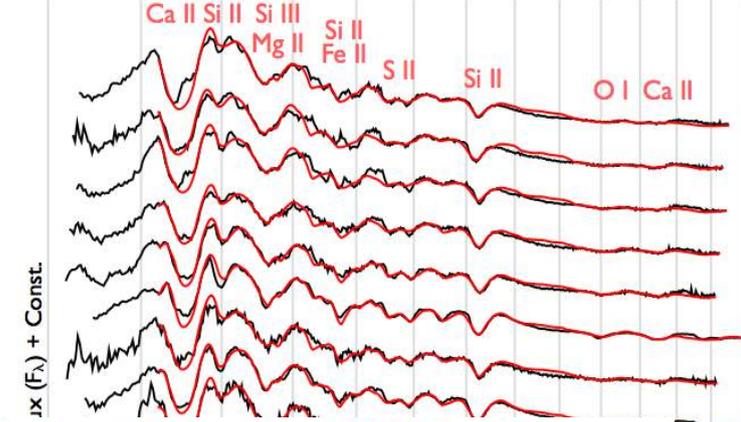
= SN



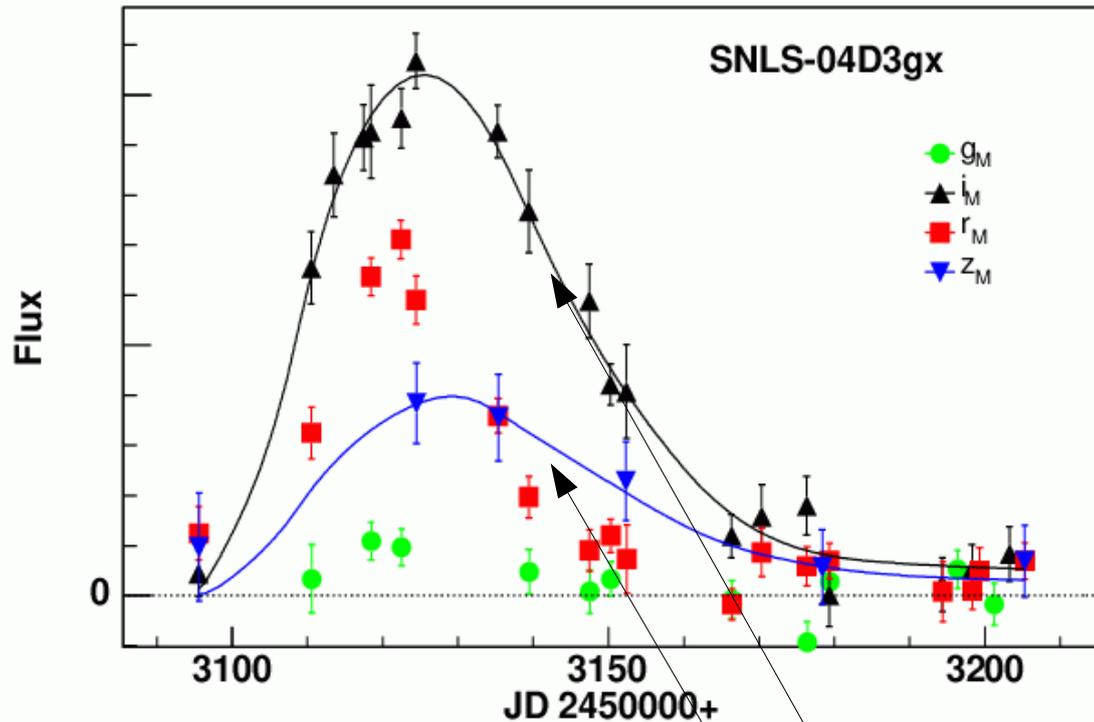
Identification spectroscopique



Et on mesure le redshift z



Mesurer les « courbes de lumière »

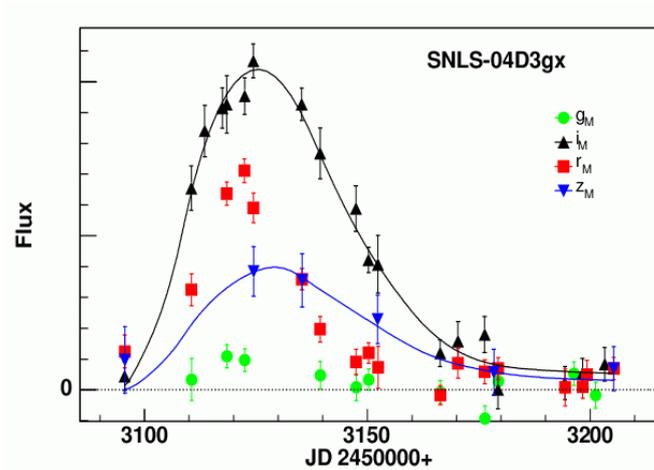


Mesure du flux de l'objet
comme fonction du temps
durant ~ 2 mois

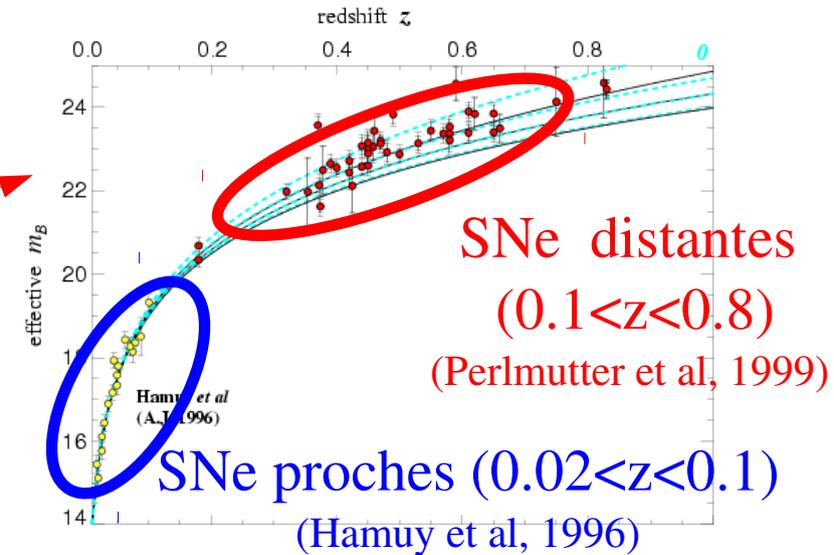
Il faut mesurer une
« couleur », i.e. mesurer
la lumière dans au moins
deux bandes spectrales

Ajustement à l'aide d'un modèle
empirique, ce qui permet de réduire
les données à quelques paramètres

Diagramme de Hubble : flux vs redshift



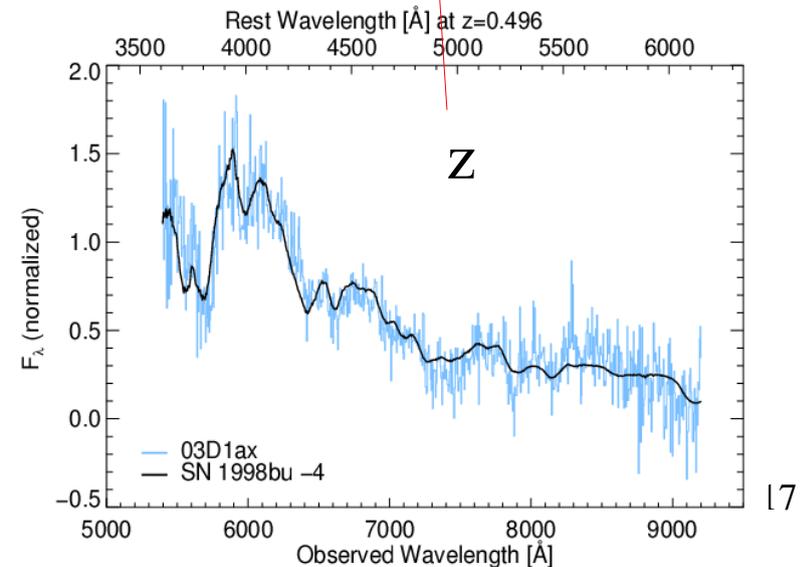
flux au pic



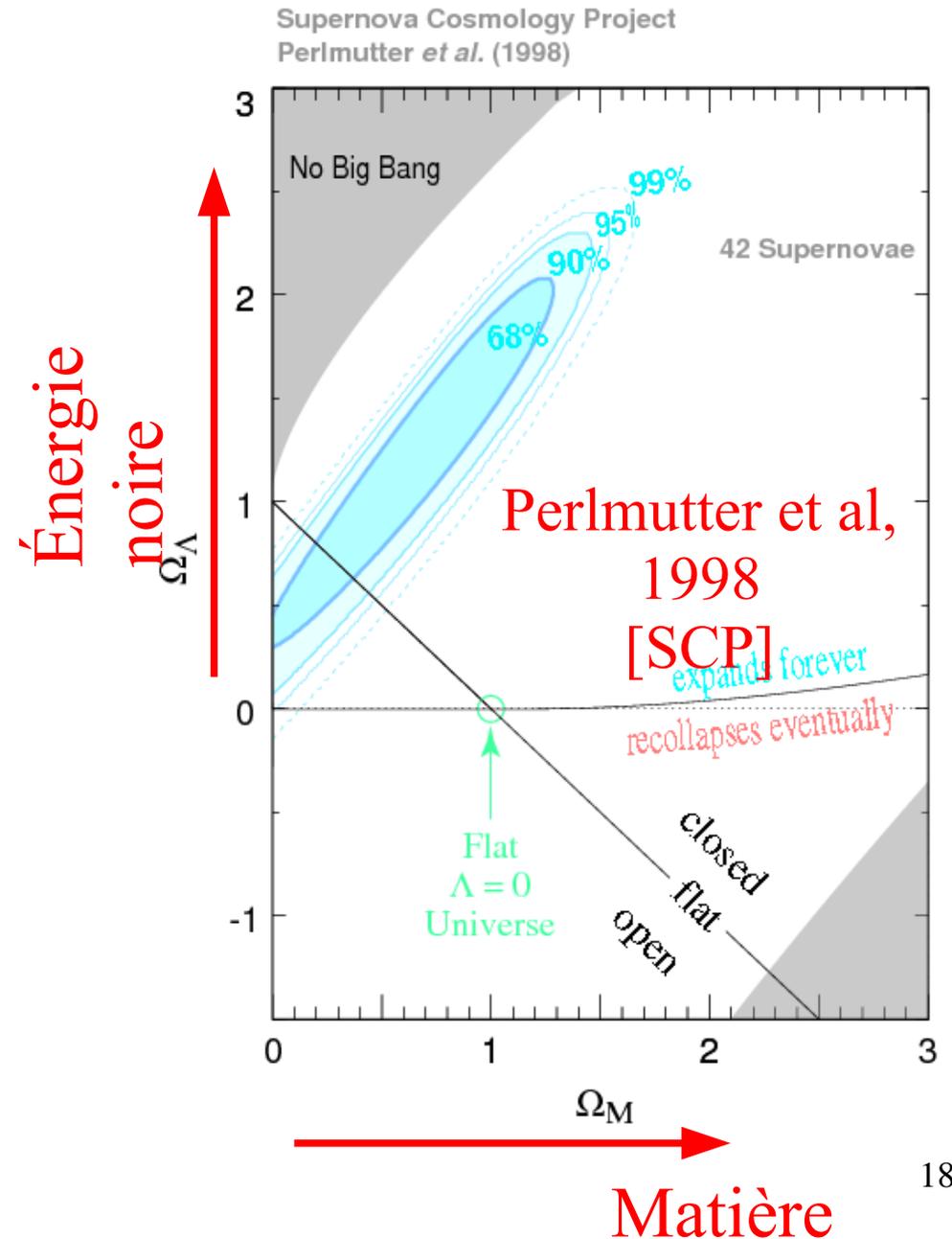
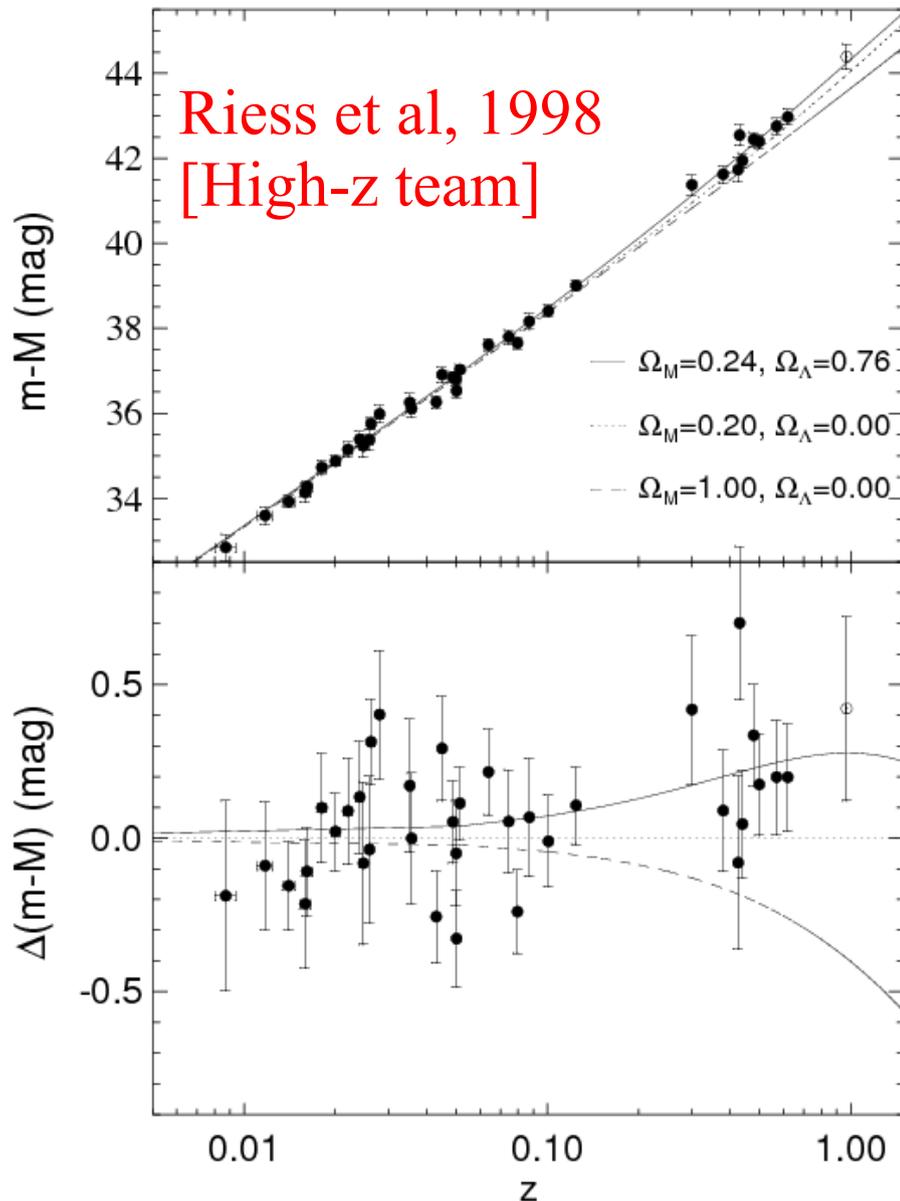
Photométrie multi-bande
=> distance



spectroscopie:
- identification
- redshift



Fin 1998 : les articles jumeaux



Qu'est ce qui est neuf en 1998 ?

- On sait détecter **systematiquement** les supernovae distantes ($z \sim 0.5$)
(Les deux équipes ont principalement utilisé la caméra BTC sur le CTIO 4m)
- On peut alors compare les supernovae à « grands z » et celles à « petit z »
(Les deux équipes comparent au même lot de SNe proches : Hamuy (1996))
- **Pour quoi faire ?** l'idée était de mesurer paramètre de

décélération q_0 :

$$d_L = \frac{c}{H_0} \left(z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 \right)$$

- Dans un univers dominé par la matière $q_0 = \Omega_M / 2$
-> l'expansion doit décélérer (la matière attire).

Supernova Cosmology Project
Perlmutter *et al.* (1998)

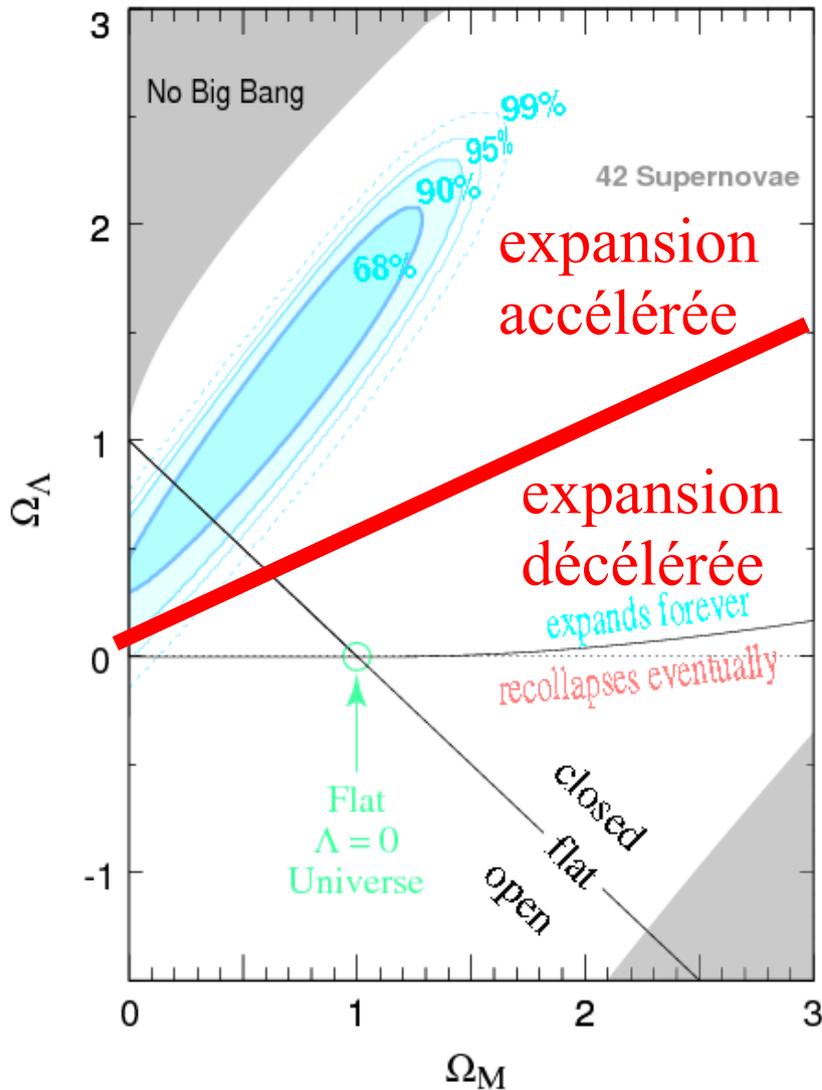


Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



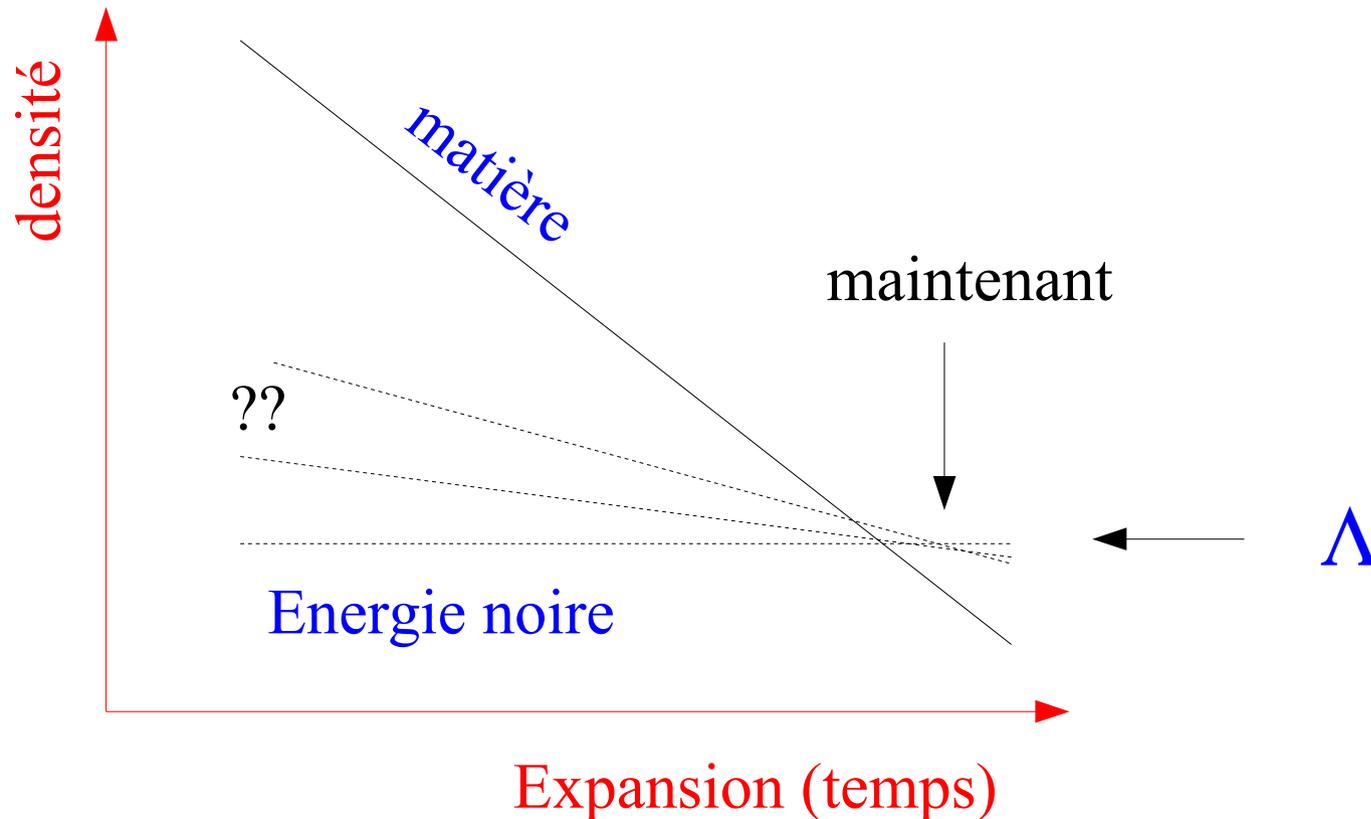
Photo: U. Montan

Adam G. Riess



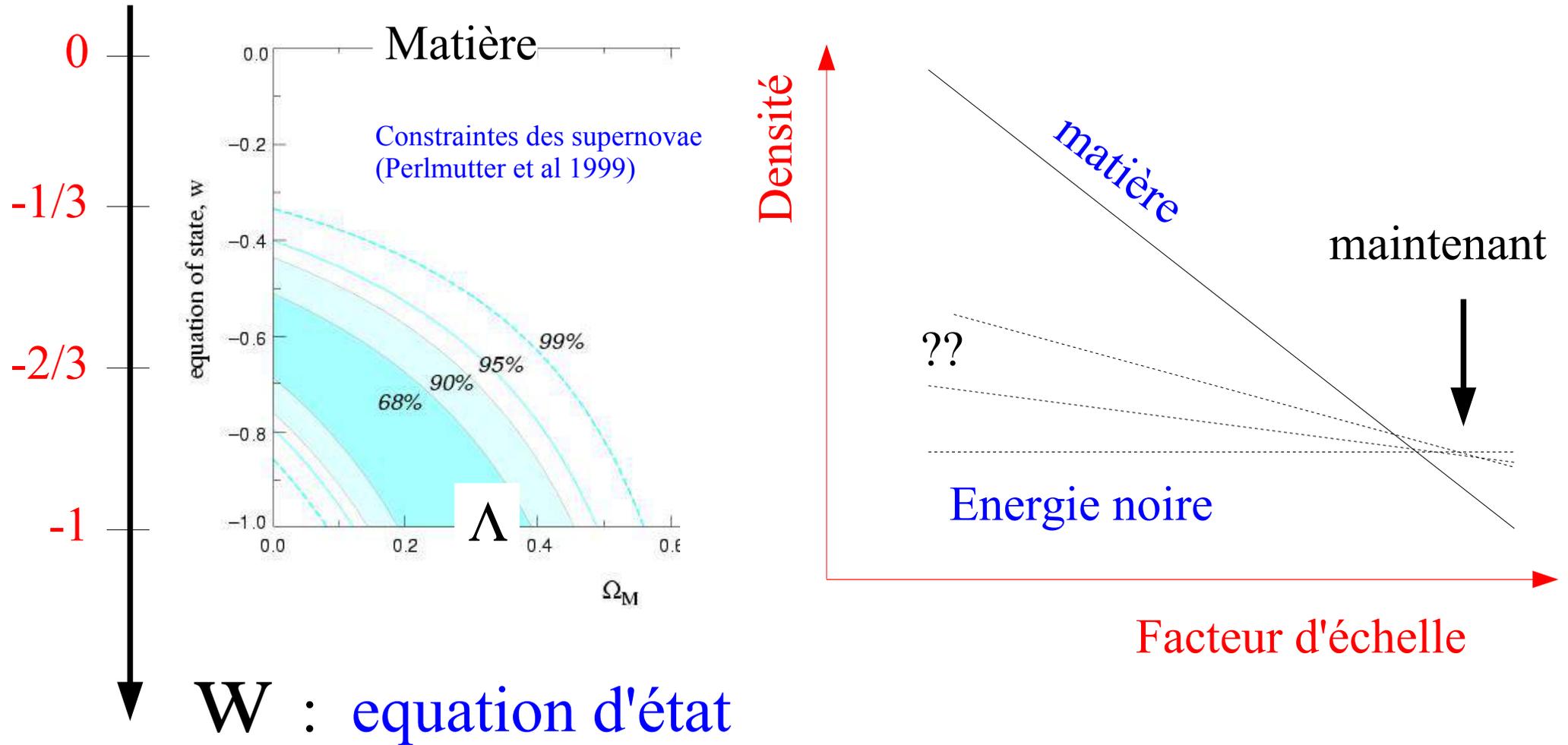
The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Un univers dominé aujourd'hui par deux composantes



Comment la densité d'énergie noire varie-t-elle avec l'expansion ?

Constante cosmologique, ou bien ?



W : equation d'état

w décrit l'évolution de la densité avec l'expansion

- Matière : $w = 0$ (suit l'expansion)
- Constante cosmologique : $w = -1$ (ignore l'expansion)

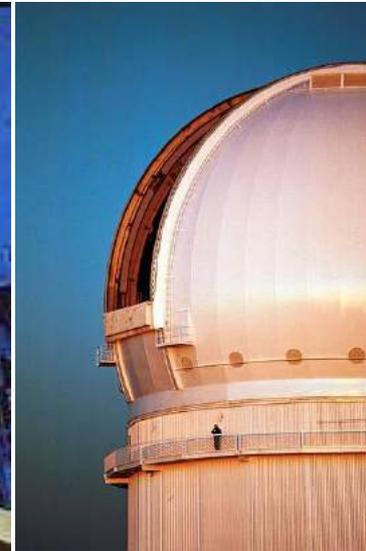
Vers 2000, un nouvel instrument



Telescope

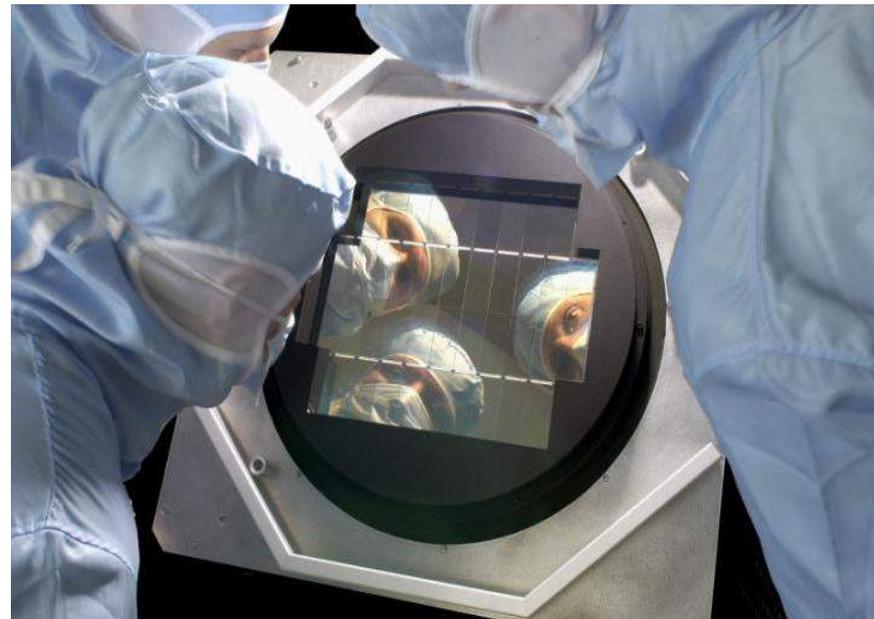
Canada France Hawaii :

- diamètre 3.6m
- Mauna Kea, Hawaii
- 4200 m
- Qualité d'image exceptionnelle



MegaCam:

- 18 000 x 18 000 pixels
- champ de vue : **1 deg²**
- 1^{re} lumière fin 2002.
- fabriquée au CEA.



Le champ de Megacam



1 degré (18000 pixels)

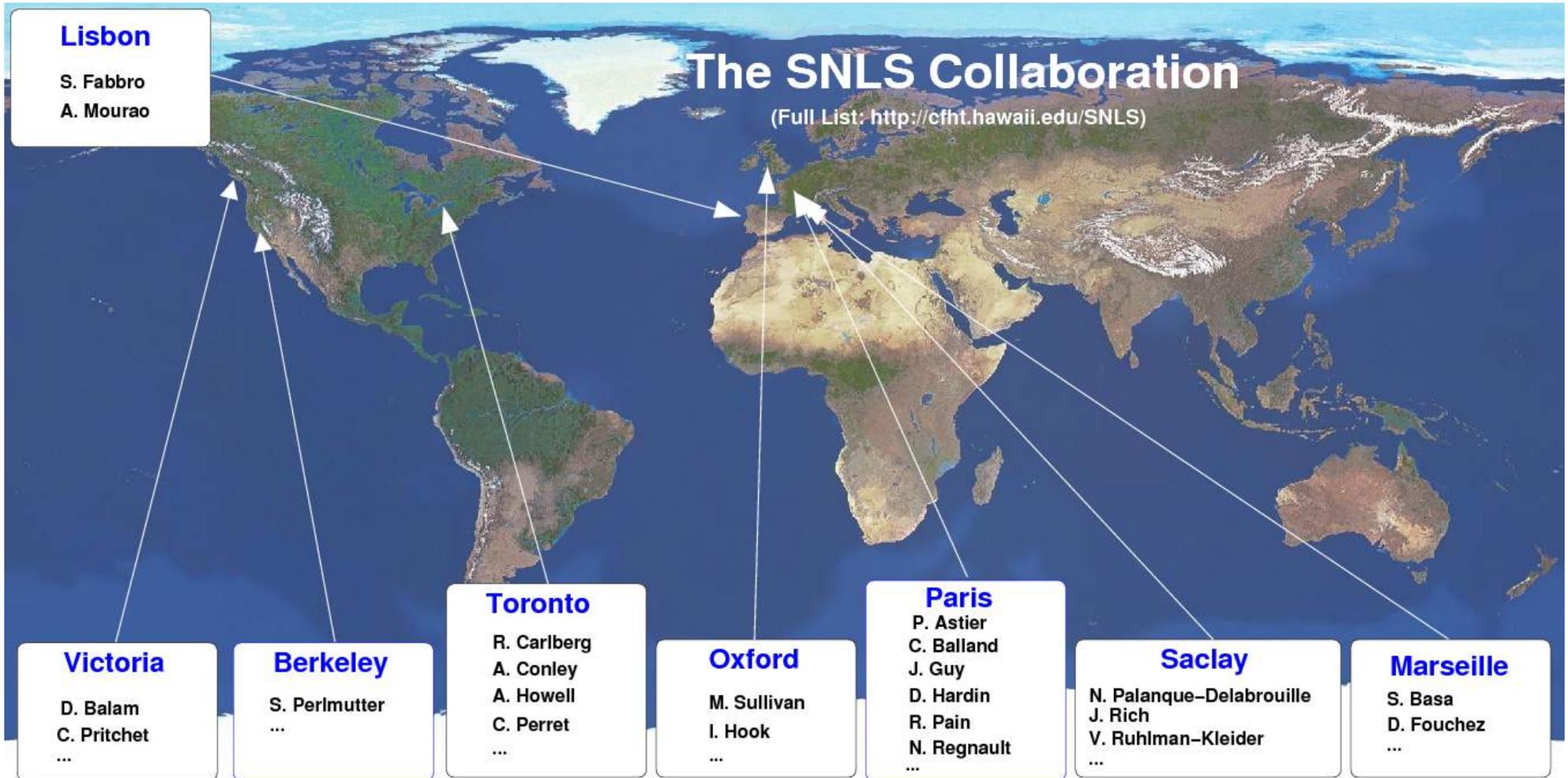


<http://www.cfht.hawaii.edu/images/CFHTLS-D1-Zoom/>



La collaboration SNLS

(SuperNova Legacy Survey)

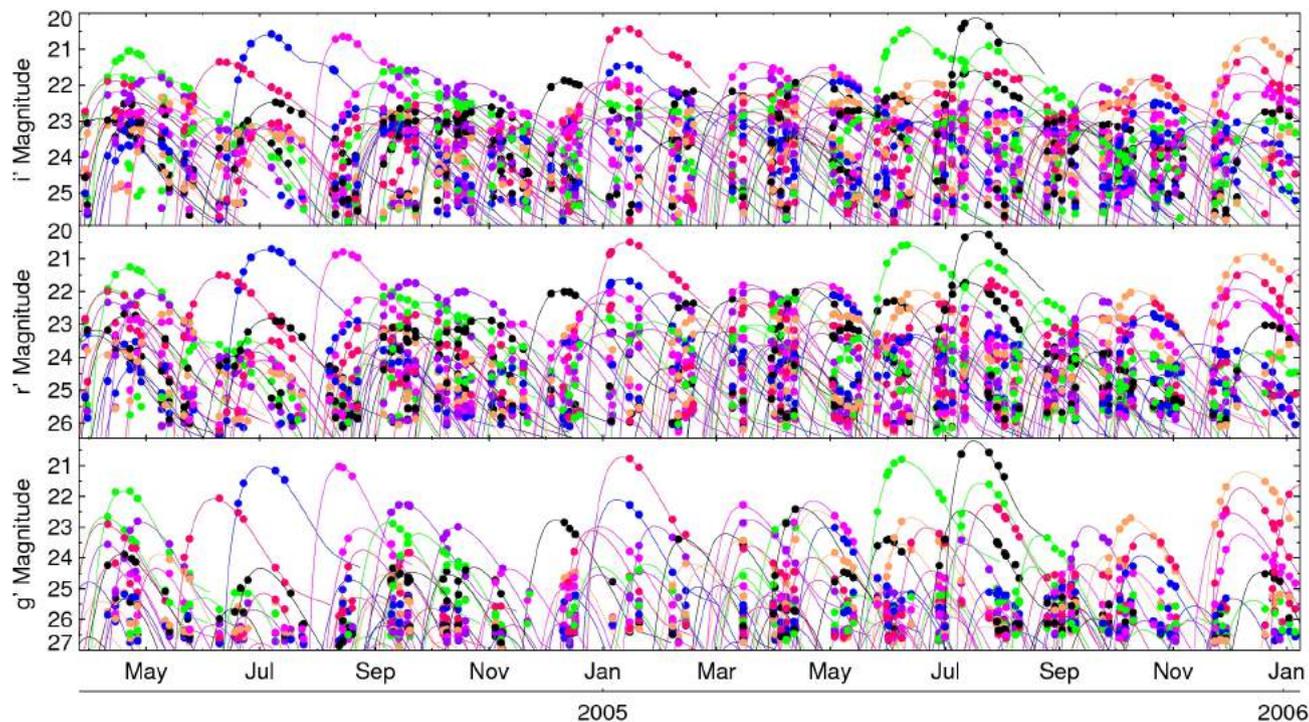
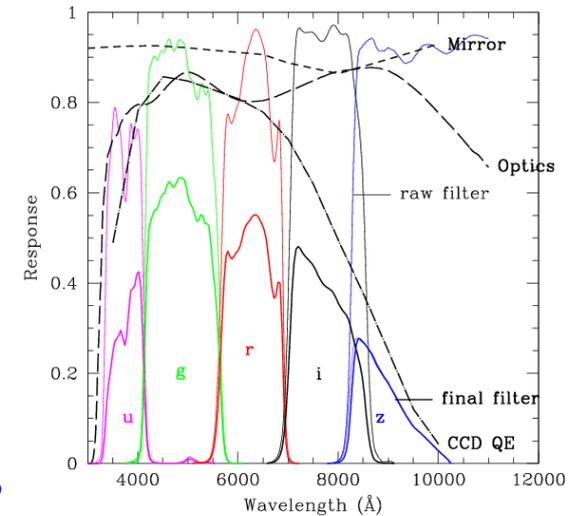


(vers 2006)

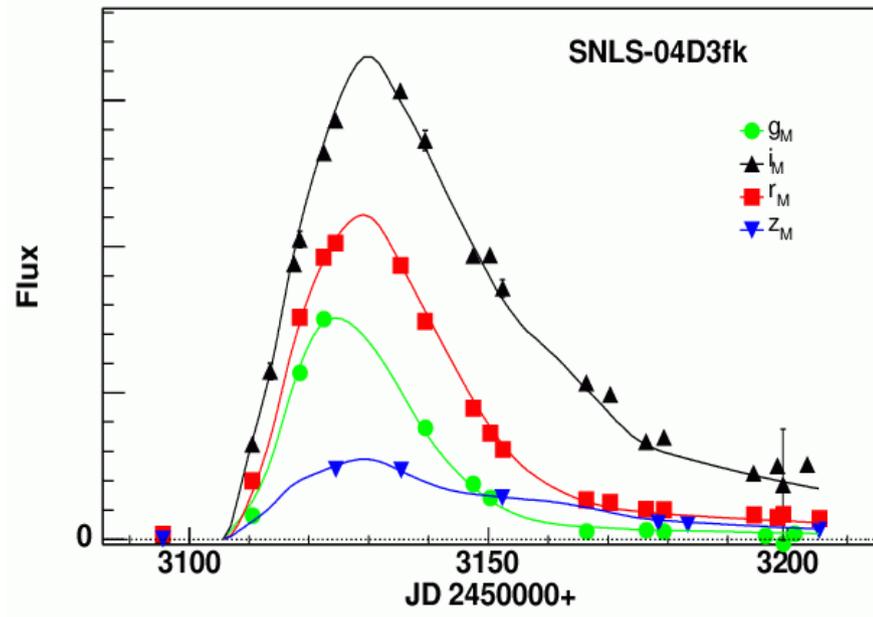
Observations SNLS : recherche roulante

- Observations répétées toutes les 4 nuits
- On essaie la nuit suivante si mauvais temps
- **4 bandes** : g,r,i,z [420-950] nm
- 5 ans d'observations : **2003-2008**
- Part du CFHTLS

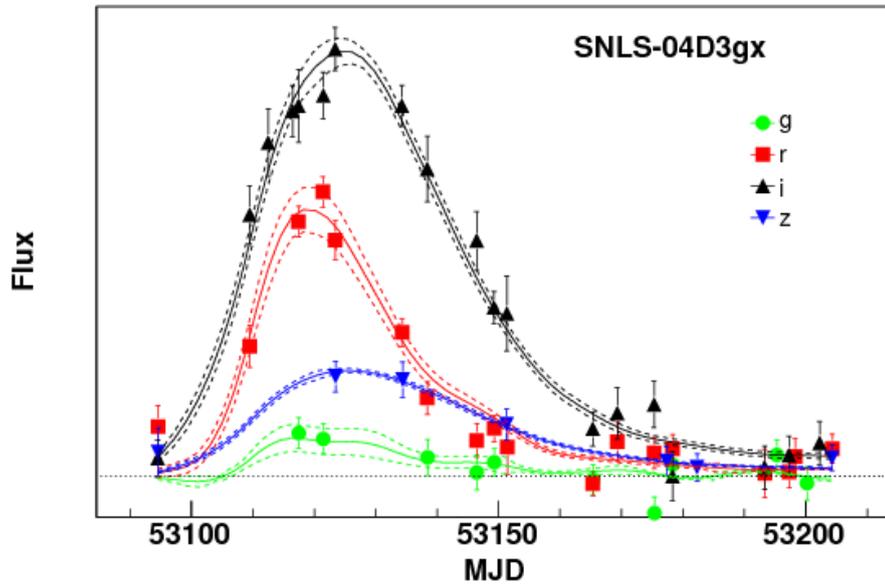
Plusieurs supernovae actives
dans chaque image



Courbes de lumière

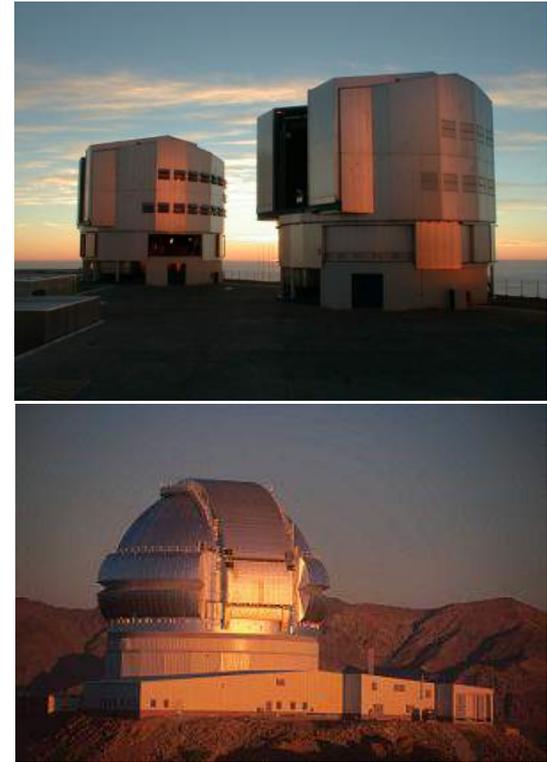
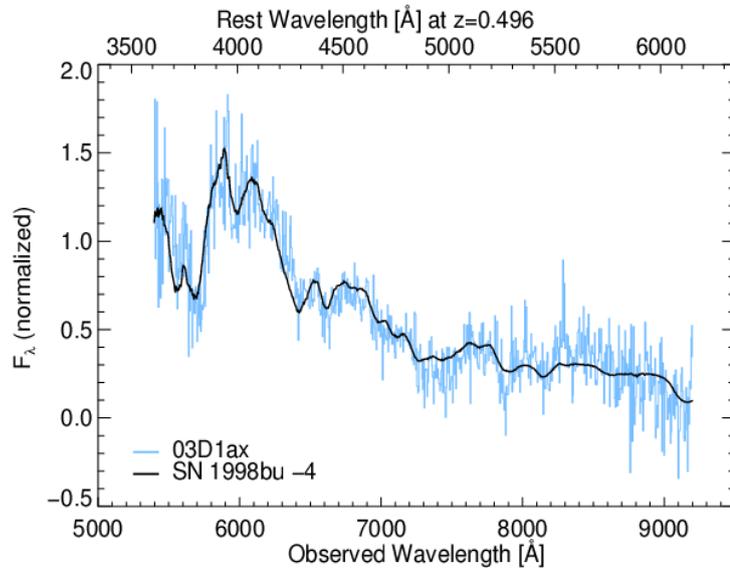


SNLS-04D3fk
 $z=0.358$



SNLS-04D3gx
 $z=0.91$

Et des spectres...



Trois grands télescopes :

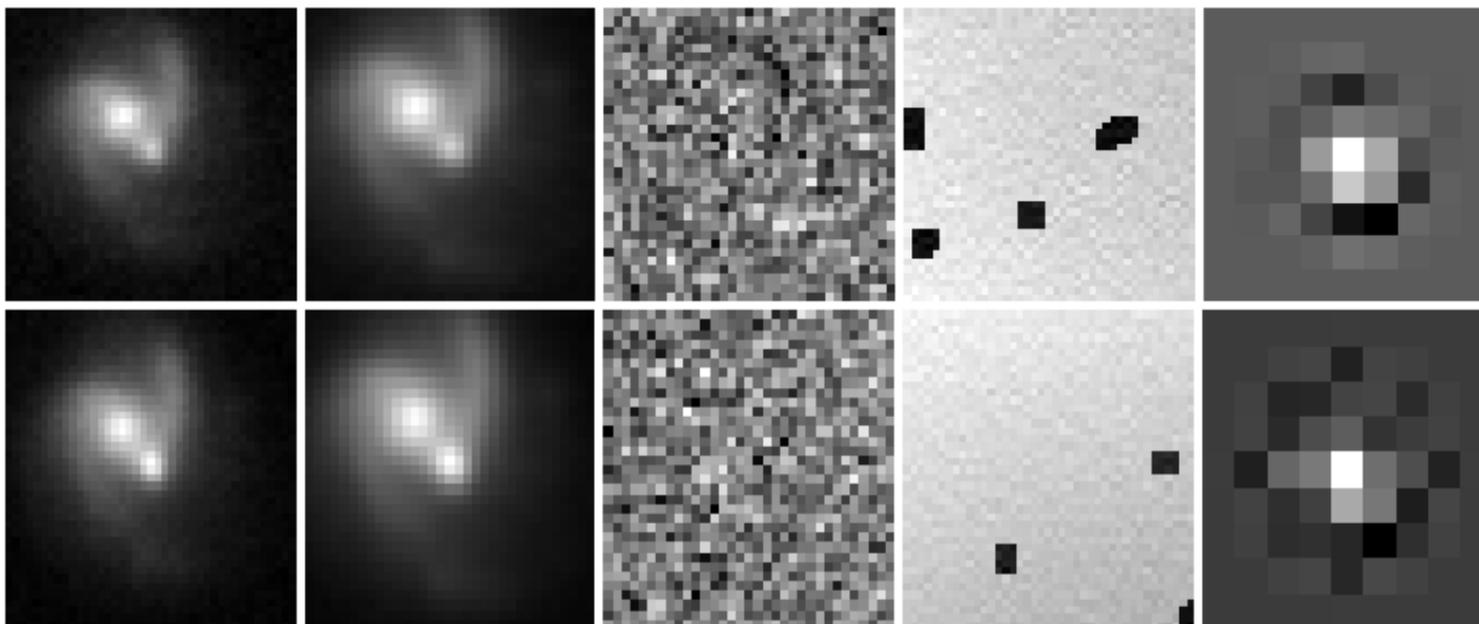
Le Very Large Telescope (ESO) (8m)

Gemini (8m)

Keck (10m)

Au total : plus de 1000 h d'observation (!) sur 5 ans

Traitement de données



CFHT/MEGACAM
26.06/2003
SEEING = 0.63"
RATIO = 1.017
MAG = 21.03(0.02)
TIME = -8.00(0.04)
MODEL*W = 11.914(14.980)
RESID*W = -0.182(0.977)

CFHT/MEGACAM
30.06/2003
SEEING = 0.65"
RATIO = 0.963
MAG = 20.49(0.01)
TIME = -4.00(0.04)
MODEL*W = 16.357(20.644)
RESID*W = -0.085(0.994)

Données

modèle

residus

poids

Kernel



~ 50 To
~ 30 000 heures



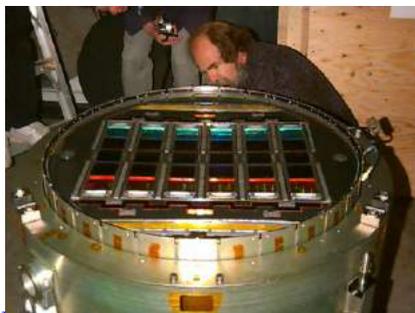
Centre de calcul de l'IN2P3, Villeurbanne

Les relevés de supernovae

Le relevé SDSS



SNLS @ CFHT



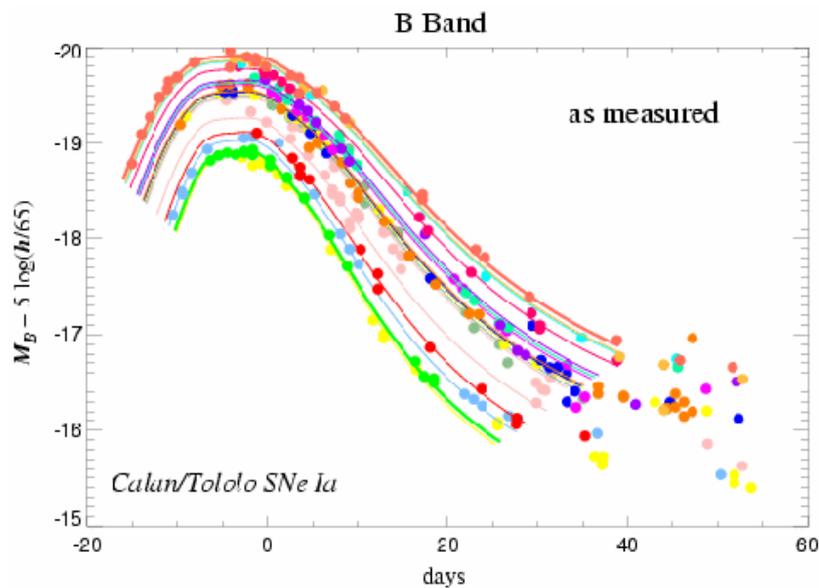
300 deg² x 3 ans
0.1 < z < 0.45
~2000 SNe
~500 spectres

4 deg² x 5 ans
0.3 < z < 1
~1000 SNe
~500 spectres

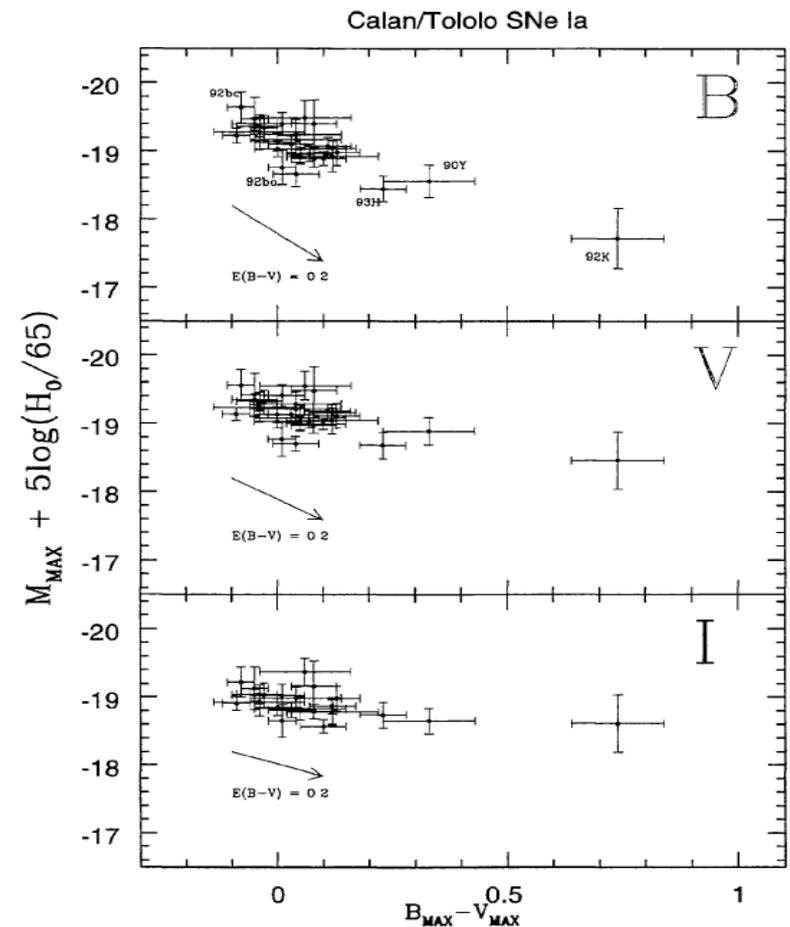


Estimation des distances

- Le luminosité des supernovae présente des variations d'événement à événement qui sont indépendantes de la distance



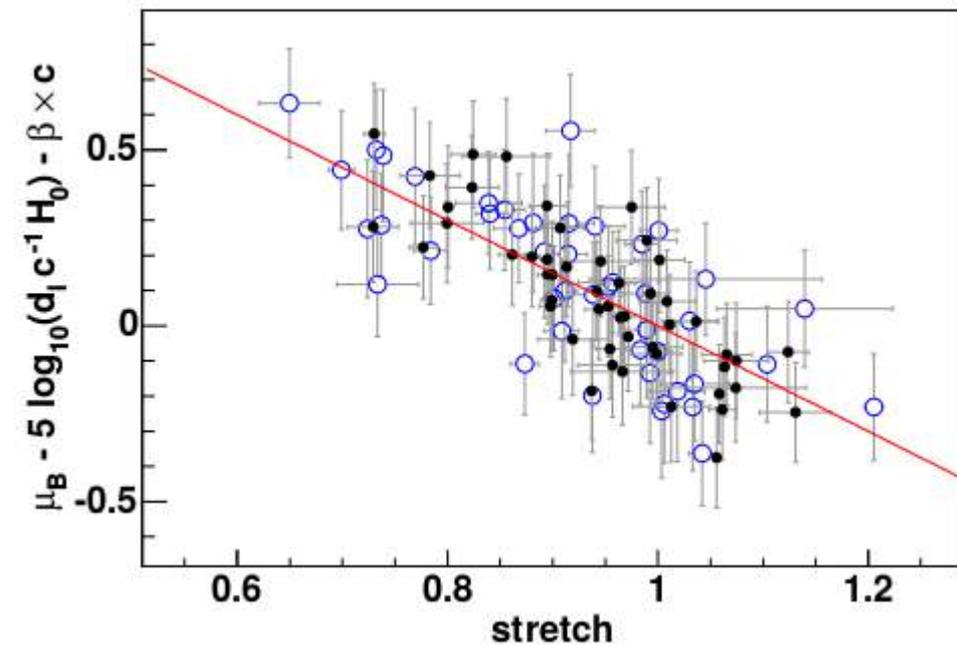
Les plus lentes sont les plus brillantes



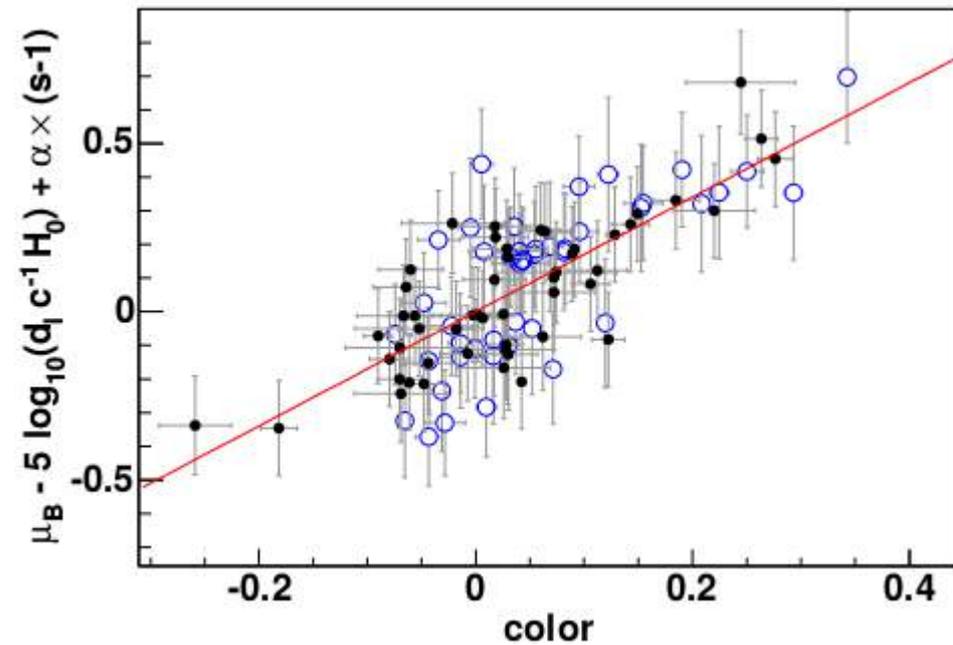
Les plus bleues sont les plus brillantes³²

Estimation des distances

Résidus au diagramme
de Hubble



Largeur de la courbe
de lumière



Couleur : « B-V »
flux en vert/flux en bleu

Estimation des distances

Module de
Distance
($\sim \log(d)$)

Mesures pour une supernova

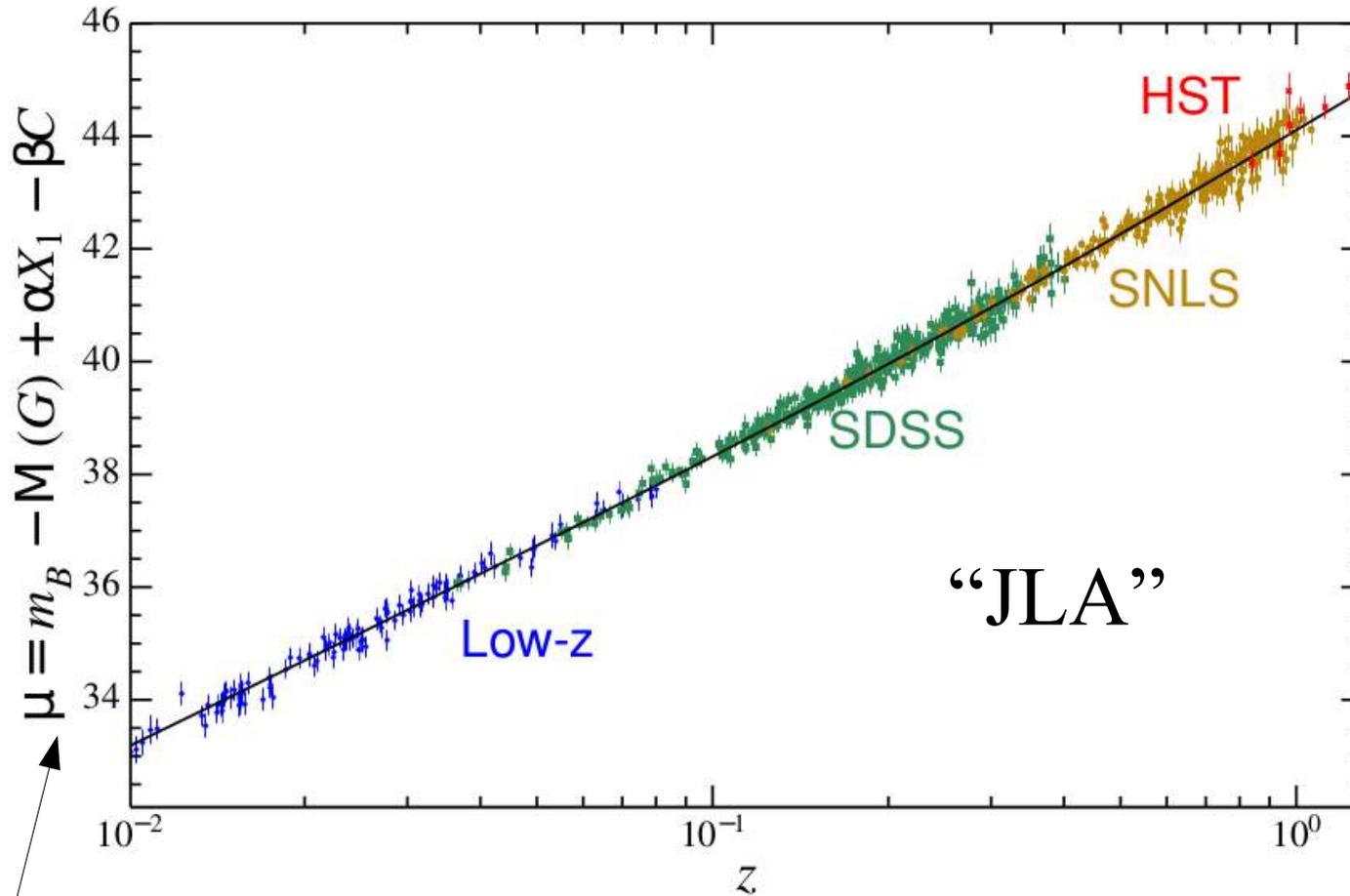
$$\mu_B = m_B - M + \alpha(s-1) - \beta c$$

Tripp (1998)

Paramètres globaux

ajustés (e.g.) en même temps
que les paramètres cosmologiques

Résultats cosmologiques (2014)



- 118 proches
- 366 SDSS
- 242 SNLS
- 14 HST

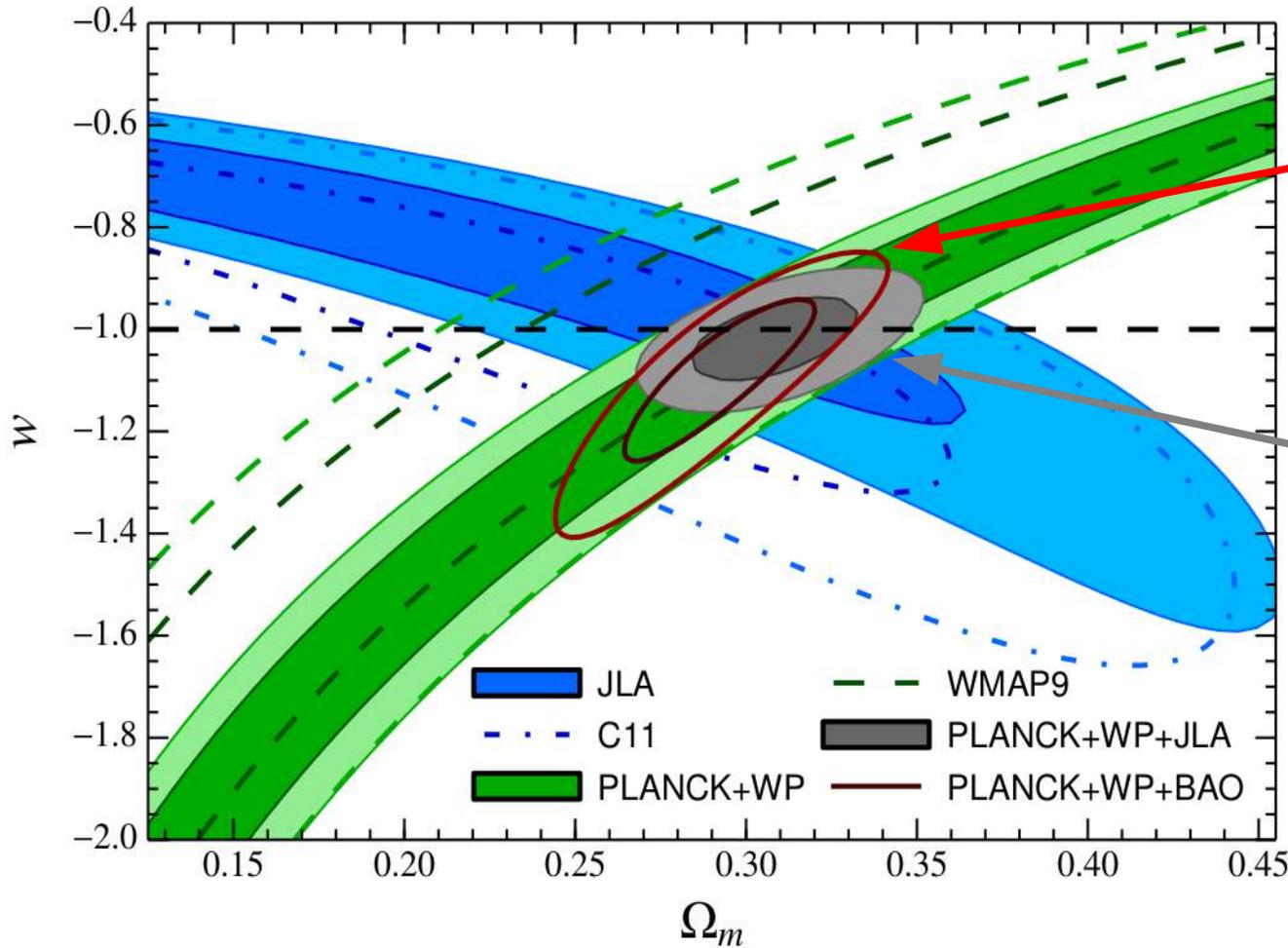
740 événements

“JLA”

Betoule et al (2014)

$\sim \text{Log}(d_L(z))$

Equation d'état dans un univers plat



Planck + BAO:
 $w = -1.01 \pm 0.08$

Λ

Planck + SN:
 $w = -1.018 \pm 0.057$

Améliorations p.r. aux
 Résultats précédents:

- Betoule et al (2014) ← - calibration améliorée.
- Betoule et al (2013) ← - Données SDSS

- inter-calibration directe³⁶

Incertitudes

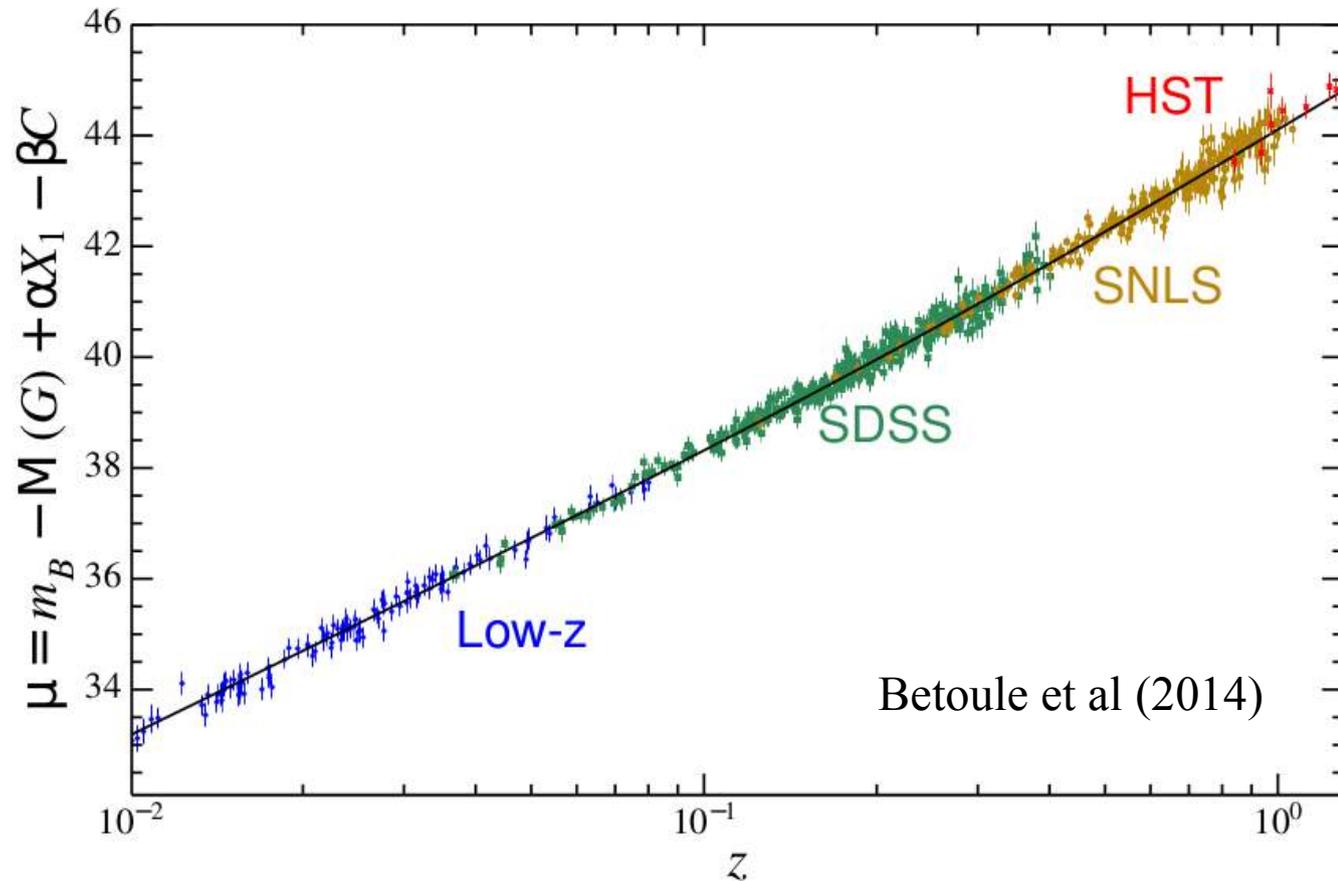
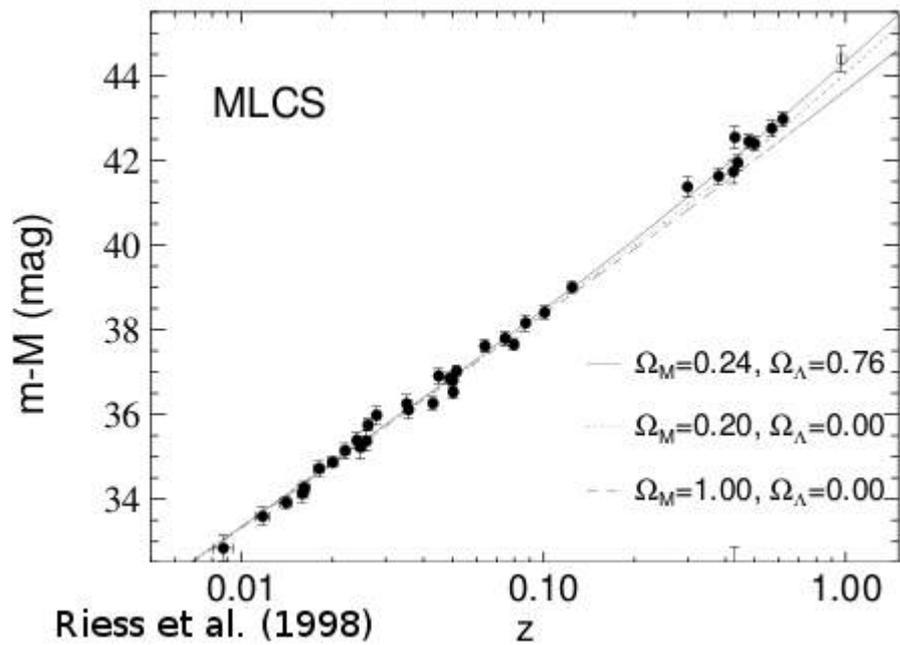
Echantillon JLA , LCDM plat

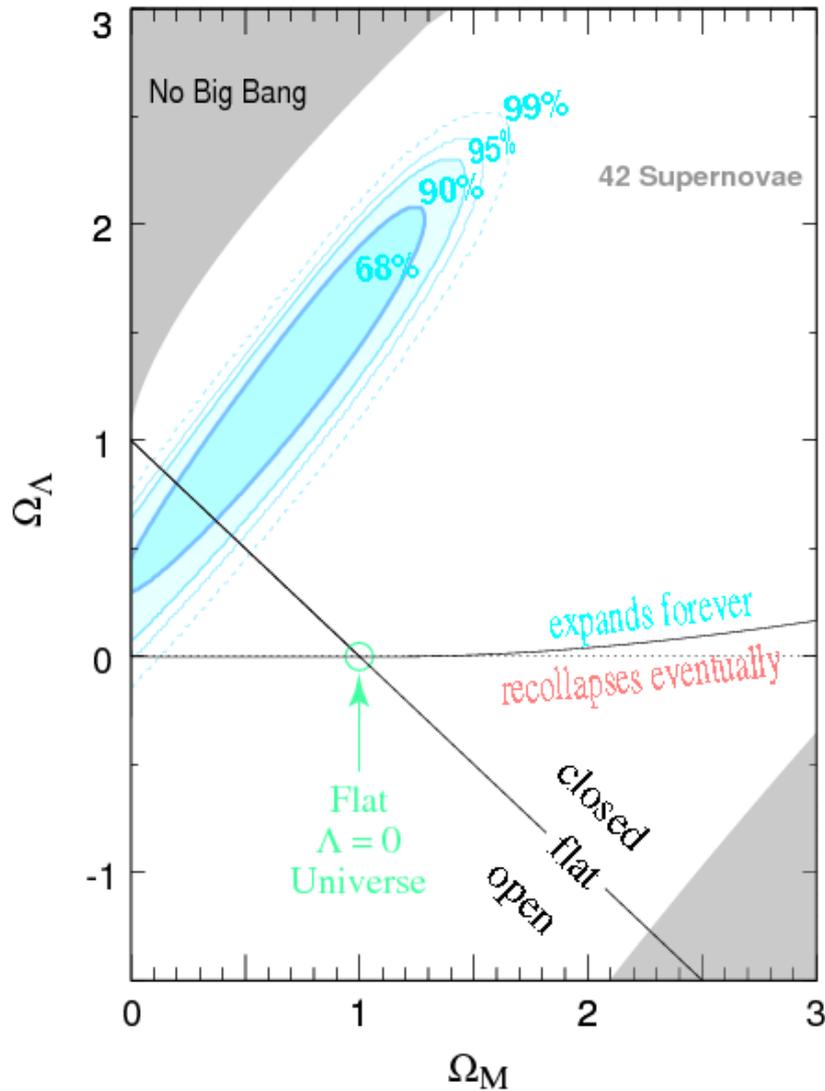
La calibration photométrique domine les incertitudes systématiques

Uncertainty sources	$\sigma_x(\Omega_m)$	% of $\sigma^2(\Omega_m)$
Calibration	0.0203	36.7
Milky Way extinction	0.0072	4.6
Light-curve model	0.0069	4.3
Bias corrections	0.0040	1.4
Host relation ^a	0.0038	1.3
Contamination	0.0008	0.1
Peculiar velocity	0.0007	0.0
Stat	0.0241	51.6

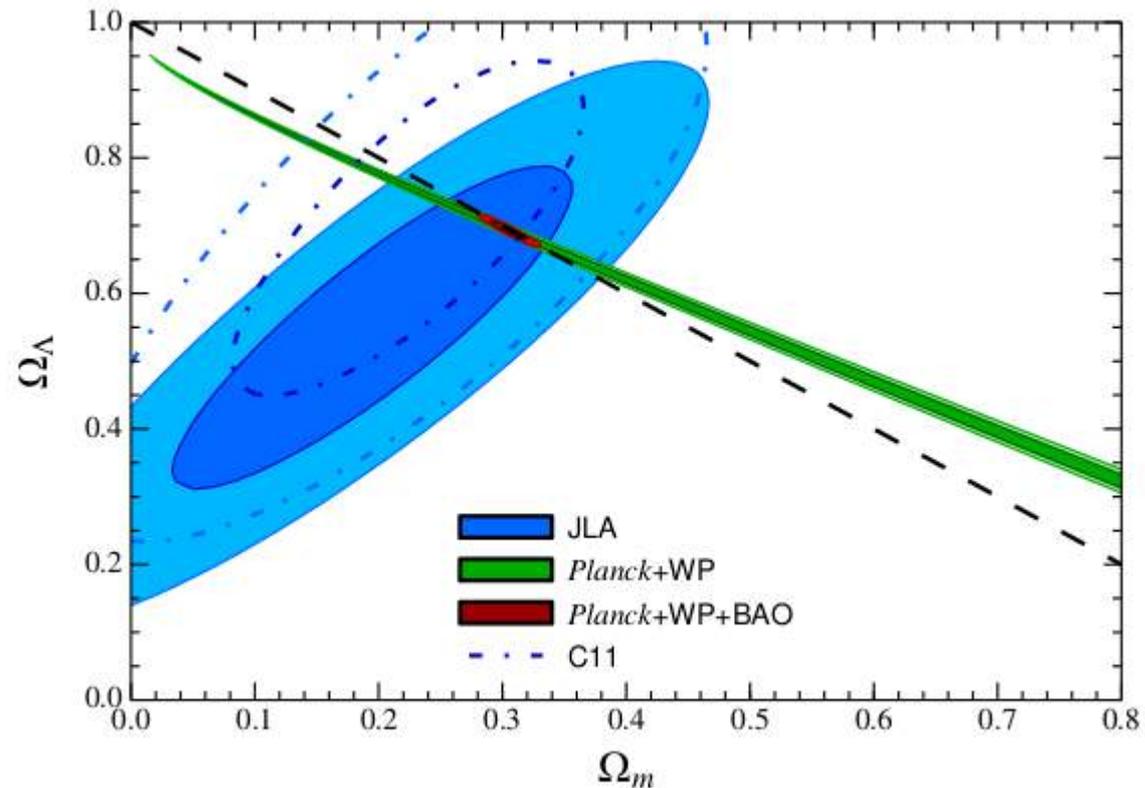
Et les incertitudes systématiques représentent la moitié de l'ensemble.

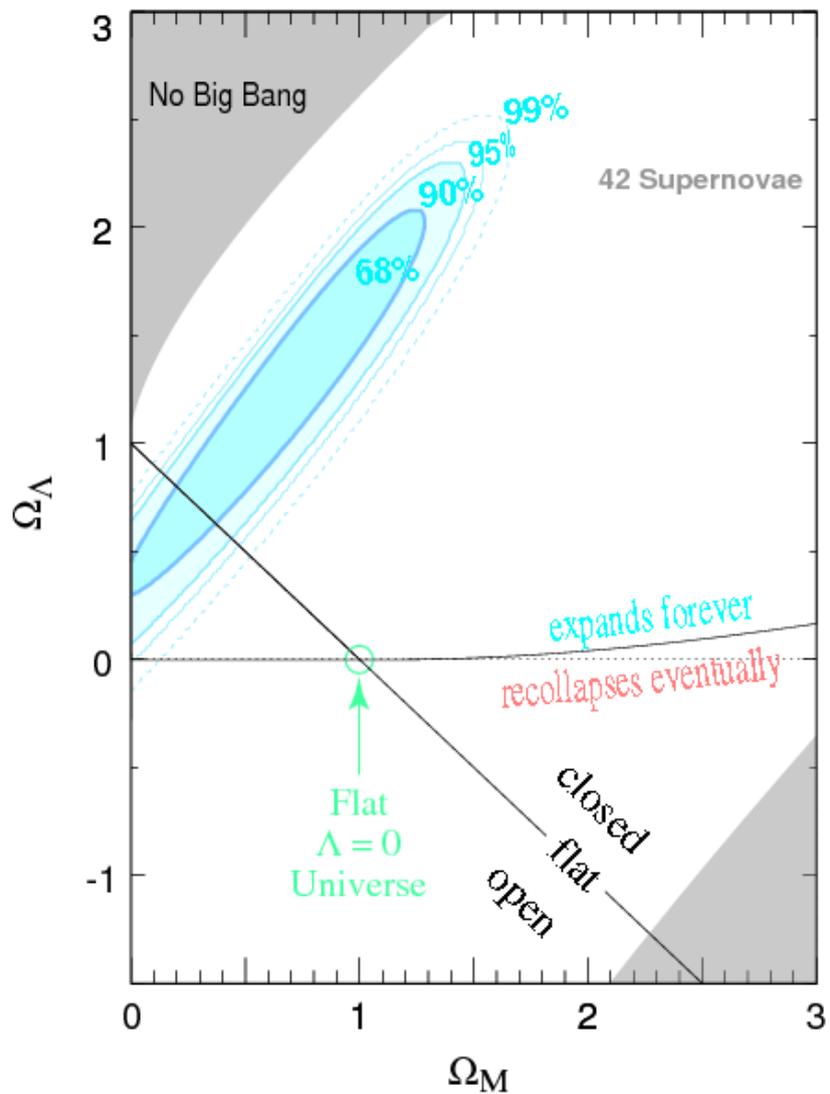
De la découverte de l'accélération à une compilation récente.



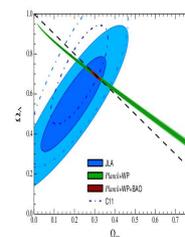


De la découverte de l'accélération à une compilation récente.





De la découverte de l'accélération à une compilation récente.



Betoule et al (2014)

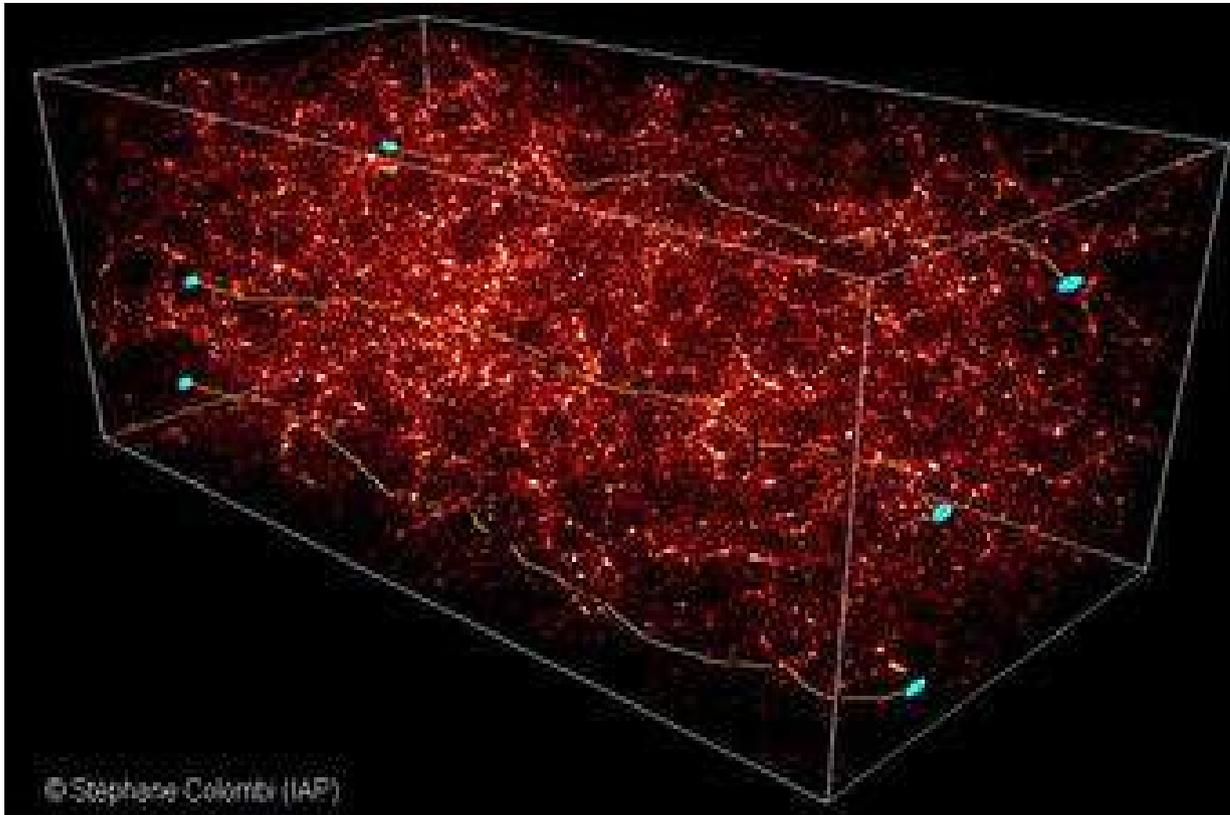
Qu'avons nous appris en 15 ans?

- Que l'accélération de l'expansion est réelle. De plus, d'autres sondes l'observent.
- Que si on l'interprète dans le cadre de la Relativité Générale, le fluide qui la cause ressemble beaucoup à une constante cosmologique.
- Qu'améliorer les mesures de distances aux supernovae va être difficile : il faut absolument améliorer les étalons de calibration photométrique.

La suite

- Les deux dernières années de SNLS (~ 150 SN)
- Pan STARSS (+ 100?)
- Dark Energy Survey (2012-2017) (+1000?)
- LSST (2022-) : + 10000
- Euclid (2021-) : + 0 \rightarrow 1500 à $z > 1$ (en discussion)
- WFIRST (202x-) : + 2000 ?

Cisaillement gravitationnel



Dans un univers
inhomogène,
La lumière est
(légèrement) déviée.

Distorsions gravitationnelles

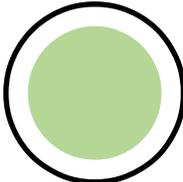
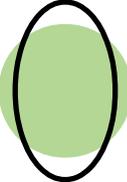
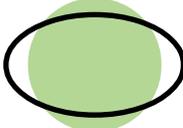
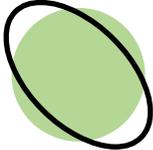
- Transformation du plan image
 - Lentillage faible : transformation bi-univoque.
 - Lentillage fort : images multiples du même objet
- **Ordre 0**: un déplacement (\sim inobservable).
- **Ordre 1** (matrice $2 \times 2 = 4$ paramètres):
 - **Magnification** (1 paramètre)
 - **Cisaillement** (symétrique, $\det=1 \rightarrow 2$ paramètres)
 - Rotation (1 paramètre)
 - Magnification et cisaillement sont observables statistiquement. La rotation n'est pas observable et absente pour les lentilles simples.

Schématique des distortions

Convergence
/magnification

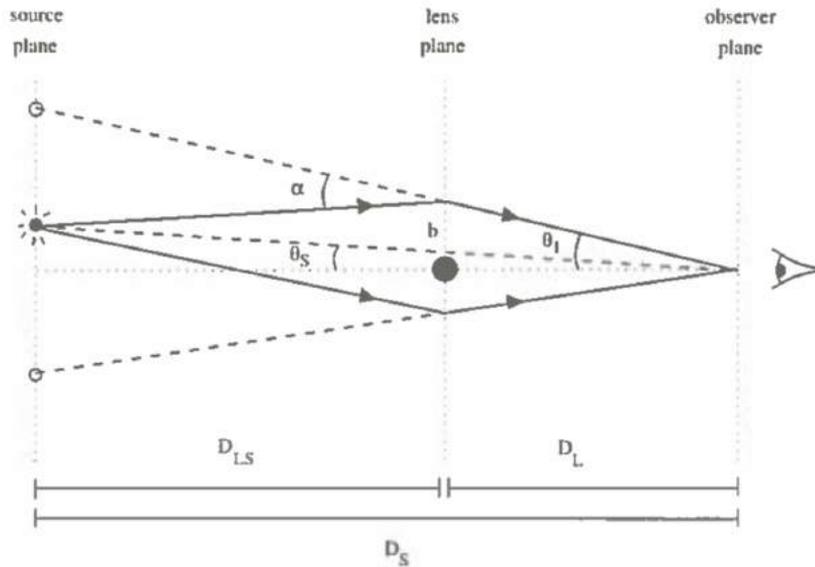
Une composante du
cisaillement

L'autre composante
du cisaillement

	< 0	> 0
κ		
$\text{Re}[\gamma]$		
$\text{Im}[\gamma]$		

"Shear-components" by TallJimbo

Relation avec les sources de gravitation



$$\theta_I - \theta_S = \frac{D_{LS}}{D_S} \alpha = \nabla_{\theta} \psi(\theta_I)$$

Potentiel de lentille

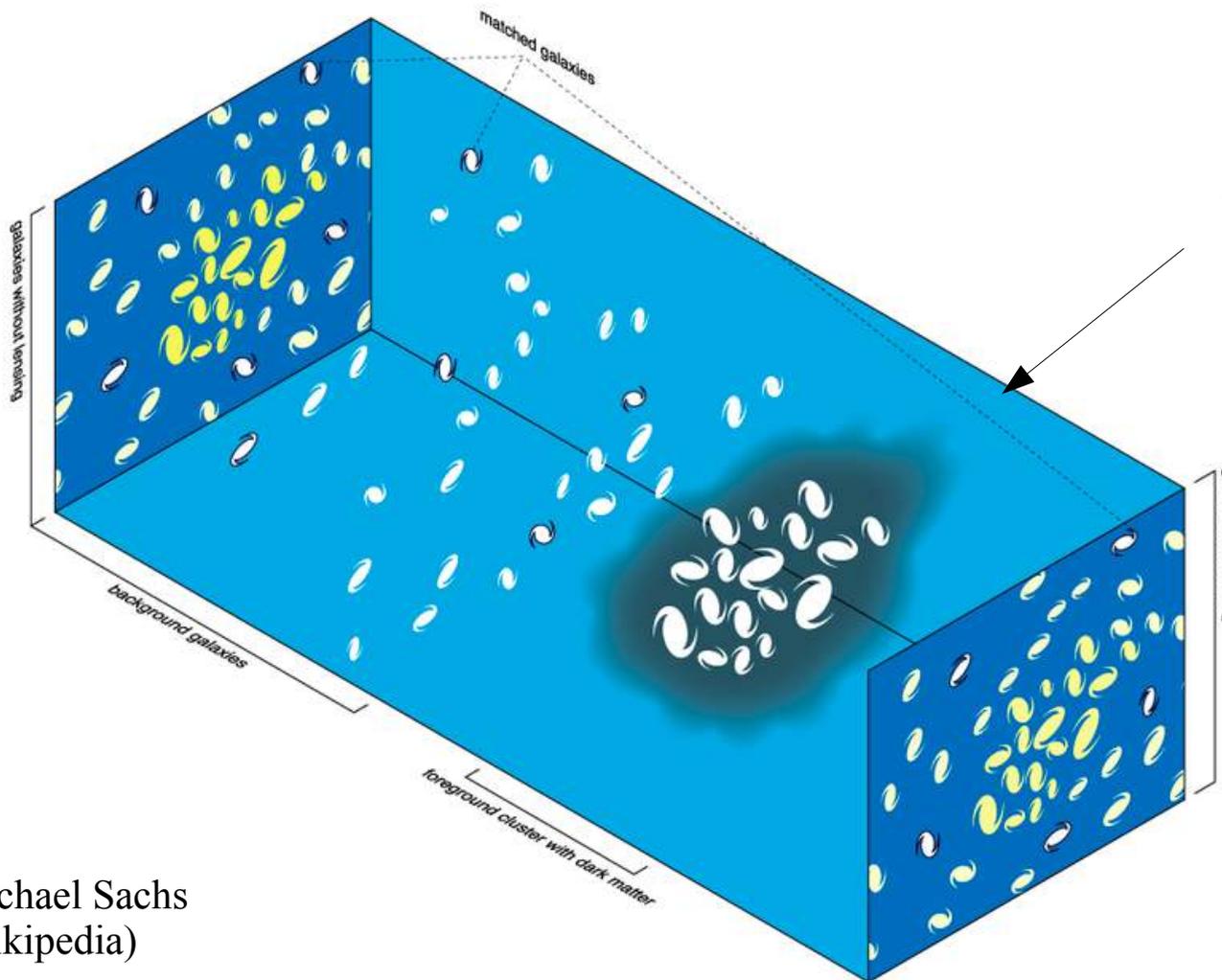
Cosmological physics (Peacock).

“Equation de Poisson” :

$$\nabla_{\theta}^2 \psi = \frac{8\pi G}{c^2} \int \frac{D_L D_{LS}}{D_S} \rho dl$$

Les observables dérivent d'un potentiel scalaire : la « masse projetée ».

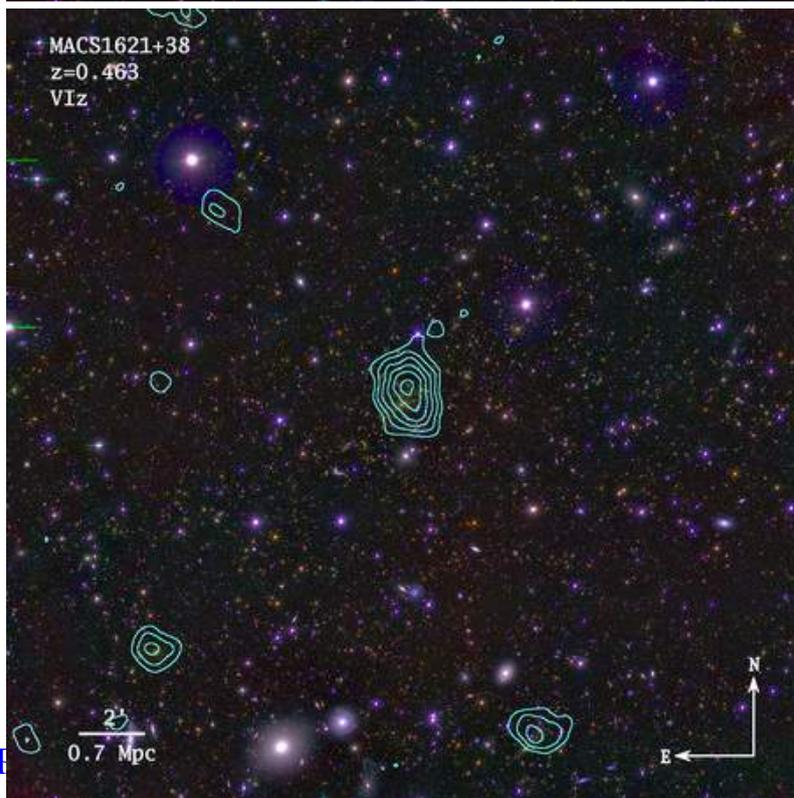
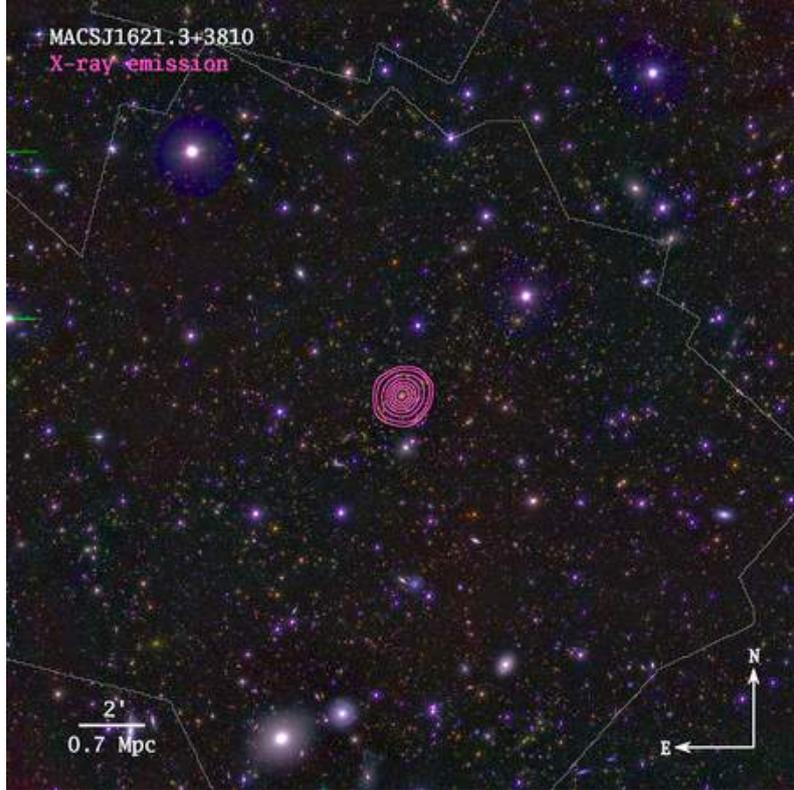
Exemple : un amas de galaxies



Amas

Michael Sachs
(wikipedia)

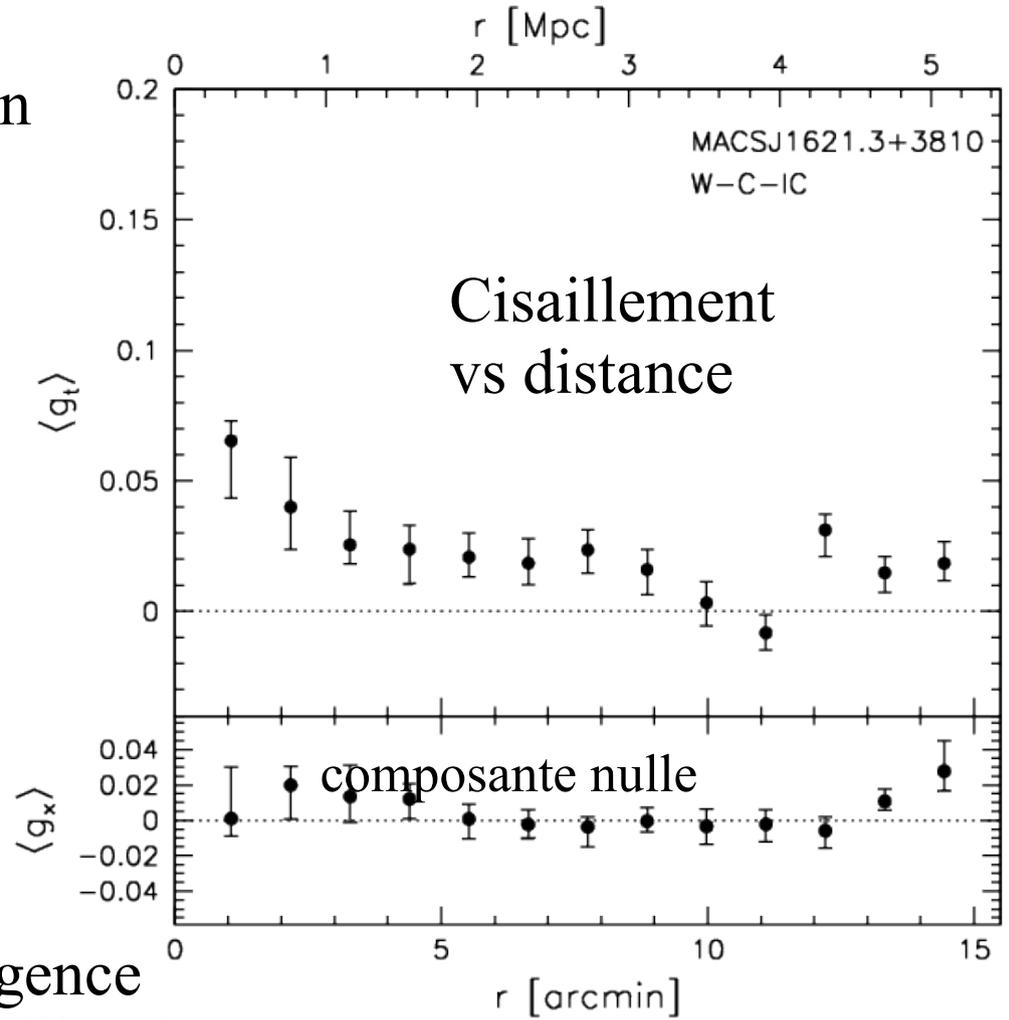
Plan image :
Les galaxies sont
(en moyenne)
allongées
tangentiellement



Weighing the Giants (1208.0597)

Amas de galaxies MACS 1621+38

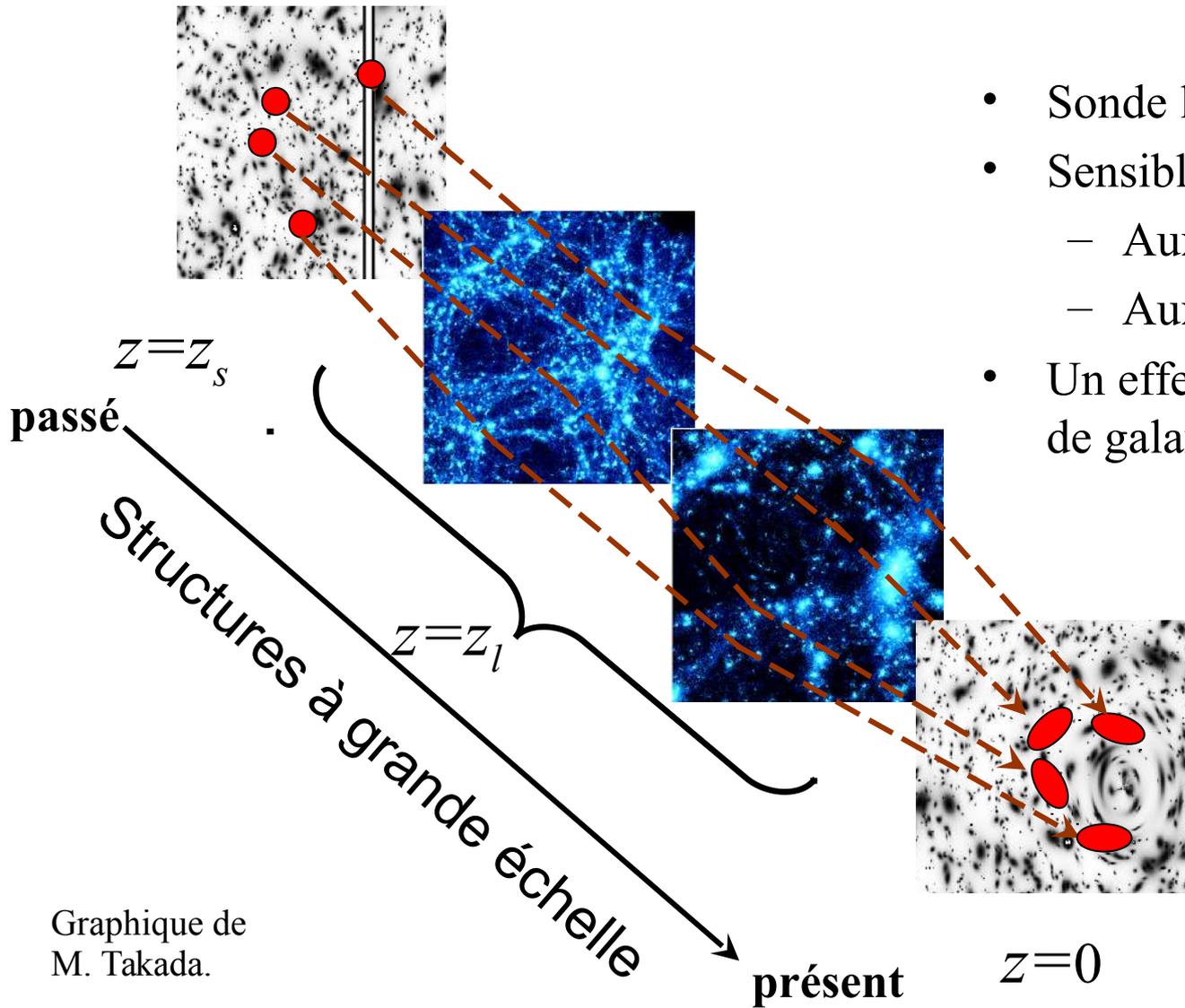
Émission
X



Convergence
(i.e. lentillage)

A. von der Linden
& co

Cisaillement cosmique



- Sonde la matière (noire ou pas)
- Sensible :
 - Aux structures
 - Aux distances
- Un effet de $\sim 1\%$: il faut des millions de galaxies pour le mesurer

Observables :

- ellipticité
- orientation

Contraintes cosmologiques issues du cisaillement cosmique

- Le modèle cosmologique prévoit la formation des structures : en pratique le contraste augmente avec le temps d'une manière reliée à l'expansion.
- Il s'agit d'une prédiction précise, et encodée dans les corrélations des fluctuations de densité.
- Le cisaillement est sensible aux fluctuations de densité, et donc les corrélations du cisaillement tracent les corrélations de densité.

Le relevé CFHTLS (wide)

- Environ 200 degrés², 5 bandes, ~ 200 nuits, sur le CFHT, (2003-2008)
- ~10 millions de galaxies utilisables.



Champ de 1 degré²
Excellente qualité d'image

Mesures du cisaillement

Signal de cisaillement : corrélations des ellipticités des galaxies distantes (comme fonction de leur séparation of angulaire)

Sources d'ellipticité:

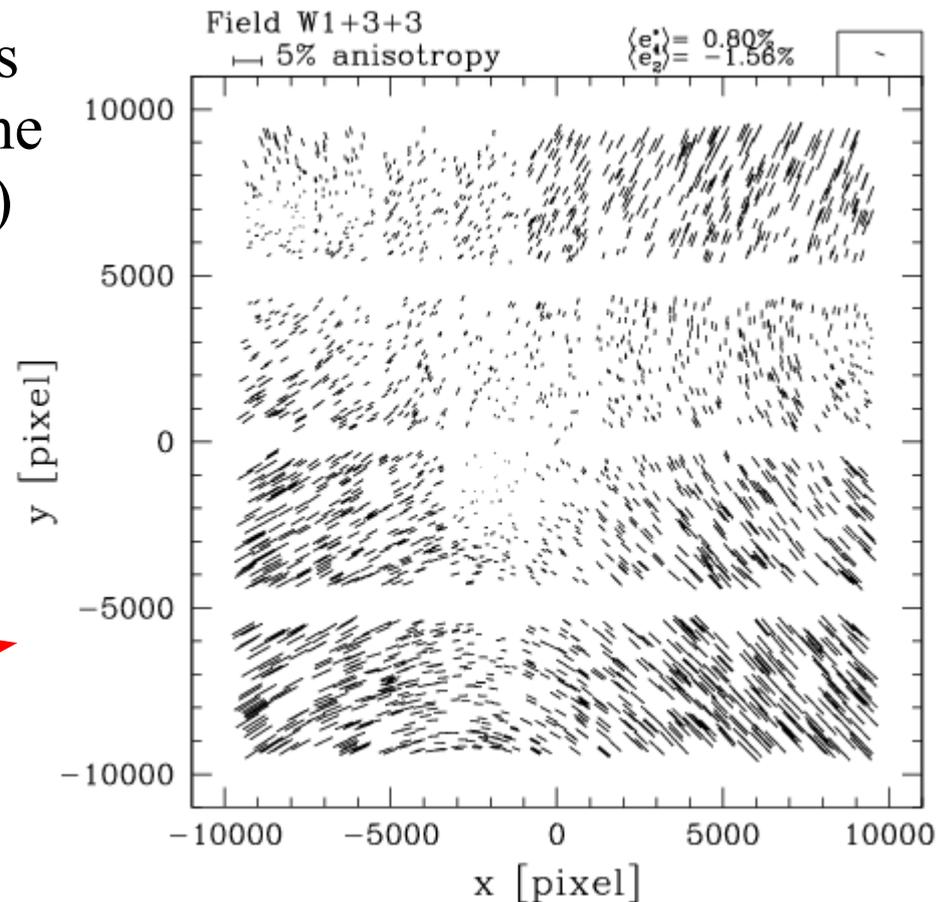
Ellipticité naturelle : $\sim 30\%$

-> moyenne sur de nombreuses galaxies

Système d'imagerie : $0 - 10\%$

-> mesurer l'ellipticité des étoiles

Signal cosmologique : $\sim 1\%$



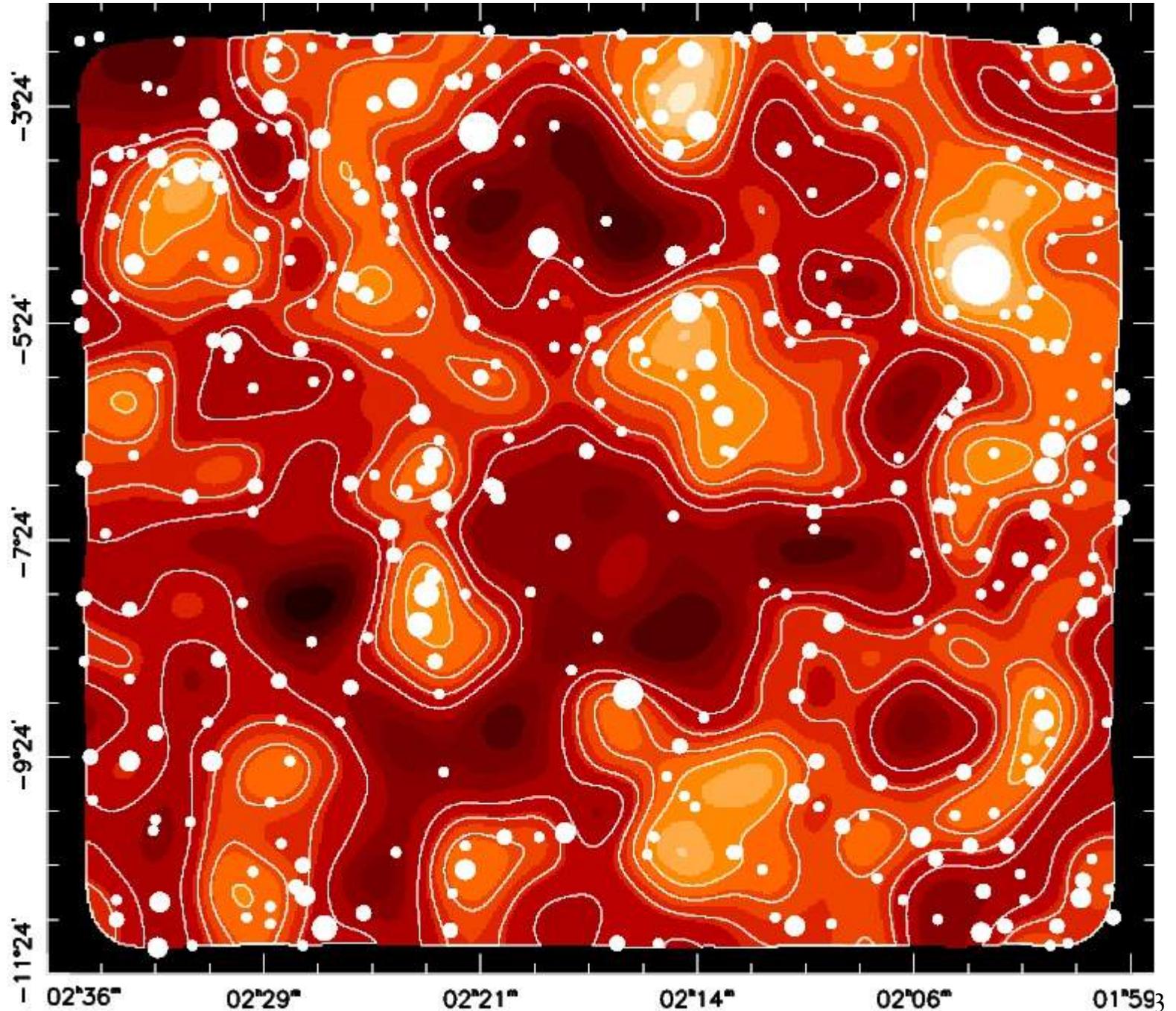
Ellipticité mesurée des étoiles

(CFHT/Megacam) Hoekstra et al 2005

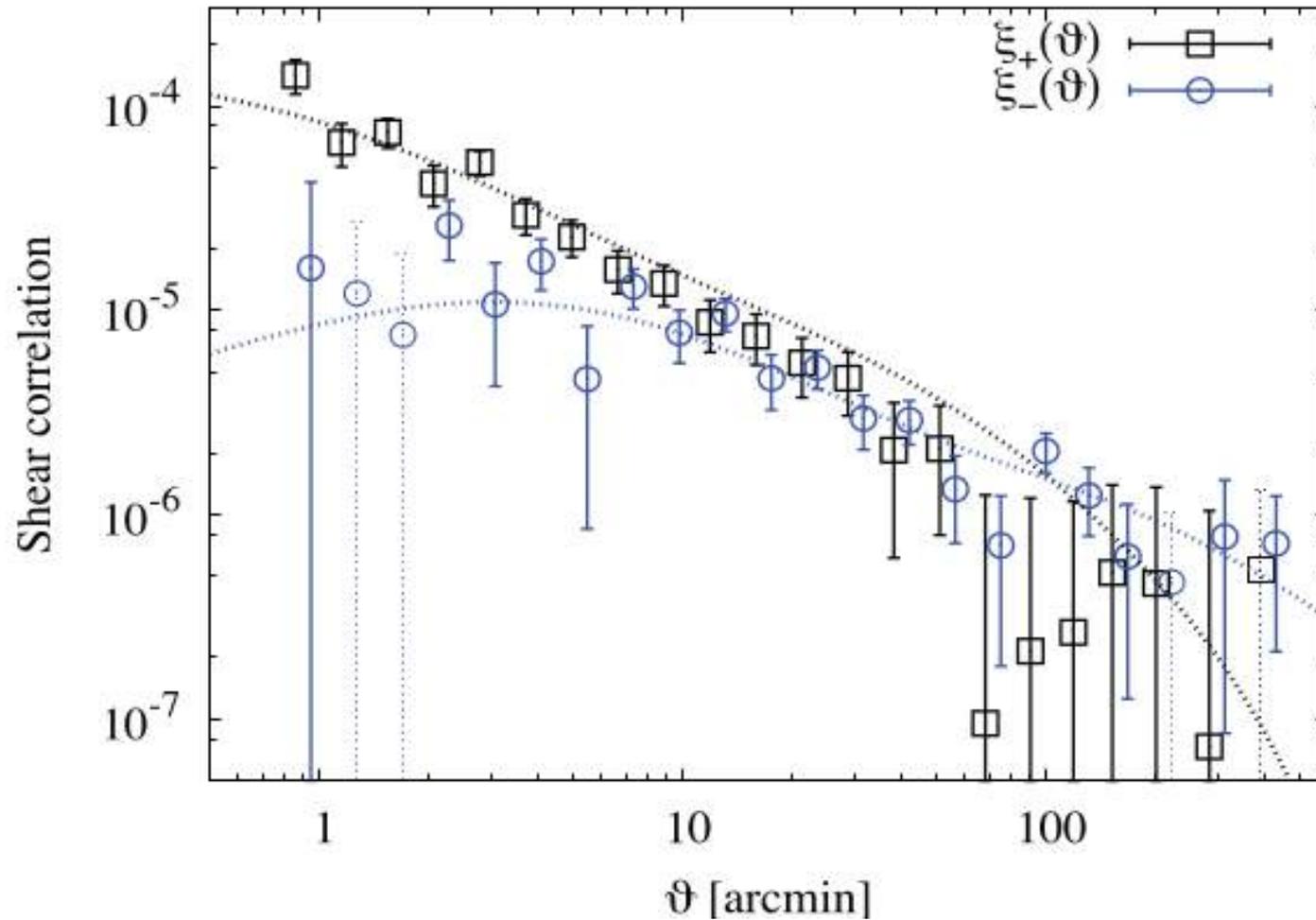
Conversion en cartes de masse

Couleurs, contours
- masse

Points blancs :
- pics dans la
densité numérique
des galaxies

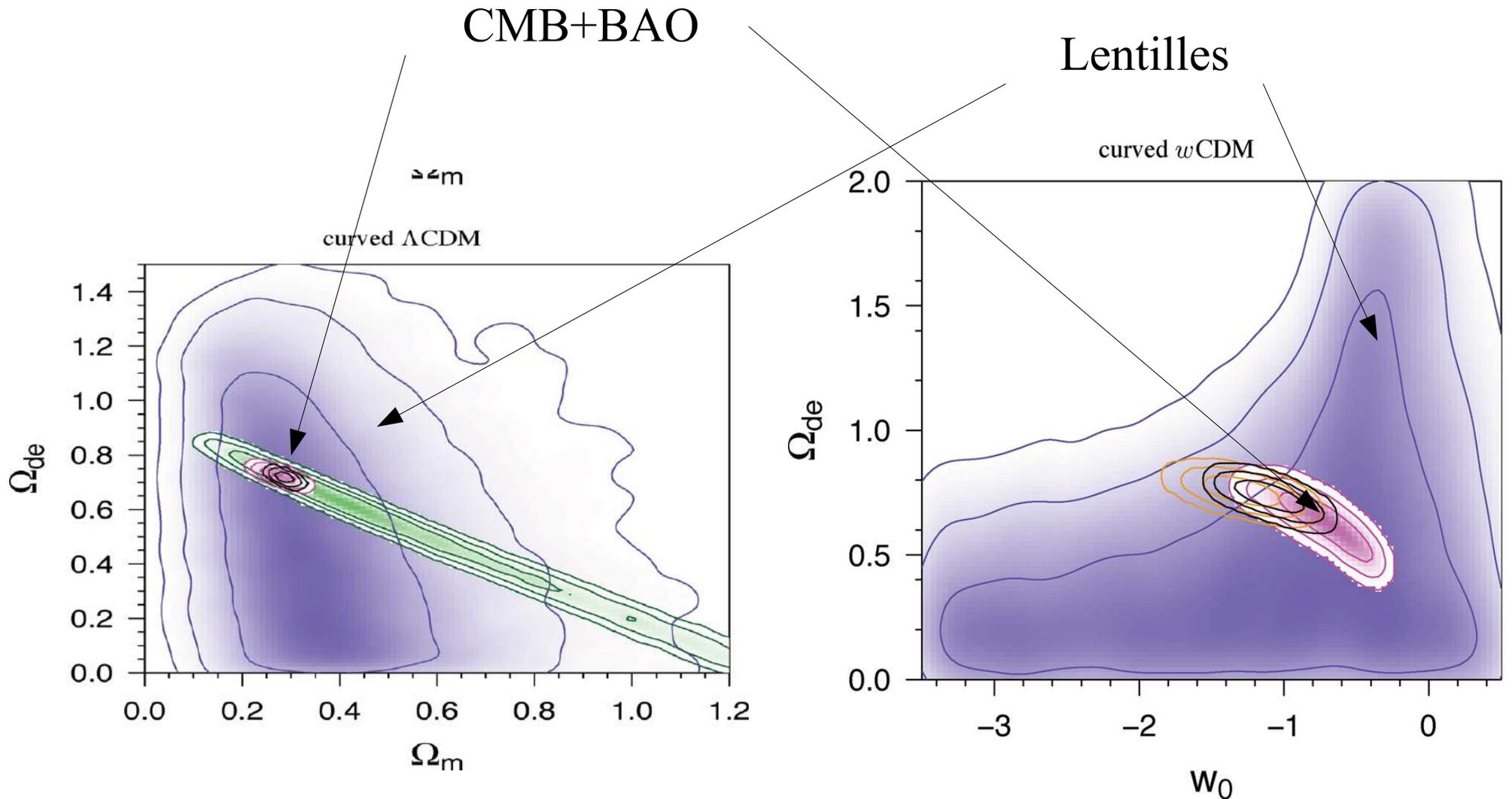


Corrélations angulaires du cisaillement



M. Kilbinger et al. (2013)

Contraintes cosmologiques (2D)

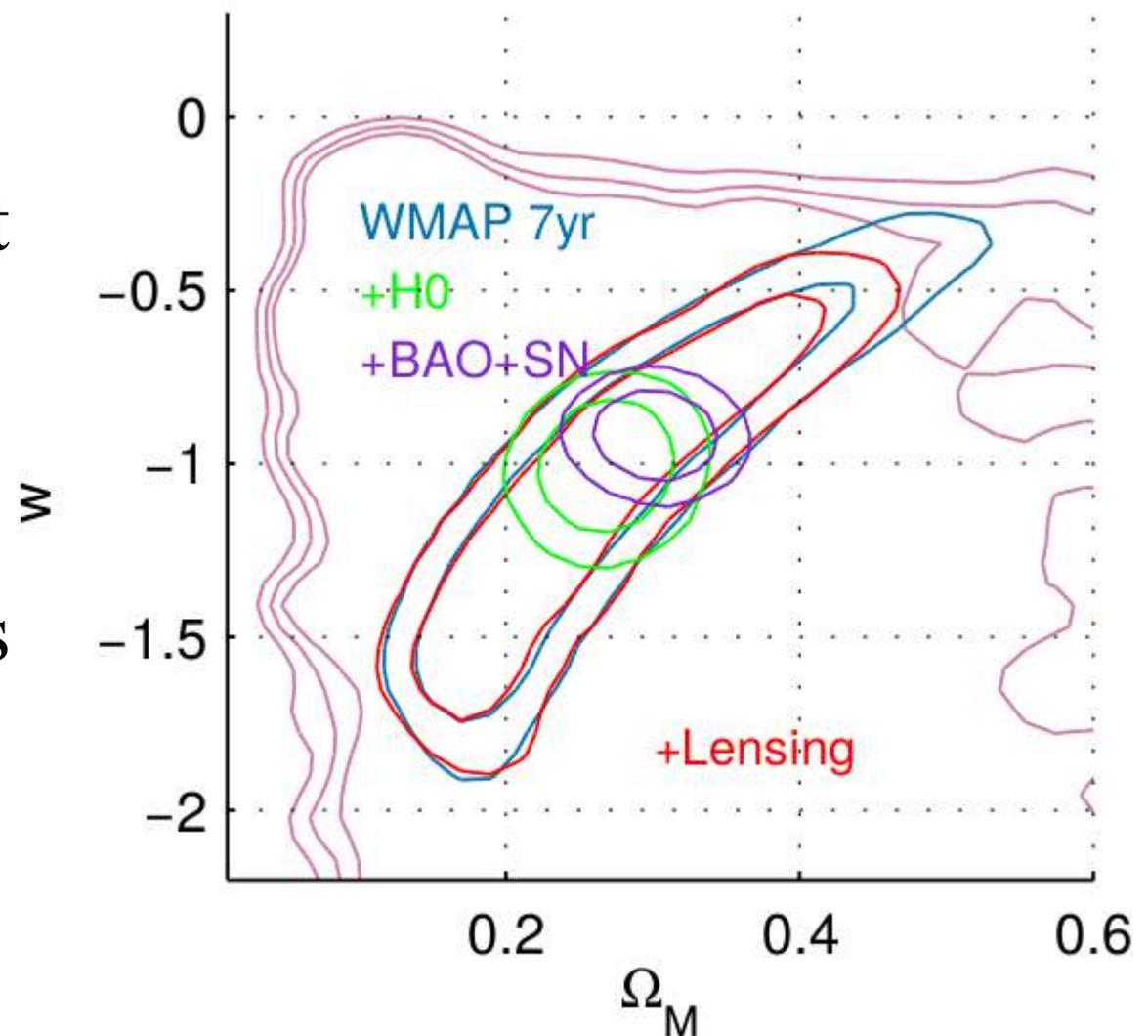


M. Kilbinger et al. (2013)

Contraintes cosmologiques (3D)

- On utilise les couleurs des galaxies pour leur attribuer un z . On peut alors « couper des tranches » en profondeur.
- C'est pour mesurer ces couleurs que l'on observe en 5 bandes (visibles $ugriz$).

Kitching et al. (2014)



Perspectives : contraindre la gravité

Distances \longrightarrow $H(z)$



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R^\sigma_\sigma + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



Perturbations linéaires \longrightarrow $P(k,z)$



Simulations
numériques

Prédictions d'observables
des perturbations

Perspectives : questions scientifiques

- Cerner la cause de l'accélération de l'expansion

- Constante cosmologique
- Champ scalaire quasi-statique
- Gravité modifiée

Supernovae
BAO

- Matière (noire) aux grandes échelles

- Mesurer directement les corrélations
- ... et leur évolution avec le temps.

Corrélations
du
cisaillement

Grands relevés d'imagerie : le programme

	Area (deg ²)	bands	depth (lim. Mag)	déb/fin	#SNe
VST @ ESO	1000	4 (vis)	~23	12/17	
Dark Energy Survey	5000	5 (vis)	~24	12/17	2000
HyperSuprimeCam	2000	5 (vis)	~26	15/19	300
Pan StarsS	30000	4 (vis)	~23	11/16	300
LSST	20000	6 (vis)	26,5	21/31	10000
Euclid	15000	1 vis + 3 NIR	24,5	21/26	?
Wfirst	3000	4 NIR	H=26	26 ?	2000 ?

Sol

Espace

Conclusions

- L'énergie noire est bien là. Elle ressemble à une constante cosmologique ($w = -1.02 \pm 0.05$)
- Les supernovae vont continuer leur avancée.
- Le cisaillement gravitationnel est difficile, mais deux projets importants sont conçus pour le mesurer : LSST et Euclid

