

Cosmologie au LPNHE

L'équipe de cosmologie du LPNHE

6 CNRS

- Pierre Antilogus
- Pierre Astier
- Etienne Barrelet
- Nicolas Regnault
- M. Betoule
- S. Bongard
- (N. Busca, J. Guy)

LSST/SN-Lensing

DESI/BAO

Théorie

6 MdC/Prof

- Christophe Balland
- S. Baumont
- Delphine Hardin
- M. Joyce
- L. Le Guillou
- K. Schahmaneche

Visiteurs

- J. Rich
- J.-M. Le Goff

2 Post-docs

- P-F. Leget
- Clare Saunders
- H. Gil-Marin
- M. Roman

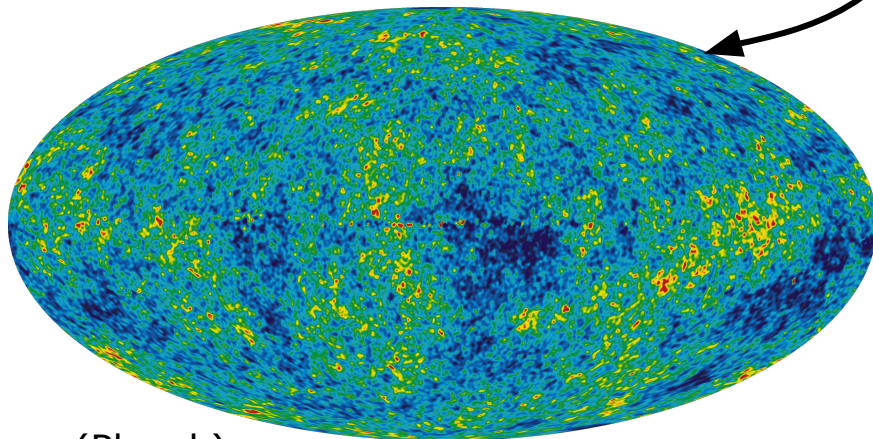
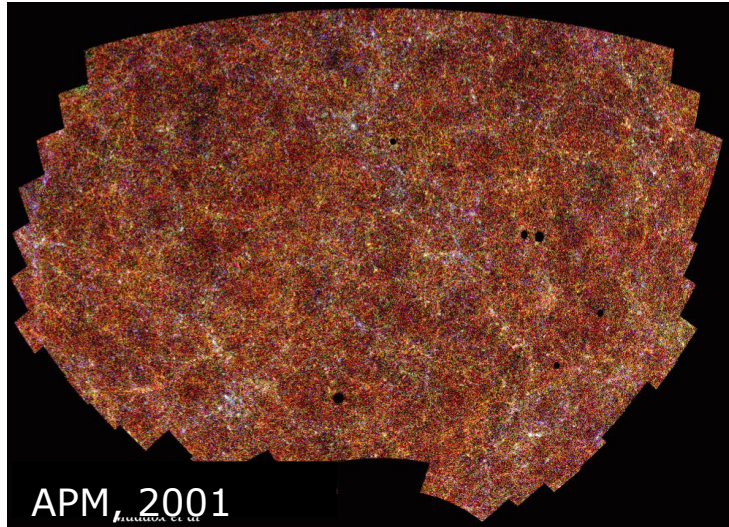
3 doctorants

- V. de Sainte Agathe
- F. Hazenberg
- J. Stermer

ASPIC
Subaru/HSC
LSST
BOSS
BAO
PCWG
Brighter-fatter
AuxTel
SAWG
eBOSS
DESI
DICE
Shear

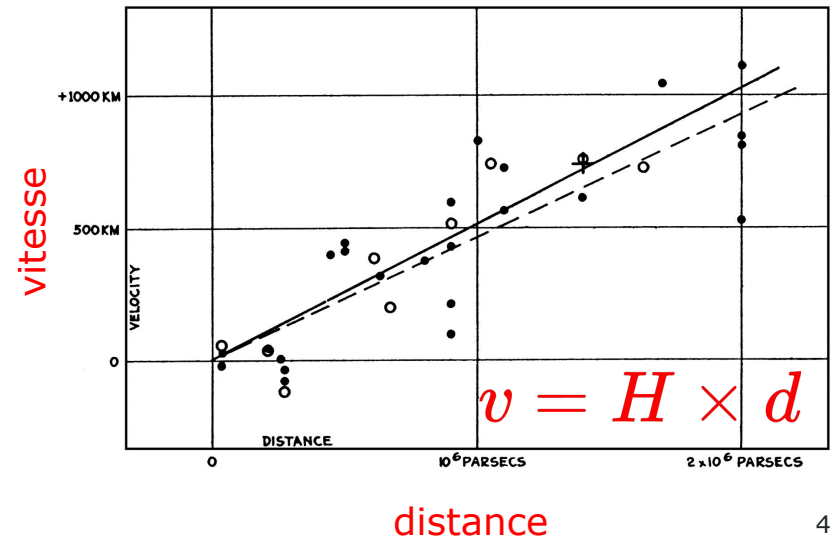


Le modèle cosmologique

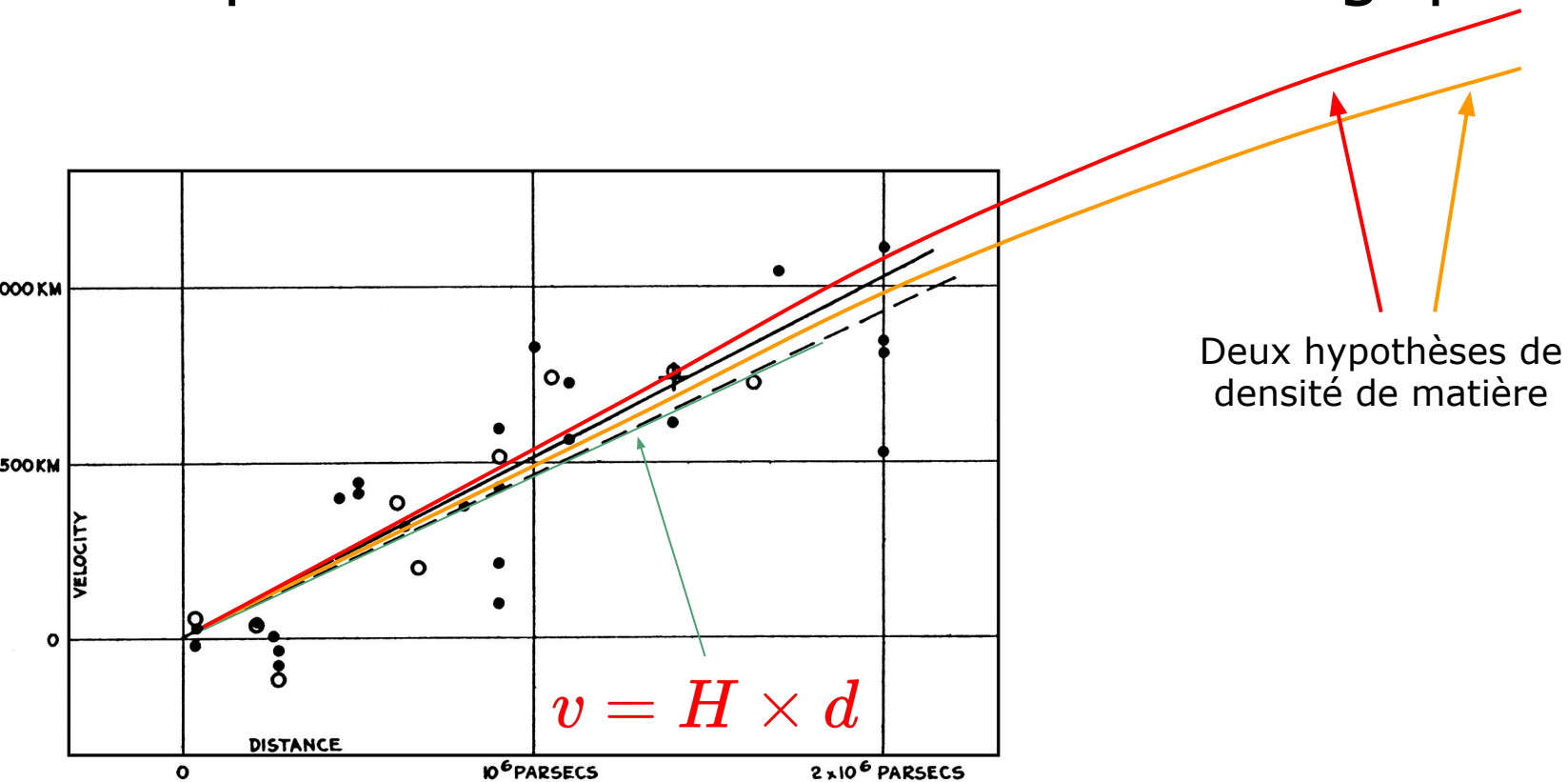


- Notre Univers est :
 - homogène (à peu près),
 - isotrope (très),
 - ... et en expansion !

Hubble, 1929



L'expansion comme sonde cosmologique



La variation de la vitesse d'expansion (H) avec le temps est une fonction des densités et équations d'état des fluides qui composent l'Univers (matière, photons, neutrinos, ...)

Les ingrédients du modèle

- **Relativité générale** (théorie de la gravitation)
- **Homogénéité + isotropie**
- **Densités et équations d'état** des fluides qui peuplent l'Univers

-> équation(s) de Friedmann

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

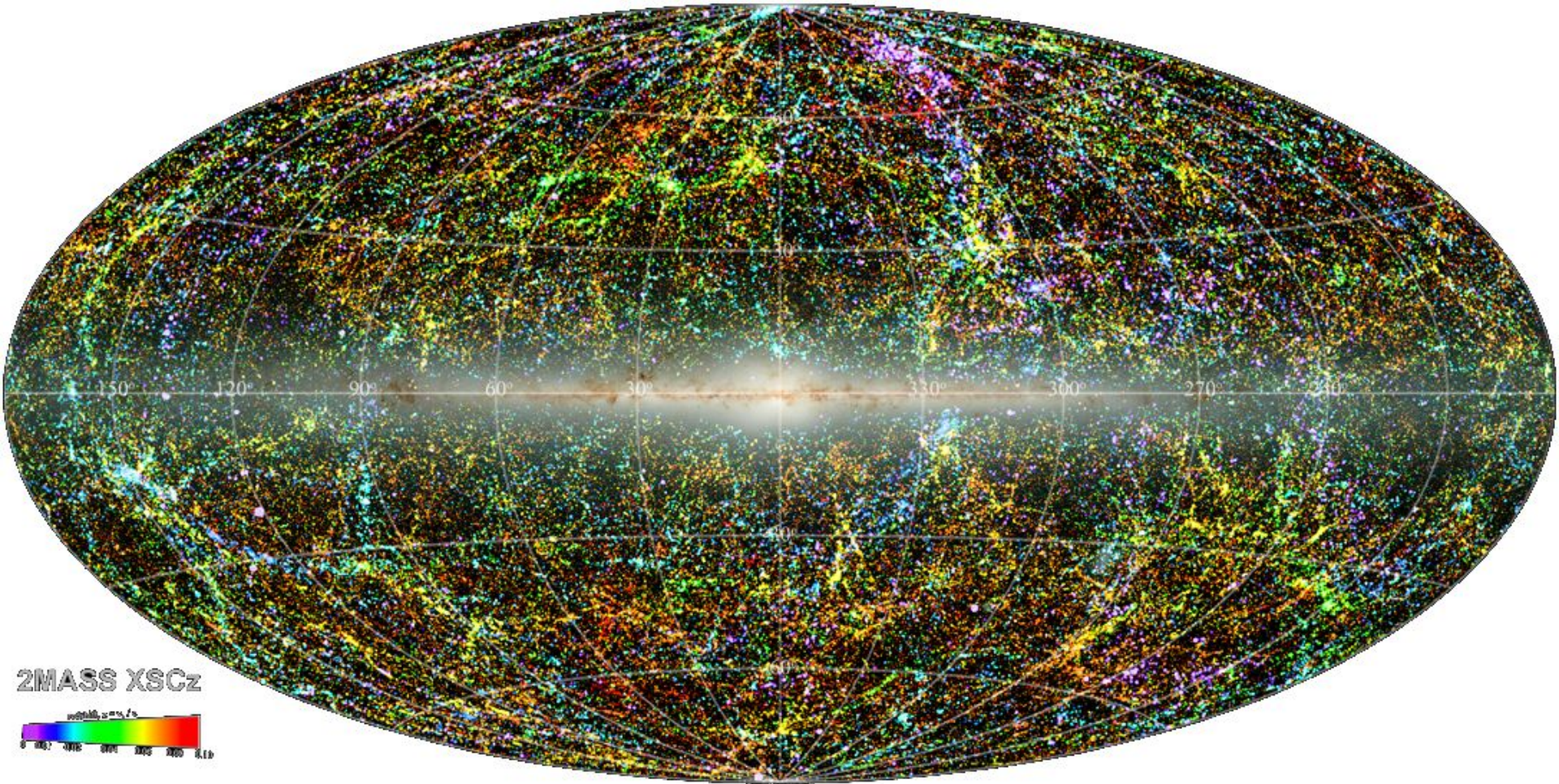
Expansion

$a(t)$:
paramètre
d'échelle

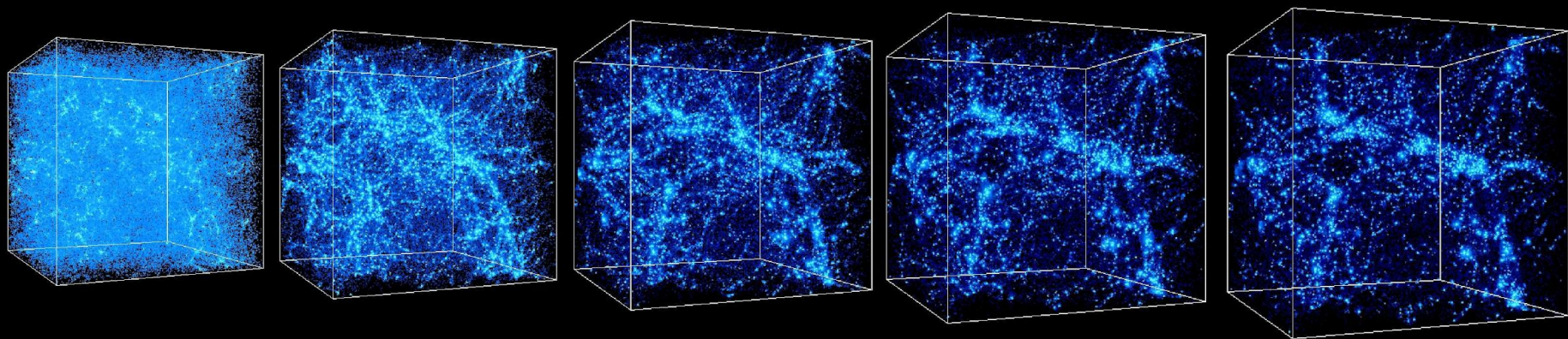
Densités d'
énergie

Courbure

Inhomogénéités & formation des structures



Formation des structures



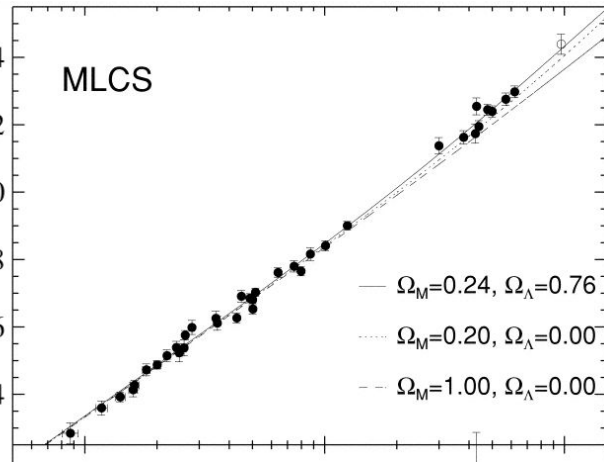
- A partir inhomogénéités primordiales, sous l'effet de la gravitation
- **Théorie** (simulations) permet de prédire
 - propriétés statistiques champ densité (fonction de corrélation)
 - En fonction du redshift
 - à partir RG + champ densité initial + énergie particules fluide
- **Sondes observationnelles**
 - Redshift surveys (RSD) + Weak lensing + vitesses particulières



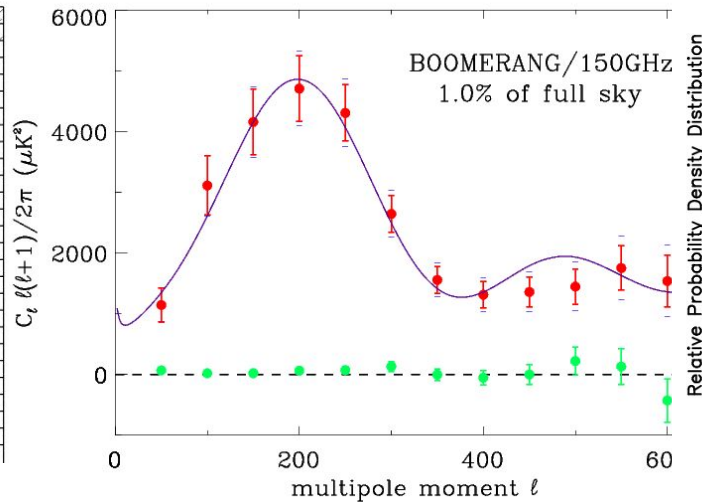
	BJ	AB	JP	PC	VI	Rivl	PK
H ₀	40	35	65	75	60	70	60
R ₀	0.2	1	0.35	0.2	1	0.3	0.2
Λ	0	0	0	0	0	0.7	0
K	-1	0	-1	-1	0	0	-1
t	15	14	29	12	18	14	16

(Leiden, 1995)

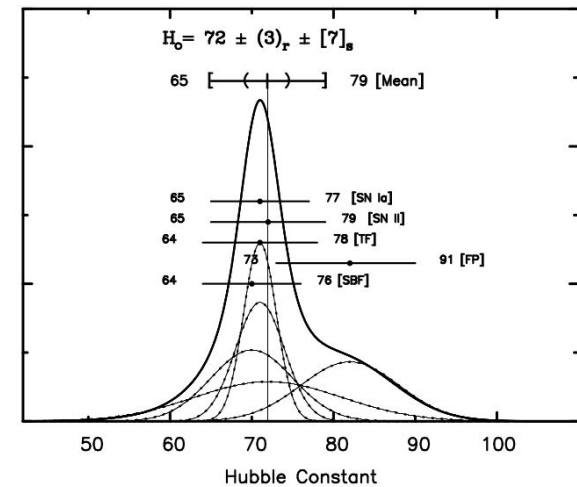
Au tournant du siècle: 3 résultats majeurs



Accélération de l'expansion cosmique (Riess et al, 1998, Perlmutter et al, 1999)



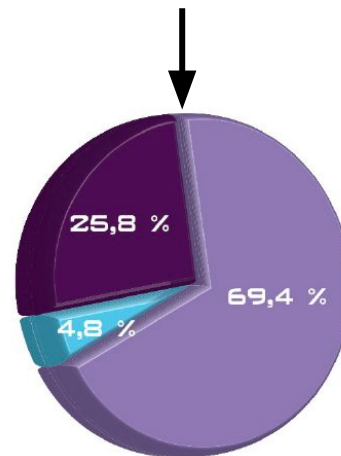
Première mesure précise du pic acoustique du CMB (de Bernardis et al, 2000)



Première mesure de précision de H0 (Freedman et al, 2000)

ΛCDM

Un univers *euclidien*, en expansion accélérée, dominé par de la **matière noire froide** et de l'**énergie noire**



Le modèle marche remarquablement bien...

A much more extensive investigation of models of dark energy and also models of modified gravity can be found in [Planck Collaboration XIV \(2015\)](#). The main conclusions of that analysis are as follows:

- an investigation of more general time-variations of the equation of state shows a high degree of consistency with $w = -1$;
- a study of several dark energy and modified gravity models either finds compatibility with base Λ CDM, or mild tensions, which are driven mainly by external data sets.

7. Conclusions³⁷

(1) The six-parameter base Λ CDM model continues to provide a very good match to the more extensive 2015 *Planck* data, including polarization. This is the most important conclusion of this paper.

Energie noire ?!?!

- Constante cosmologique ? Fluide répulsif de nature inconnue ?

- Stratégie : mesurer son équation d'état $w = \frac{p}{\rho}$
- Potentiellement variable avec z

$$w(a) = w_p + w_a(a_p - a) \quad \Lambda \Rightarrow w = -1$$

- Quelque chose à changer du côté de la relativité générale ?

- Alors on s'attend à une phénoménologie différente
- Par exemple: la croissance des structures serait modifiée

Taux de croissance des structures $\rightarrow f \propto \Omega_m^\gamma$ \leftarrow RG prédit $\gamma \sim 0.55$

Questions scientifiques

- Quelle est la cause de l'accélération de l'expansion ?
 - Constante cosmologique ?
 - Champ scalaire en evolution lente ?
 - Modification de la gravité (RG) aux échelles cosmologiques ?
- **Stratégie** : tests de précision du modèle standard

Histoire de l'expansion cosmique

- 2 sondes complémentaires:
 - Luminosité SNIa vs z [$0 < z < 1.5$]
 - Taille angulaire pic baryons vs z

Croissance des structures

- 2 sondes complémentaires
 - Cosmic shear
 - Redshift space distortions

Equation d'état DE: (w, w_a)

tests gravitation aux
échelles cosmologiques

Relation distance-redshift

$$d(z) = \int \frac{cdz}{H(z, \rho_i, \dots)}$$

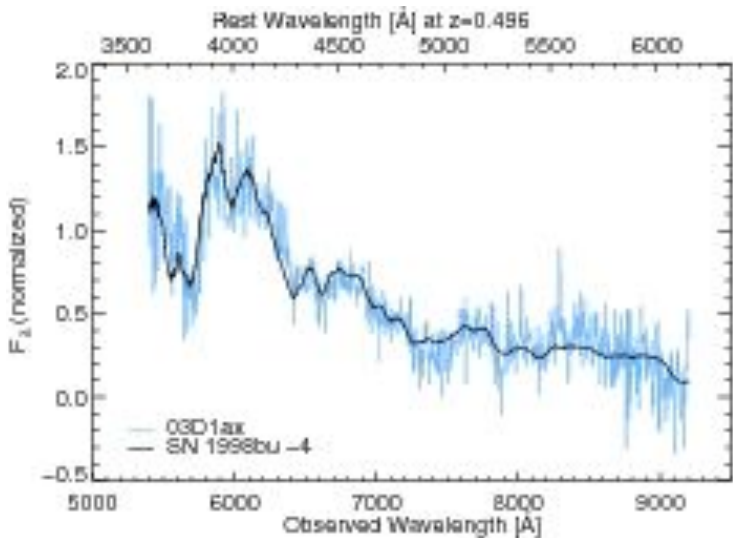
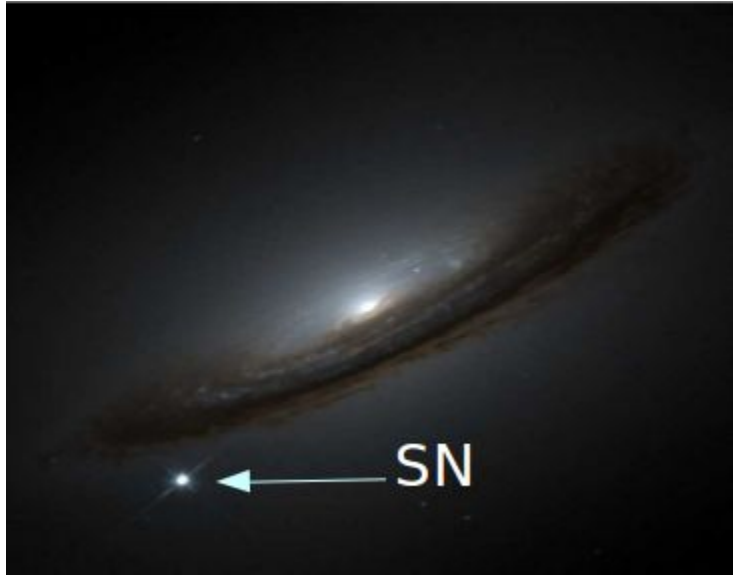
Supernovae

- Sonde mature
- Statistiquement efficace
- Limitée à $z < 1$ (au sol)
- Limitée à $z < 1.8$ (espace)

BAO

- Sonde robuste
- surveys dédiés
- $0.5 < z < 3$ (depuis le sol)
- Mesure directe de $H(z)$
- Mauvaises contraintes $z < 0.5$

Supernovae de type Ia

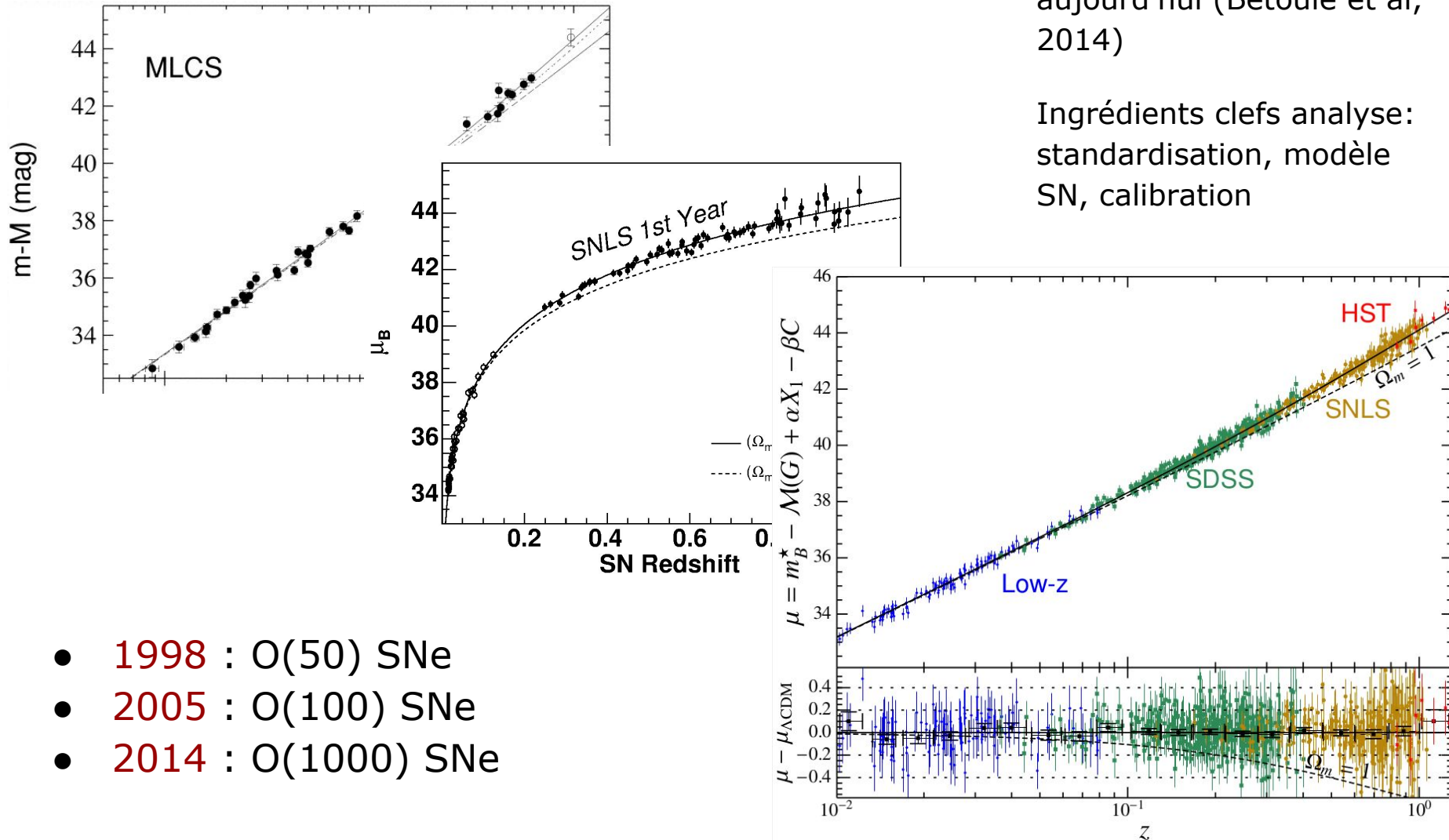


- Explosion thermonucléaire d'une naine blanche C / O
 - Rare (1/Galaxie/1000 ans)
 - Brillant ($10^{10} L_\odot$)
 - Rapide (\sim un mois)
 - *Standardisable*
 - $\sigma(L_{\max}) \sim 15\%$
- Spectroscopie
 - Pour l'identification (raies larges)
 - Mesure du redshift

Diagramme de Hubble SNe

État de l'art, encore aujourd'hui (Betoule et al, 2014)

Ingrédients clefs analyse: standardisation, modèle SN, calibration



- 1998 : O(50) SNe
- 2005 : O(100) SNe
- 2014 : O(1000) SNe

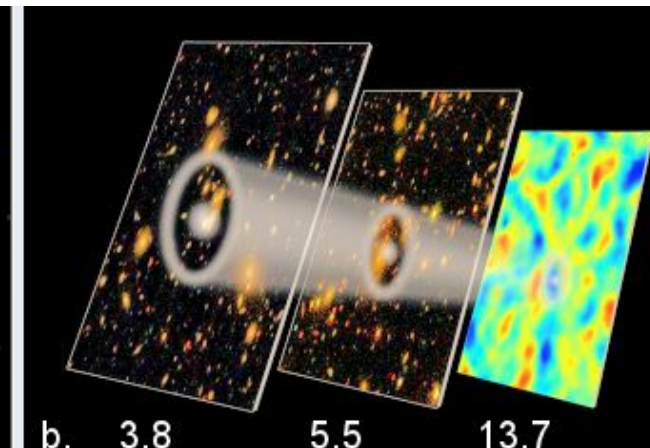
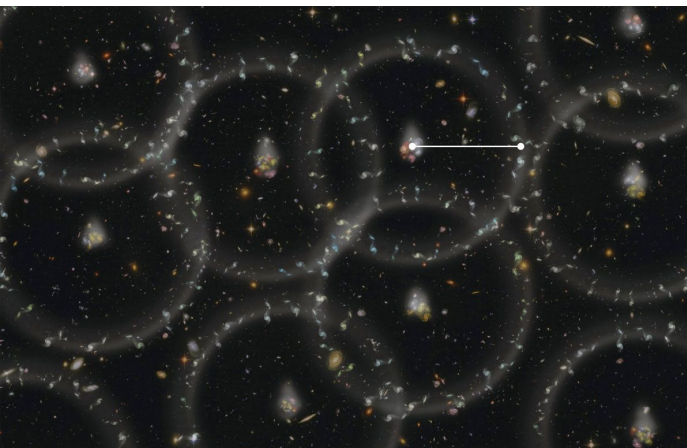
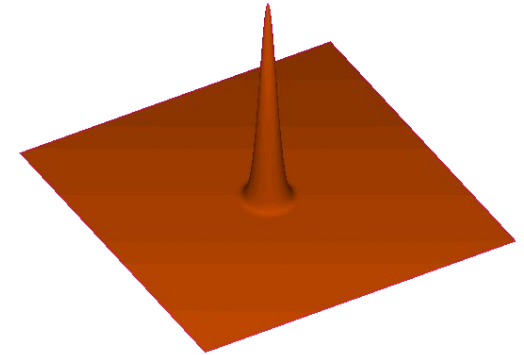
BAO

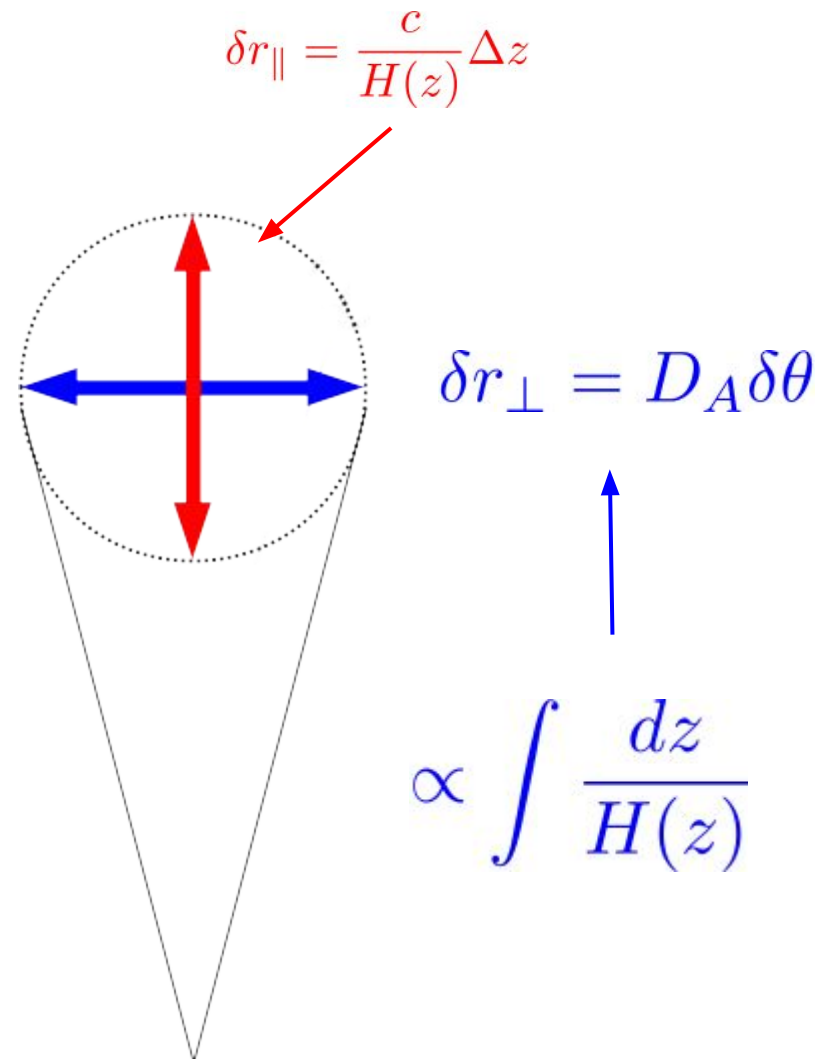
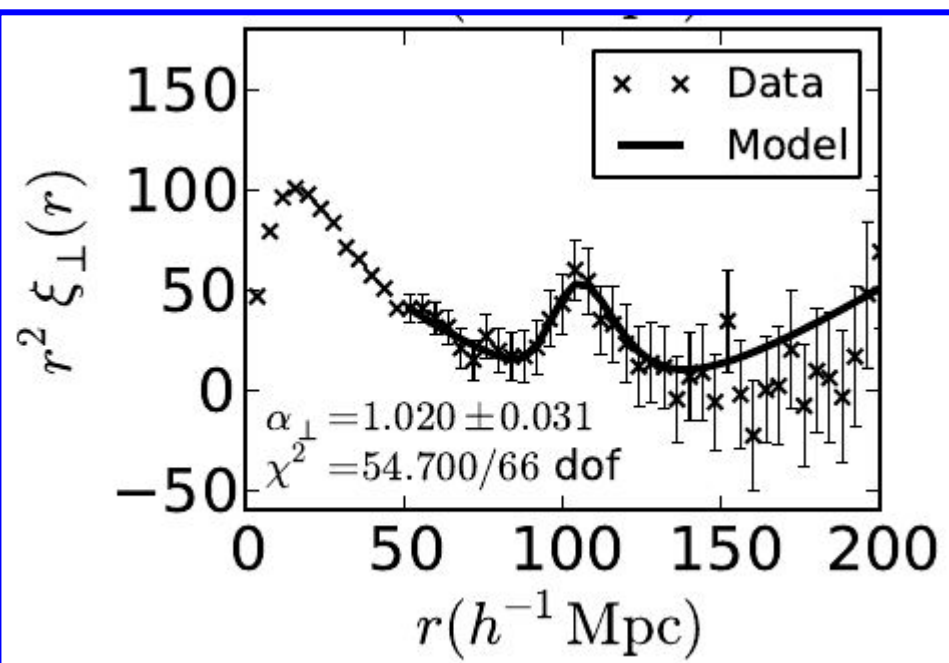
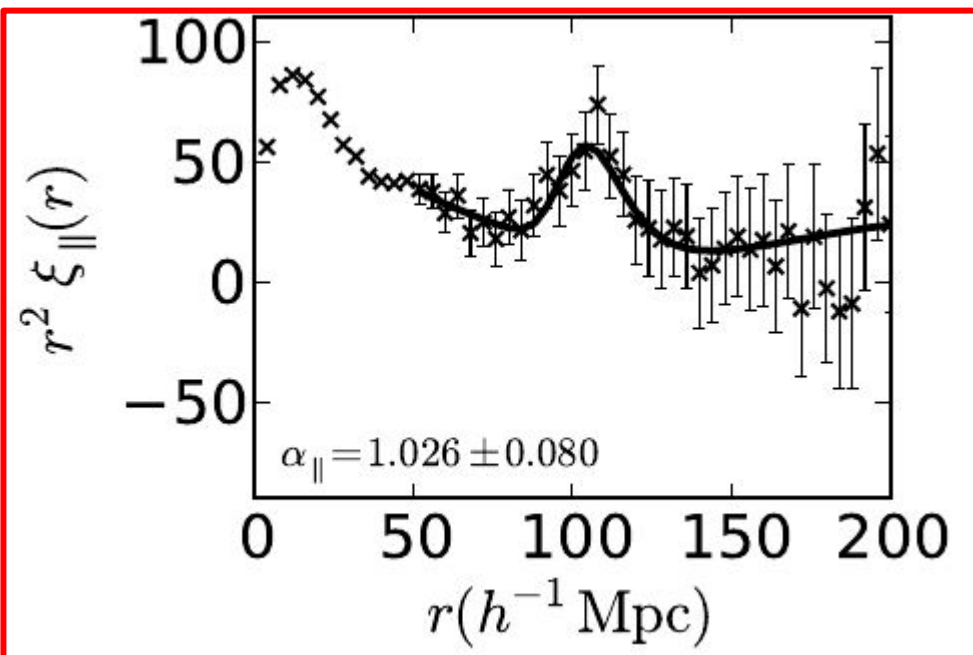
- Ondes sonores dans le plasma primordial

$$r_s = \int_0^{t_*} \frac{c_s(t)}{a(t)} dt = 147.5 \pm 0.6 \text{ Mpc}$$

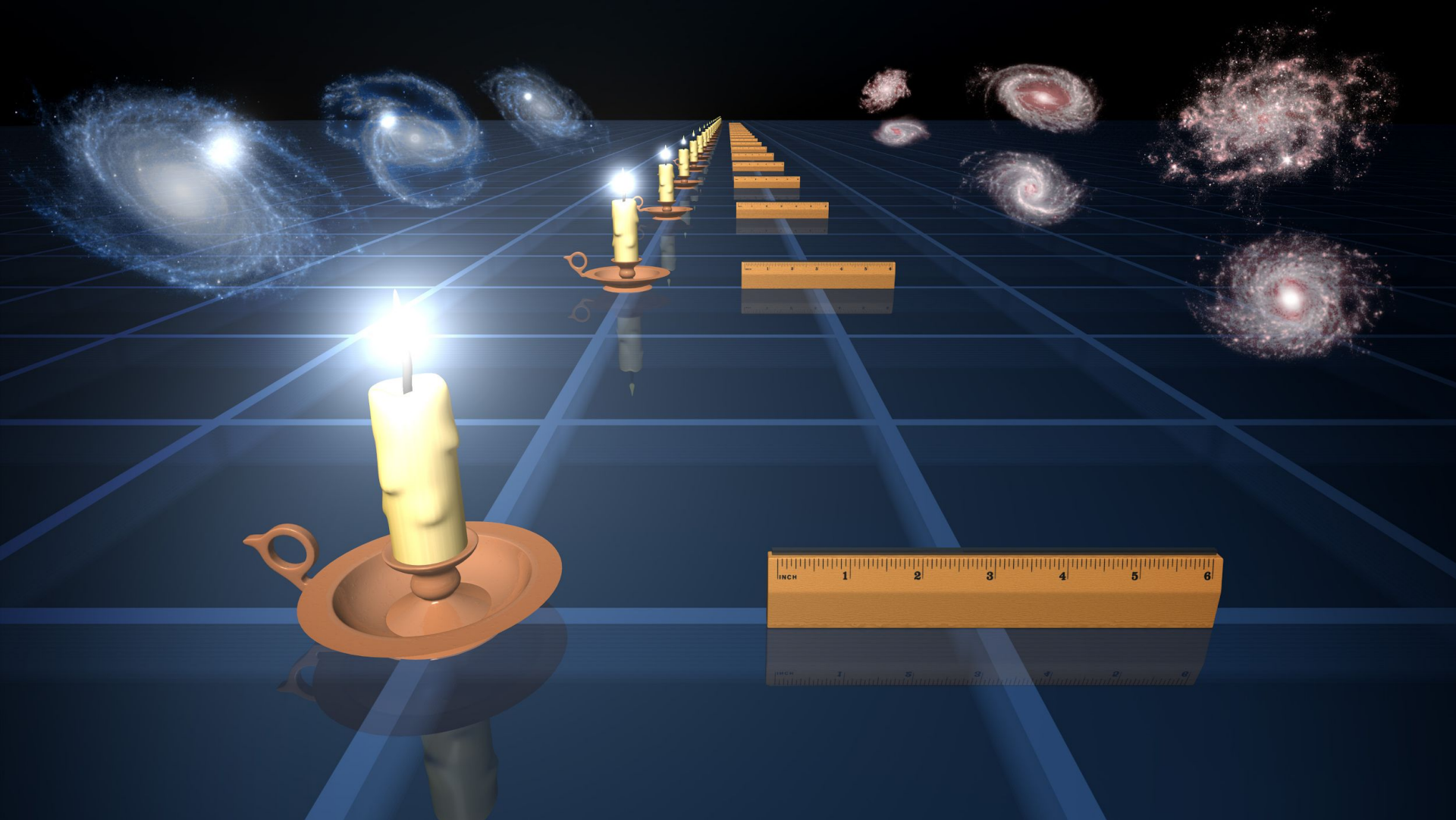
Distance max parcourue
par une onde sonore ->
découplage

Physique linéaire simple
& mesures de Planck

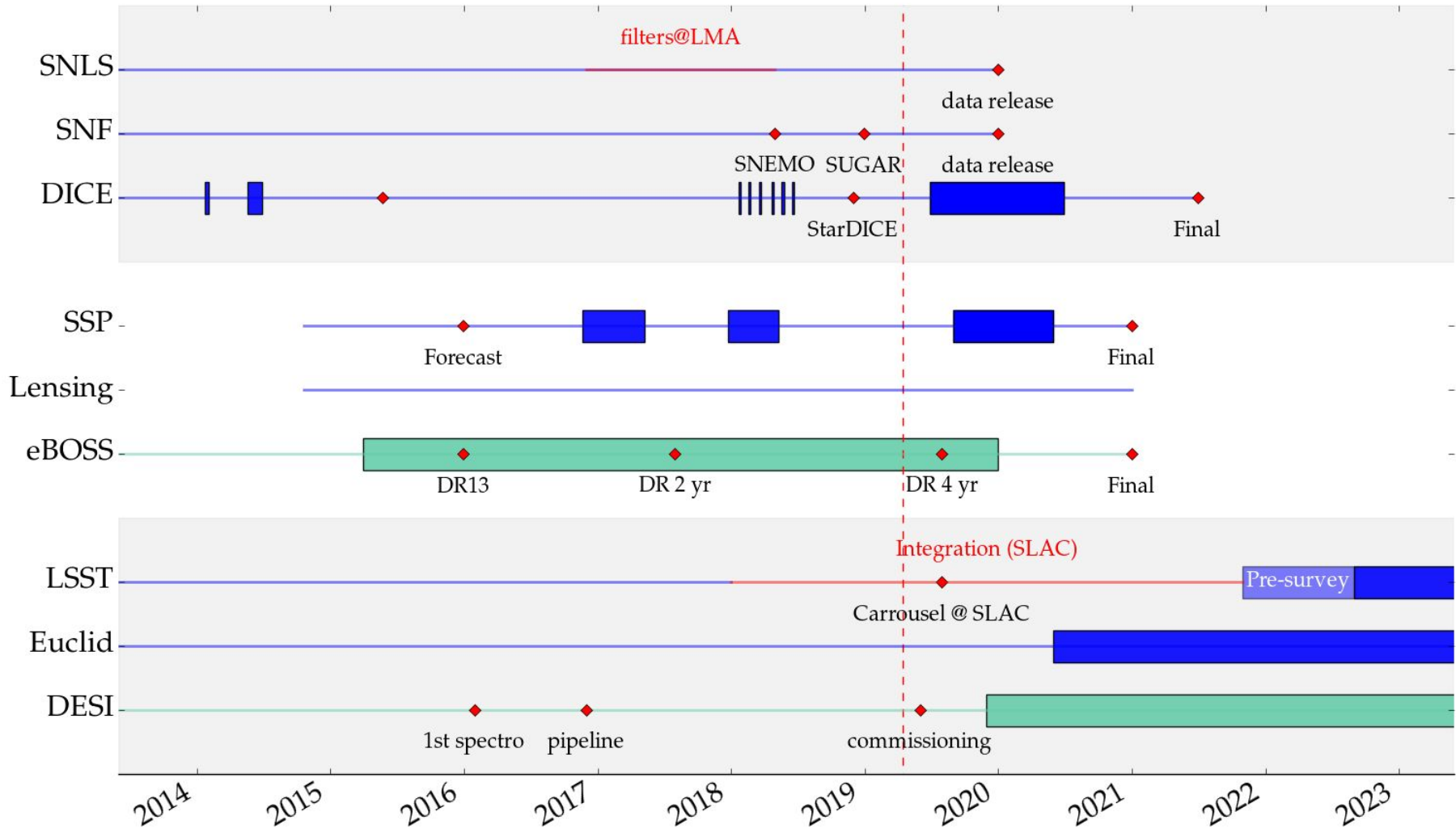




Mesure distance vs. redshift



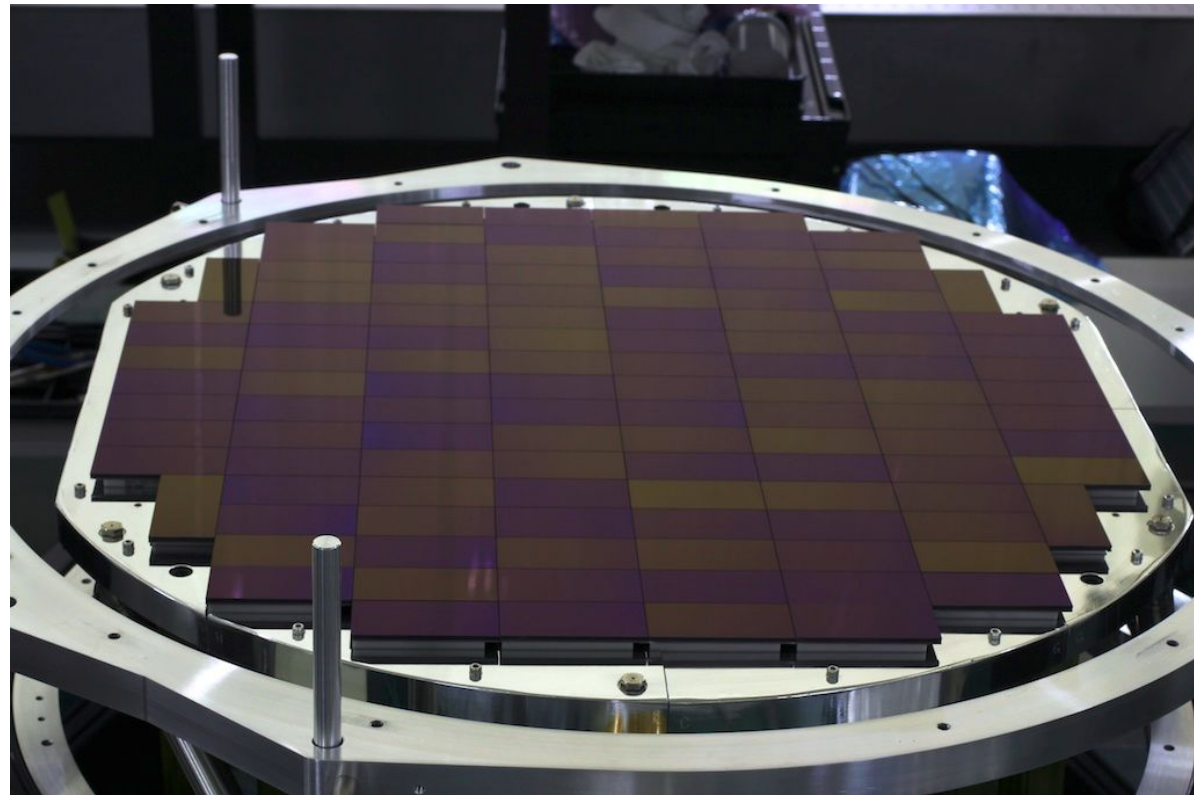
Activités du groupe



Imagerie grand champ : SNe & Lensing

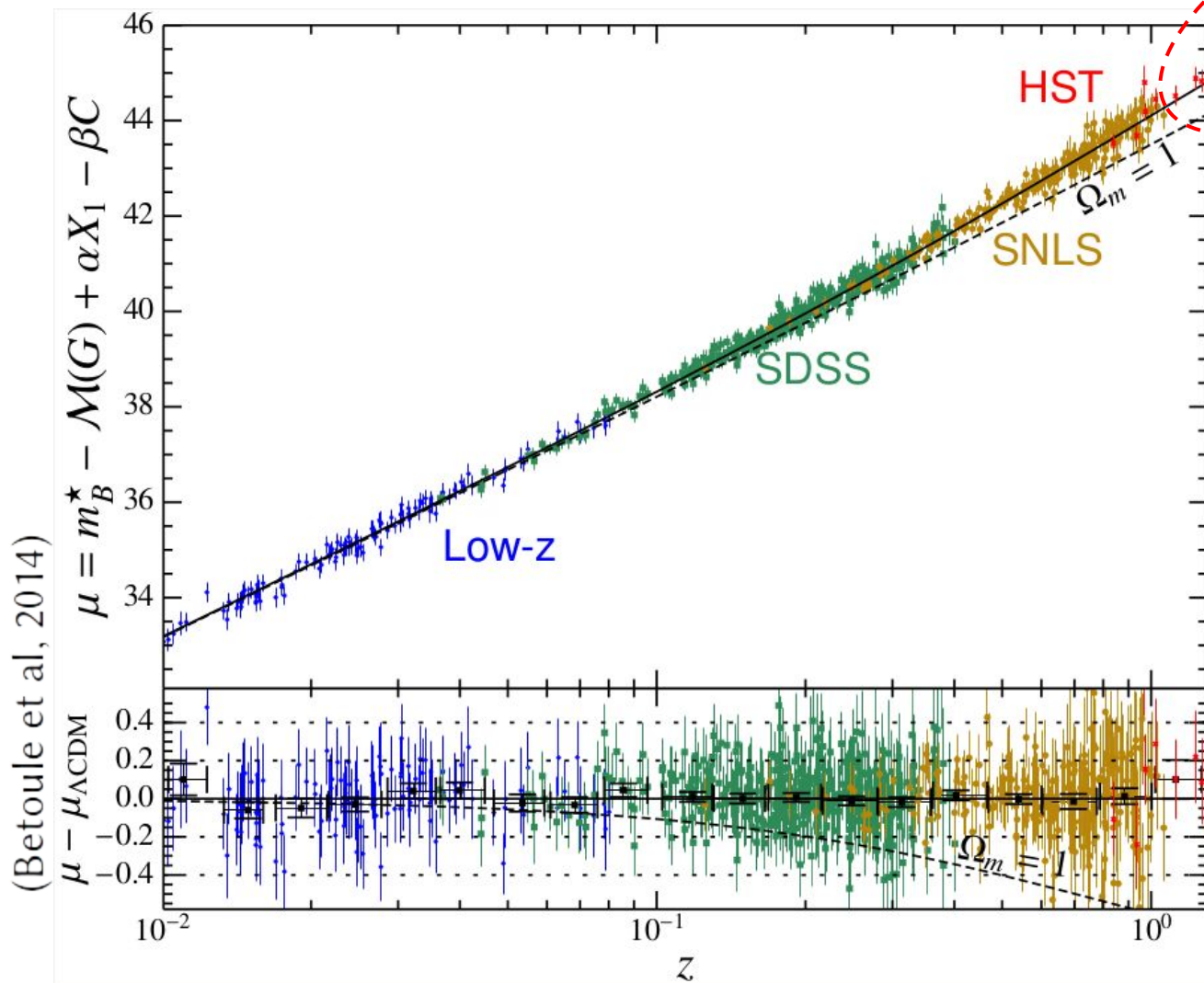
- **Objectif** : analyses LSST
- **Challenges** : liés à la mesure + contrôle des systématiques
- **SNe** :
 - calibration photométrique (starDICE, SNLS, Subaru)
 - Mise à niveau pipeline de photométrie (Subaru)
 - Codes modélisation empirique SNe (SALT, SNEMO, SUGAR)
 - Diagramme de Hubble Subaru/HST (+stat existante)
 - Préparation cadence + follow-up spectro LSST
- **Lensing**
 - Caractérisation senseurs LSST
 - "Effet brighter fatter" : développement code de seconde génération, livraison code à LSST
 - Développement méthode d'auto-calibration du cisaillement
 - Participation au développement nouveaux code PSF (Piff)

Contexte : données Subaru Strategic Program



- 1.8 deg² camera
- 116 CCD à haute résistivité
- Télescope Subaru (8.2-m)

Subaru Strategic Program

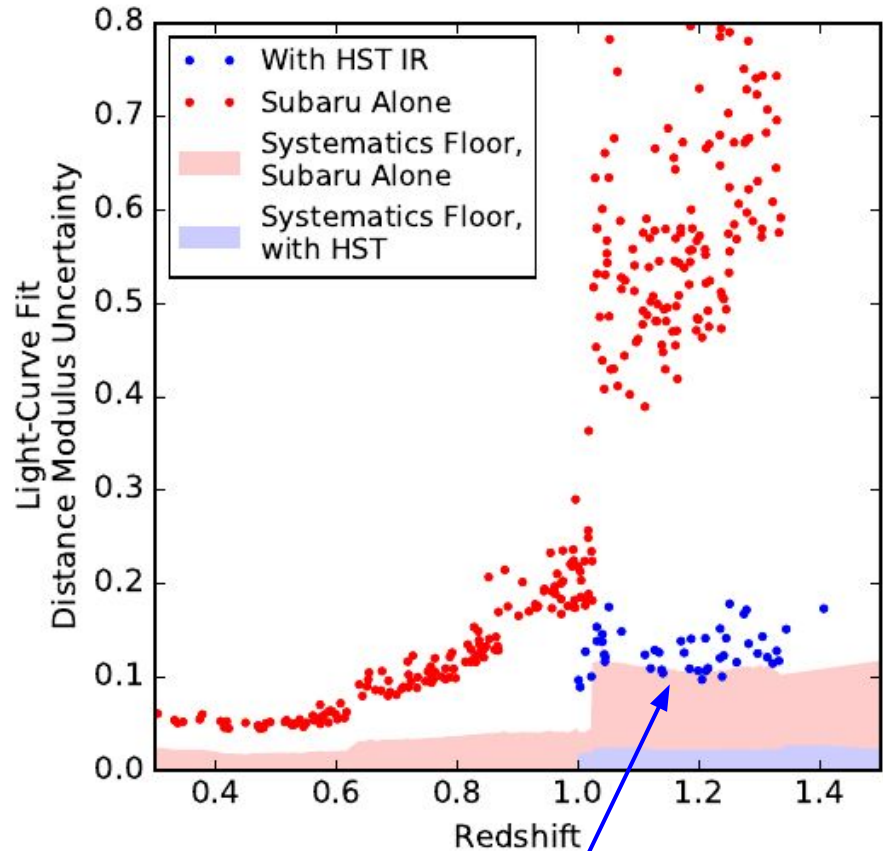


Un échantillon comparable à SNLS

- $0.8 < z < 1.1$ (HSC)
- $1.1 < z < 1.5$ (HSC + HST)

Design du survey

- 2 saisons de recherche
- ~ 240 SNe attendues
 - ~ 80 @ $z < 0.8$
 - ~ 80 @ $0.8 < z < 1.1$
 - ~ 80 @ $1.1 < z < 1.5$
- Subaru/HSC seul peut mesurer des distances jusqu' à $z \sim 1.1$
- Au-delà, on a besoin de photométrie infrarouge (par exemple, avec Hubble)



With one single HST visit (2 orbits per SN), One can measure a distance

Status

● Prise de données

- 1 saison de recherche exécutée
- 1 saison temps garanti (9/19-01/20)
- demande de temps pour 3e saison

● Développement / upgrade

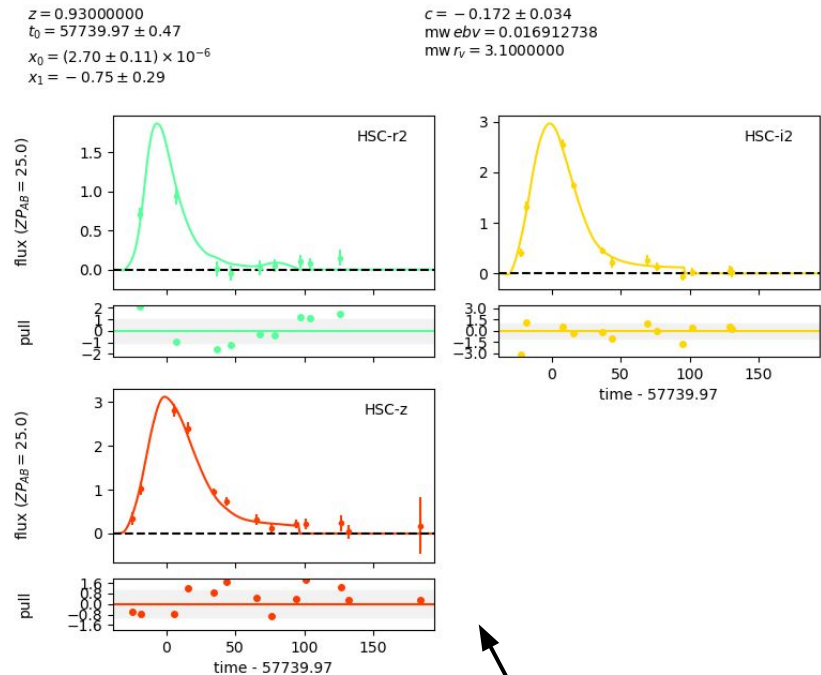
- Pipeline de recherche
- Pipeline de photométrie / calibration SNe
- Analyse spectres SNe à grand redshift

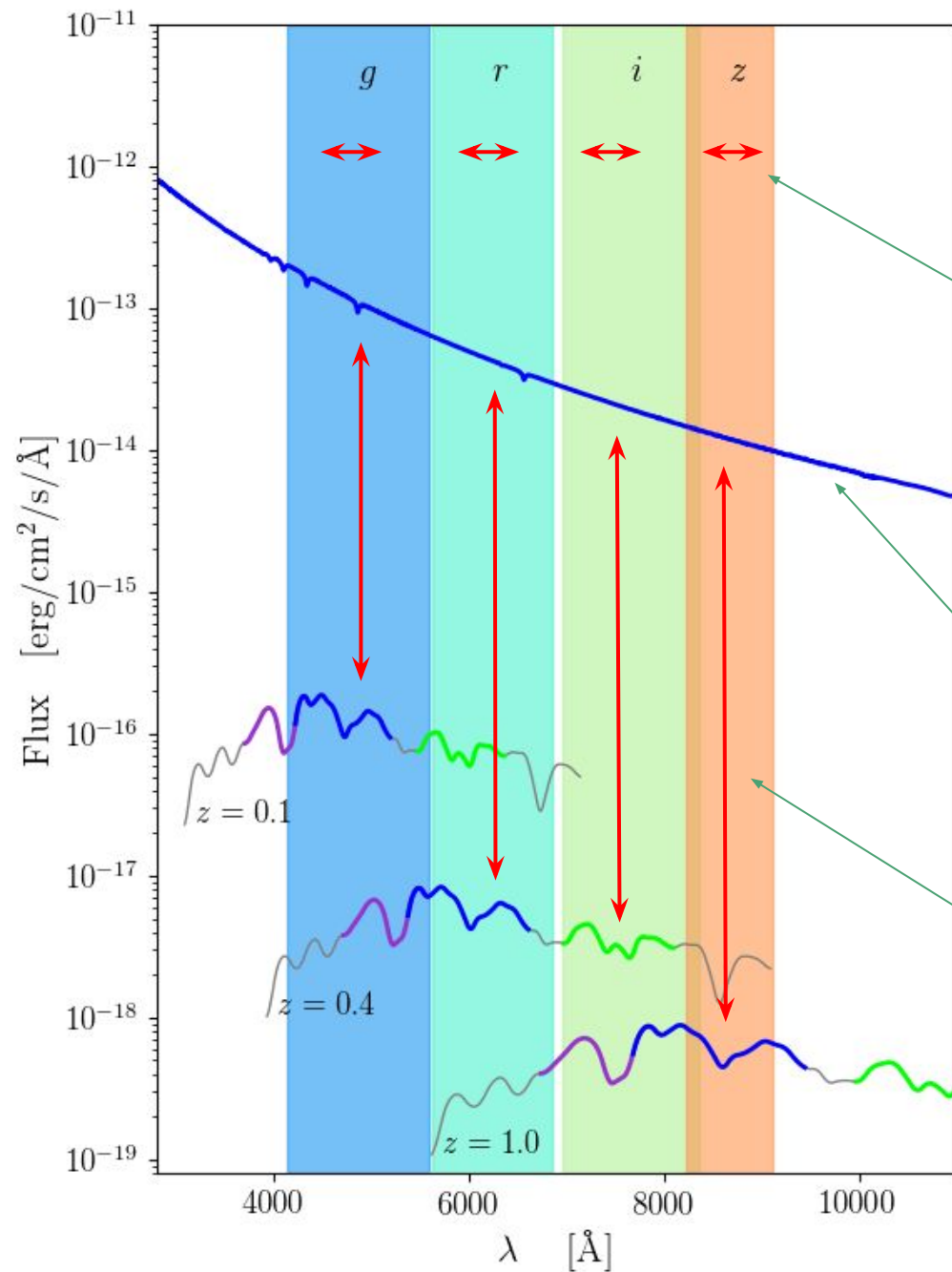
● Échantillon

- O(100) SNe @ $z < 1$ avec bonne courbes de lumière subaru
- 25 SNe @ $z > 1$ avec visites HST
- Redshifts difficiles à obtenir

- Publication diagramme de Hubble basé sur ce premier lot de données d'ici 2020

Regnault, Saunders,
Antilogus, Astier, Betoule,
Baumont, Bongard, Leget
et al

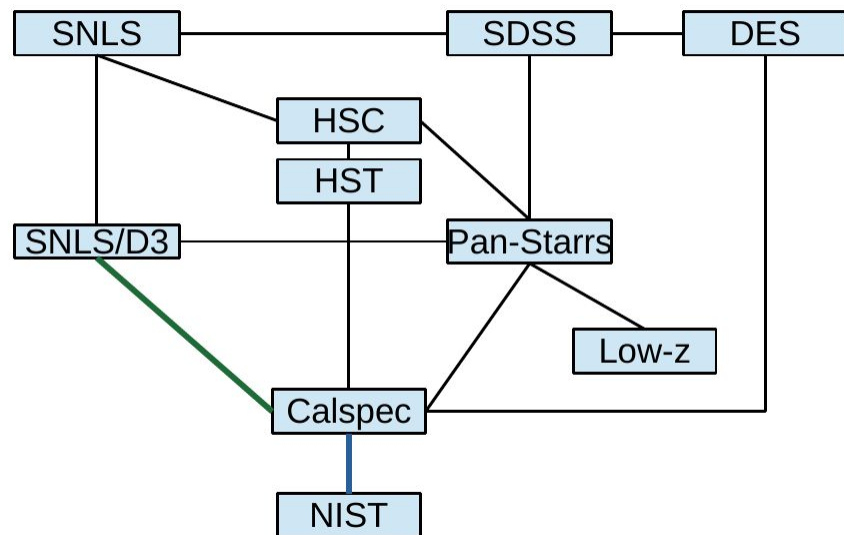




- **Metrologie des filtres**
 - calibration en λ
- **Calibration relative en flux des bandes passantes**
 - Donnée par une référence de flux
 - Étoile (bien modélisée)
 - Étalon de laboratoire
- **Chaîne métrologie des flux**
 - Du standard primaire aux images de science

Calibration SNLS - SNLS data release

(M. Betoule)

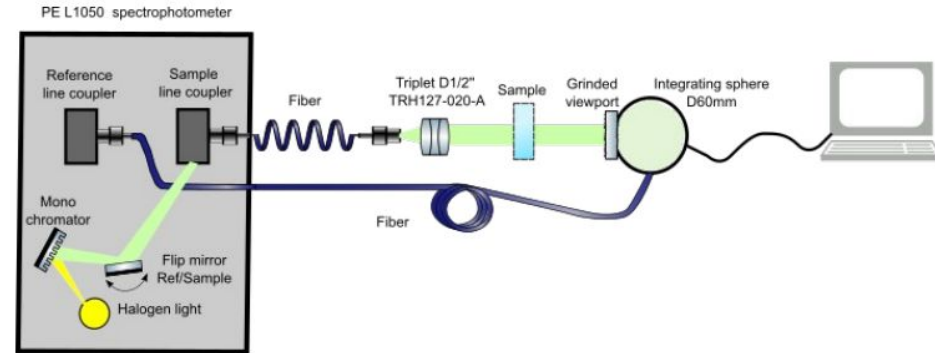


- **Échantillon** SNLS-5ans + SDSS (JLA) est un élément essentiel du diagramme de Hubble combiné SSP
- **But**
 - Recalibration JLA
 - SNLS-5 ans data release
- **Métrologie des filtres**
 - Filtres MegaCam -> LMA
- **Métrologie des flux**
 - CALSPEC <-> mesures SNLS
 - DICE: CALSPEC <-> NIST

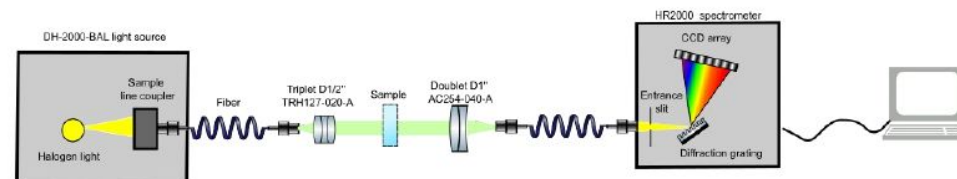
New measurements of MegaPrime Filters

- Filter set decommissioned in Feb 2016
- Send to Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) in Dec 2016 after demonstration on broken i filter
- Build a transmission measurement bench where large pieces can be surveyed
- Two setups :
 - Fast spectrometric scan (1cm resolution, normal incidence)
 - Slow spectrophotometric scan
- Send back to CFHT in June 2018
- Measurement described in Sassolas et al. 2018

Setup A (slow): Monochromatic light + IS

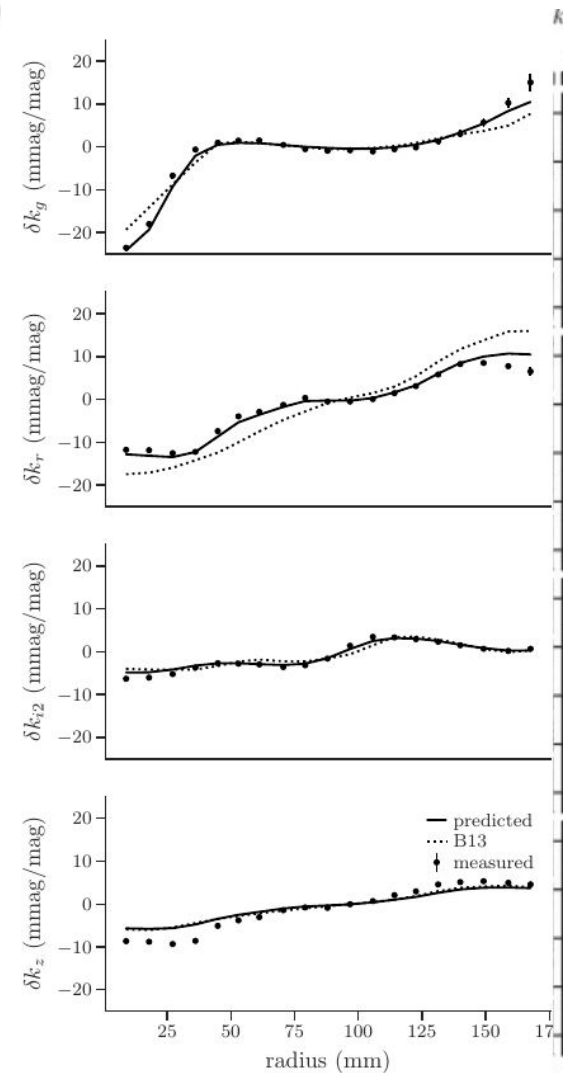
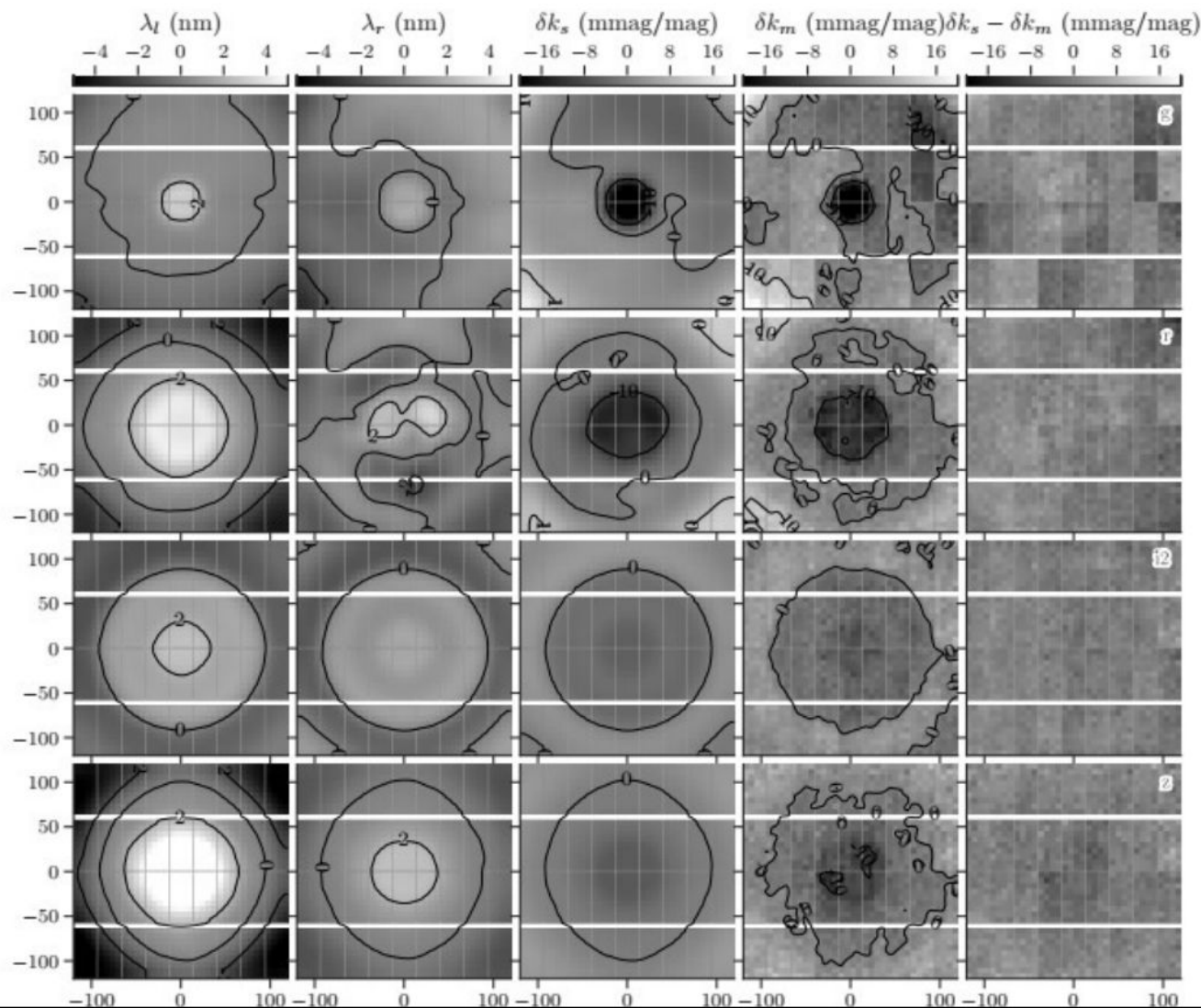


Setup B (Fast): white light + fiber spectro

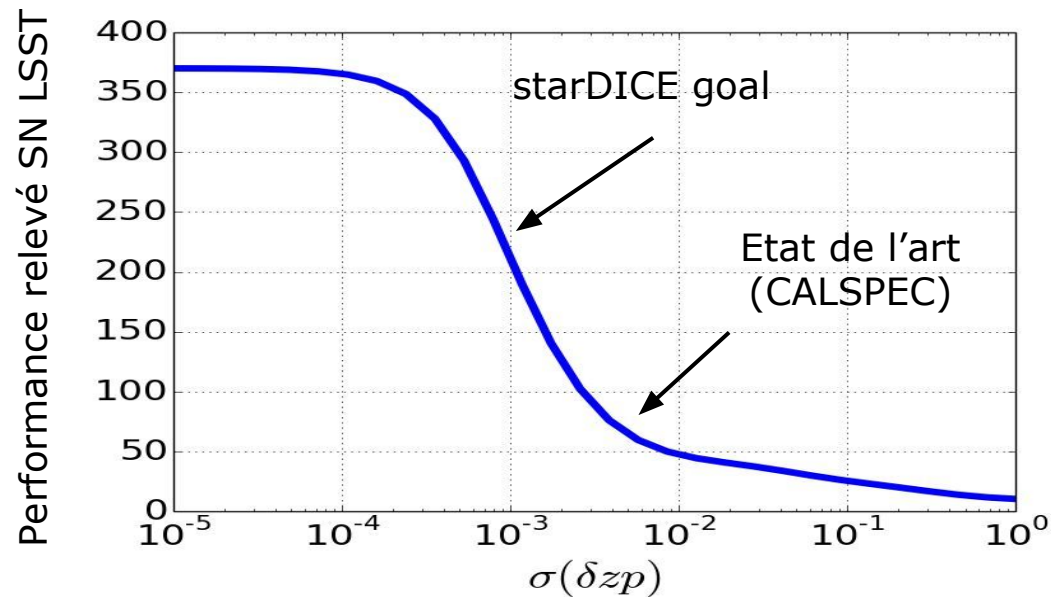


(M. Betoule)

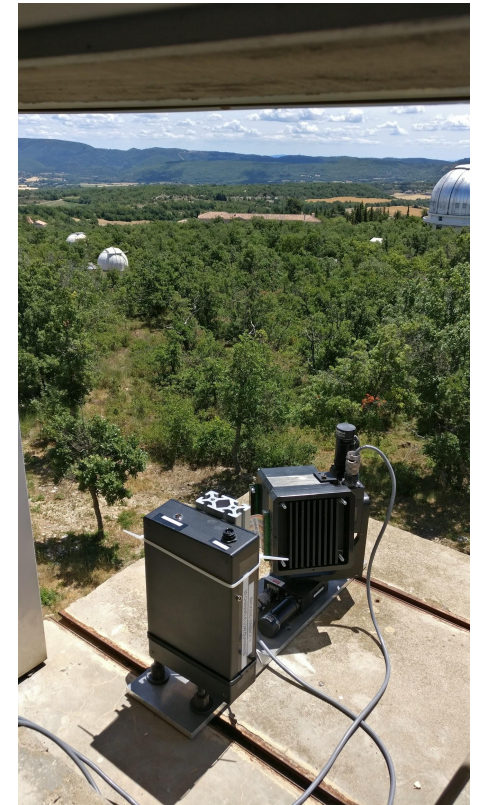
Cartographie des filtres MegaCam



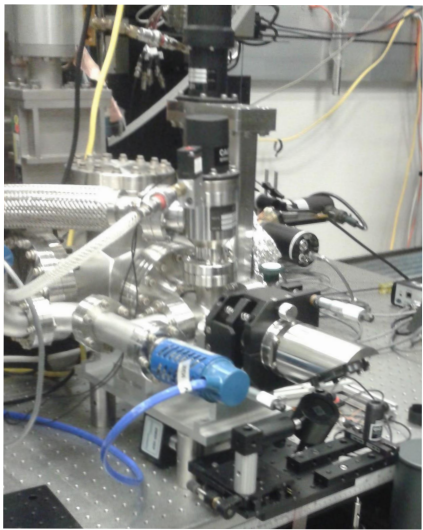
Calibration photométrique : starDICE



- @ Observatoire de Haute-Provence (OHP)
 - Phase de démonstration achevée
 - Télescope dédié (en construction)
 - Étoile artificielle (dérivée source DICE)
 - Recalibration CALSPEC
 - Constitution réseau étoiles standard -> LSST



The proposed calibration path



NIST POWR

$10^{-3}W$

NIST SCF

$10^{-6}W$

NIST
Photodiodes

$10^{-13} W/cm^2/nm$

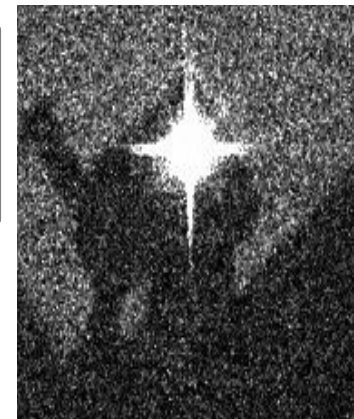
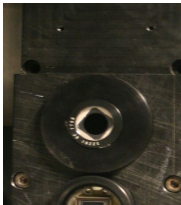
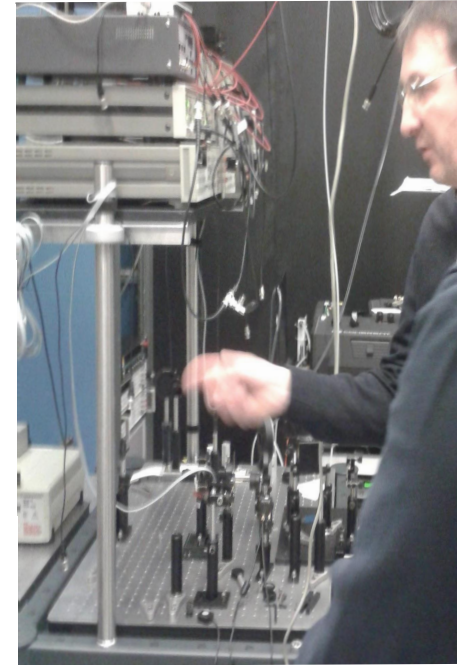
Narrow spectrum
LEDs with stable
drive elec

$10^{-17} W/cm^2/nm$

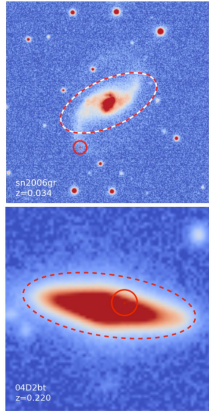
Small aperture
telescope

$10^{-19}W/cm^2/nm$

Spectrophotometric
standard stars



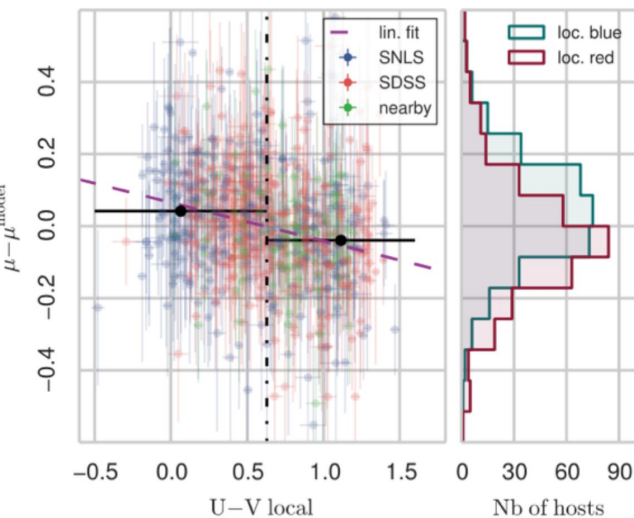
Luminosité SNe & environnement galactique



- **Après standardisation**, la SN standard est $\sim 10\%$ plus brillante dans les galaxies massives à faible taux de formation d'étoiles
- **Paramètres environnemental**
 - Global ? (masse galaxie hôte) (e.g. betoule et al, 2014)
 - Local ? taux de formation étoiles local (e.g. Rigault et al, 2013)

- **Étude SNLS5 + SDSS + low-z**

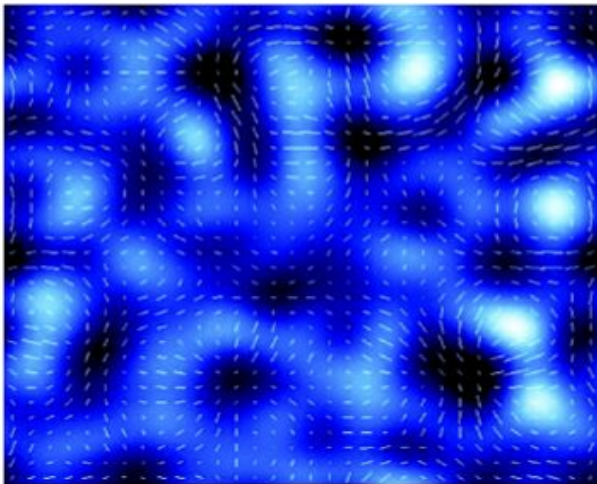
- 882 SNe
- Photométrie locale et global gal hôtes
- -> Masse stellaire + couleur locale
- Couleur locale : paramètre le + pertinent
- mag step mesuré -0.091 ± 0.013 (7 sigmas)
- Réduction dispersion ~ 0.14 mag



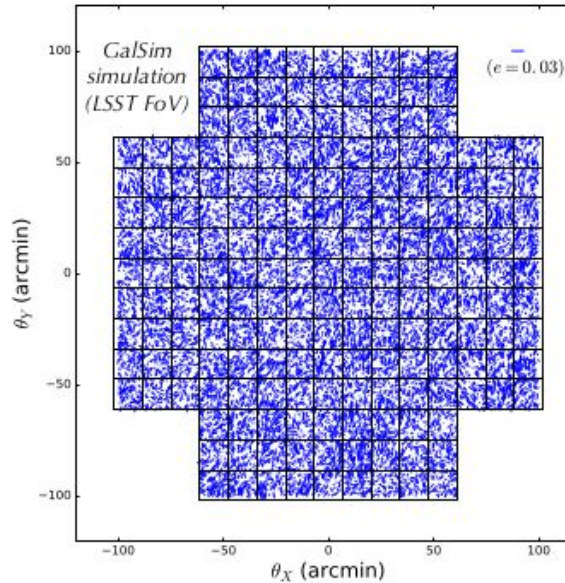
Modélisation de la PSF

Weak lensing signal

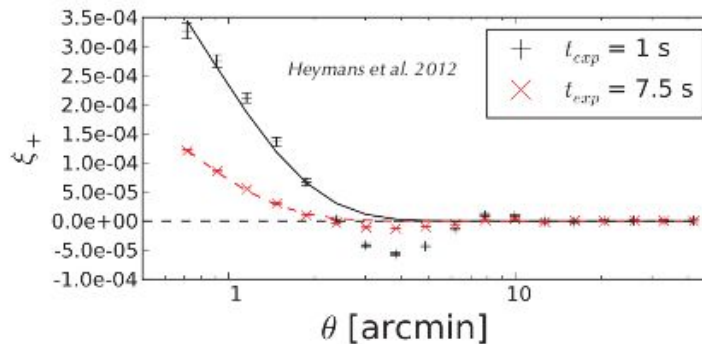
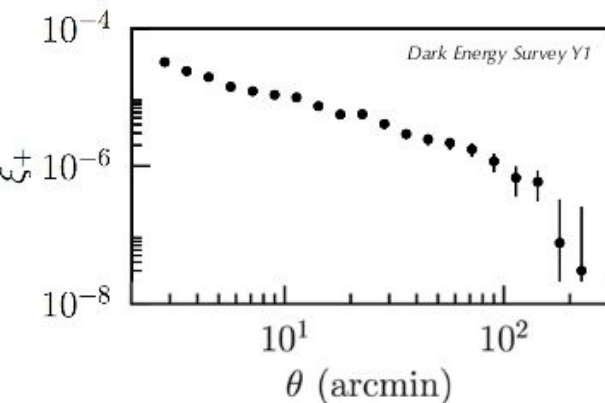
Ellis 2010 (simulation)



Point Spread Function ellipticity



- Weak-lensing needs very accurate (unbiased) shape measurements
- PSF introduces additional ellipticity and is spatially correlated (like sheared galaxy shapes) due to atmosphere and optics



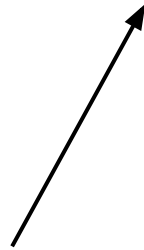
- An accurate (unbiased) model of spatial variation of the PSF is crucial for LSST cosmic shear

(slide by P.-F. Leget)

Piff

- Modélisation de la PSF sur l'ensemble du plan focal

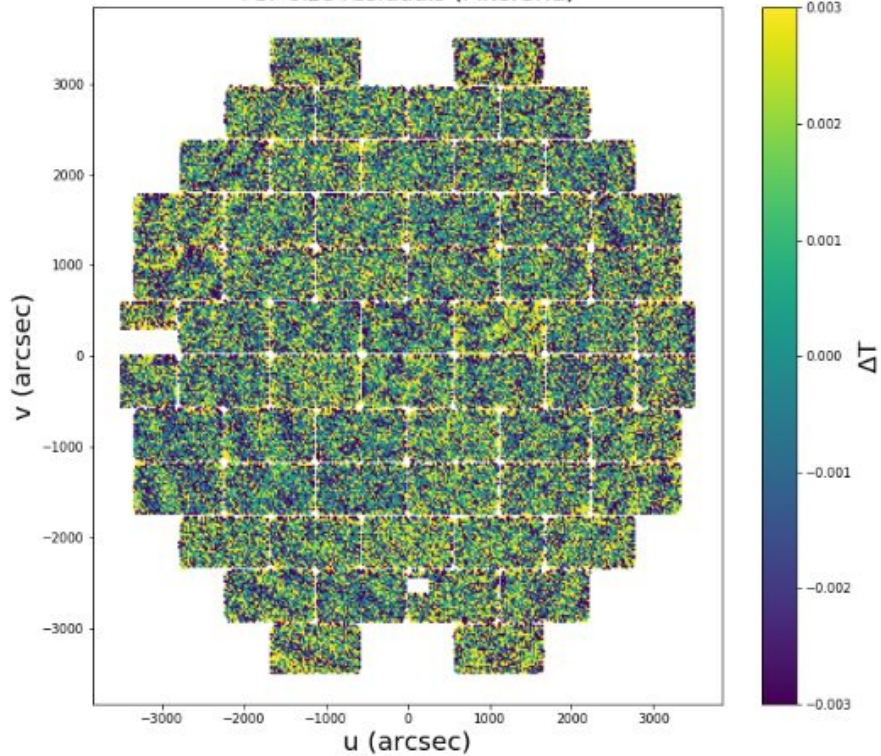
$$PSF = \text{OpticalPSF} \otimes \text{AtmosphericPSF}$$



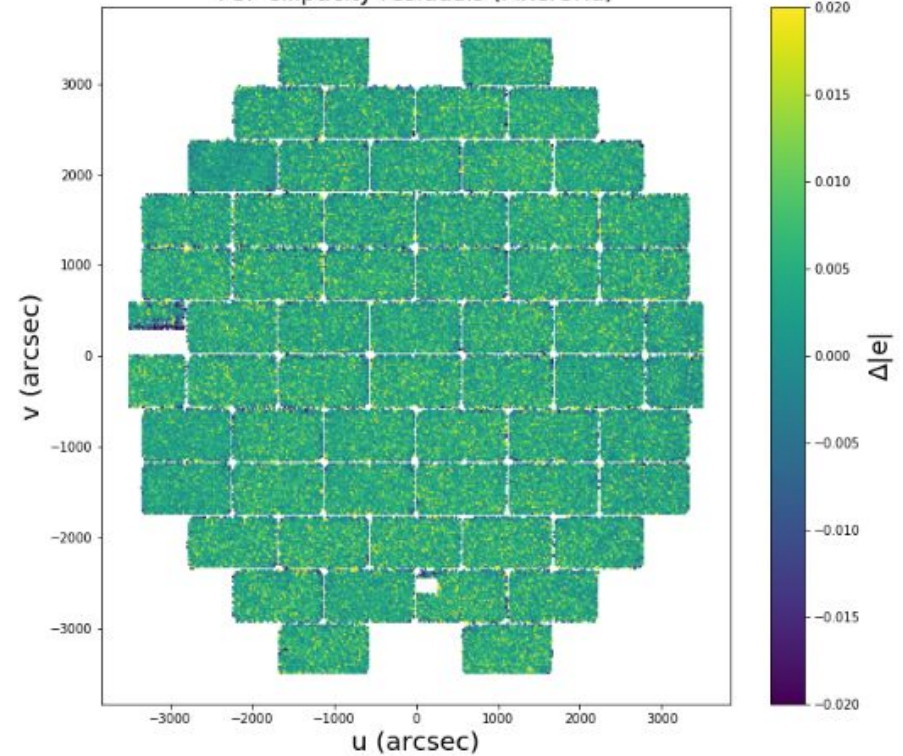
- Variations spatiales du front d'onde
- Modèle contraint à partir série d'images hors-focus

- Profil de Kolmogorov
- Paramètres profil interpolés à l'échelle du plan focal avec processus gaussien

PSF size residuals (PixelGrid)

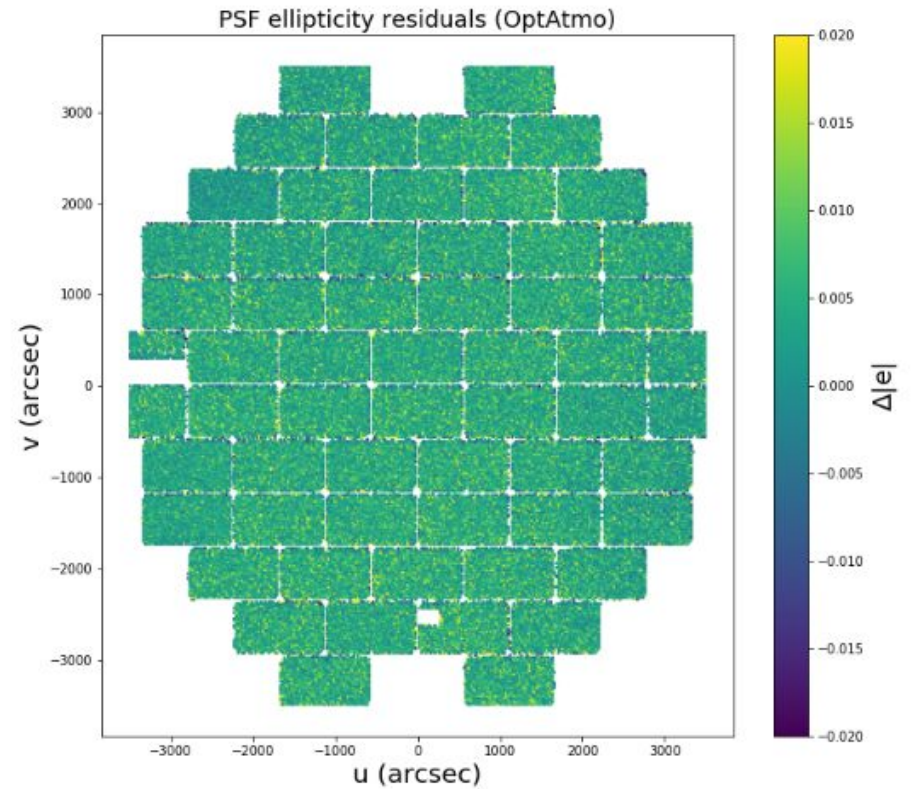
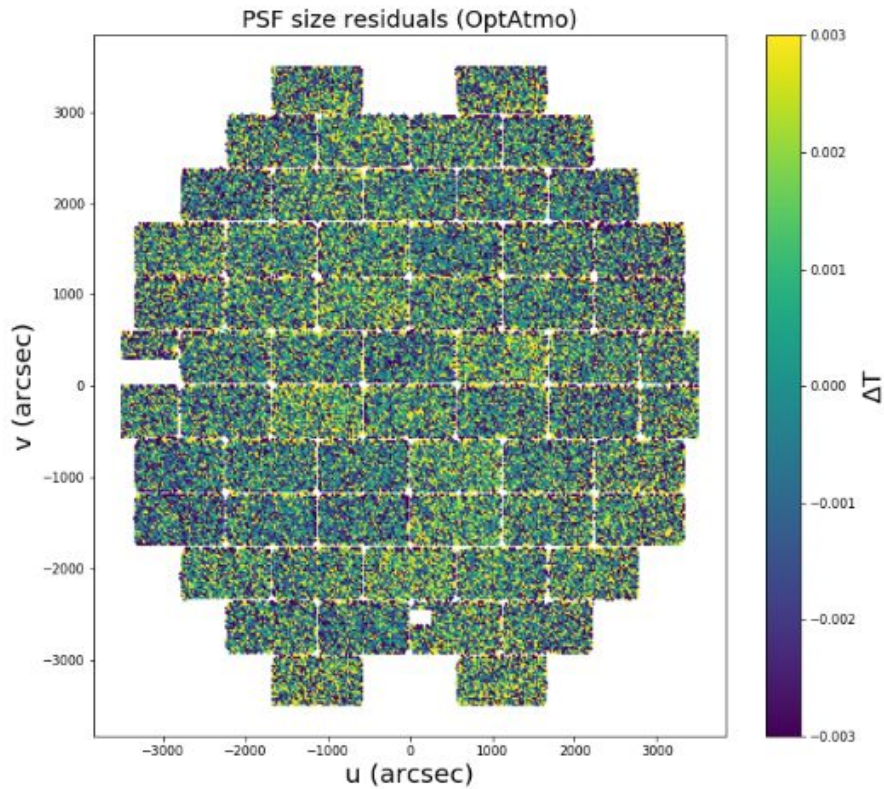


PSF ellipticity residuals (PixelGrid)



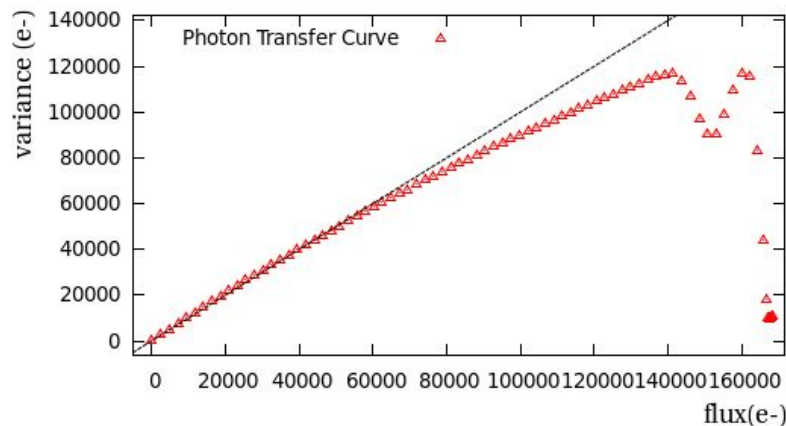
- Residual size (Trace of second moments matrix) and ellipticity averaged across the DES FoV
- For the **Pixel Basis** model using Piff and an **interpolation done per CCD chip**

(slide by P.-F. Leget)



- Residual size (Trace of second moments matrix) and ellipticity averaged across the DES FoV
- For the **Optical and the Atmospheric model** using Piff and an **interpolation done on the full FoV**

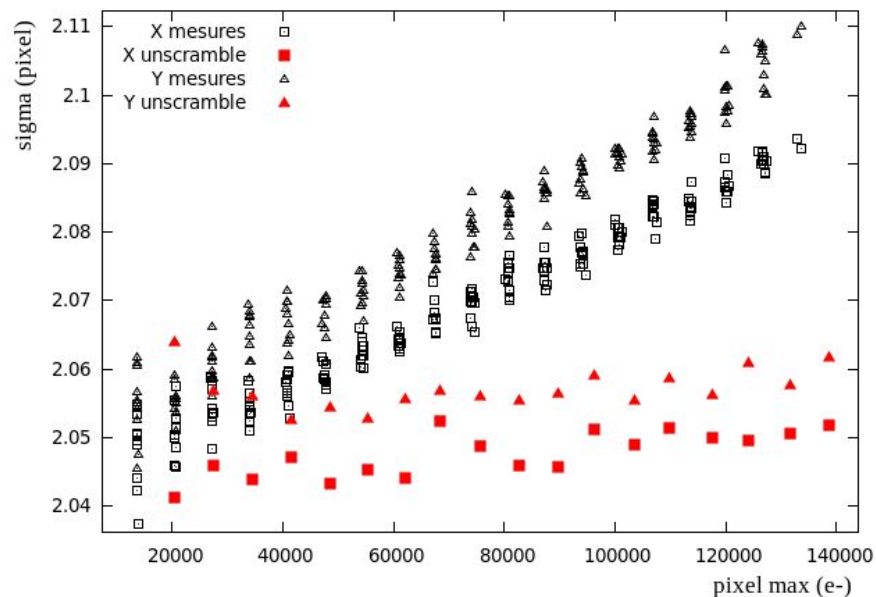
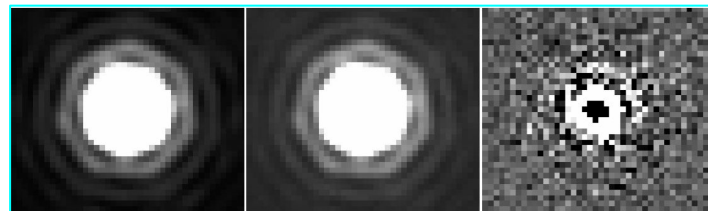
Caractérisation senseurs LSST : effet BF



- Deux manifestations du même phénomène

- Corrélations à longue portée observables dans les flats
- Distorsion PSF étoiles en fonction du flux
- Cause : distorsion électrostatique champ de dérive -> distorsion grille de pixels

200-s 20 x 10-s 1 - 2



- Mesure corrélations pixels flatfields -> correction images de science

BAO : eBOSS

V. de Sainte Agathe, J. Stermer, S. Karkar, L. Le Guillou, C. Balland, JM LeGoff et J. Rich

2017-2019: Analyses Lyman- α des données SDSS

DR14 (eBOSS):

- Autocorrélation Ly- α /Ly- α à $z=2.34$ (de Sainte Agathe et al 2019, soumis)
- Corrélation croisée QSOs/Ly- α (Blomqvist et al 2019, soumis)

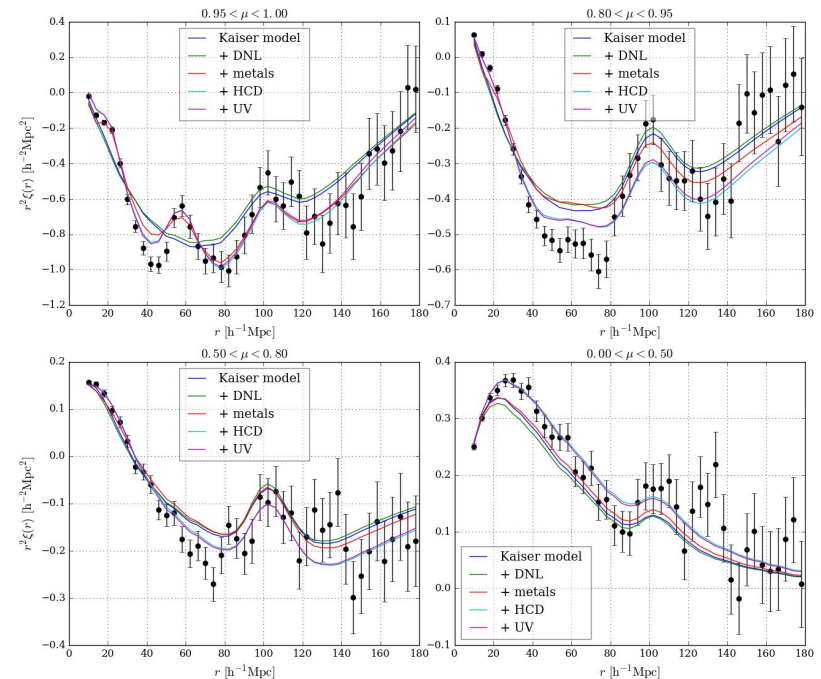
Inclusion des régions d'absorption Lyman- β

-> Mesure de l'échelle de distance BAO à:

radiale: 3.3%

transverse: 5%

-> Suffisamment de stat pour poser des contraintes dans deux bins de redshift ($z=2.19$ et $z=2.49$)



BAO : eBOSS

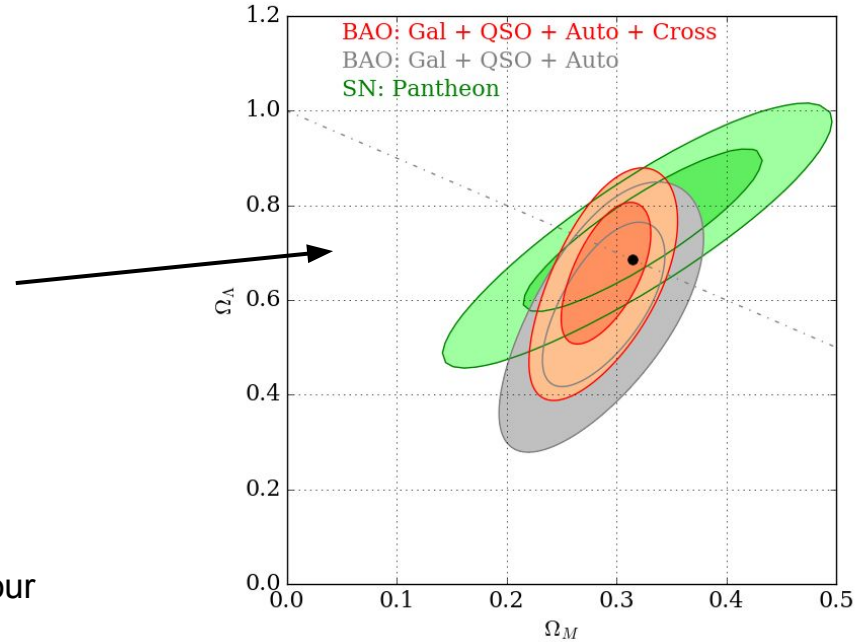
2017-2019: Analyses Lyman- α des données SDSS DR14 (eBOSS):

Contraintes sur les paramètres cosmologiques en accord avec les valeurs de Planck pour un Univers Λ -CDM plat.

2019-2020: Analyse finale eBOSS

basée sur les données SDSS DR16

-> Etude de catalogues phénoménologiques pour les analyses BAO Ly- α (Thèse J. Stermer)



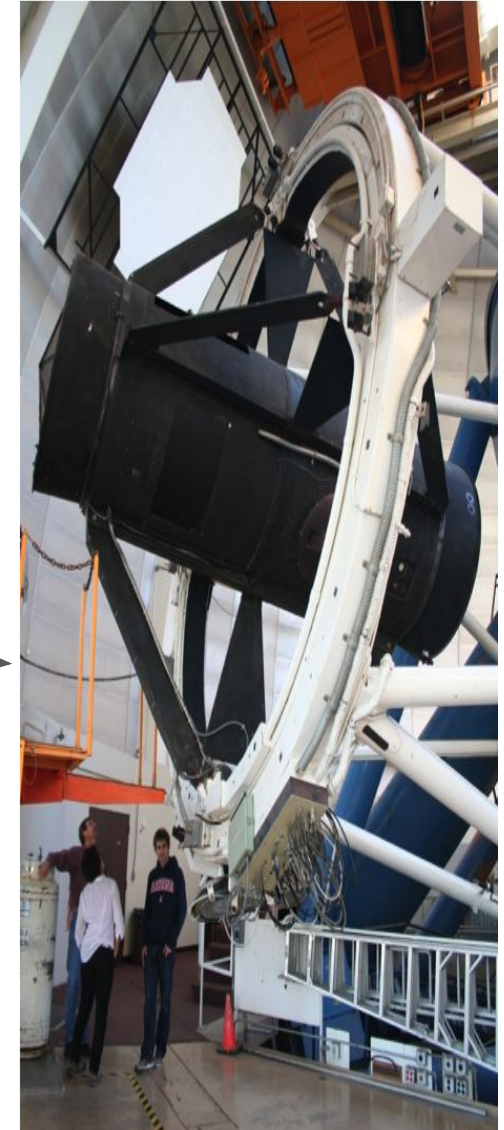
Contraintes à $z = 2.34$ sur les paramètres cosmologiques (Ω_M , Ω_Λ) obtenues, à partir des données BAO. Ces contraintes sont compatibles avec un univers plat et en bon accord avec les valeurs obtenues par Planck pour un univers Λ -CDM plat.

BAO : DESI

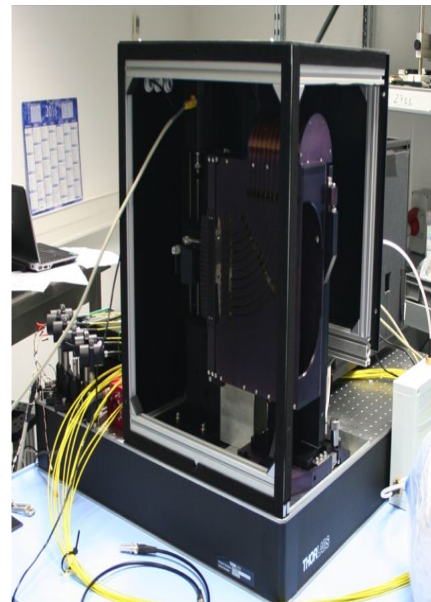
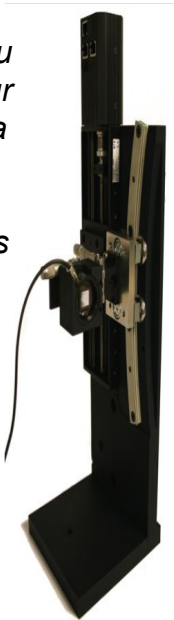
V. de Sainte-Agathe, J. Stermer, S. Karkar, L. Le Guillou, C. Balland, JM Le Goff et J. Rich

2016-2019 Responsabilités techniques pour DESI:

- Spectrographes de DESI: mesure de la transmission des 10 spectrographes
- Calibration spectroscopique de l'instrument: conception et fabrication



Dispositif conçu au LPNHE pour la mesure de la transmission des spectrographes de DESI



Sonia au Mayall et une des 5 boites de lampes de calibration conçues et fabriquées au LPNHE

Mise en oeuvre à WinLight

BAO : DESI

V. de Sainte-Agathe, J. Stermer, S. Karkar, L. Le Guillou, C. Balland, JM LeGoff et J. Rich

2015-2018: Responsabilités dans le processing des données pour DESI:

Responsabilité de la production du code de redshift de DESI

Responsabilité de la partie redshift des catalogues simulés pour les analyses de DESI

2019-2021 Participation à l'analyse des données de validation du survey et des données de DESI

Etude de catalogues simulés

Analyse auto-corrélation Ly- α

Théorie : groupe et collaborations

- **1 permanent** : M. Joyce
- 1 (ou 2?) nouveau(x) thésard(s) en 2019
- **Collaborations françaises**
 - LPTMC (SU)
 - Université de Nice
- **Collaborations internationales**
 - Université La Sapienza (Rome)
 - Center for Astrophysics (Harvard University, USA)

Théorie : activités de recherche

- **Sujet** : formation des structures dans l'Univers
 - Agrégation de matière noire dans le régime non-linéaire
- **Focus actuel**
 - Contrôle de la résolution / précision des simulations cosmologiques
 - Construction de modèles analytiques / semi-analytiques
- **Depuis 2018**, nouvelle collaboration en cours avec CfA/Harvard (préparation des prévisions théoriques pour DESI)
- **Développement de cette collaboration** avec thésard dès 9/2019
 - > demande de postdoc

Publications

Papiers clefs de la mesure du BAO à $z=2.3$: l'équipe COSMO du LPNHE est vraiment partie prenante dans la mesure du BAO

- De Sainte Agathe et al, Baryon acoustic oscillations at $z\sim 2.34$ from the correlations of Ly-alpha absorption in eBOSS DR14, submitted to A&A
- Blomqvist et al, Baryon acoustic oscillations from the cross-correlation of Ly-alpha absorption and quasars in eBOSS DR14, submitted
- J. Bautista, N. Busca, J. Guy et al, Measurement of baryon acoustic oscillation correlations at $z=2.3$ with SDSS DR12 Lyman-alpha Forests. A&A, 2017

Papier clef sur l'impact de l'environnement des SNIa ("Polémique" sur la mesure de H_0)

- M. Roman, D. Hardin, M. Betoule et al, The Dependence of Type Ia Supernovae Luminosities on Their Local Environment, A&A, 2018

Vers la publication finale SNLS 5 ans

- C. Balland, F. Cellier-Holzem et al, The ESO-VLT Type Ia supernova spectral set of the final two years of SNLS, A&A, 2018

Modélisation empirique SNe Ia

- Saunders et al, SNEMO, Improved empirical models for type Ia supernovae, ApJ, 869 (2018)
- Leget et al, SUGAR: an empirical model of type Ia supernovae based on spectral features (submitted)

Publications

Papiers de références mise en évidence et la compréhension de l'effet brighter-fatter

- P. Antilogus, P. Astier, P. Doherty, A. Guyonnet, N. Regnault, The brighter-fatter effect and pixel correlations in CCD sensors, JINST, 2014
- P. Astier et al, The shape of the photon transfer curve of CCD sensors, submitted

Papier de référence sur l'équation d'état de l'Énergie Noire

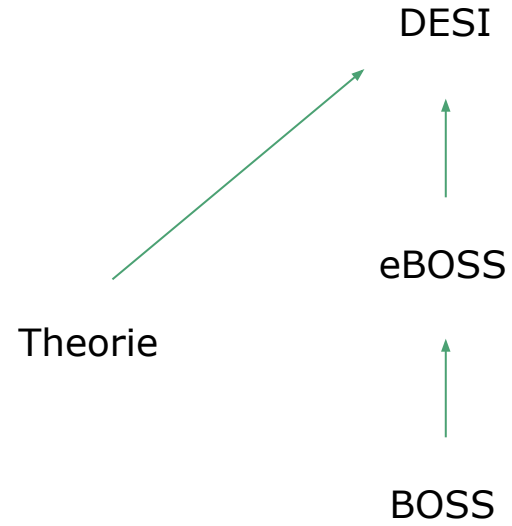
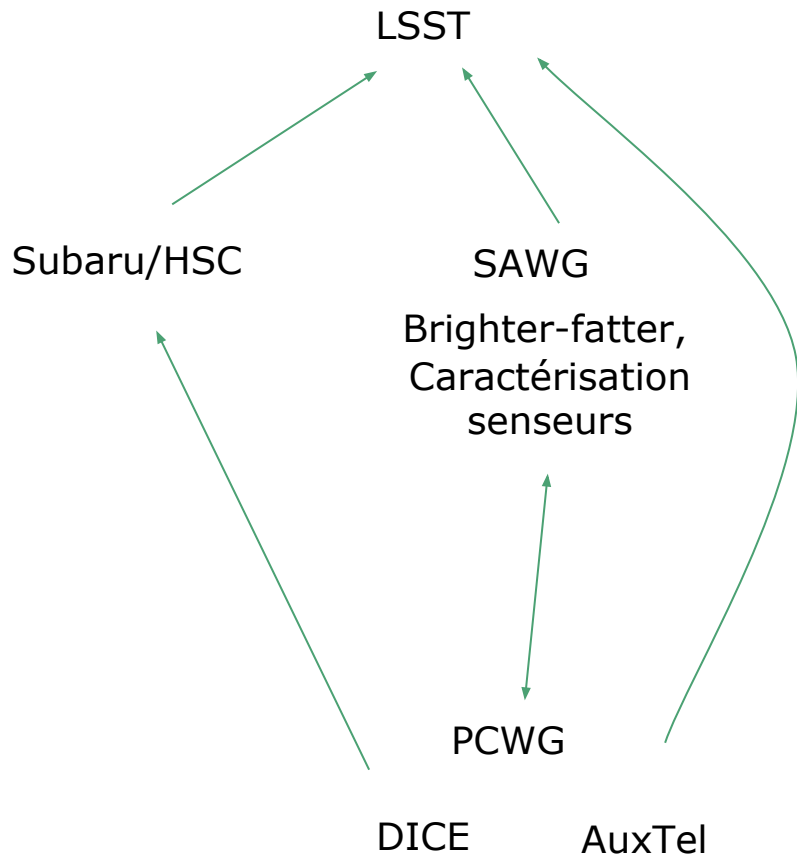
- Betoule et al, Improved photometric calibration of the SNLS and the SDSS supernova surveys, A&A, 2013.
- Betoule et al, Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SNLS and SDSS surveys, A&A, 2014.

Papier de référence pour une mesure du diagramme de Hubble combiné sol-espace

- Astier et al, Extending the supernova Hubble diagram to $z \sim 1.5$ with the Euclid space mission, A&A, 2014.

Une production théorique toujours soutenue (exemple)

- Benhaïem (Rome), Joyce, Sylos Labini (Rome) et al, Long-lived transient structure in collisionless self-gravitating systems, Phys. Rev. E, 99, 022215 (2019)
- Diemer (CfA Harvard) and Joyce, An accurate physical model for halo concentration, Astrophysical Journal, 871, 168 (2019)

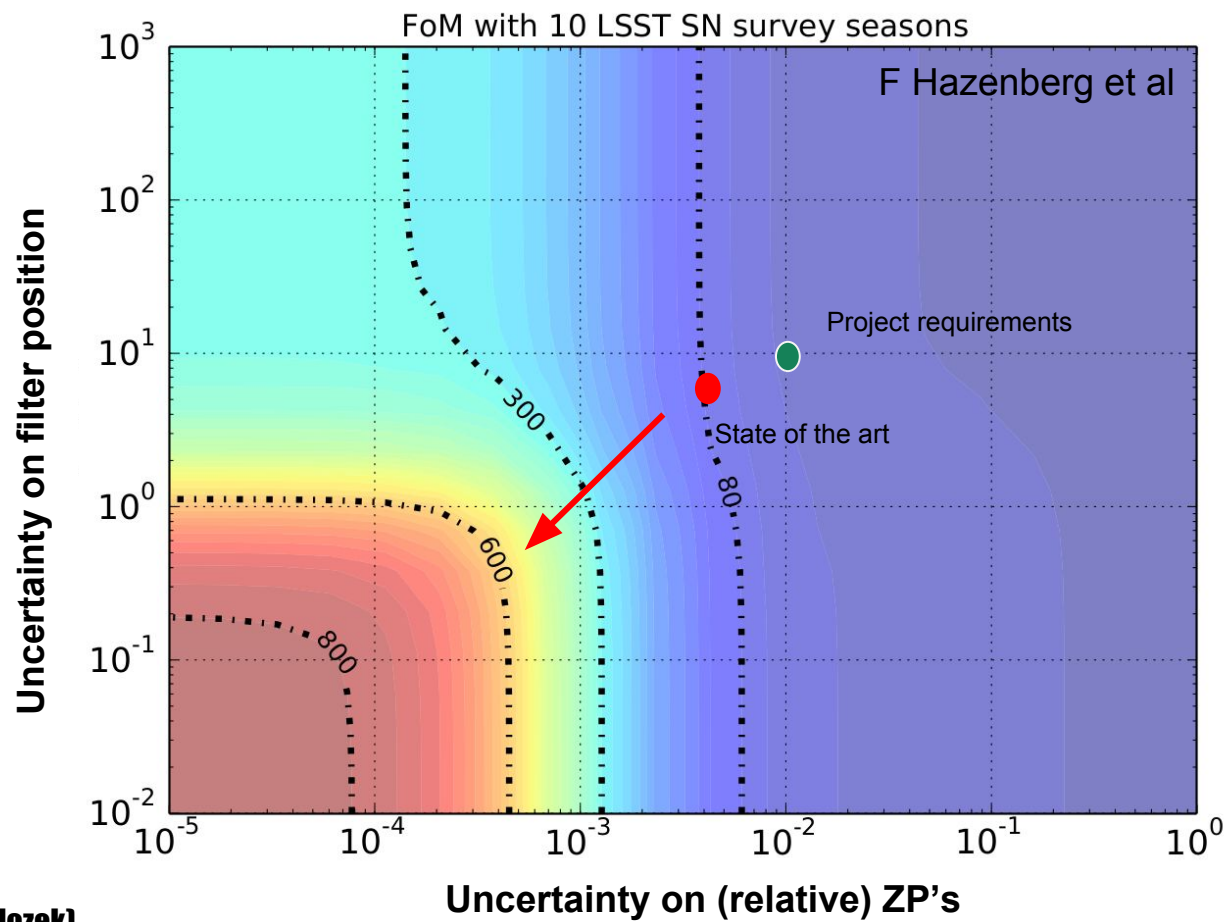


Conclusion

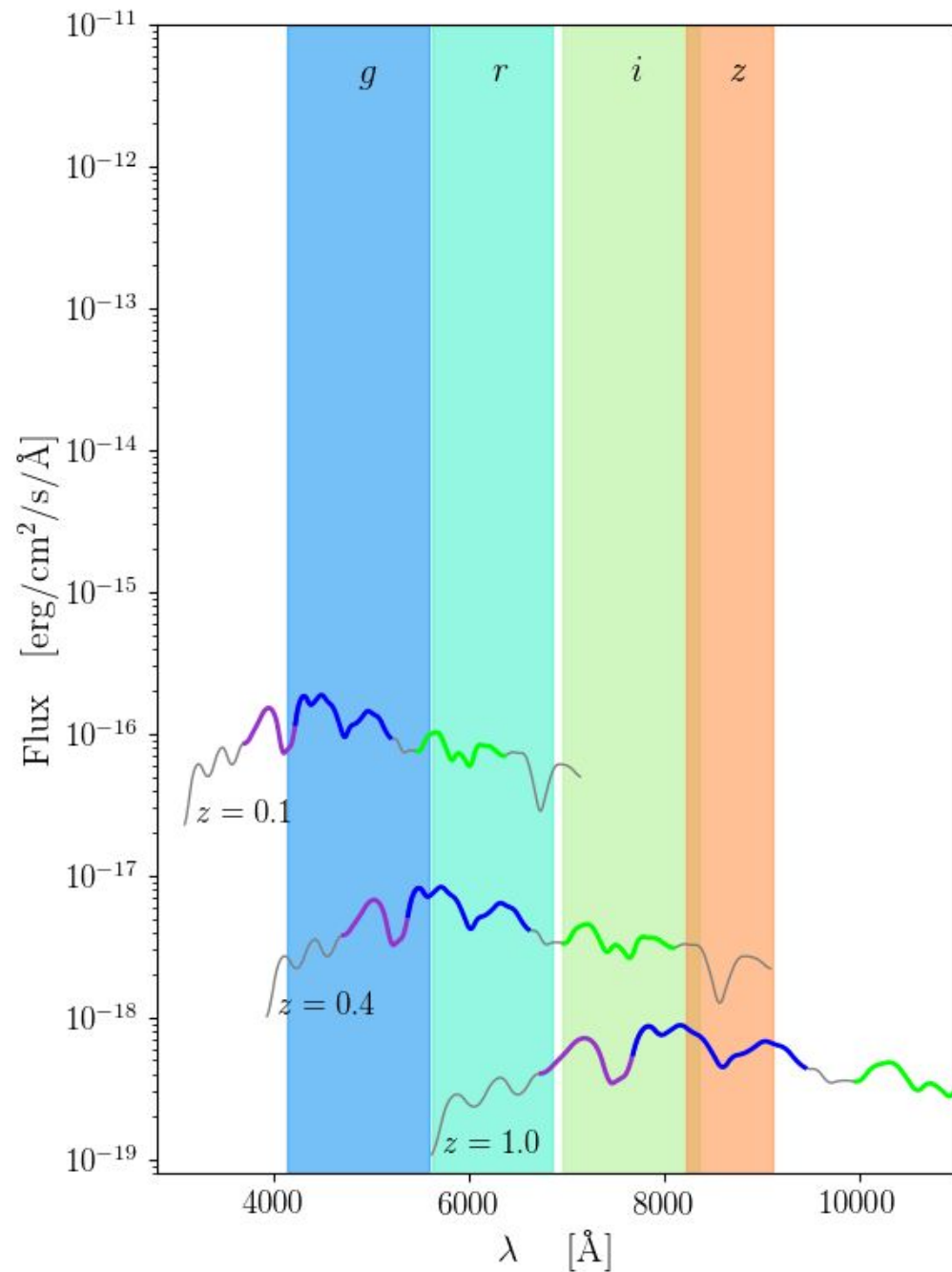
- **Le groupe est à la veille du démarrage** de deux relevés majeurs de cosmologie observationnelle
 - DESI (2019)
 - LSST (2022, commissioning: 2021)
- **Effort intense construction & préparation commissioning**
- **Projets intermédiaires**
 - eBOSS (2 papiers soumis)
 - Subaru Strategic Program
 - 1 saison sur disque, 2 saisons en préparation
 - projet publication rapide échantillon 1 an)
- **Clef des analyses LSST (SN & Lensing) passe par projets instrumentaux**
 - Caractérisation senseurs (banc CCD @ LPNHE)
 - Calibration photométrique du survey (starDICE)

backup

How much does this matter ?



(See also DESC SRD
(Mandelbaum, Scolnic, Hlozek))



- Distances to low-z SNe rely on blue bands (g,r)
- Distances to high-z SNe rely on red band (i,z)
- **Critical calibration ingredients:**
 - relative (band-to-band) flux calibration
 - positions of filter cut-on/cut-off
- **Calibration errors affect**
 - SN magnitudes
 - SN empirical model
 - -> SN distances (x2)