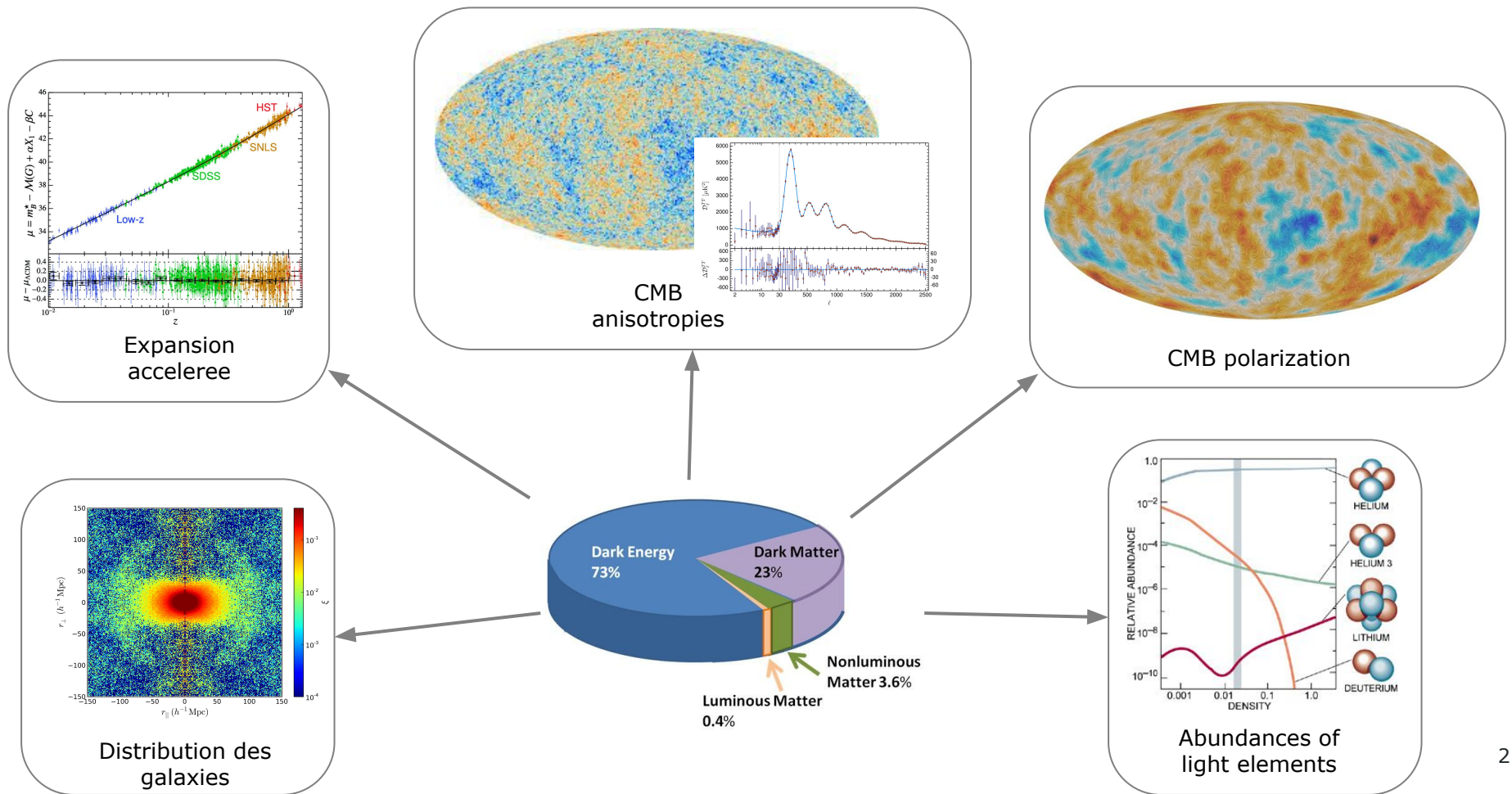


# Cosmologie au LPNHE

---

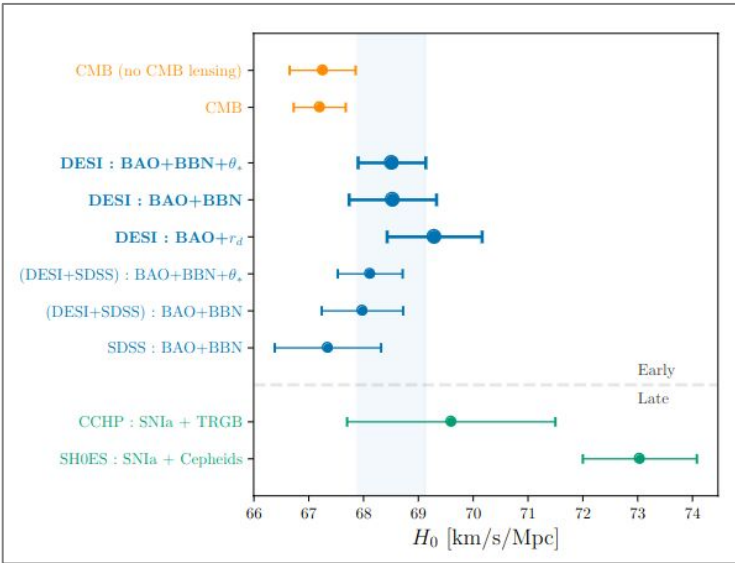
# $\Lambda$ CDM

- Avec 6 paramètres libres,  $\Lambda$ CDM décrit à peu près toutes les mesures cosmologiques actuelles...



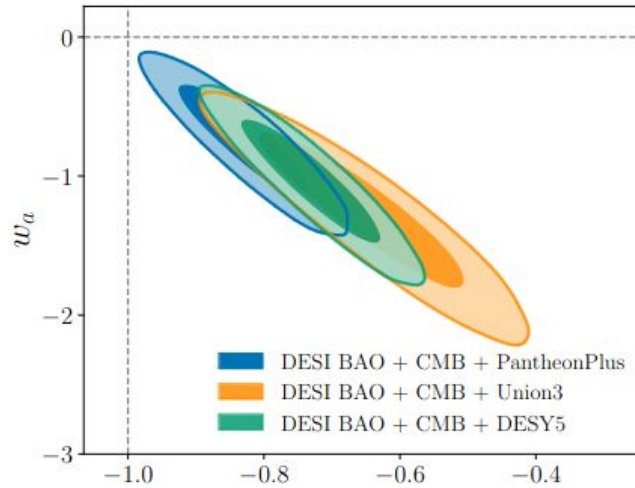
# A quelques détails près...

Tension sur la mesure de la vitesse d'expansion de l'Univers local vs. univers lointain (jeune)



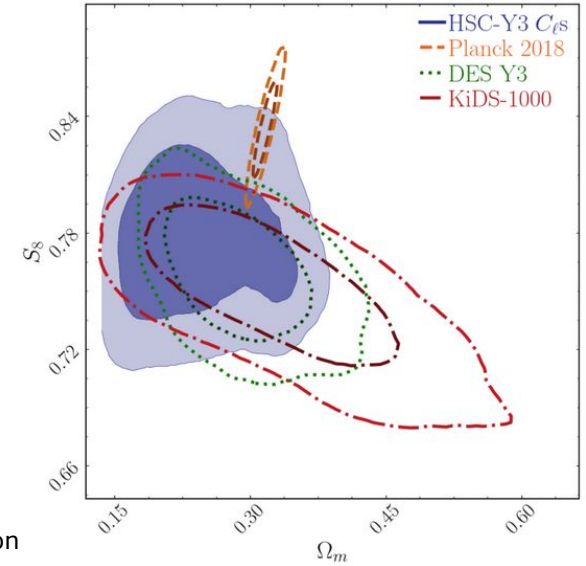
Tension sur la détermination de l'équation d'état de l'énergie noire

DESI Coll, 2024



DESI + SN, 2024

Tension sur la mesure des fluctuations de densité de matière



HSC/SSP, 2023

# Energie noire ??!

- Constante cosmologique ? Fluide répulsif de nature inconnue ?

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

$$w(z) = w_0 + w_a \left( \frac{z}{z+1} \right) \quad \Lambda \Rightarrow w = -1$$

- 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

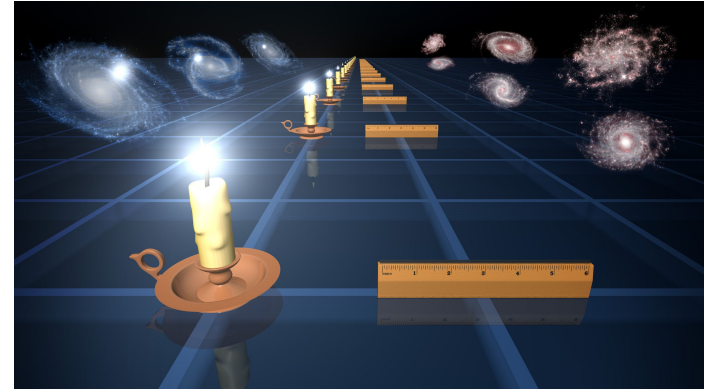
Taux de croissance des structures  $\rightarrow f \propto \Omega_m^\gamma$   $\leftarrow$  RG prédit  $\gamma \sim 0.55$

# Tests de précision de $\Lambda$ CDM

( $w_0, w_a$ )

- Histoire de l'expansion cosmique

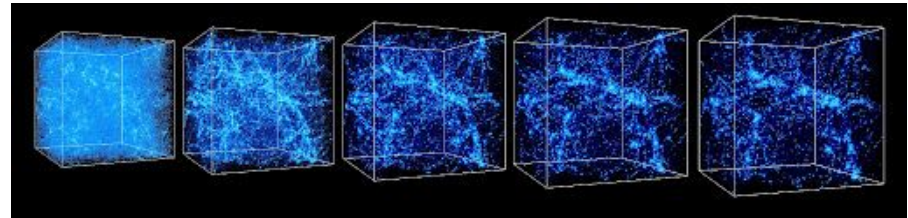
- Luminosité des SNe vs  $z$ 
  - ( $0 < z < 1.5$ )
- Taille angulaire pic baryons
  - ( $0.5 < z < 2.5$ )



Tests of gravity

- Histoire de la formation des structures

- Redshift space distortions
- Cosmic shear



# Le groupe de cosmologie du LPNHE

## 6+1 CNRS

- Pierre Astier
- Pierre Antilogus
- Marc Betoule
- Sebastien Bongard
- Jeremy Neveu (\*)
- Nicolas Regnault
- Pauline Zarrouk

## 5 MdC / Prof

- Christophe Balland
- Sylvain Baumont
- Delphine Hardin
- Michael Joyce
- Laurent Le Guillou

## Ingenieurs & Techniciens

- Guillaume Daubard
- Claire Juramy
- Edo Sepulveda
- Marjorie Stievenart Ammour
- Jean-Marc Colley
- Mathieu Bernard
- ...

## 2 postdocs

- Thomas de Jaeger
- Anna Niemiec

## 7 doctorants en 2024

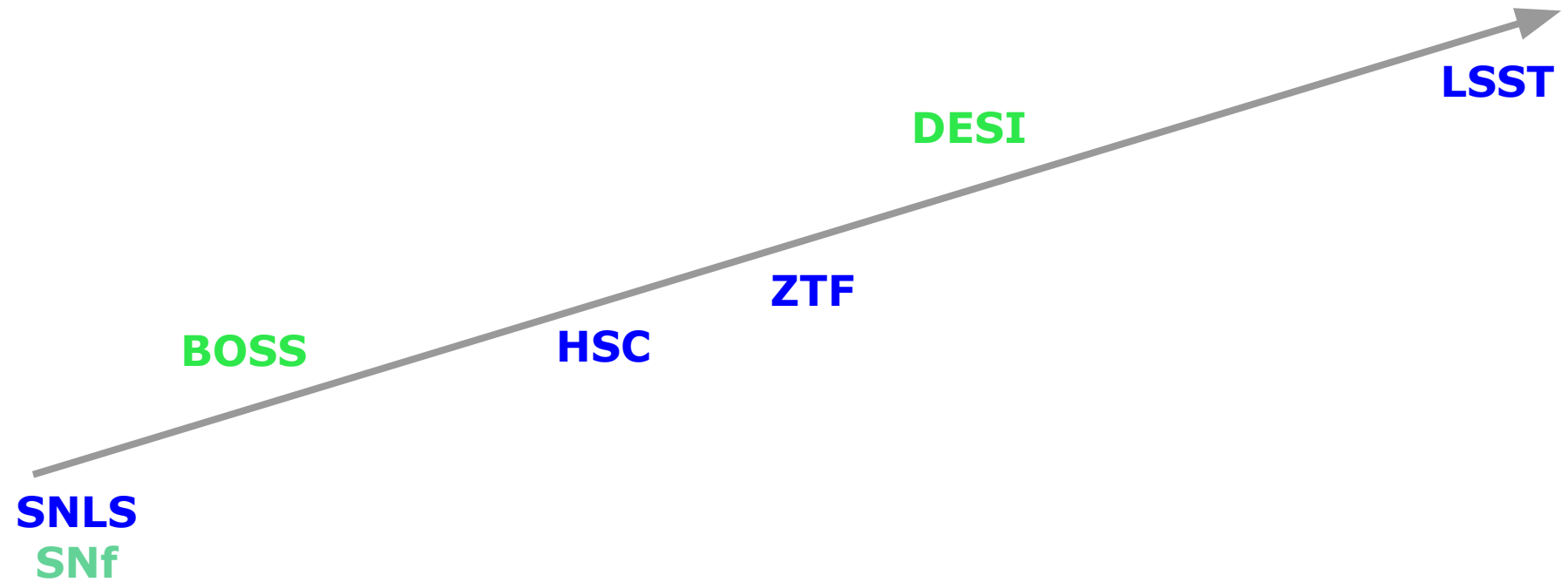
- G. Augarde ('22)
- Yassine Faris
- Dylan Kuhn
- Leander Lacroix
- Sara Maleubre ('23)
- Mahmoud Osman
- Azrul Pohan ('23)
- Thierry Souverin
- Julianna Stermer ('22)
- Ting Tan ('23)
- Svyatoslav Trusov
- E. van den Abeele

**Imaging**

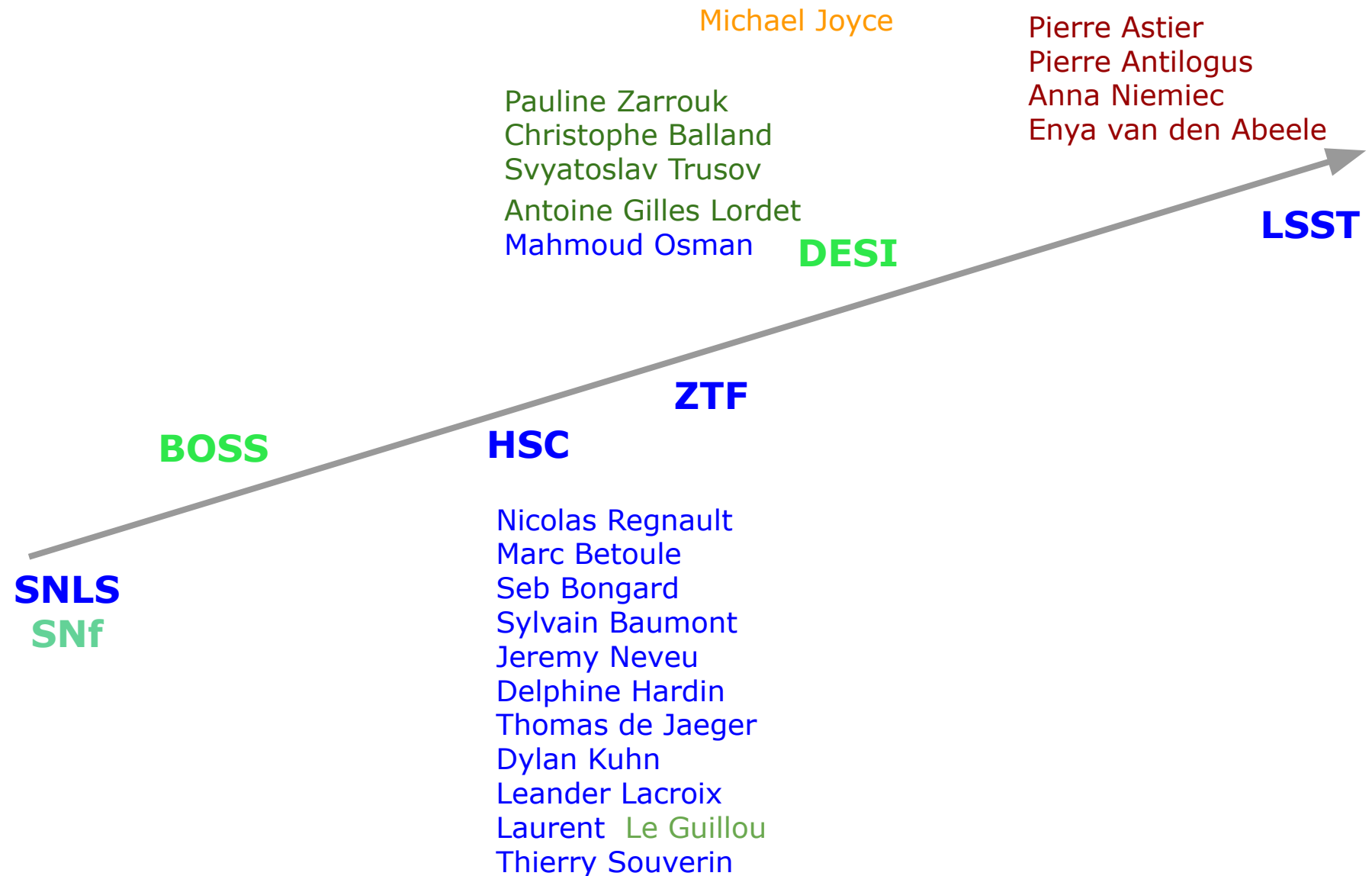
**Spectroscopy**

**Théorie**

# Le groupe de cosmologie du LPNHE



# Le groupe de cosmologie du LPNHE





# Le groupe de cosmologie du LPNHE

shear

Theorie

Michael Joyce

RSD

Pauline Zarrouk  
Christophe Balland  
Svyatoslav Trusov

DESI

Antoine Gilles Lordet  
Mahmoud Osman

Pierre Astier  
Pierre Antilogus  
Anna Niemiec  
Enya van den Abeele

LSST

BOSS

ZTF

HSC

Nicolas Regnault  
Marc Betoule  
Seb Bongard  
Sylvain Baumont  
Jeremy Neveu  
Delphine Hardin  
Thomas de Jaeger  
Dylan Kuhn  
Leander Lacroix  
Laurent Le Guillou  
Thierry Souverin

w,wa

SNLS  
SNf

# Activities du groupe

shear

Theorie

Michael Joyce

RSD

Pauline Zarrouk  
Christophe Balland  
Svyatoslav Trusov

Pierre Astier  
Pierre Antilogus  
Anna Niemiec  
Enya van den Abeele

DESI

Antoine Gilles Lordet  
Mahmoud Osman

LSST

ZTF

BOSS

HSC

Nicolas Regnault  
Marc Betoule  
Seb Bongard  
Sylvain Baumont  
Jeremy Neveu  
Delphine Hardin  
Thomas de Jaeger  
Dylan Kuhn  
Leander Lacroix  
Laurent Le Guillou  
Thierry Souverin

w,wa

SNLS  
SNf

# Le groupe de cosmologie du LPNHE

shear

Theorie

Michael Joyce

Pierre Astier  
Pierre Antilogus  
Anna Niemiec  
Enya van den Abeele

RSD

Pauline Zarrouk  
Christophe Balland  
Svyatoslav Trusov

LSST

DESI

Antoine Gilles Lordet  
Mahmoud Osman

ZTF

BOSS

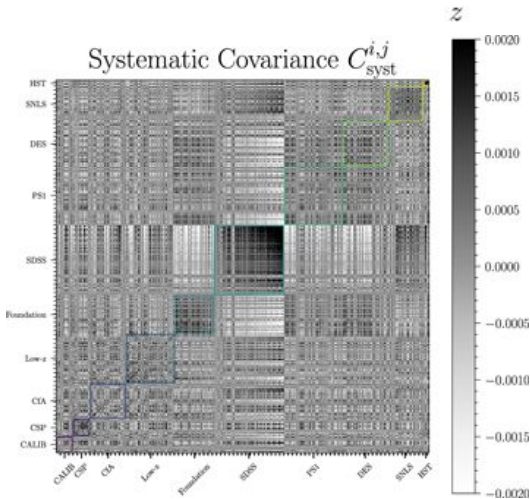
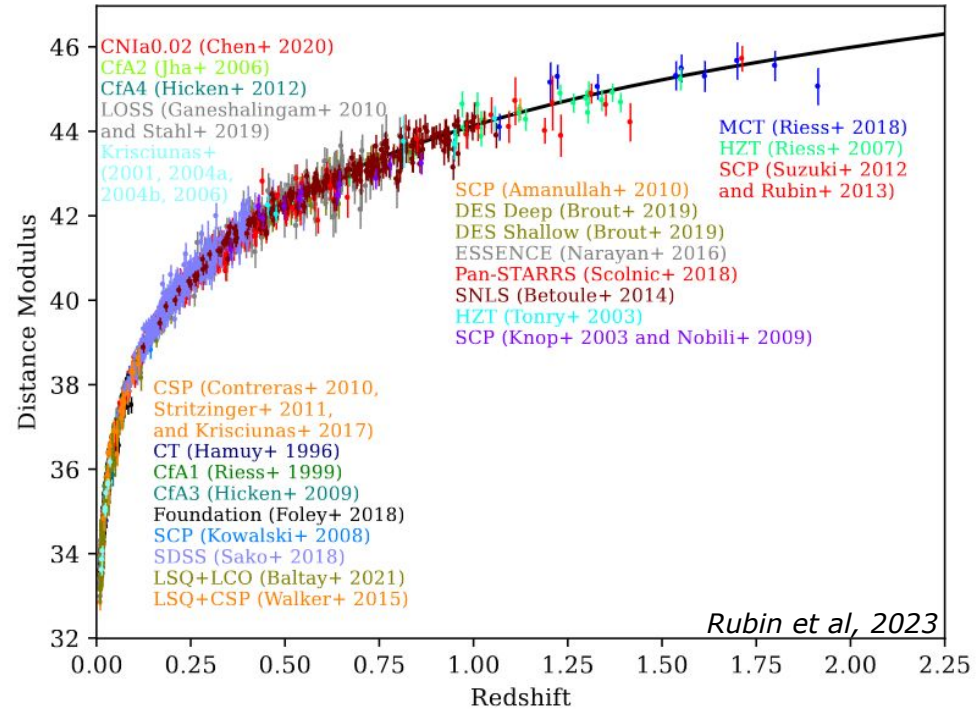
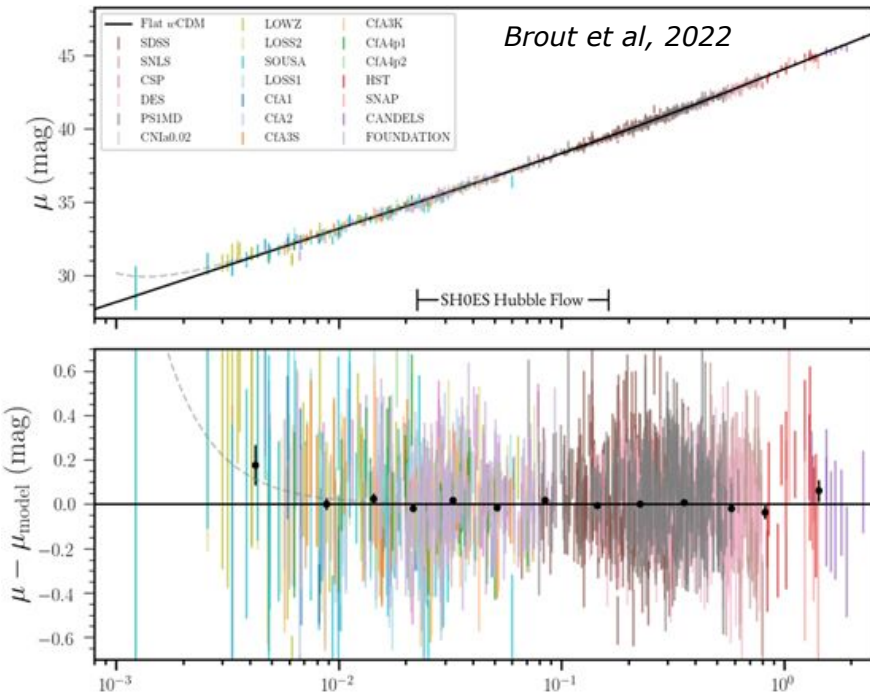
HSC

Nicolas Regnault  
Marc Betoule  
Seb Bongard  
Sylvain Baumont  
Jeremy Neveu  
Delphine Hardin  
Thomas de Jaeger  
Dylan Kuhn  
Leander Lacroix  
Laurent Le Guillou  
Thierry Souverin

w,wa

SNLS  
SNf

# Recent Hubble diagrams: Pantheon+ & Union3



**Table 1.** Bandpass shifts for each filter bringing the synthesized color terms in line with observed color terms. For the Bessell & Mply (2012) filters, we take the shifts from Bohlin & Landolt (2015); for the Smith et (2002) filters, we compute our own shifts using stars in common with CALSPEC.

Filter	Shift (Å)
Bessell & Murphy (2012) <i>U</i>	-8
Bessell & Murphy (2012) <i>B</i>	-20
Bessell & Murphy (2012) <i>V</i>	-20
Bessell & Murphy (2012) <i>R</i>	-31
Bessell & Murphy (2012) <i>I</i>	-27
Smith et al. (2002) <i>u</i>	7
Smith et al. (2002) <i>g</i>	19
Smith et al. (2002) <i>r</i>	7
Smith et al. (2002) <i>i</i>	30
Smith et al. (2002) <i>z</i>	-12
LOSS K1 <i>B</i>	-13
LOSS K2 <i>B</i>	-28
LOSS K3 <i>B</i>	-22
LOSS K4 <i>B</i>	-21
LOSS N1 <i>B</i>	-22
LOSS N2 <i>B</i>	-22
LOSS K1 <i>V</i>	-18
LOSS K2 <i>V</i>	-17
LOSS K3 <i>V</i>	-18
LOSS K4 <i>V</i>	-18
LOSS N1 <i>V</i>	-18
LOSS N2 <i>V</i>	-17
LOSS K1 <i>R</i>	-46
LOSS K2 <i>R</i>	-49
LOSS K3 <i>R</i>	-49
LOSS K4 <i>R</i>	-44
LOSS N1 <i>R</i>	-47
LOSS N2 <i>R</i>	-51
LOSS K1 <i>I</i>	-180
LOSS K2 <i>I</i>	-58
LOSS K3 <i>I</i>	-56
LOSS K4 <i>I</i>	-55
LOSS N1 <i>I</i>	-133
LOSS N2 <i>I</i>	-133

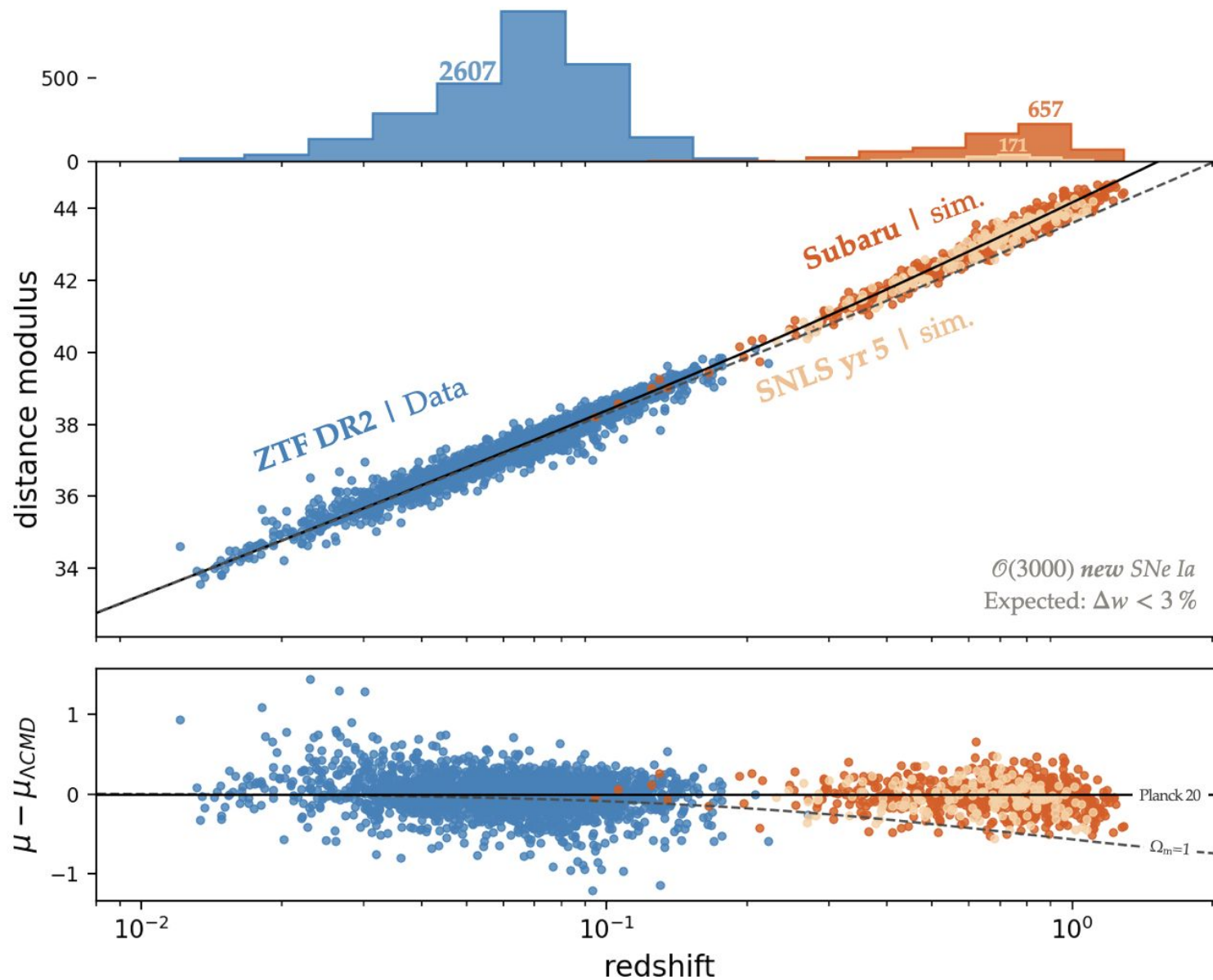
Table 1 continued

Table 1 (continued)

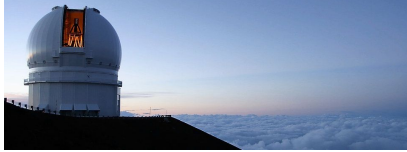
Filter	Shift (Å)	Filter	Shift (Å)	Filter	Shift (Å)
LCO <i>B</i>	-23	CfA2 4Sh3 SAO <i>B</i>	11	CfA3/4 4Sh Harris <i>B</i>	51
LCO <i>V</i>	124	CfA2 AC Harris <i>B</i>	-8	CfA3/4 KC <i>B1</i>	2
LCO <i>g</i>	-65	CfA2 AC SAO <i>B</i>	-14	CfA3/4 MC <i>B</i>	3
LCO <i>r</i>	-9	CfA2 4Sh1 Harris <i>V</i>	-13	CfA3/4 KC <i>B1</i>	-64
LCO <i>i</i>	62	CfA2 4Sh1 SAO <i>V</i>	-14	CfA3/4 KC <i>B2</i>	-64
CfA1 FIWO <i>B</i> thick	12	CfA2 4Sh1 Harris <i>R</i>	-57	CfA3/4 4Sh Harris <i>V</i>	4
CfA1 FIWO <i>B</i> thin	11	CfA2 4Sh1 SAO <i>R</i>	-42	CfA3/4 KC <i>V1</i>	4
CfA1 FIWO <i>V</i> thick	-35	CfA2 4Sh3 SAO <i>R</i>	-42	CfA3/4 MC <i>V</i>	-26
CfA1 FIWO <i>V</i> thin	-9	CfA2 AC SAO <i>V</i>	-30	CfA3/4 KC <i>V1</i>	-3
CfA1 FIWO <i>R</i> thick	-73	CfA2 AC SAO <i>V</i>	-19	CfA3/4 KC <i>V2</i>	-3
CfA1 FIWO <i>R</i> thin	-63	CfA2 4Sh1 Harris <i>R</i>	-57	CfA3/4 4Sh Harris <i>R</i>	-27
CfA1 FIWO <i>I</i> thick	27	CfA2 4Sh3 SAO <i>R</i>	-42	CfA3/4 4Sh Harris <i>I</i>	-92
CfA1 FIWO <i>I</i> thin	-61	CfA2 4Sh3 Harris <i>R</i>	-57	CfA3/4 KC <i>r1</i>	24
CfA2 4Sh1 Harris <i>U</i>	-47	CfA2 4Sh3 SAO <i>R</i>	-42	CfA3/4 MC <i>r</i>	17
CfA2 4Sh1 SAO <i>U</i>	5	CfA2 AC Harris <i>R</i>	-62	CfA3/4 KC <i>r1</i>	30
CfA2 4Sh3 Harris <i>U</i>	38	CfA2 AC SAO <i>R</i>	-39	CfA3/4 KC <i>r2</i>	-11
CfA2 4Sh3 SAO <i>U</i>	5	CfA2 4Sh1 Harris <i>I</i>	-88	CfA3/4 KC <i>i</i>	-30
CfA2 AC Harris <i>U</i>	43	CfA2 4Sh1 SAO <i>I</i>	-157	CfA3/4 MC <i>i</i>	-33
CfA2 AC SAO <i>U</i>	24	CfA2 4Sh3 Harris <i>I</i>	-88	CfA3/4 KC <i>i1</i>	-28
CfA2 4Sh1 Harris <i>B</i>	23	CfA2 4Sh3 SAO <i>I</i>	-157	CfA3/4 KC <i>i2</i>	-28
CfA2 4Sh1 SAO <i>B</i>	11	CfA2 AC Harris <i>I</i>	-228		
CfA2 4Sh3 Harris <i>B</i>	23	CfA2 AC SAO <i>I</i>	-157		

# The *Lemaître* Hubble diagram

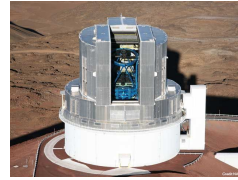
Latest Extended Mapping of  
Acceleration with an  
Independent Trove of  
Redshifted Explosions



# Key ingredients



- **SNLS** 4-5 year
- 2008+
- 3.6-m, 1 deg<sup>2</sup>
- **179** SNe @  $0.3 < z < 0.8$



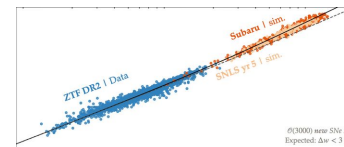
- **Subaru/HSC**
- 2017-2020
- 8.2-m, 1.8 deg<sup>2</sup>
- **500** SNe @  $z < 1.2$
- **50** SNe @  $z > 1.1$  (HST)



- **starDICE**
- Instrumental calibration of Primary flux standards



- **ZTF** phases I & II
- 2017 - 2024+
- 1.2-m, 47 deg<sup>2</sup>
- **O(3500)** SNe @  $z < 0.1$

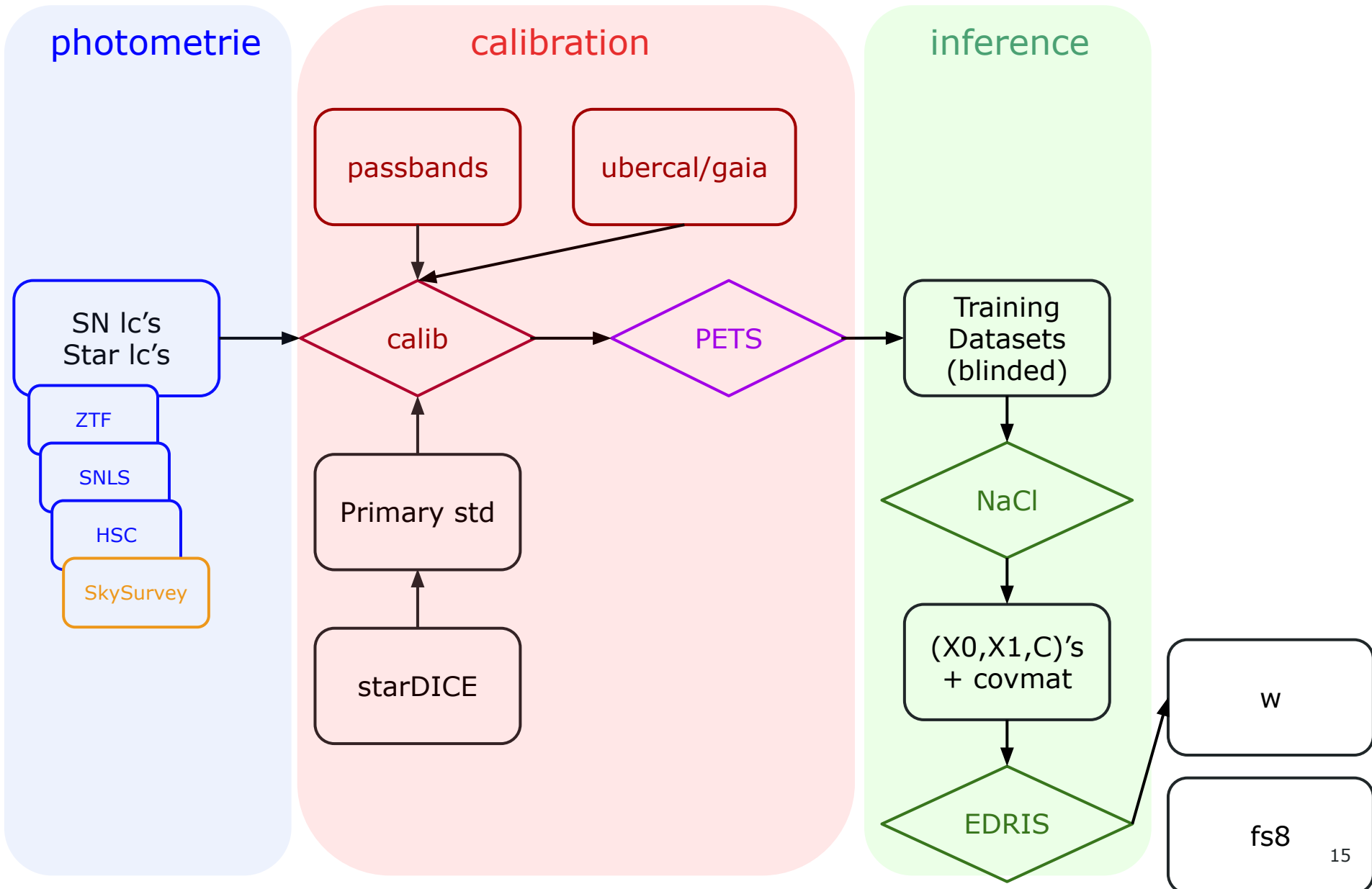


## New inference pipeline

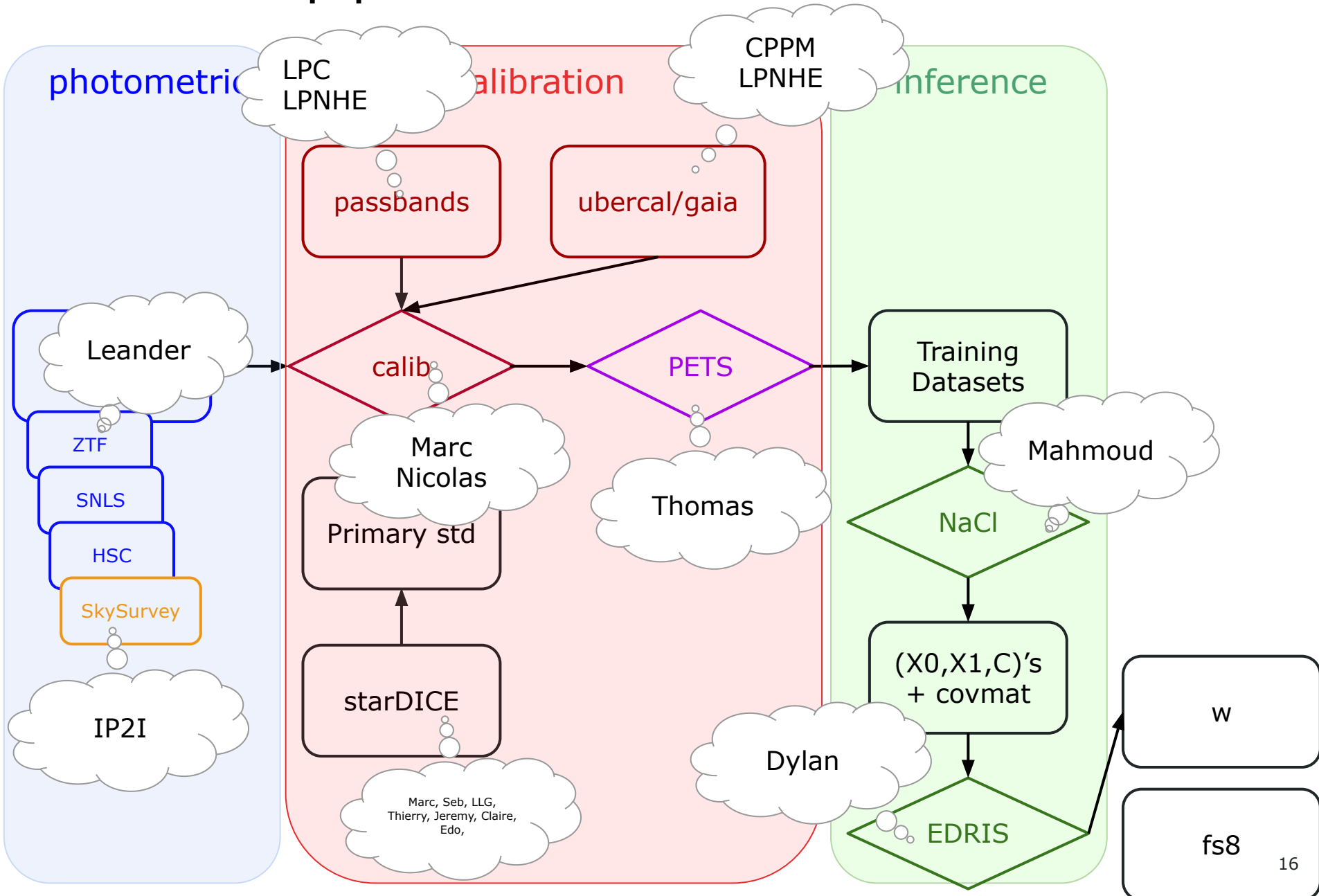
- SN model training
- Distance & cosmology inference

Hubble diagram

# Lemaitre pipeline

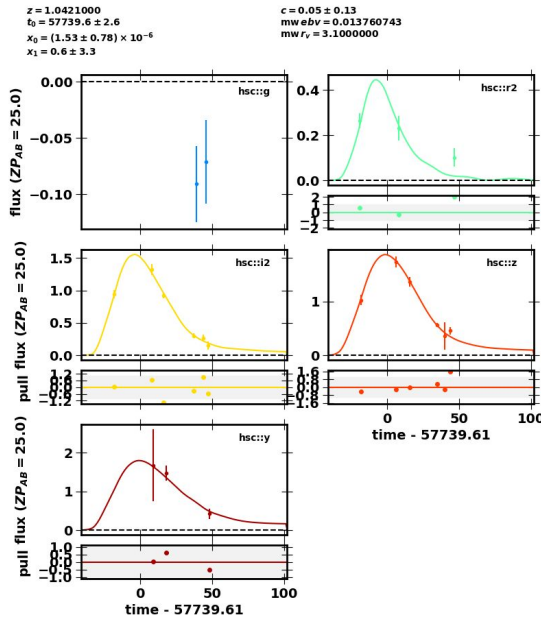
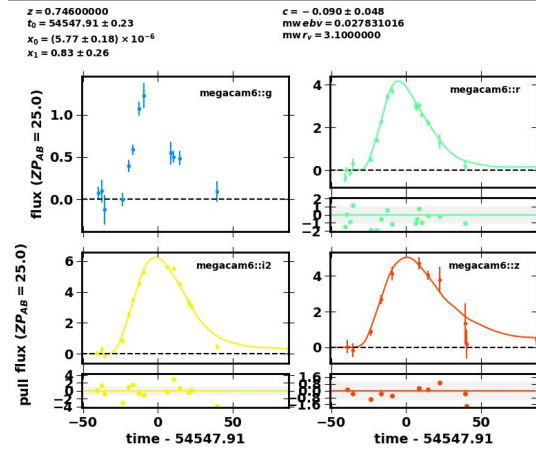
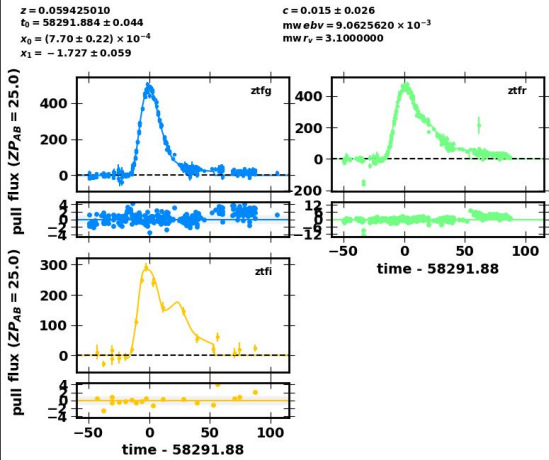


# Lemaitre pipeline

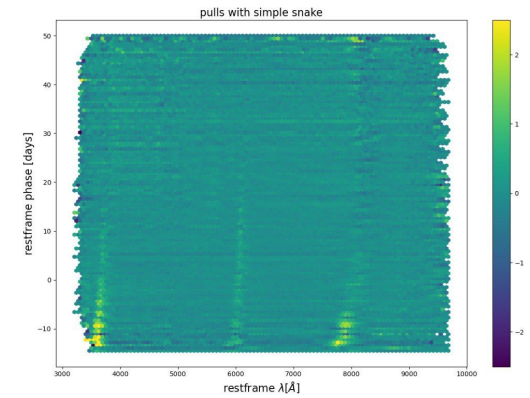




# Pipeline Lemaitre

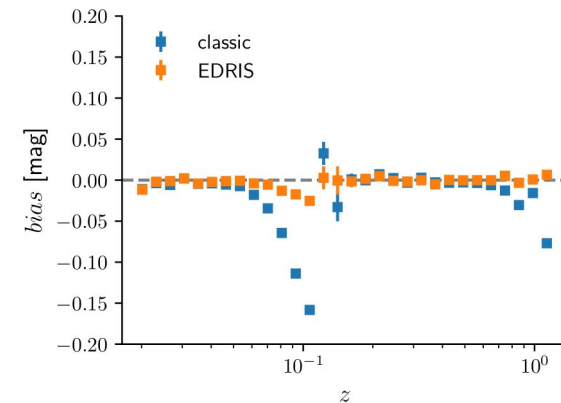


## NaCl



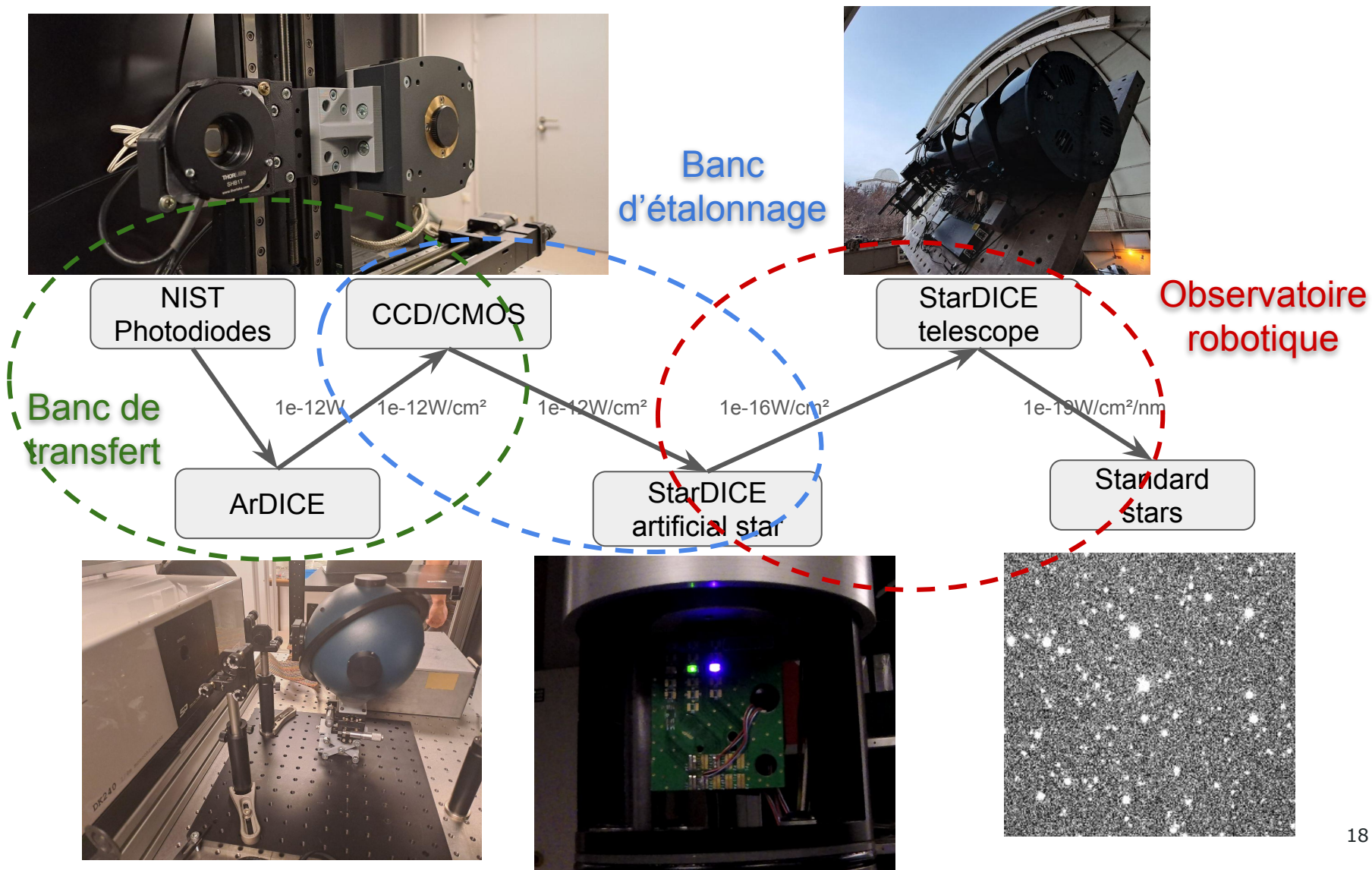
Osman, Regnault

## EDRIS

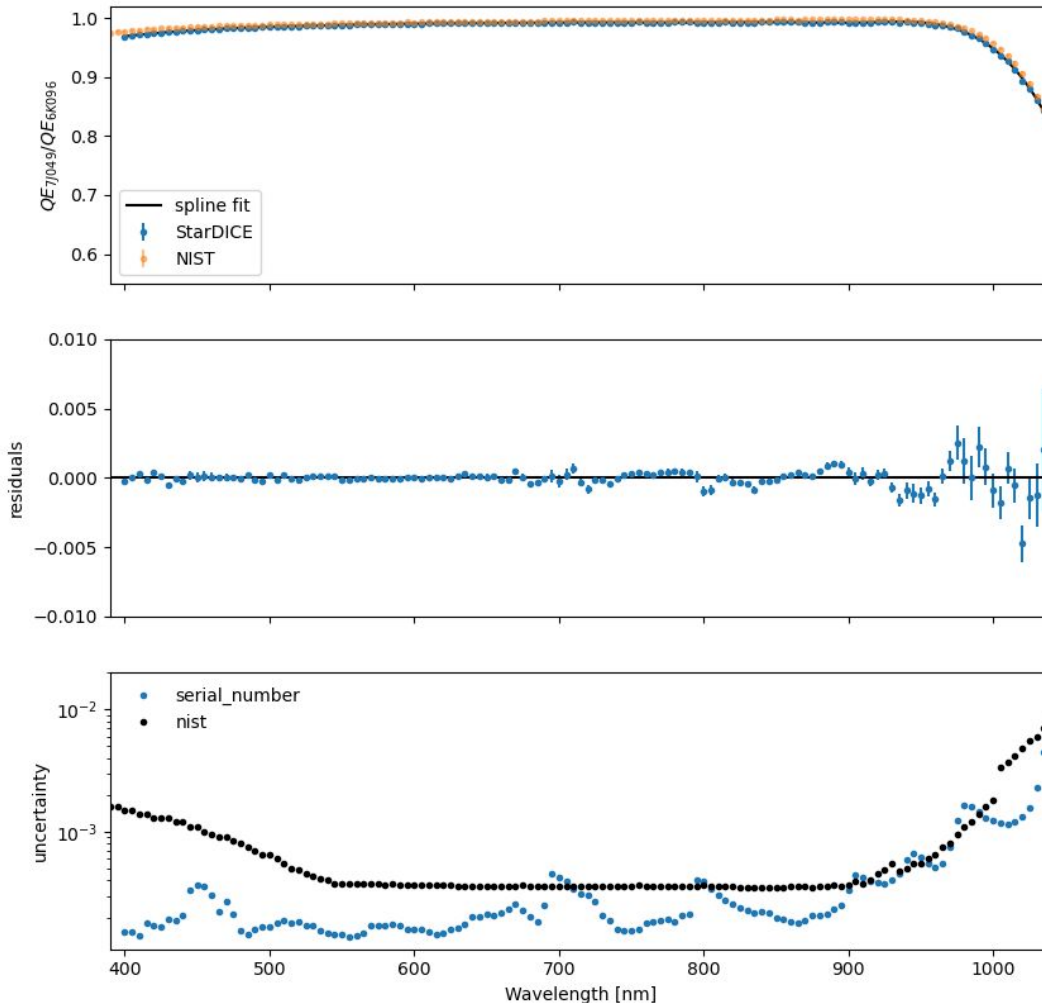


Kuhn, Betoule

# StarDICE



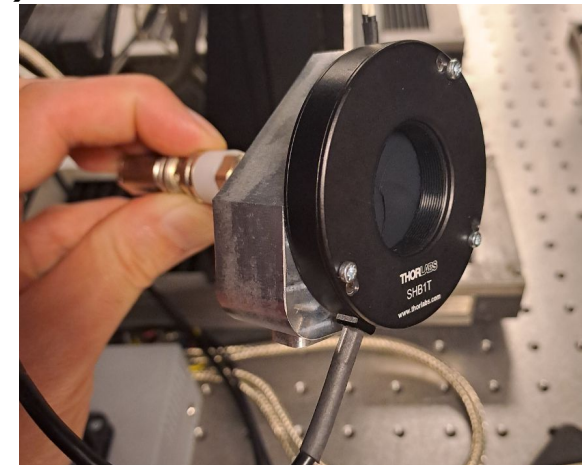
# Banc de transfert StarDICE



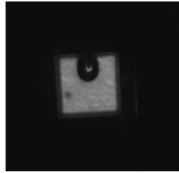
Production de  
3 photodiodes  
calibrées pour  
Rubin  
Observatory



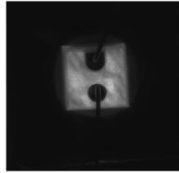
Incertitudes statistiques à un  
niveau inférieur ou équivalent  
à celui du NIST  
Démarrage des études sur les  
systématiques (température  
...)



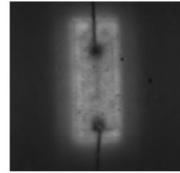
# L'étoile artificielle



Led 0, RLCU 400, 400nm



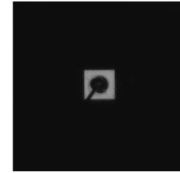
Led 1, SMC430, 430nm



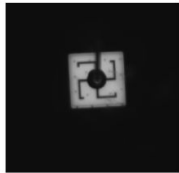
Led 2, Dialight 598-8181-107F, 525nm



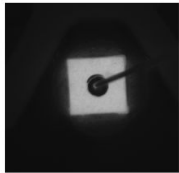
Led 3, STM570, 570nm



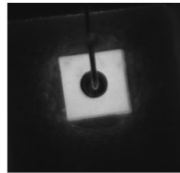
Led 4, Dialight 598-8181-107F, 610nm



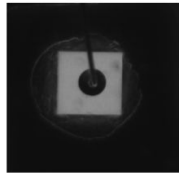
Led 5, SMC660N, 660nm



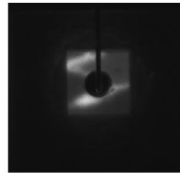
Led 6, SMT720, 720nm



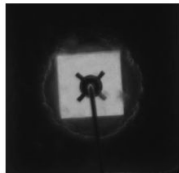
Led 7, SMC735, 735nm



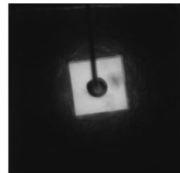
Led 8, SMC780, 780nm



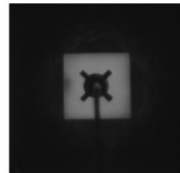
Led 9, SMC830, 830nm



Led 10, SMC870, 870nm



Led 11, SMC910, 910nm

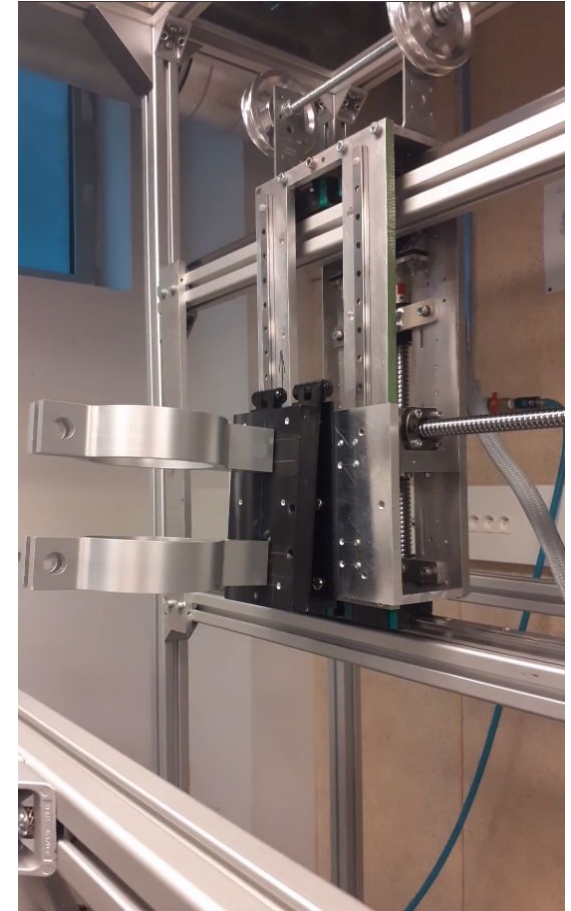


Led 12, SMC970, 970nm



Led 13, SMC1050, 1050nm

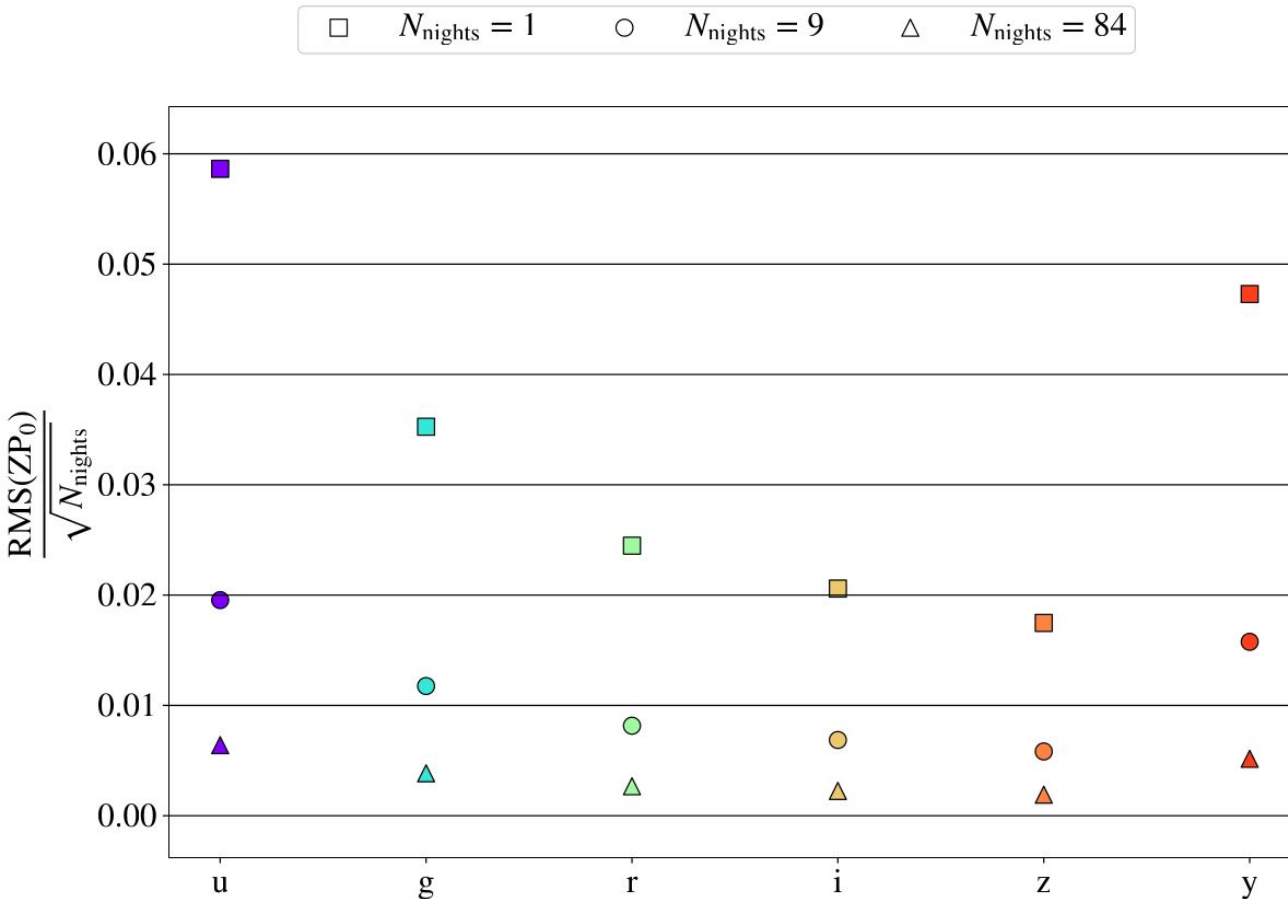
Microphotographie des 14 LEDs sélectionnées et intégrées



Structure du banc d'étalonnage en construction

- Caractérisation de l'électronique et des leds terminée
- Intégration finale en cours pour une installation sur site fin juin
- Observations sur site au cours de l'été
- L'infrastructure d'étalonnage avance en parallèle

# Performance du télescope robotique



23 nuits d'observations pour le pre-survey

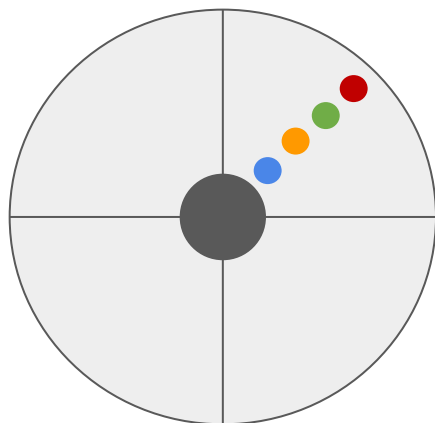
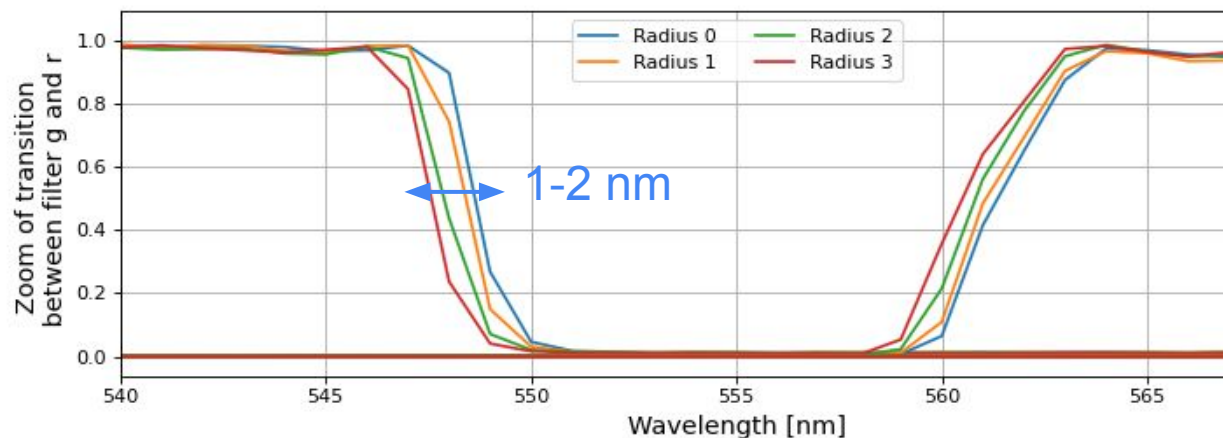
Sélection de 9/23 nuits de qualité photométrique

Dispersion de la mesure des magnitudes hors atmosphère entre 2 et 4% dans les bandes griz

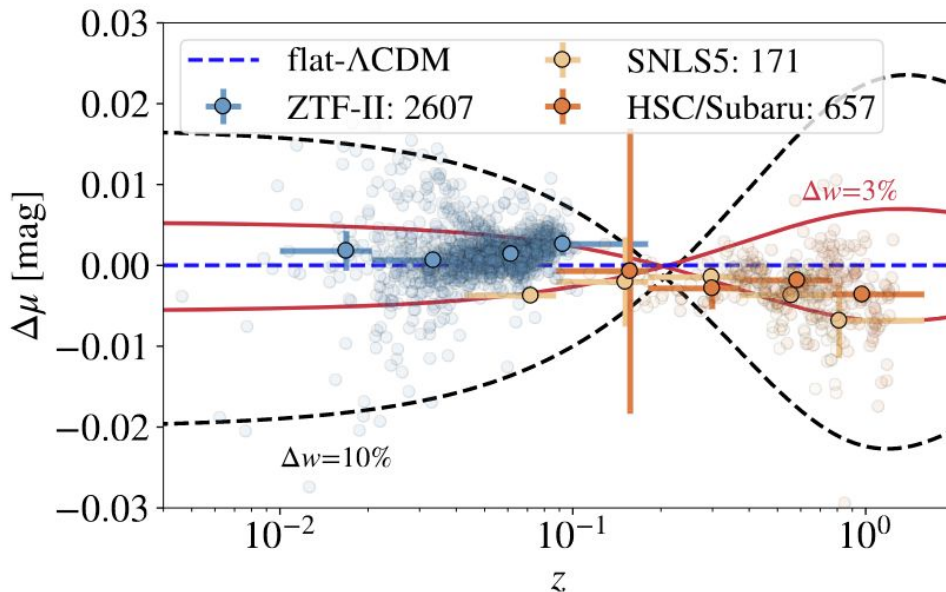
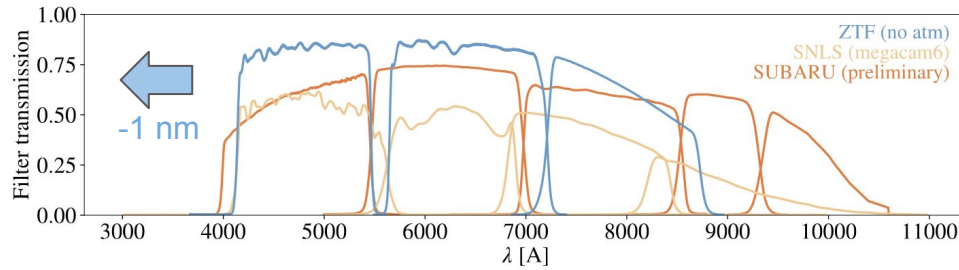
Un facteur à gagner en améliorant le modèle d'atmosphère pour atteindre la performance nominale du relevé

# La mesure des filtres par le CBP

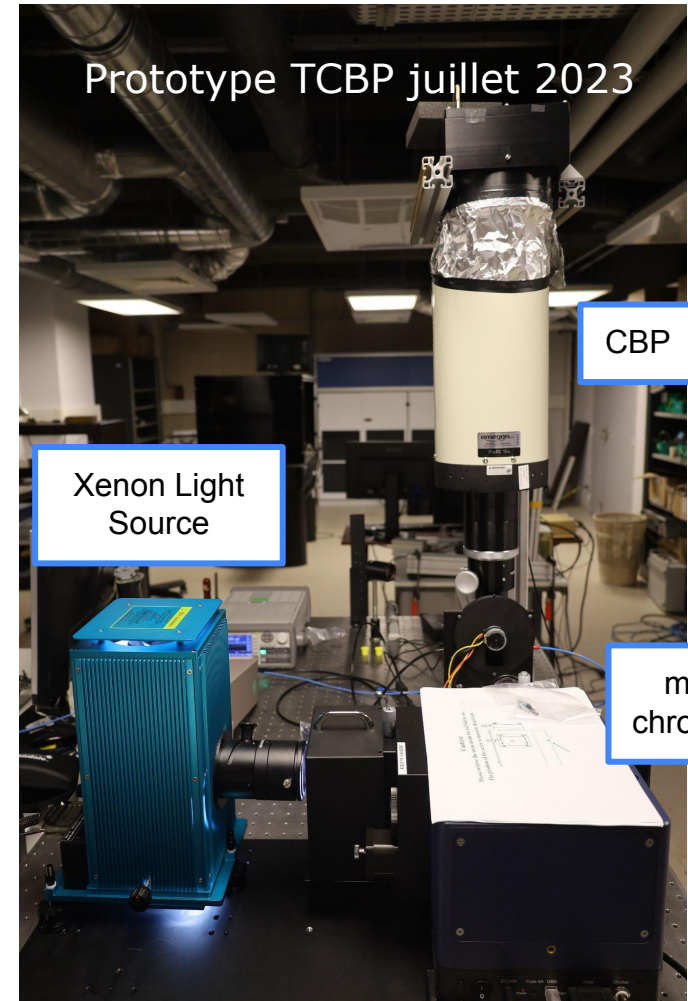
Avec le CBP laser, on voit les fronts de filtre se décaler de 1-2 nm selon l'angle d'incidence



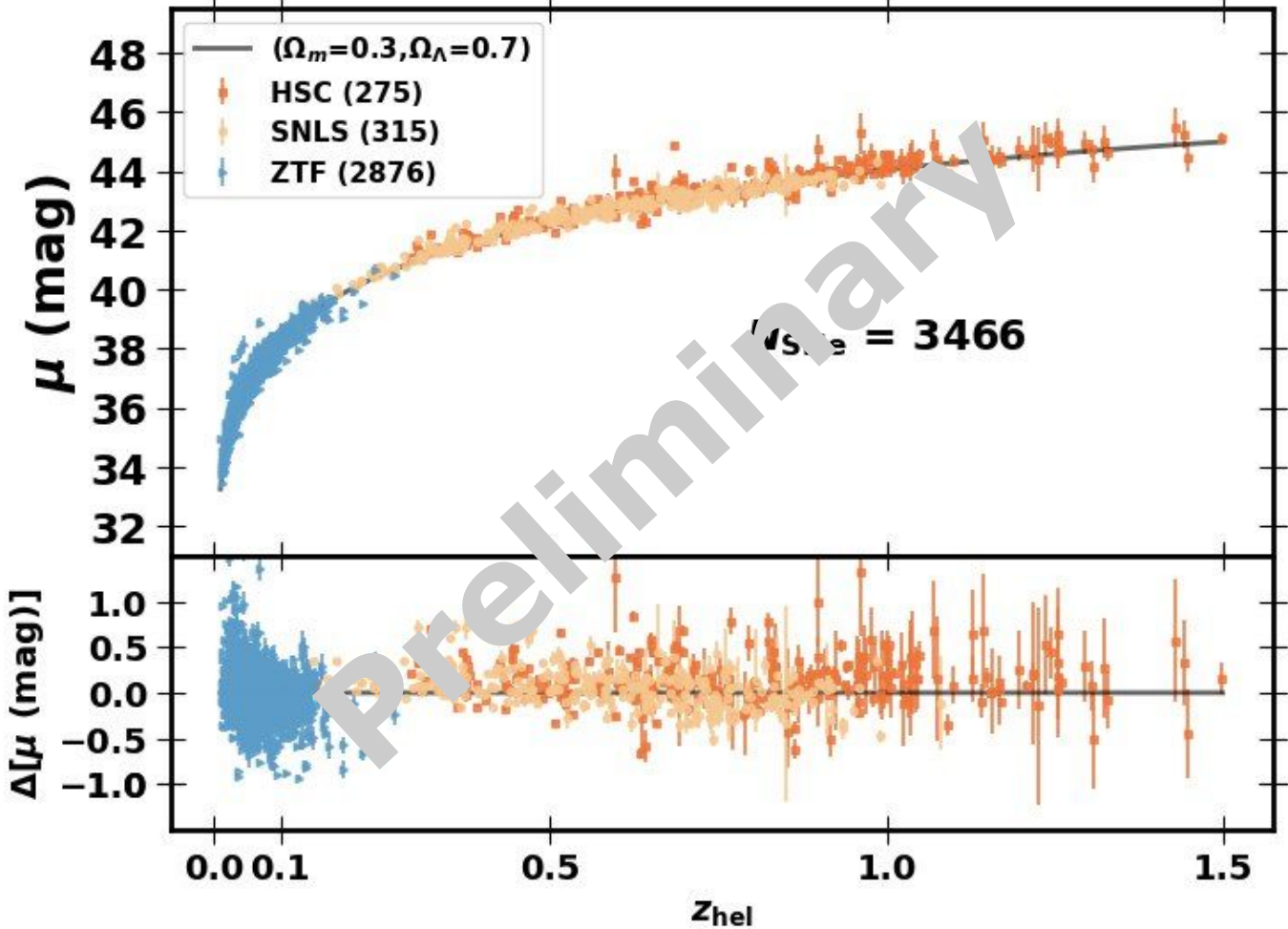
# Traveling CBP: mesure des filtres ZTF à 1Å



Décalage des filtres ZTF de 1nm  
 => biais de 1.5% sur  $w$   
 => il faut les mesurer !



# Lemaitre Hubble diagram





# Activites

shear

Theorie

Michael Joyce

Pierre Astier  
Pierre Antilogus  
Anna Niemiec  
Enya van den Abeele

RSD

Pauline Zarrouk  
Christophe Balland  
Svyatoslav Trusov

DESI

Antoine Gilles Lordet  
Mahmoud Osman

ZTF

LSST

BOSS

HSC

Nicolas Regnault  
Marc Betoule  
Seb Bongard  
Sylvain Baumont  
Jeremy Neveu  
Delphine Hardin  
Thomas de Jaeger  
Dylan Kuhn  
Leander Lacroix  
Laurent Le Guillou  
Thierry Souverin

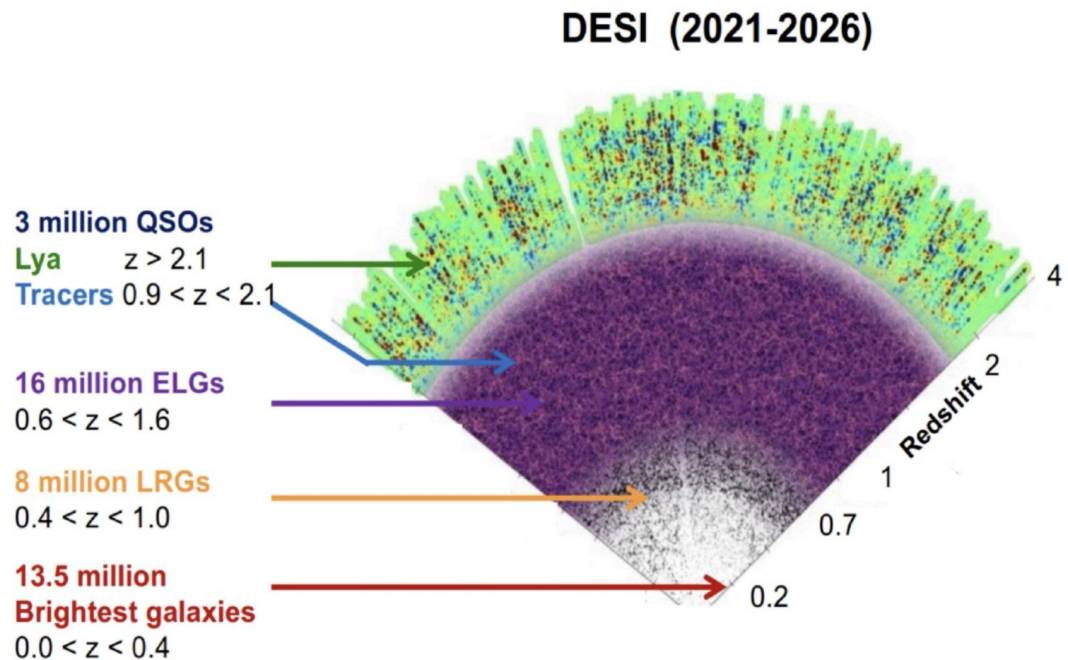
w,wa

SNLS  
SNf

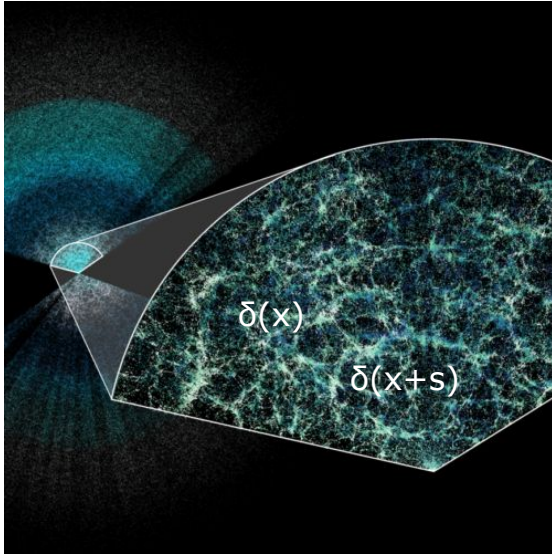
# DESI



- Relevé spectroscopique : 40 millions de spectres de galaxies en 5 ans
- Début de la prise de données mai 2021
- 4m Mayall télescope
- Plan focal avec 5000 fibres robotisées
- Contributions techniques du LPNHE



# Clustering des galaxies avec DESI

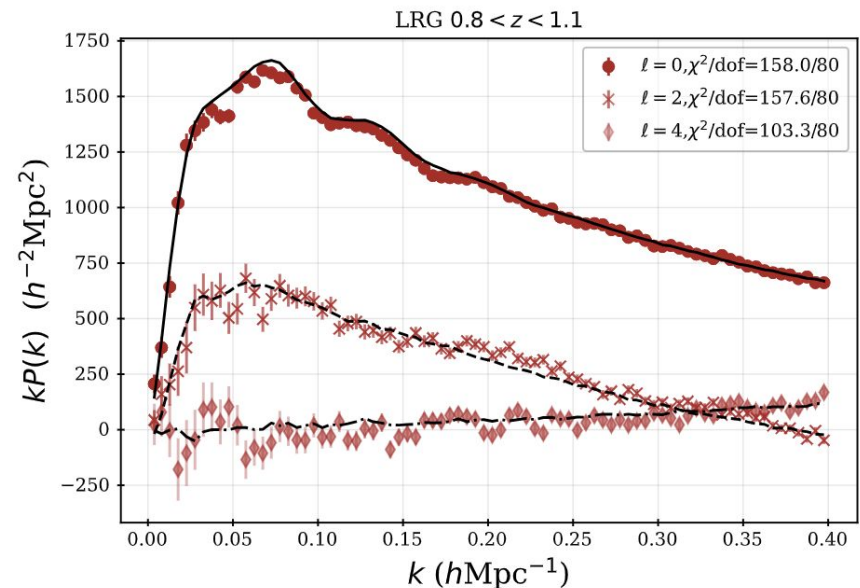
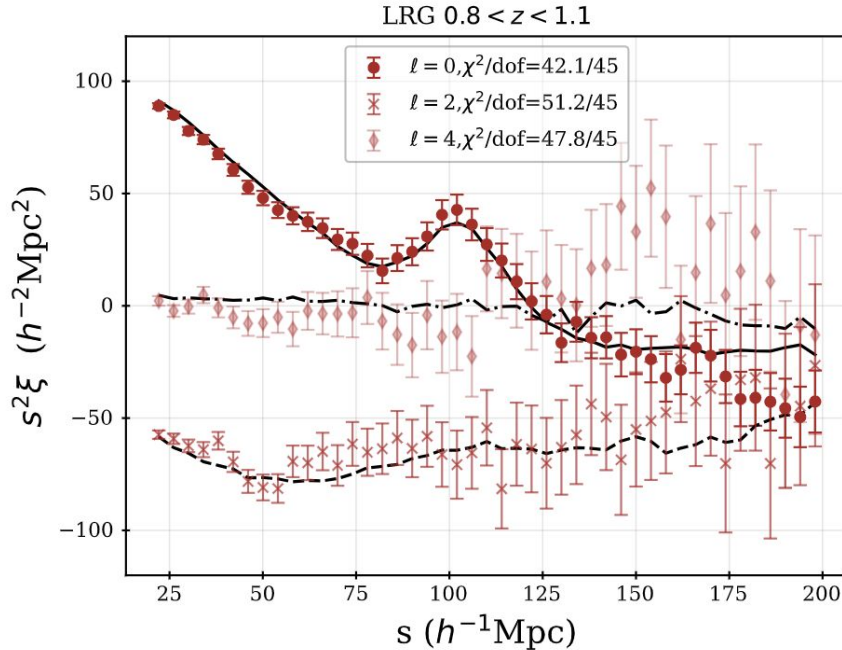


- **Analyse standard**

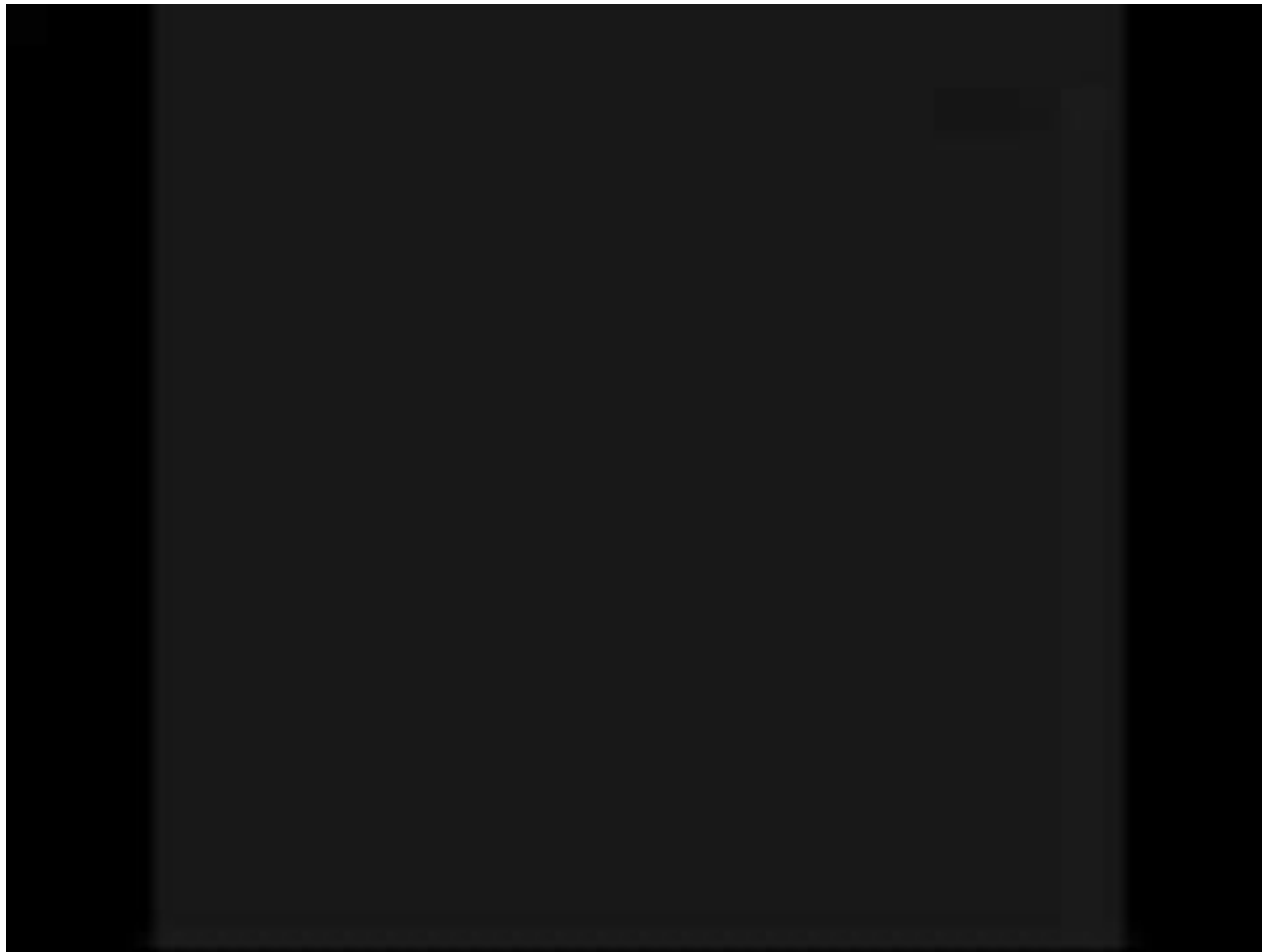
- fonction de corrélation à deux points (variance du contraste de densité)

$$\xi(r) = \langle \delta(\mathbf{x})\delta(\mathbf{x}') \rangle = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} P(k) e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{x}-\mathbf{x}')}$$

- BAO : expansion cosmique
- RSD : croissance des structures



# Croissance des structures avec DESI



- Mesurer la vitesse à laquelle les structures se forment (taux de croissance des structures)
- Test direct de la théorie de la gravité aux échelles cosmologiques

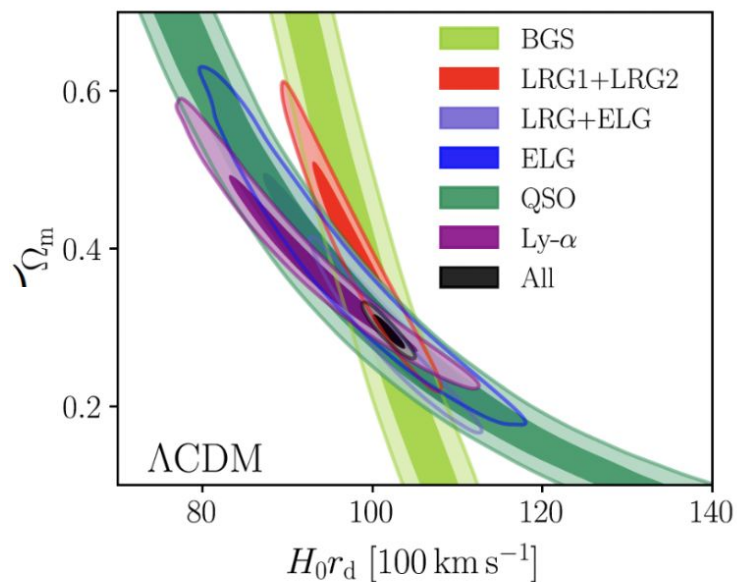
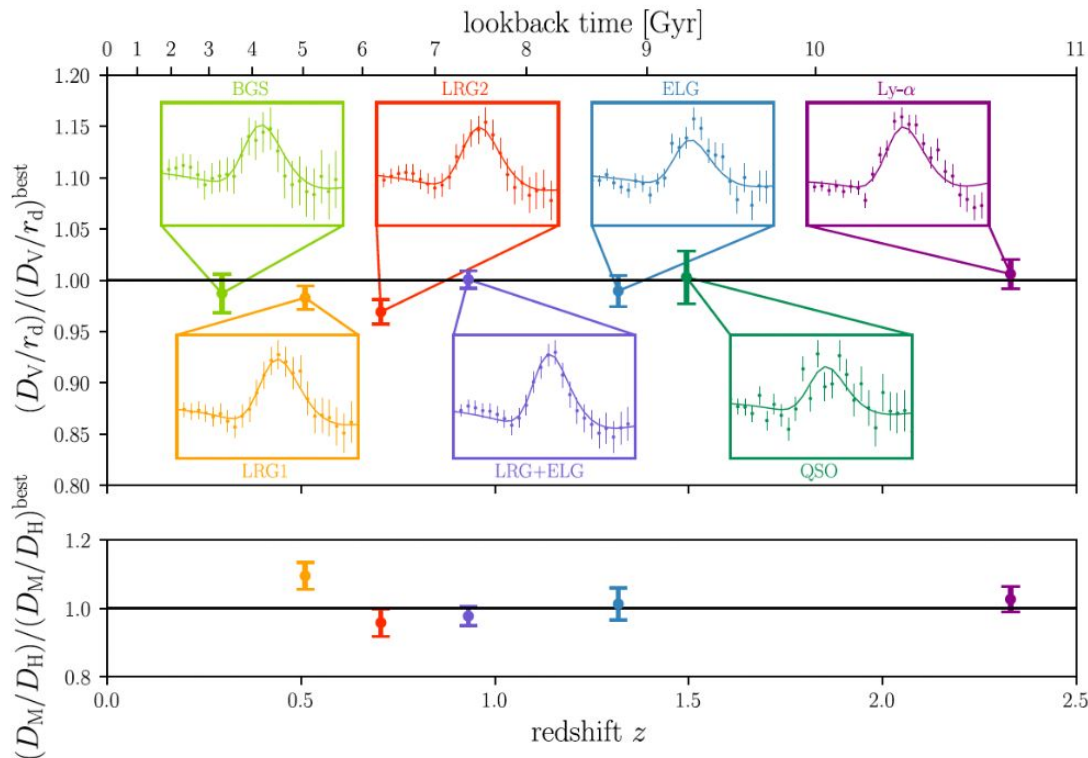
# Résultats DESI Y1

DESI Y1:

- 7 bins en redshift
- 6 million de spectres entre  $0.1 < z < 4.2$

→ En 1 an DESI : plus de spectres qu'en 20 ans de SDSS

Lien vers le [CP IN2P3](#)  
**Séminaire du labo le 17 juin**



$$\Omega_m = 0.295 \pm 0.015 \quad (5.1\%)^c$$

$$H_0 r_d = (101.8 \pm 1.3) [100 \text{ km s}^{-1}] \quad (1.3\%)$$

DESI

$$\Omega_m = 0.3069 \pm 0.0050 \quad (1.6\%)$$

DESI + CMB

# Résultats DESI Y1

## Varying EoS

$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a \quad (\text{CPL})$$

$$w_0 = -0.45^{+0.34}_{-0.21} \quad w_a = -1.79^{+0.48}_{-1.00}$$

DESI + CMB  $\Rightarrow 2.6\sigma$

$$w_0 = -0.827 \pm 0.063 \quad w_a = -0.75^{+0.29}_{-0.25}$$

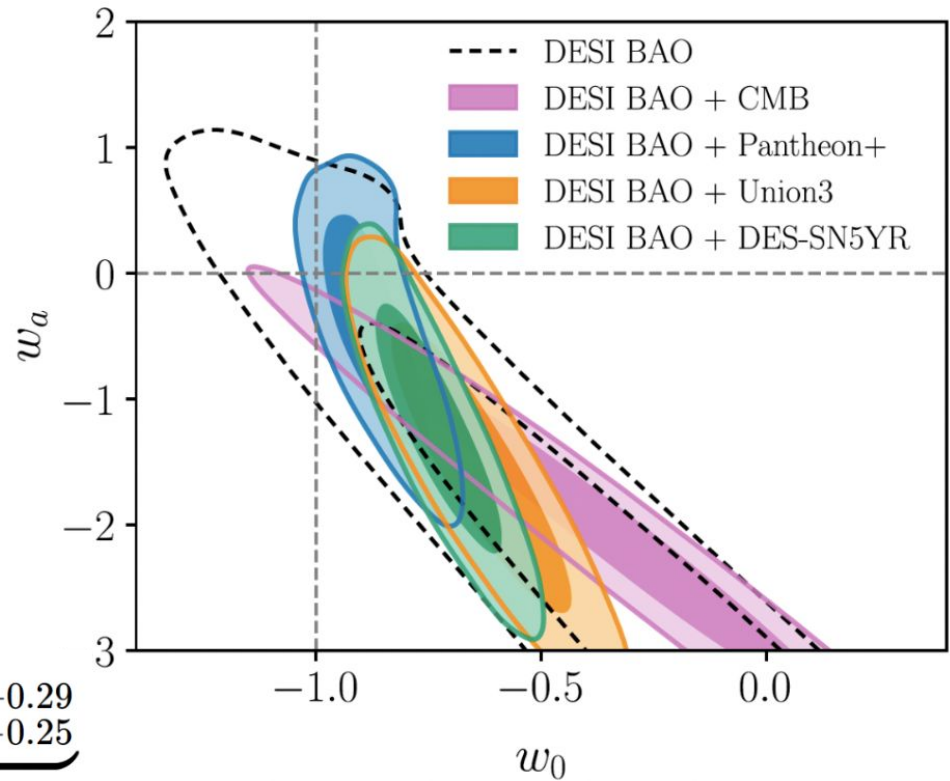
DESI + CMB + Pantheon+  $\Rightarrow 2.5\sigma$

$$w_0 = -0.64 \pm 0.11 \quad w_a = -1.27^{+0.40}_{-0.34}$$

DESI + CMB + Union3  $\Rightarrow 3.5\sigma$

$$w_0 = -0.727 \pm 0.067 \quad w_a = -1.05^{+0.31}_{-0.27}$$

DESI + CMB + DES-SN5YR  $\Rightarrow 3.9\sigma$

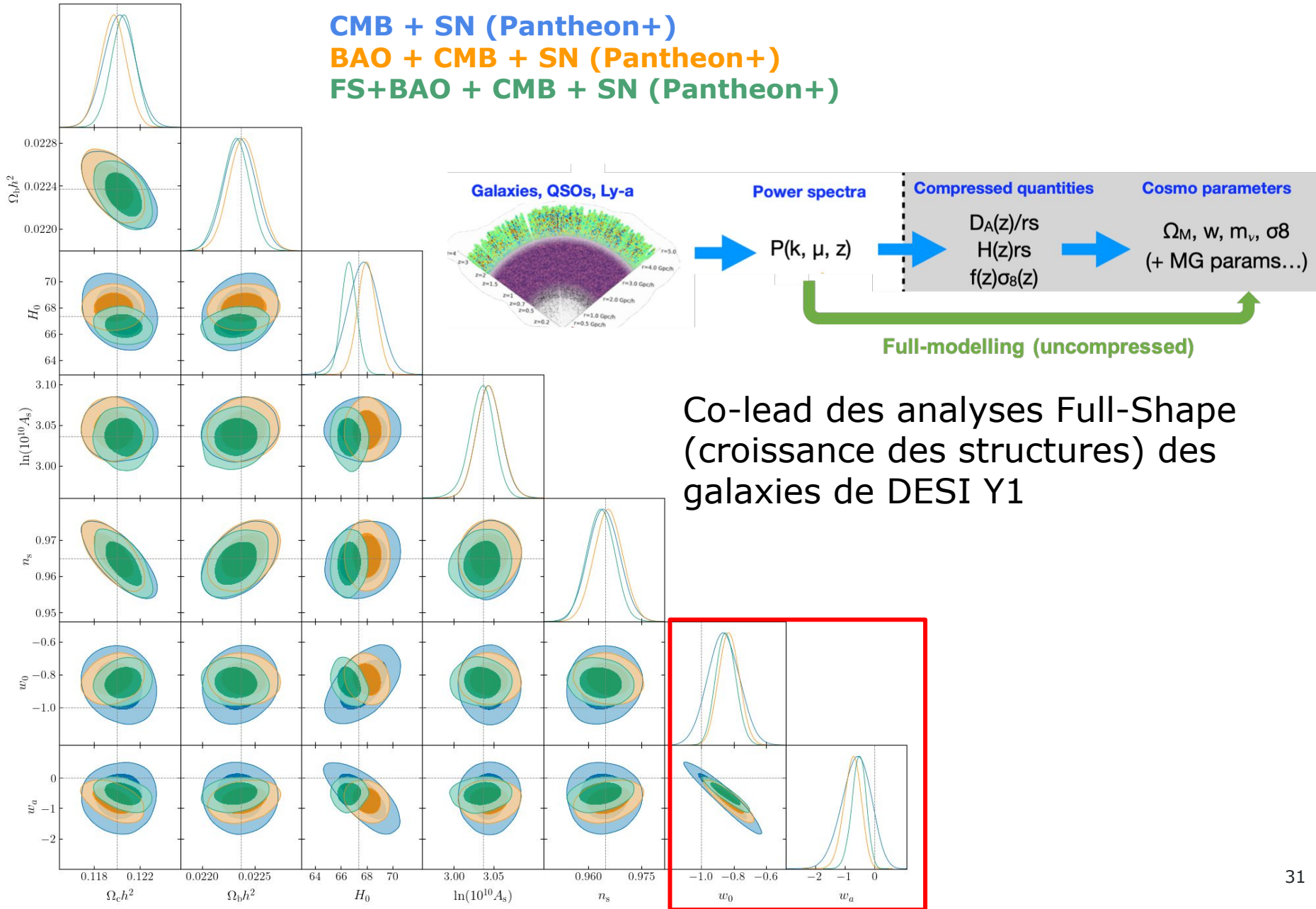


→ Complémentarité des mesures SN Ia et DESI

→ Nécessité de *Lemaître*

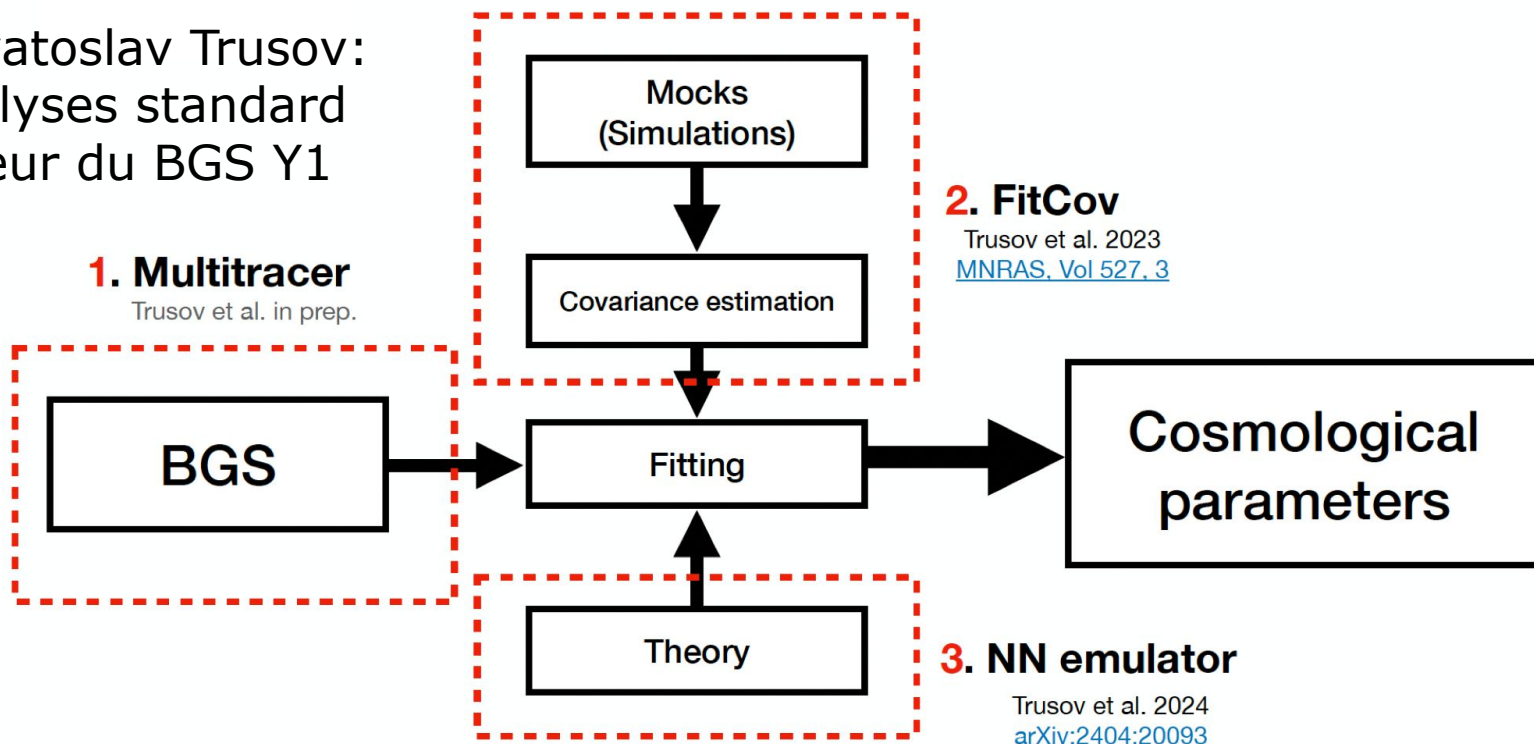
# Résultats DESI Y1 (à venir)

**CMB + SN (Pantheon+)**  
**BAO + CMB + SN (Pantheon+)**  
**FS+BAO + CMB + SN (Pantheon+)**



# Au-delà des méthodes standard: BGS

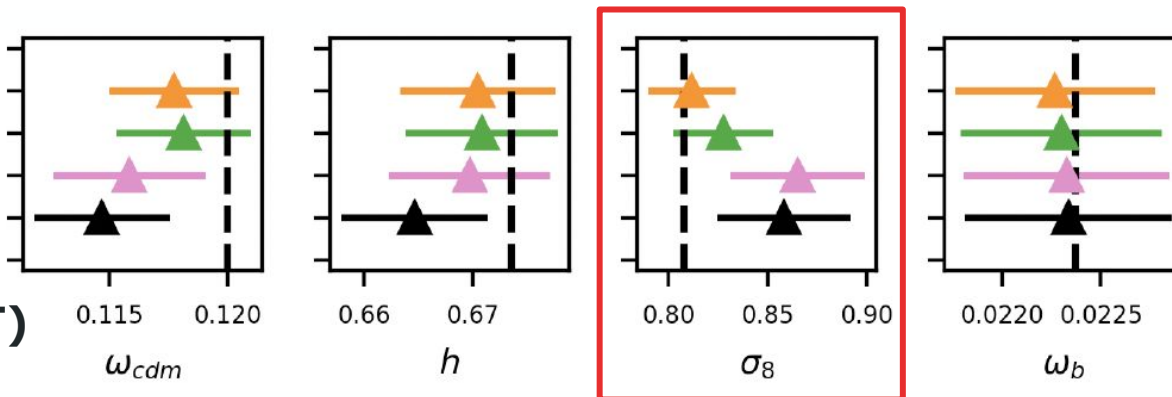
Thèse de Svyatoslav Trusov:  
Dvpt des analyses standard  
et multi-traceur du BGS Y1



## multi-traceur (MT)

DESI Y1 BGS Full MT  
DESI Y1 BGS Full ST  
DESI Y1 BGS ST with FitCov  
DESI Y1 BGS ST

**standard ou  
single-traceur (ST)**





# Le groupe de cosmologie du LPNHE

shear

Theorie

Michael Joyce

RSD

Pauline Zarrouk  
Christophe Balland  
Svyatoslav Trusov

DESI

Antoine Gilles Lordet  
Mahmoud Osman

LSST

ZTF

BOSS

HSC

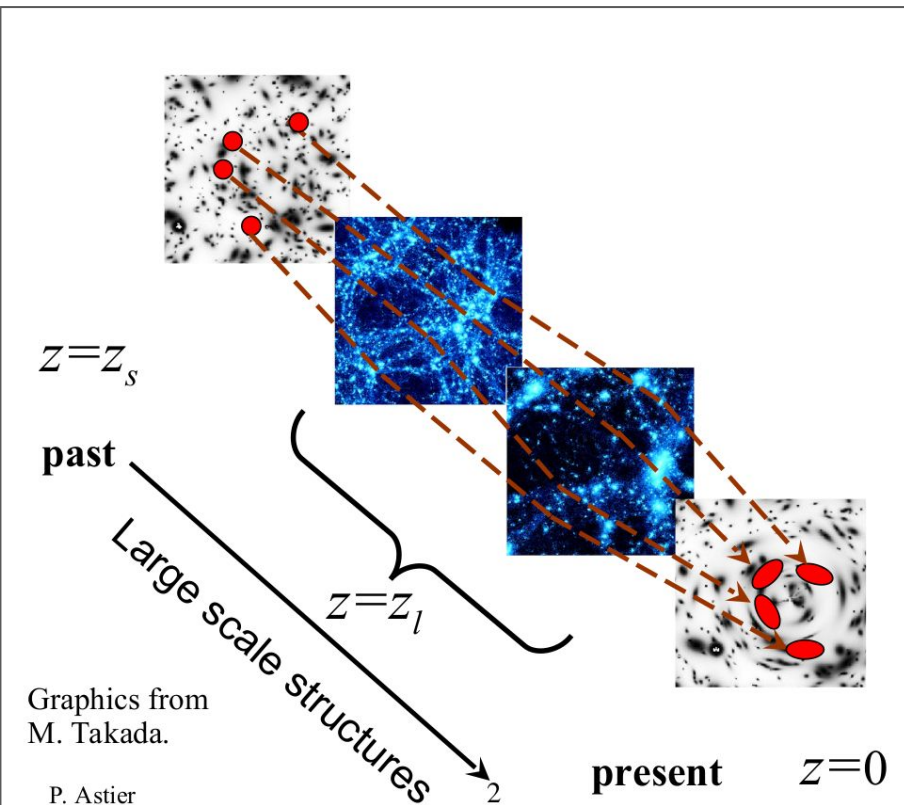
Nicolas Regnault  
Marc Betoule  
Seb Bongard  
Jeremy Neveu  
Delphine Hardin  
Thomas de Jaeger  
Dylan Kuhn  
Leander Lacroix  
Laurent Le Guillou  
Thierry Souverin

Pierre Astier  
Pierre Antilogus  
Anna Niemiec  
Enya van den Abeele

SNLS  
SNf

w,wa

# Lensing



- Contraintes directes sur le potentiel gravitationnel intégré entre observateurs et lentilles
  - Reconstruction corrélations contrastes de densité intégrés matière visible *et* matière noire.
  - Dans des tranches de redshift -> evolution contraste de densité versus  $z$

- **Signal faible:** ellipticité galaxies  $\sim 25\%$ , signal  $\sim 1\%$ 
  - millions de galaxies
  - avec leurs redshifts (photométriques)

# Lensing

- **Challenges**

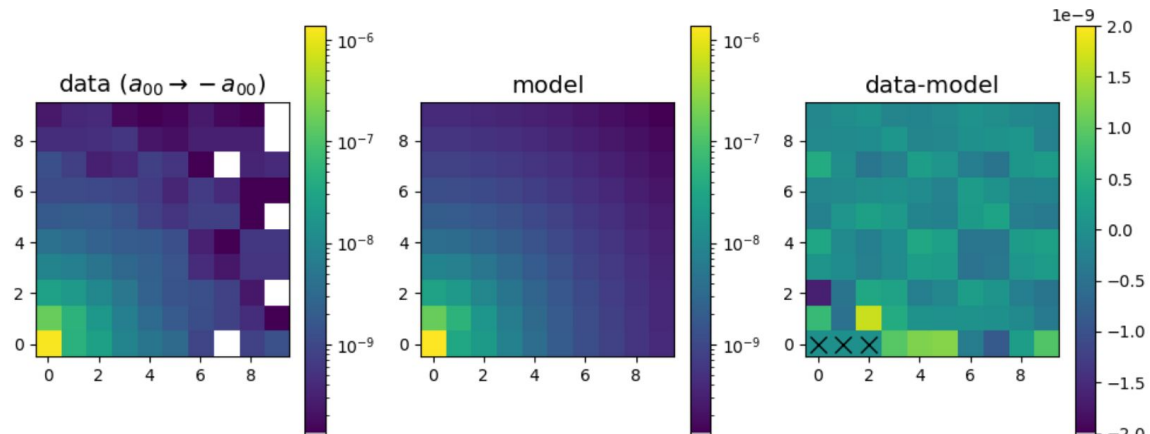
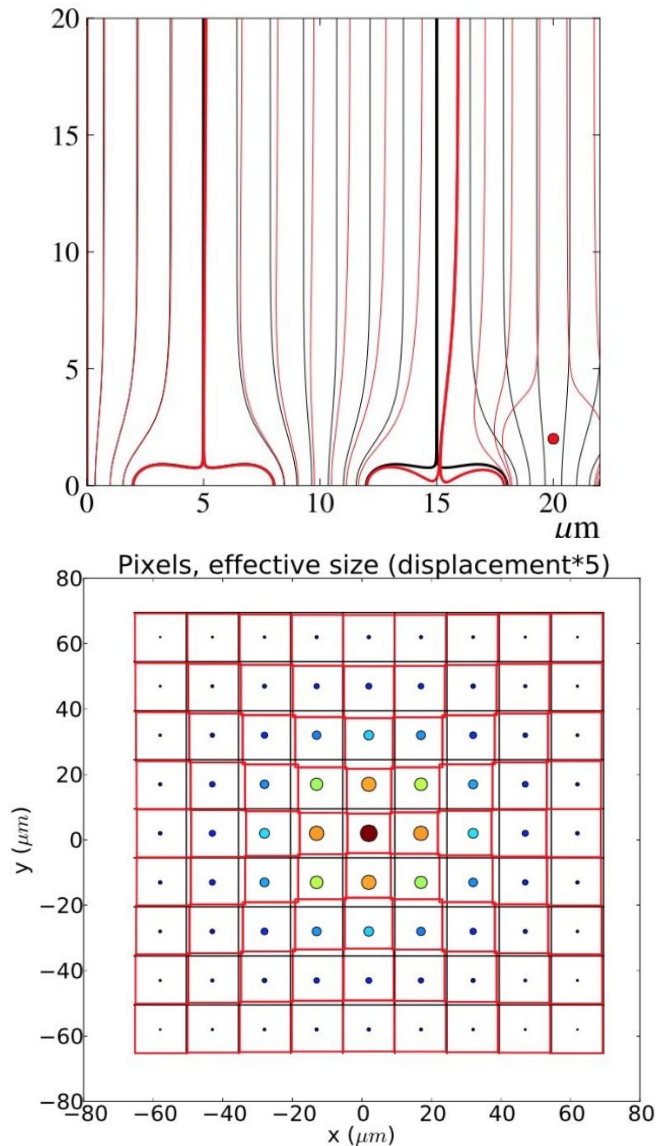
- Estimation PSF
- Construction d'un estimateur de shear
  - Non biaisé
  - Prenant en compte les contributions de la PSF
  - Contributions effets senseurs au shear
- Estimation des redshifts photométriques
  - Minimisant erreurs catastrophiques
  - Entraînés sur populations de galaxies représentatives

- **Stratégie :**

- S'attaquer aux points durs, proches des senseurs
- Utiliser champs Subaru/HSC Ultra-deep pour valider pipeline

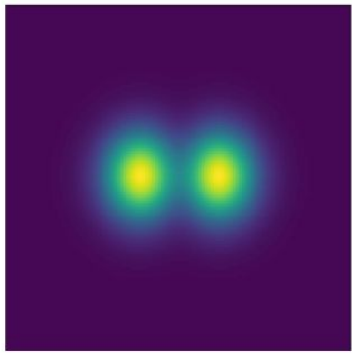
# Effets senseurs : brighter-fatter

- **Altération du champ de dérive** sous l'effet des charges accumulées dans les pixels
  - => déformations grille de pixels
- **Caractérisation** : fonction a deux point des flatfields en fonction du flux
- Technique mature
  - développée au LPNHE (Pierre & Pierre),
  - Etat de l'art: HSC (2301.03274)



# Method : Technical aspects

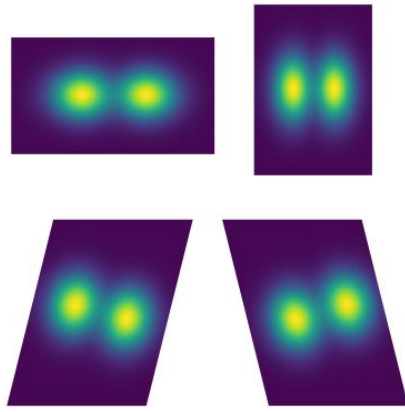
Application of shear variations ( $\pm\epsilon$ ) to calculate derivatives : distortion of the coordinate system (with  $S$  matrix), then interpolation of the image ( $F$  function) onto the new grid.



$$g_1 = \pm \epsilon ; g_2 = 0$$

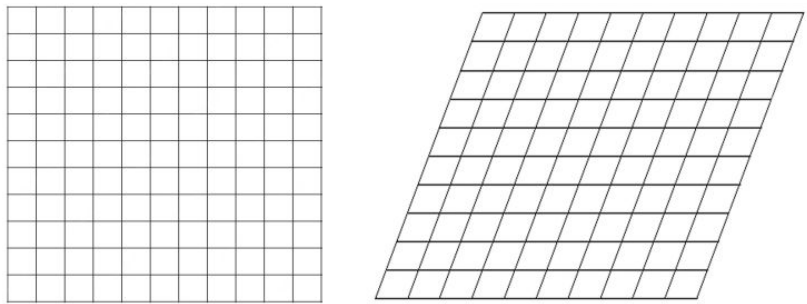
grid distortion  
+  
interpolation

$$g_1 = 0 ; g_2 = \pm \epsilon$$



*Galsim convention*

$$S = \frac{1}{\sqrt{1-g^2}} \begin{pmatrix} 1+g_1 & g_2 \\ g_2 & 1-g_1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

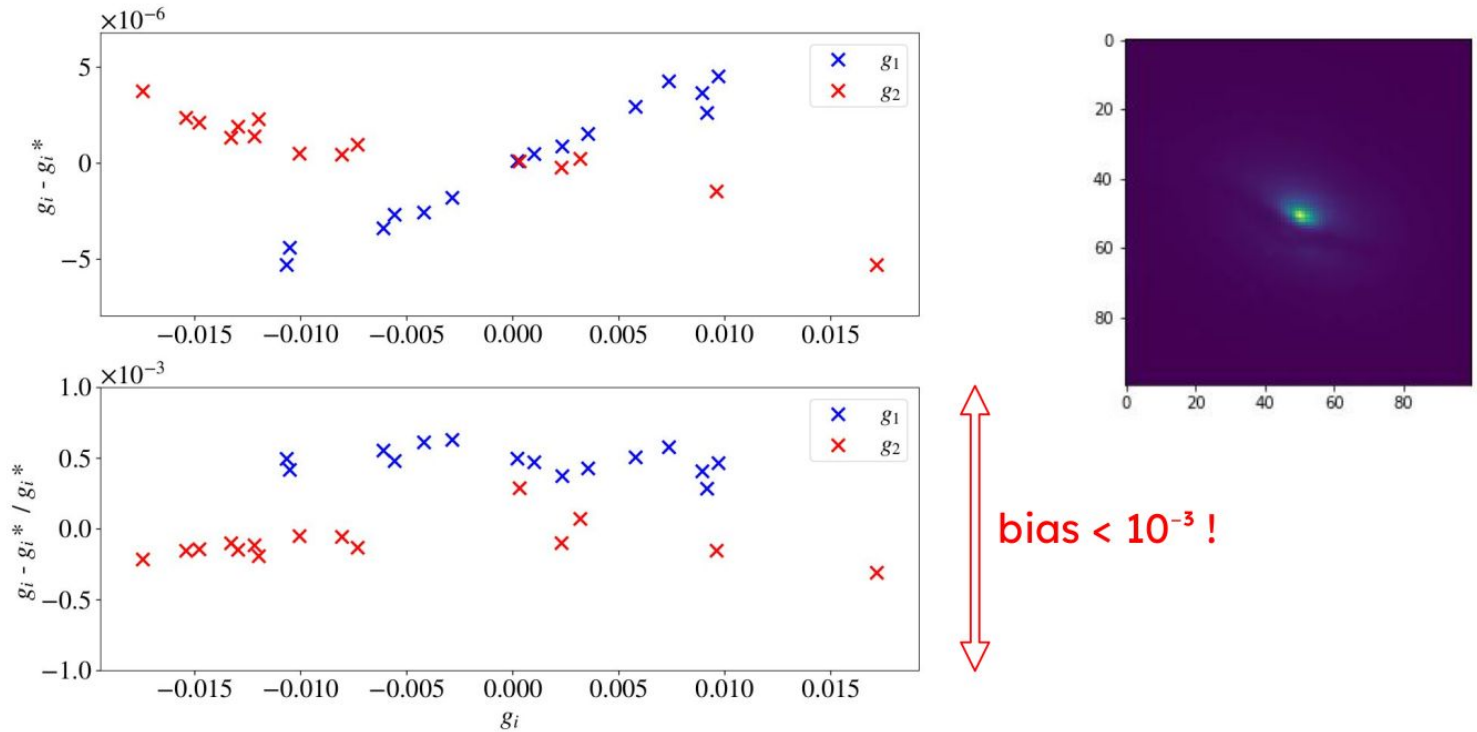


$$\frac{\partial M}{\partial g_1} = \frac{S M_{1+} - S M_{1-}}{2\epsilon}$$

$$\frac{\partial M}{\partial g_2} = \frac{S M_{2+} - S M_{2-}}{2\epsilon}$$

# Results : Realistic galaxy profile (COSMOS catalog)

Comparison : Mean over random rotations applied to the galaxy



(Enya van den Abeele)

# Changeur de Filtre : Janvier 2022- Printemps 2024

- Après les restrictions fortes de voyage du au COVID et grâce aux travaux faits pendant le covid dans le hall du LPNHE, le changeur de filtre à SLAC a été finalisé - qualifié (en ~2 ans Jan 2022-Fev 2024, 6 missions à SLAC sur ~ 140 jours de 1 à 3 personnes : Claire, Didier et Pierre)



Février 2024 : 1ere Mise en place de l'AutoChanger 2 (=spare du système qui prend le filtre dans le carrousel pour le mettre devant le plan focal) : qualification avec le carrousel.



Février 2024 : une image dans le filtre U ;-)

# Dernière livraison pour LSST-Camera en Mai 2024

- Les derniers livrables et matériels de maintenance (5 caisses) sont arrivés sur site au Chili de Paris le 15 Mai .

ex: Caisse contenant  
les spares du carrousel

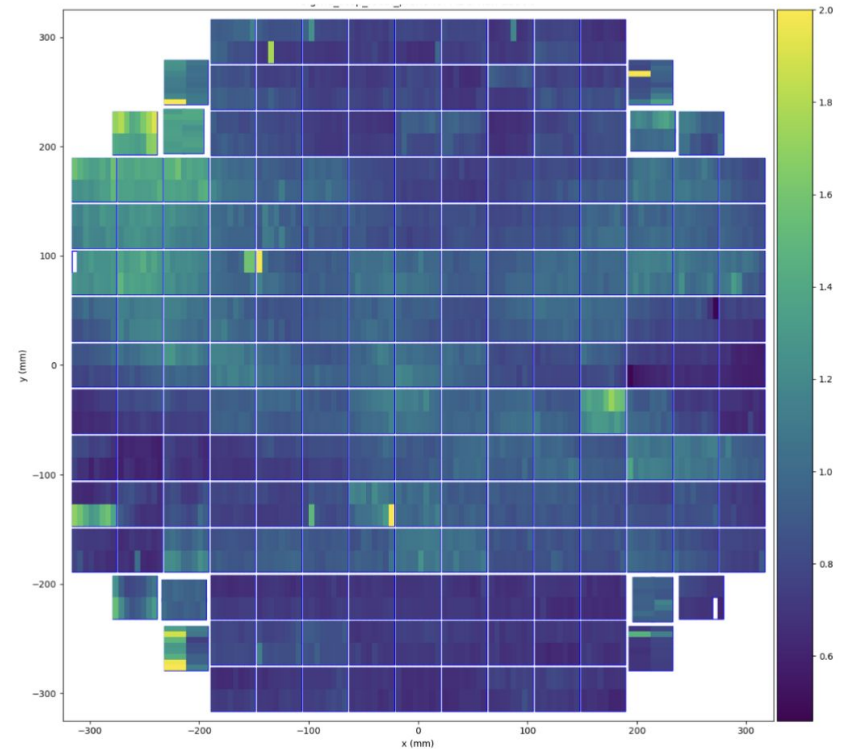
Cet envoi, clos 12 ans  
d'expéditions aux US (2012, envoi  
d'ASIC proto pour le plan focal)  
pour la caméra de LSST !





# 2022-2024 : Plan focal de LSST-Camera

- L'équipe reste un élément moteur, avec une expertise clef, dans la mise en oeuvre et l'optimisation du plus grand plan focal au monde ;-)
- Nous avons contribué à tous les runs de prise de données du plan focal à SLAC, et avons identifié un certain nombre de problèmes et proposé des solutions. La qualité du plan focal est excellents mais les objectifs de performance sont inégalés à ce jour (ex : objectif de stabilité des gains à mieux que  $10^{-3}$  sur une nuit : il semble que  $10^{-4}$  soit à notre portée ! )



Dispersion du gain sur 24h par ampli ( unit  $\sim 10^{-4}$  ), correction optimale ( Y.Faris)

# Conclusion

- 3 pôles d'activité, très complémentaires
- On partage
  - données
  - Méthodes
- Dans un but unique
  - Caractérisation de la nature de l'énergie noire
- Via
  - Mesure de son équation d'état (expansion history)
  - Tests de la relativité générale aux échelles cosmologiques

# Groupe cosmologie

**Objectif** : Tests de précision du modèle de la cosmologie

$\Lambda$ CDM

## Expansion cosmique

Deux sondes **complémentaires**:

- SNIa: luminosité SNe Ia vs  $z$  ( $0 < z < 1.5$ )
- BAO: taille angulaire pic baryons vs  $z$  ( $0.1 < z < 2.5$ )

⇒ EoS énergie noire ( $w, w_a$ )

Imagerie  
Spectro

## Formation des structures

Trois sondes **complémentaires**:

- lentillage faible (weak lensing)
- SNe Ia ( $z < \sim 0.2$ ) peculiar velocity
- clustering des galaxies

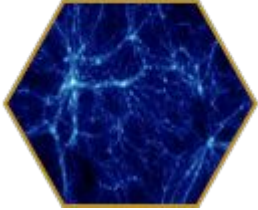
⇒ Test gravitation échelles cosmologiques

Nature Énergie noire  
Test de la gravité

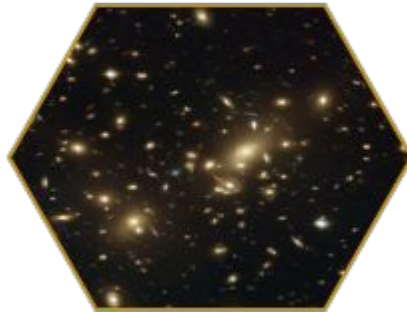
**Notre objectif pour 2026/2027** : être prêt pour effectuer des **analyses multi-sondes avec LSST/DESI**, ce qui implique de publier DESI Full-Shape et LEMAÎTRE, mais surtout de préparer la sonde “weak lensing/cosmic shear”.

# LSST : Science

Galaxy clustering

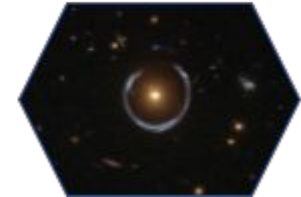


Cisaillement gravitationnel  
(weak lensing)



→ 10 milliards d'images  
de galaxies entre  $0 < z < 2$

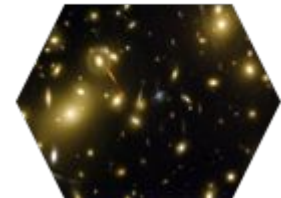
Lentillage fort  
(strong lensing)



Supernova Ia



Amas de galaxies

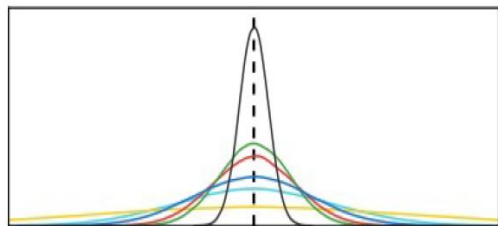


- **Galaxy clustering:** a priori, DESI fera mieux ou pareil mais avant → 3x2pt
- **Supernova Ia:** apport des SN Ia de LSST après LEMAÎTRE ? Si la stratégie d'observation est favorable, LSST devrait améliorer la partie  $0.1 < z < 0.6$  (early science avec les deep fields de LSST)
- **Weak lensing:** la sonde phare de LSST → poste CPJ 2025 ?! 🙌
- **Combinaison de sondes et analyses jointes**

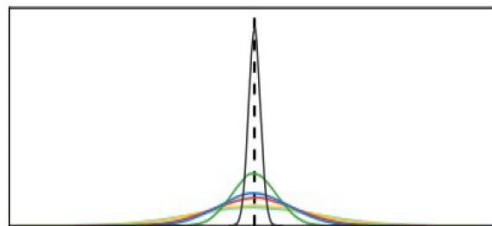
# Pourquoi du multi-sondes ?

LSST est le projet phare pour faire de la combinaison de sondes

LSST 1 year

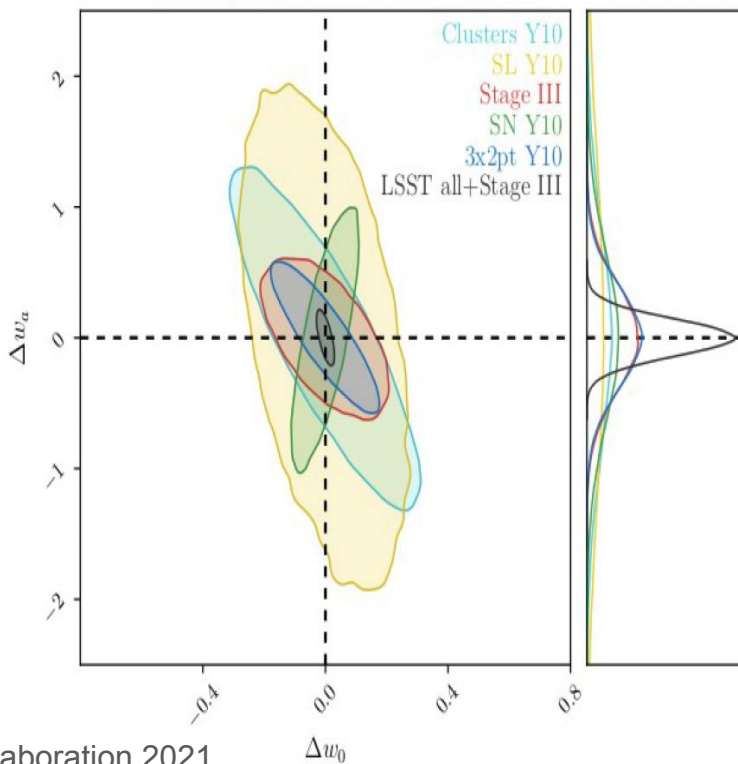
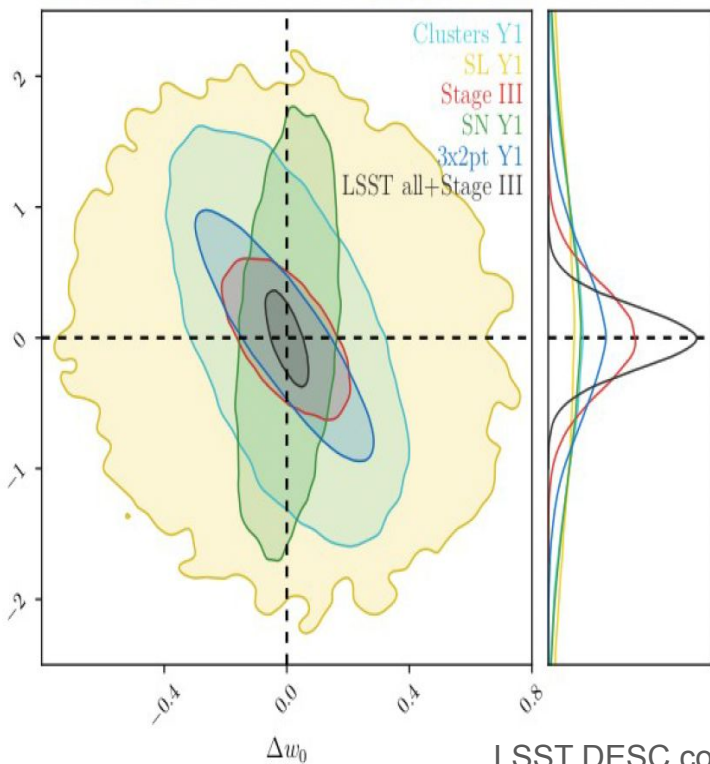


LSST 10 year



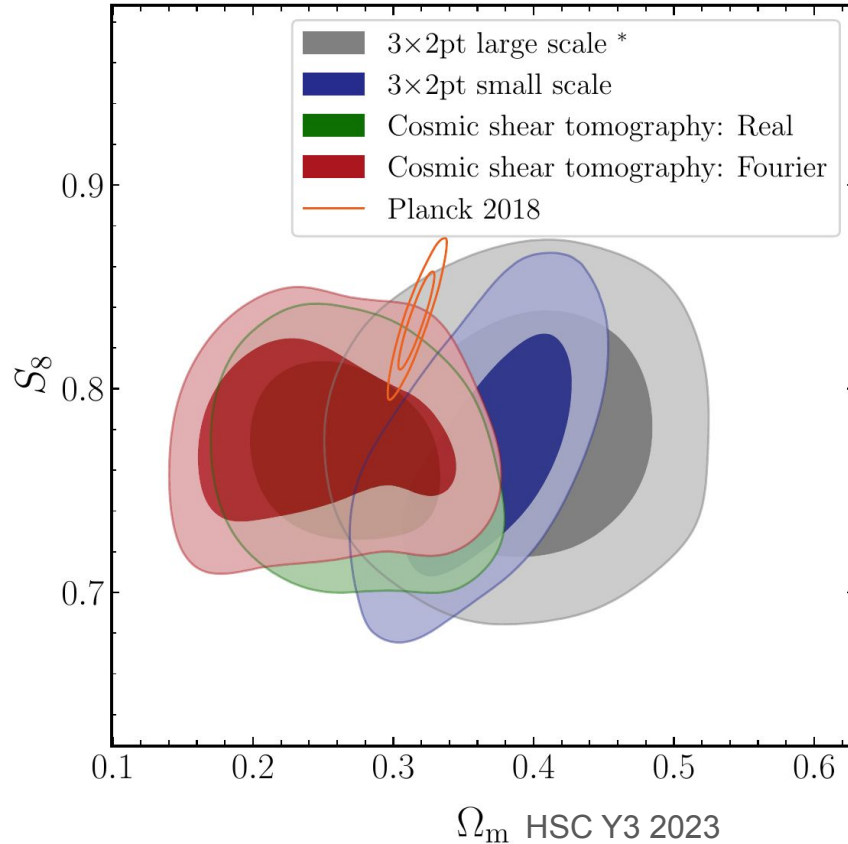
$$w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

2% sur  $w$   
(constant)



# Pourquoi du multi-sondes ?

## Exemple d'analyse jointe : le 3x2pts



- Corrélation entre ellipticités des galaxies :  $\langle \text{shear}, \text{shear} \rangle$



- Corrélation entre positions des galaxies :  $\langle \text{galaxy}, \text{galaxy} \rangle$

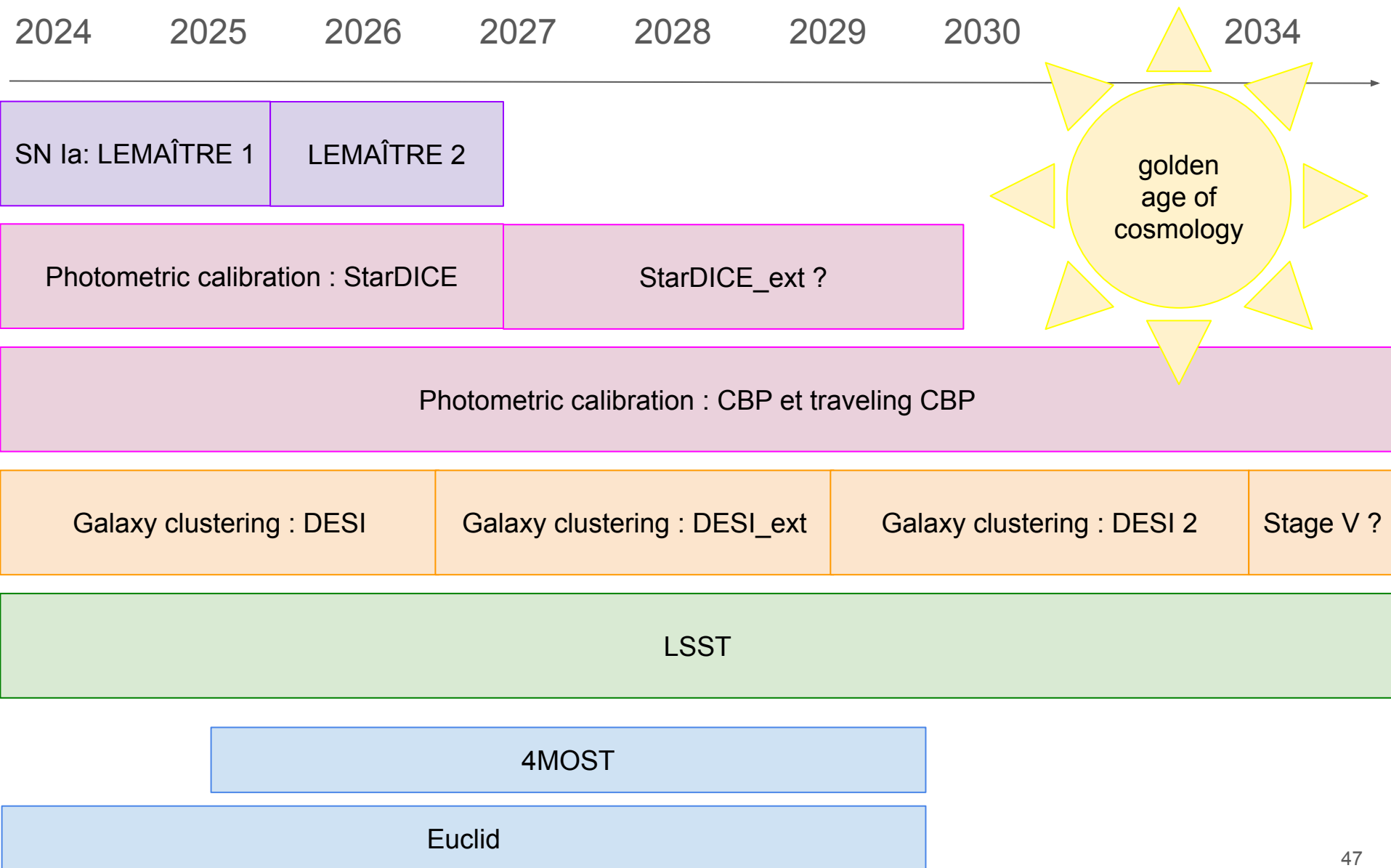


- Corrélation croisée forme/position :  $\langle \text{shear}, \text{galaxy} \rangle$

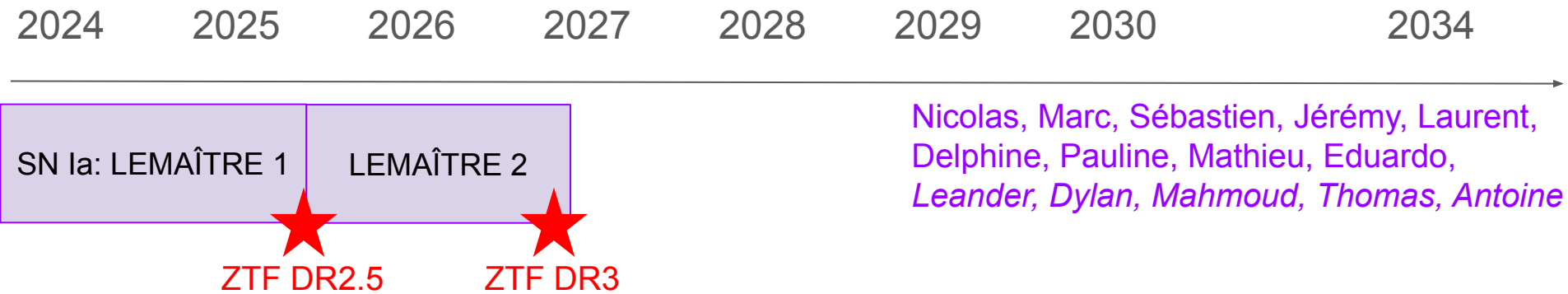


Mais chaque sonde individuelle nécessite son propre pipeline et un traitement des effets systématiques à la hauteur de la précision statistique

# Projets au LPNHE et timeline



# SN Ia: Pipeline LEMAITRE



Nicolas, Marc, Sébastien, Jérémy, Laurent, Delphine, Pauline, Mathieu, Eduardo, Leander, Dylan, Mahmoud, Thomas, Antoine

## Milestone 1: LEMAITRE

- Correction des effets instrumentaux (“pocket effect”, “brighter-fatter”)
- processing des données: des données brutes aux courbes de lumière standardisées
- 1ère calibration par StarDICE

cf posters de Dylan et de Mahmoud

## LEMAITRE 2

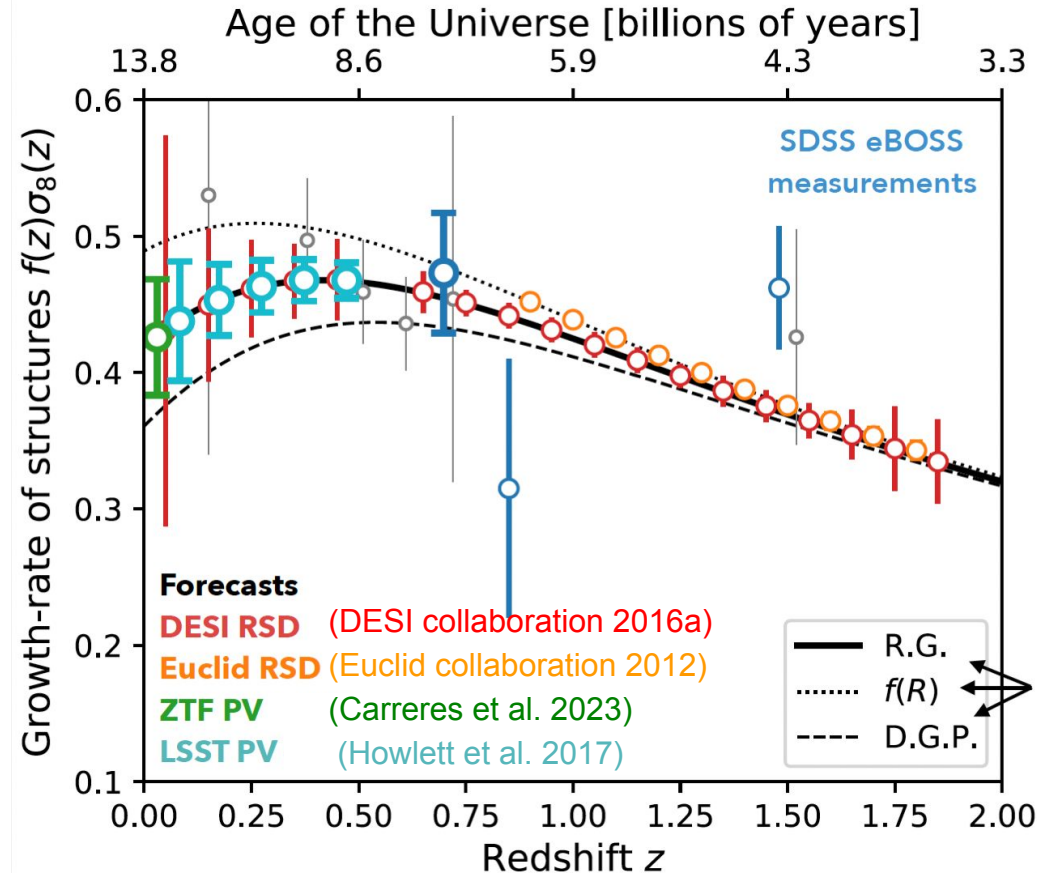
- basé sur le pipeline existant développé et validé pour LEMAITRE
- utilise de nouvelles données : ZTF DR3 + DES Y5

## Transition vers LSST (2025-2027)

- pertinence de LSST pour SN Ia: Early science sur un champ profond



# SN Ia: vitesses particulières



A  $z < 0.1$ , précision de DESI (BGS) limitée par la variance cosmique.

→ **Analyse jointe des galaxies BGS de DESI et des SN Ia de ZTF : extraire de l'information du champ de densité et du champ de vitesses des galaxies**

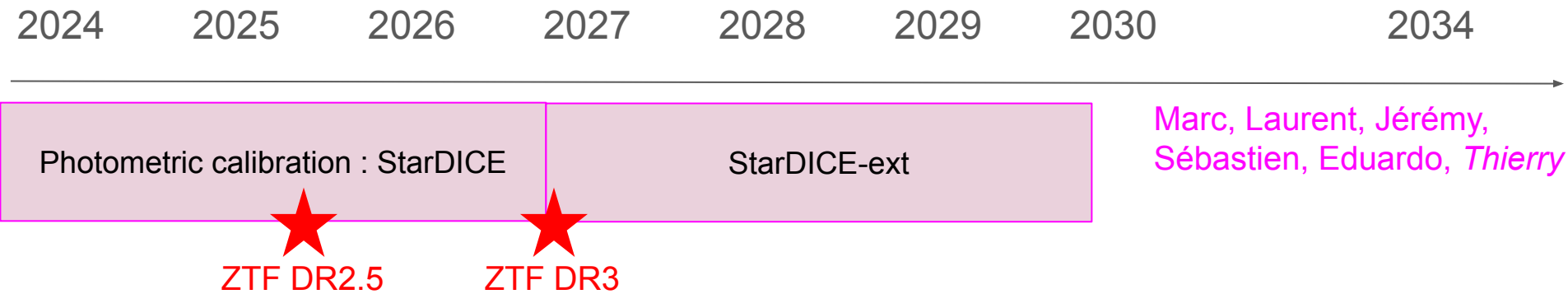
Différents modèles de gravité

cf poster DESI

Sujet de stage M2 2024 (Antoine Gilles--Lordet) et de thèse IN2P3 2023-2026 (Mahmoud Osman)

**1ère thèse (d'une longue série, on espère !) sur la combinaison de sondes dans le groupe cosmo**

# Photometric calibration: StarDICE



Marc, Laurent, Jérémy,  
Sébastien, Eduardo, *Thierry*

## Pre-survey (2023-2024)

- objectif: Utilisation des résultats pour la calibration pour LEMAÎTRE avec un premier lot de données (mi-2025)
- Estimation: 100 nuits photométriques pour battre l'atmosphère

cf poster de Thierry

## Full survey (2025-2026)

- objectif: calibration finale pour LEMAÎTRE 2 (fin 2026)
- Contrôle fin des effets atmosphériques avec ~100 nuits photométriques

## StarDICE-ext et réflexions sur l'instrumentation (>2027)

- Nouveau site pour StarDICE ?
- Étoile artificielle sur drone / Lucky imaging & caméras CMOS / Spectroscopie sans fente / Banc spectroscopique

# Photometric calibration: CBP

2024

2025

2026

2027

2028

2029

2030

2034

Photometric calibration : CBP

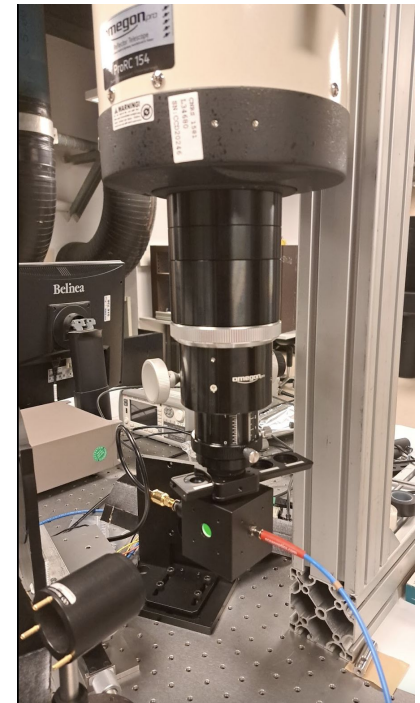
Jérémy, Laurent, Eduardo  
Thierry, Liliane (thèse 2024)

## CBP

- commissioning de LSST pour 2025
- calibration en continu pendant toute la durée du relevé LSST

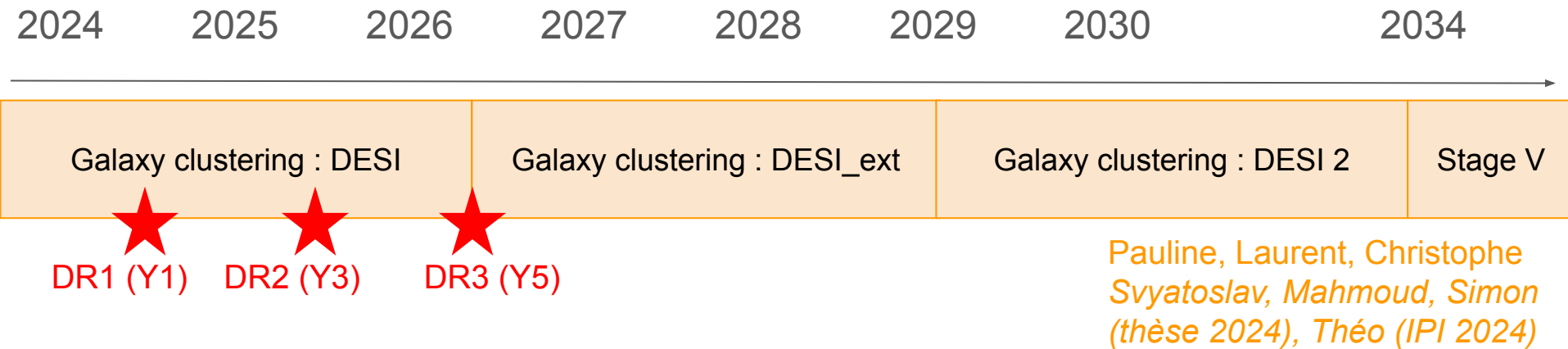
## Traveling CBP (2024-27)

- PUMA publié => *merci Evelyne et Carla !*
- construction d'ici fin 2024: tests matériel et pré-montage
- montage + calibration pour ZTF prévu pour 2025
- analyse d'ici mi-2026 pour LEMAÎTRE 2
- mesure du télescope auxiliaire de LSST
- etc...



Fiat lux !

# Galaxy clustering : DESI



## DESI @LPNHE

- Laurent, Pauline Builder status
- DR1
  - analyses BAO (avril 2024) CP IN2P3 → séminaire 10 juin
  - analyses Full-Shape / croissance des structures (septembre 2024)
  - analyse multi-traceur de DR1 BGS (Trusov, Zarrouk et al. in prep)
- DR2, DR3
  - analyses au-delà des méthodes standard: density-split (thèse Simon Bouchard)
  - analyse jointe DESI BGS x ZTF SN Ia (stage Antoine Gilles–Lordet et thèse Mahmoud Ahmed Emam Osman)
  - combinaison de sondes (3x2pt) et synergies avec LSST
  - multiplier les synergies avec Michael Joyce

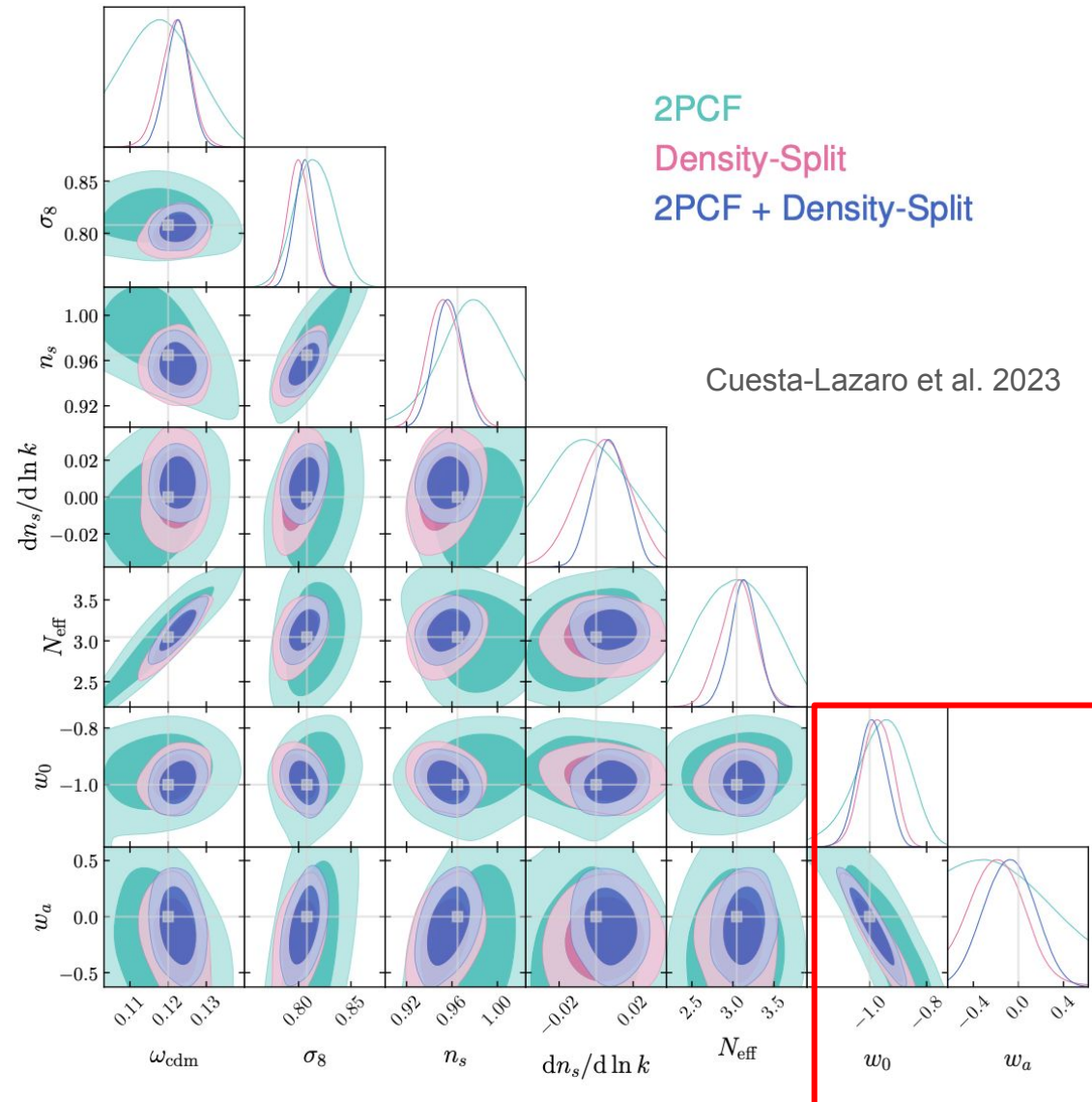
# DESI : au-delà des méthodes standard

**Objectif : extraire l'information non-Gaussienne et non-linéaire pour améliorer les contraintes sur l'énergie noire et les tests de la gravité**

Une méthode prometteuse : le density-split

→ sujet de thèse 2024 (Simon Bouchard)

- Modèle basé sur des simulations (émulateur avec NN)
- Inférence classique (avec une likelihood explicite) ou basée sur des simulations
- enjeu majeur : rendre ces méthodes non-standard robustes pour la cosmologie de précision



# Galaxy clustering : DESI > 2026

## DESI\_ext (2026-2028)

→ extension du footprint de 20%, augmenter la densité des LRG de 50% et augmenter la fibre-completeness des ELG

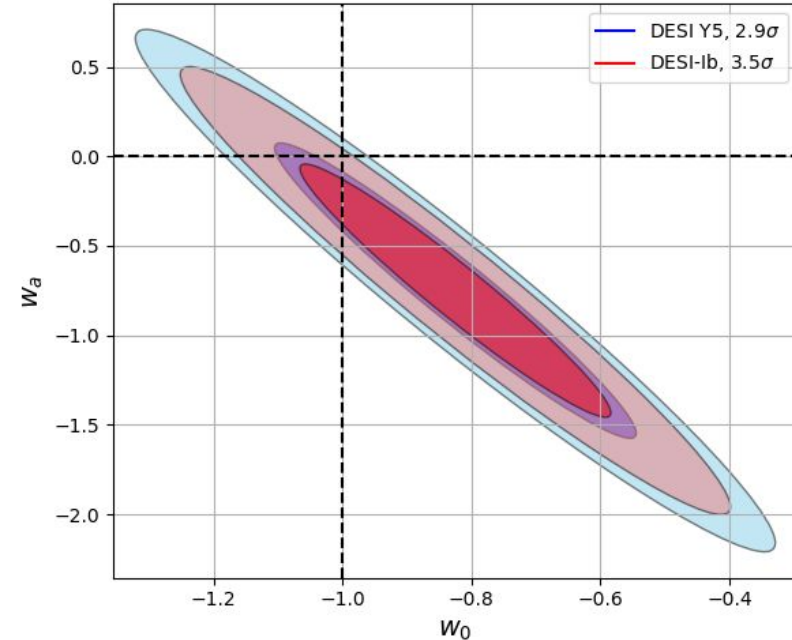
## DESI-2 (2029-2034)

- 2 programmes scientifiques: high density low-z et high-z (LBG, Ly-alpha emitters)
- R&D: Skipper-CCDs dans le bleu (Claire), upgrader les gratings, améliorer le refroidissement du miroir
- si contribution technique sur la calibration des skippers CCD, négocier plus de slots

## Stage V (> 2034)

- projet américain: Spec-S5 (Skipper-CCD, production)
- projet ESO: WST (CCDs courbes)
- le groupe se laisse encore 2-3 ans pour suivre l'évolution des deux projets
- Aura-t-on besoin de nouvelles données après DESI + LSST ?

→ 2 visiteurs du LBL le mois prochain: Julien Guy (25-28/06) et Anand Raichoor (01-02/07)  
avec un séminaire DESI-2/Spec-S5 le lundi 1er juillet



Credit: DESI collaboration

# LSST : Commissioning de la caméra



**Objectifs : s'assurer que la caméra ait la précision et la fiabilité requises pour la cosmologie de précision avec LSST**

## Les étapes clés :

- Installation et set-up
- calibration des senseurs et Brighter-Fatter
- calibration photométrique avec le CBP et AuxTel
- validation des performances pour évaluer la qualité des images et des données

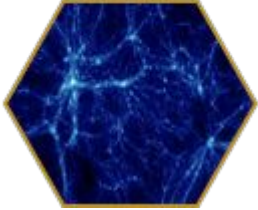
cf poster de Yassine



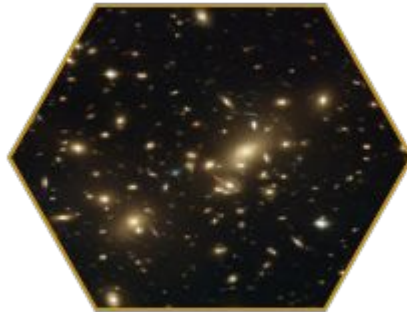
(petite pensée pour Pierre au Chili!)

# LSST : Science

Galaxy clustering

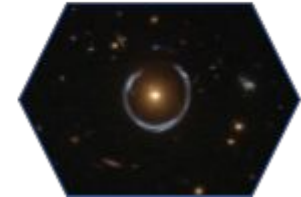


Cisaillement gravitationnel  
(weak lensing)



→ 10 milliards d'images  
de galaxies entre  $0 < z < 2$

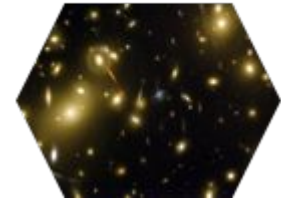
Lentillage fort  
(strong lensing)



Supernova Ia



Amas de galaxies



- **Galaxy clustering:** a priori, DESI fera mieux ou pareil mais avant → 3x2pt
- **Supernova Ia:** apport des SN Ia de LSST après LEMAÎTRE ? Si la stratégie d'observation est favorable, LSST devrait améliorer la partie  $0.1 < z < 0.6$  (early science avec les deep fields de LSST)
- **Weak lensing:** la sonde phare de LSST → poste CPJ 2025 ?! 🙌
- **Combinaison de sondes et analyses jointes**



# Weak lensing: Cosmic shear avec LSST

## Pré-requis observationnels

- beaucoup de galaxies: images profondes avec un imageur grand-champ
- beaucoup d'étoiles pour déterminer les distorsions d'images dues au télescope et à l'atmosphère (PSF)
- redshift photométriques (photo-z avec au moins 5 bandes)

## From now to Rubin-LSST

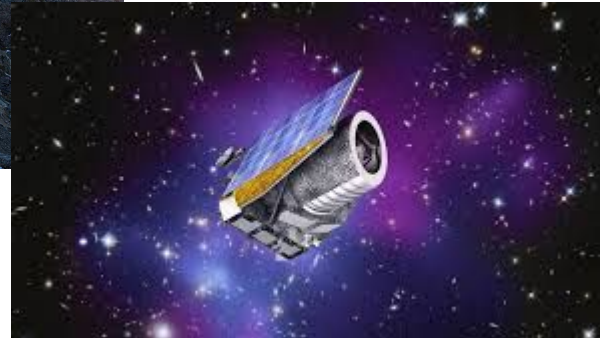
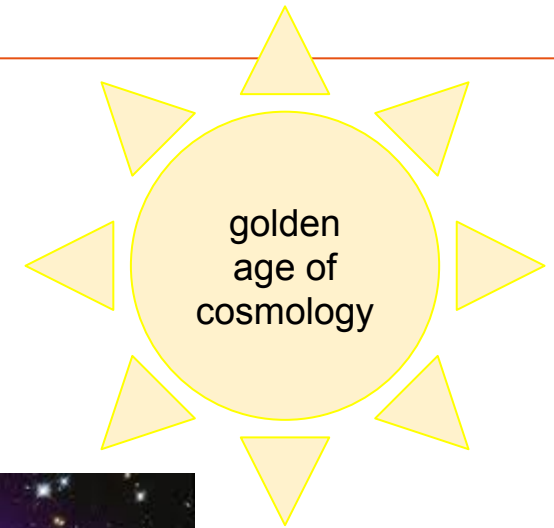
## Plusieurs défis majeurs associés au cosmic shear

1. calibration photométrique
2. estimateur non-biaisé du shear (Pierre, *Enya, Anna*) cf poster d'*Enya*
3. estimation de la PSF (Pierre, Pierre, *Yassine*, Pierre-François)
4. photo-z → synergie DESI/LSST pour calibration avec spectro-z
5. alignements intrinsèques de galaxies

	Now	Goal	How
Photometric Calibration (SNe)	0.5%	0.1%	Laboratory standards
Filter bandpasses (SNe)	1nm	0.1 nm	In situ measurement
Scale error of shear estimator	1%	0.1%	- Higher S/N cut - Image-based simulations
PSF size	~0.3%	0.1%	Physics in PSF model (PIFF)
Photo-z	0.01 to 0.02(1+z)	0.001	- More spectroscopic data - Mix with correlation-based approaches

Credit: Pierre Astier

# Conclusions



On est one grosse bande de chouette copains  
et on a un plan !