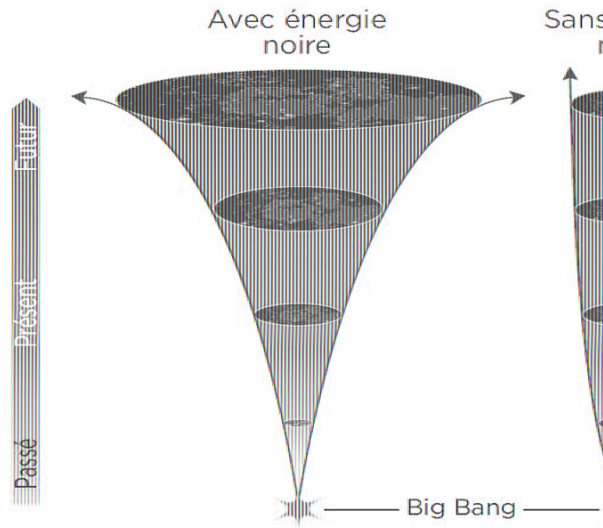


Groupe LSST - Vera C. Rubin Observatory

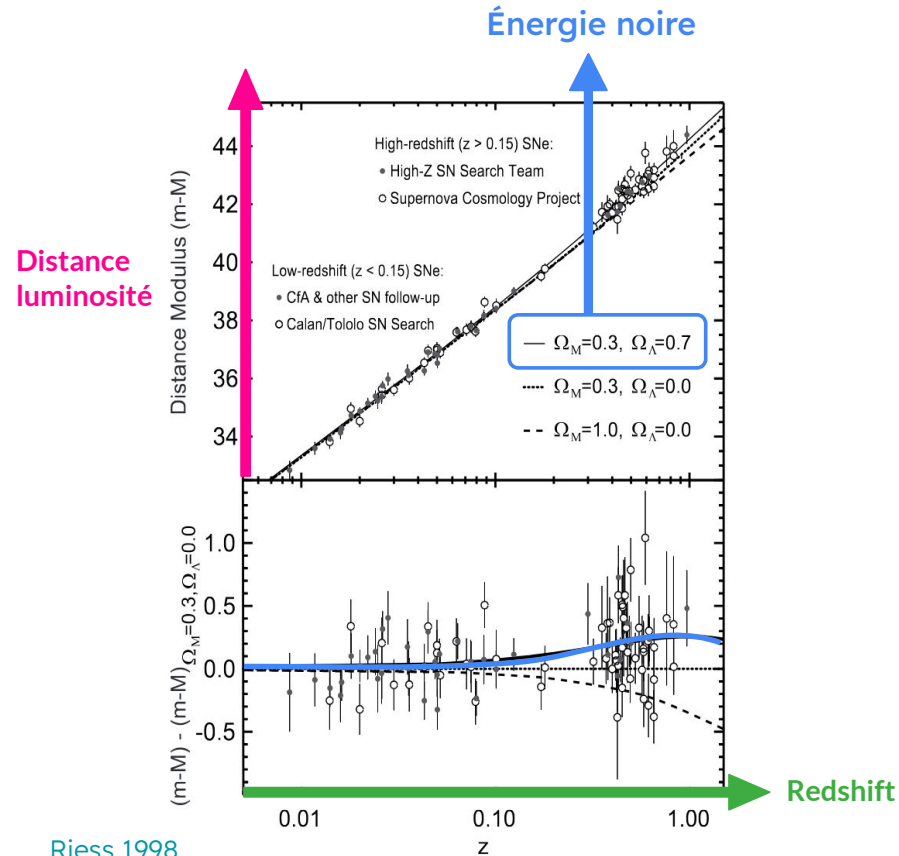
Jean-Eric Campagne, Sylvie Dagoret-Campagne, Julian Hamo, Angelo Lamure-Fontanini, Marc Moniez, Jérémy Neveu, Julien Peloton, Enya Van den Abeele

Cosmologie : Qu'est ce que l'énergie noire, sa nature ?



- Deuxième phase d'expansion accélérée (récente $z \sim 0.6$, après l'inflation, il y a 5 milliards d'années)
- Observable dans la mesure de différentes sondes cosmologiques étudiées dans Rubin-LSST, dont les **Supernovae de type Ia**

Cosmologie - Énergie noire



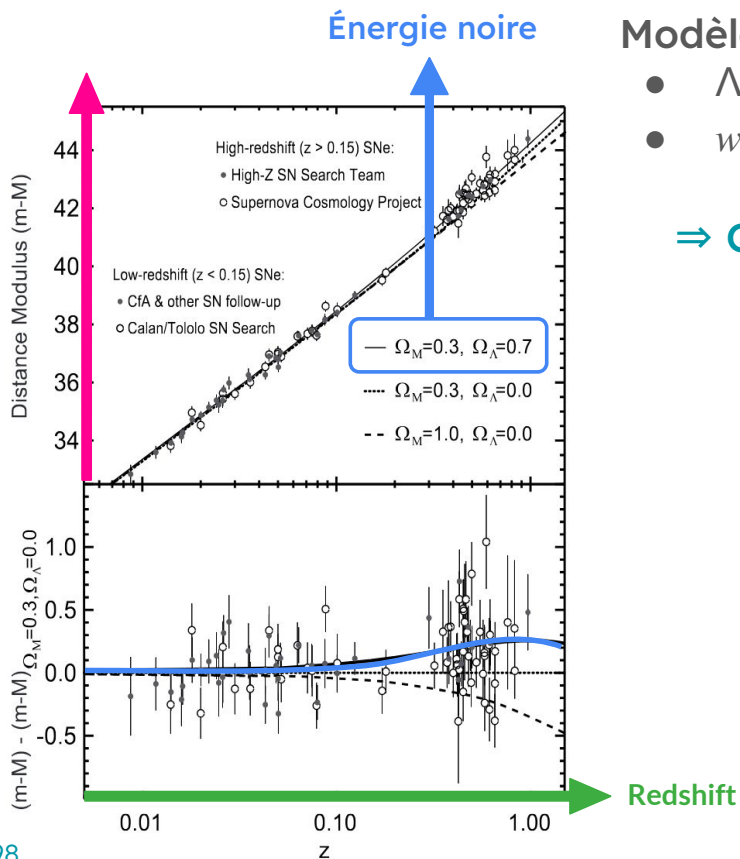
Cosmologie - Énergie noire

$$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(1+w)}$$

Modèles :

- Λ CDM (le modèle standard) : $w = -1$
- $w \neq -1$, constant (w CDM), ou dynamique ($w_0 w_a$ CDM)

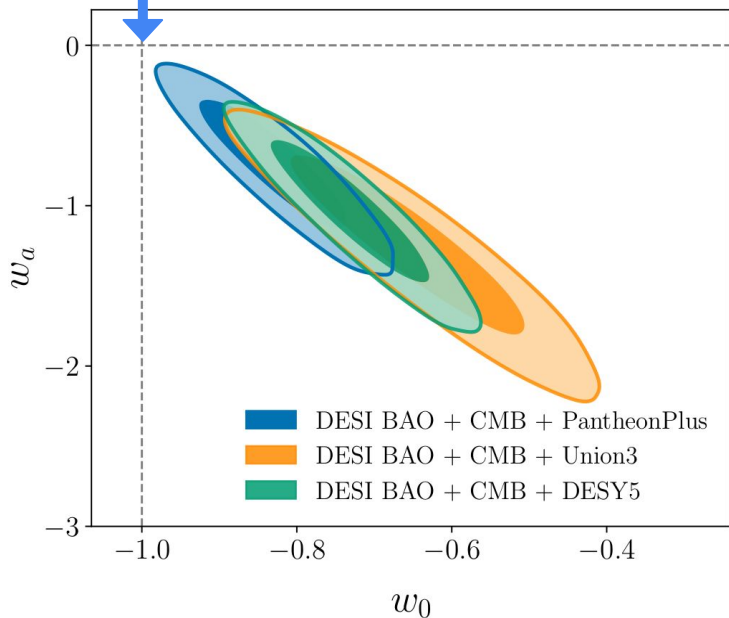
⇒ Quel modèle décrit le mieux les observations ?



Cosmologie - Énergie noire

$$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(1+w)}$$

Λ CDM



Constraints in the w_0 - w_a plane parameters
(DESI Collaboration et al., 2024)

Modèles :

- Λ CDM (le modèle standard) : $w = -1$
- $w \neq -1$, constant (w CDM), ou dynamique ($w_0 w_a$ CDM)

⇒ Quel modèle décrit le mieux les observations ?

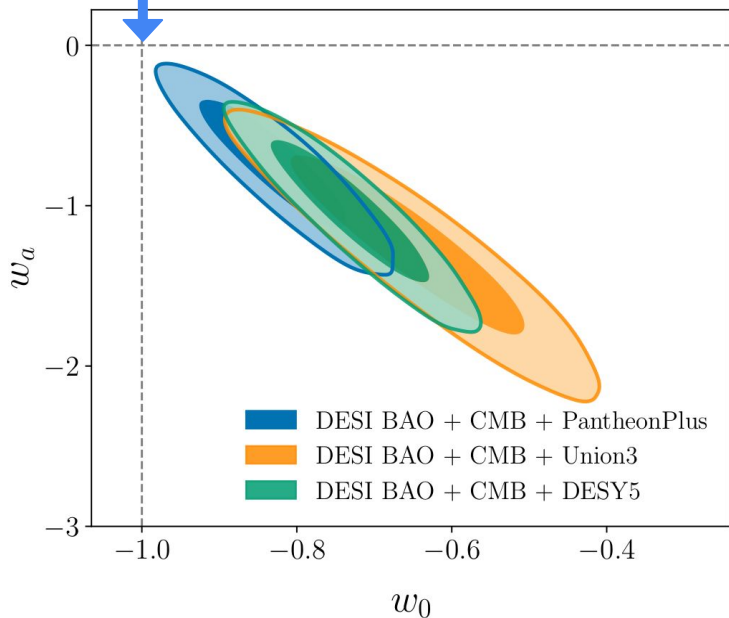
Combinaison de sondes :

- Supernovae de type Ia
- Fond diffus cosmologique (CMB)
- Oscillations acoustiques de baryons

Cosmologie - Énergie noire

$$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(1+w)}$$

Λ CDM



Constraints in the w_0 - w_a plane parameters
(DESI Collaboration et al., 2024)

Modèles :

- Λ CDM (le modèle standard) : $w = -1$
- $w \neq -1$, constant (w CDM), ou dynamique ($w_0 w_a$ CDM)

⇒ Quel modèle décrit le mieux les observations ?

Combinaison de sondes :

- Supernovae de type Ia
- Fond diffus cosmologique (CMB)
- Oscillations acoustiques de baryons

⇒ Tensions de 3.9σ avec Λ CDM ($w_0 = -1$, $w_a = 0$)

⇒ Mesures précises ? Ou y a-t-il une source de biais, notamment pour les SNe Ia ?

Supernova de type Ia

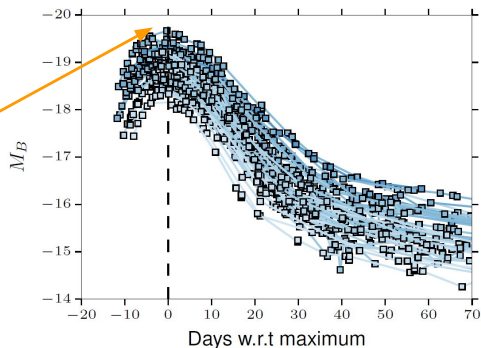
- Chandelle standard : objet de luminosité connue
- SNIa : Courbes de lumière caractéristiques, rapide pic maximal du flux lumineux, puis lente décroissance



Mesure des **distances** :

$$F_{\max} = \frac{L_{\max}}{4\pi D_L^2}$$

?



Courbes de luminosité absolue de SNe Ia proches dans la bande B (François Hazenberg)

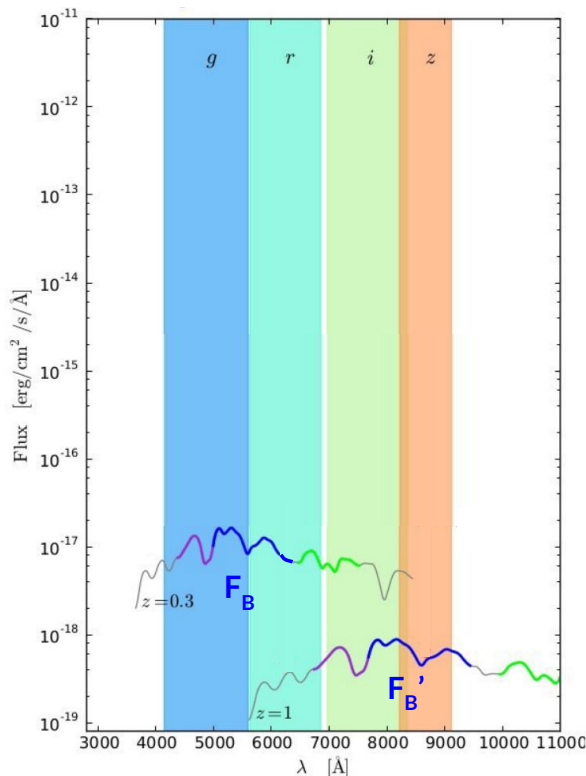
Supernova de type Ia

- Chandelle standard : objet de luminosité connue
- SNIa : Courbes de lumière caractéristiques, rapide pic maximal du flux lumineux, puis lente décroissance

Mesure des **distances** :

$$F_{\max} = \frac{L_{\max}}{4\pi D_L^2}$$

?



Spectre de SN Ia observé à travers les filtres d'un télescope

$$F_X = \int \lambda d\lambda \times \underbrace{S_{\star}(\lambda)}_{\text{Spectre de la SN}} \underbrace{T_X(\lambda)}_{\text{Transmission filtre X}} \underbrace{T_{\text{atm}}(\lambda)}_{\text{Transmission atmosphérique}}$$

Objectif : Mesurer relativement F_B issus de spectres de SN à différents redshift z

Mais :

- Spectres étendus sur plusieurs filtres
- F_B pour différents z mesuré dans différentes bandes

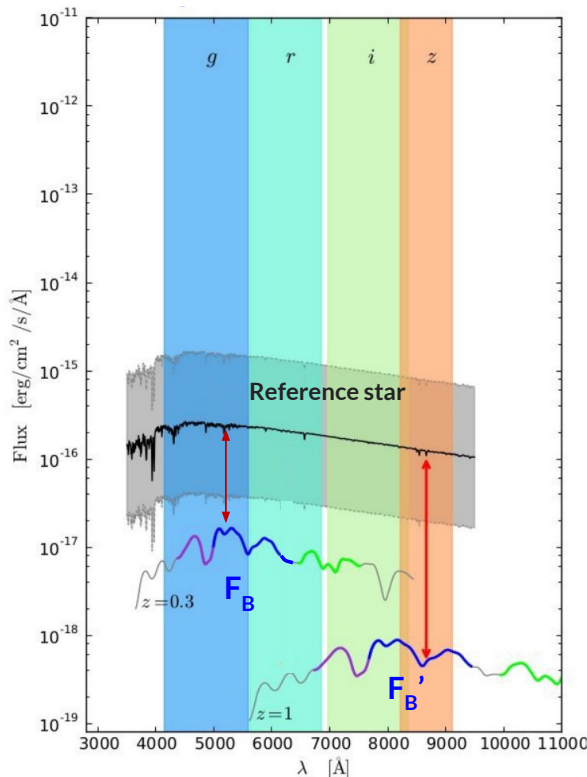
Supernova de type Ia

- Chandelle standard : objet de luminosité connue
- SNIa : Courbes de lumière caractéristiques, rapide pic maximal du flux lumineux, puis lente décroissance

Mesure des **distances** :

$$F_{\max} = \frac{L_{\max}}{4\pi D_L^2}$$

?



Spectre de SN Ia observé à travers les filtres d'un télescope

$$F_X = \int \lambda d\lambda \times \underbrace{S_{\star}(\lambda)}_{\text{Spectre de la SN}} \underbrace{T_X(\lambda)}_{\text{Transmission filtre X}} \underbrace{T_{\text{atm}}(\lambda)}_{\text{Transmission atmosphérique}}$$

Objectif : Mesurer relativement F_B issus de spectres de SN à différents redshift z

Mais :

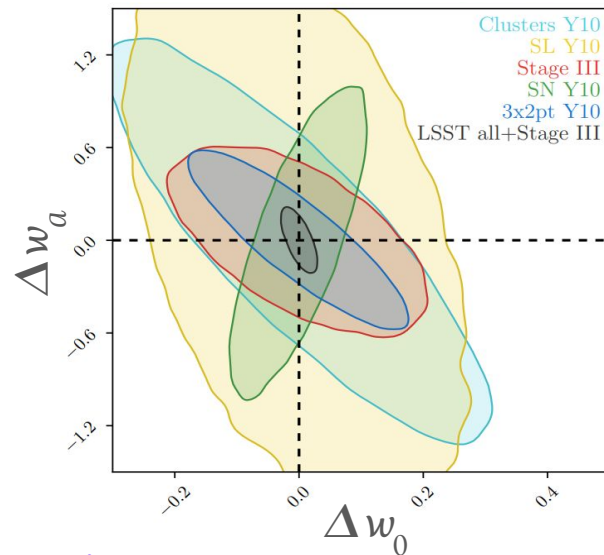
- Spectres étendus sur plusieurs filtres
- F_B pour différents z mesuré dans différentes bandes

Étoile de référence : Calibrer la transmission du flux pour chaque filtre → **Calibration CALSPEC**

Vera C. Rubin Observatory - LSST

LSST : Relevé photométrique multisonde

- **Large** : Champ de vue de 9.2 deg^2 , miroir primaire de 8m, caméra de 3.2 Gpix
- **Rapide** : Scan l'intégralité du ciel austral en 3 nuits
- **Profond** : 6 bandes (ugrizy), mag limite de 26.9 à 10 ans



[arxiv:1809.01669](https://arxiv.org/abs/1809.01669)

SN Ia avec LSST

- 1 000 000 SNIa au bout de 10 ans (avec les bonnes coupures qualité), dont **35 000 avec un spectre**
- 20 000 bonnes SNIa issues des DDF (~ 700 à $z > 0.8$)
- Diagramme de Hubble des SNIa construit à partir des magnitudes en bande B \rightarrow dépend fortement de notre capacité à convertir les magnitudes observées dans les bandes ugrizy \rightarrow **besoin de calibration photométrique !**

\rightarrow dispersion intrinsèque des SNIa : $\sigma_{\text{int}} = 0.15 \text{ mag}$

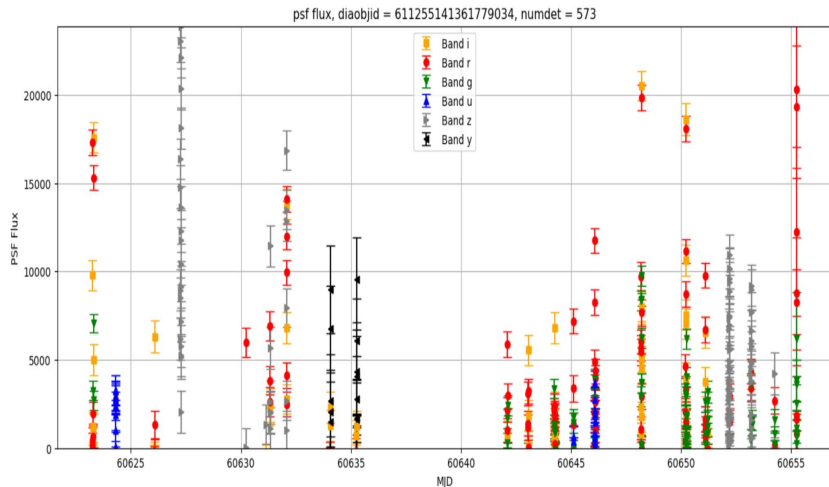
\rightarrow pour 35000 SNIa : $\sigma = \sigma_{\text{int}} / \sqrt{(35000)} \sim 1 \text{ mmag}$

\rightarrow **Systématique de la calibration photométrique au max d'1 mmag pour tirer pleinement parti de la puissance statistique d'LSST !**

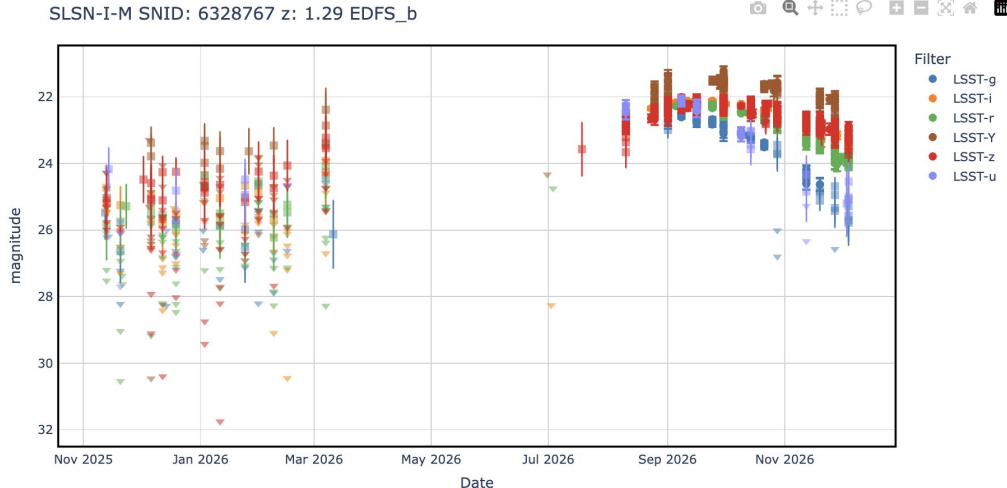
Défi pour reconnaître les SN / aux autres transitoires

- Échantillonnage temporel et dans les 6 bandes

Courbe mesurée durant le commissioning



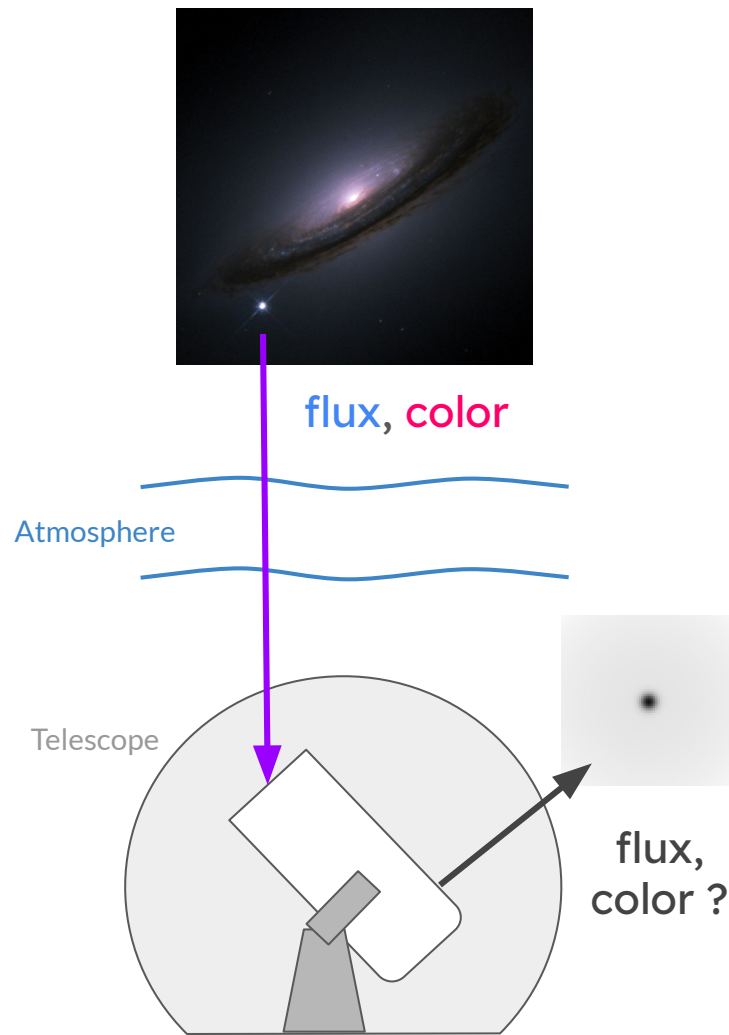
Courbes prédites par des simulations



→ Utiliser des outils avancés (IA par exemple) pour identifier la nature de ces objets

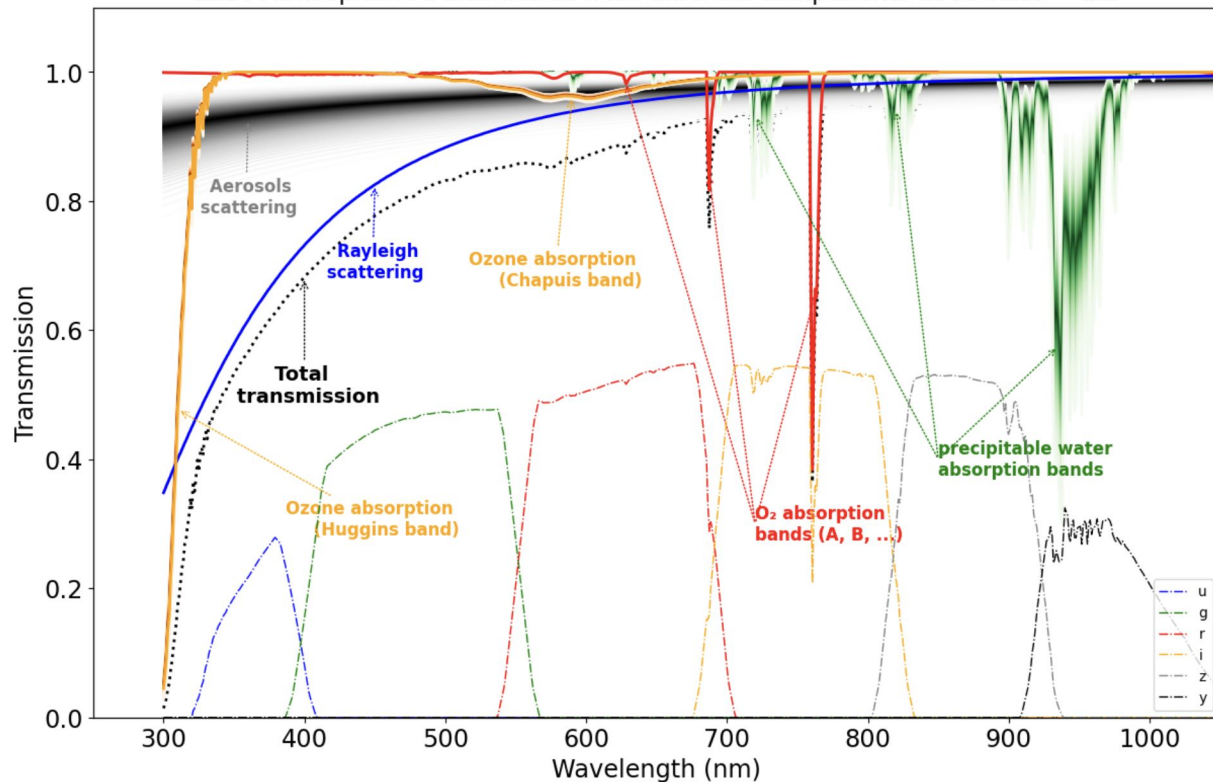
Calibration photométrique

- **Supernova de type Ia** : chandelles standard
→ **Besoin de mesures précises en flux et en couleur**
- **Atmosphère + télescope** : une mauvaise calibration va biaiser les mesures de flux + couleur
→ **Aujourd'hui : incertitudes instrumentales dominante dans l'estimation des paramètres de l'énergie noire**

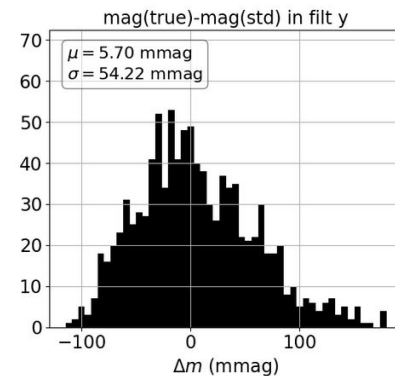


Les variations de transmission atmosphérique

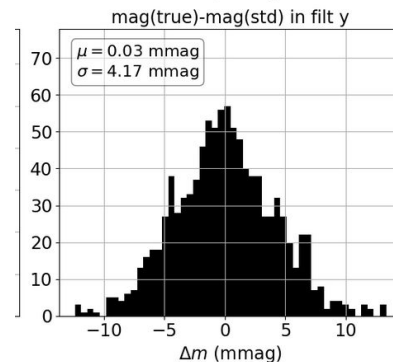
LSST Atmospheric transmission from different components at airmass = 1.2



Bande Y sans correction



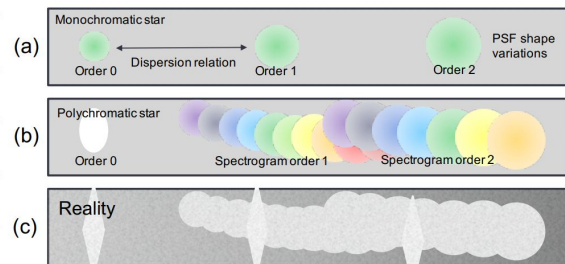
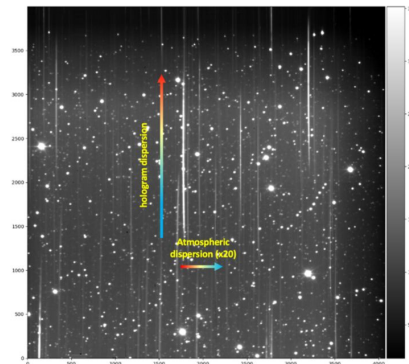
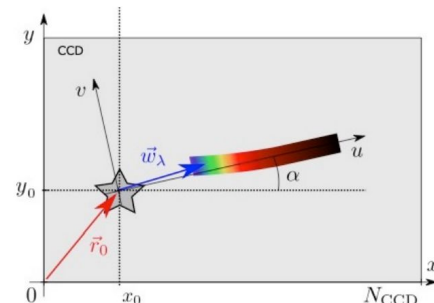
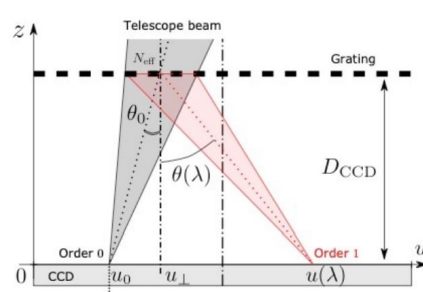
Bande Y avec correction



AuxTel

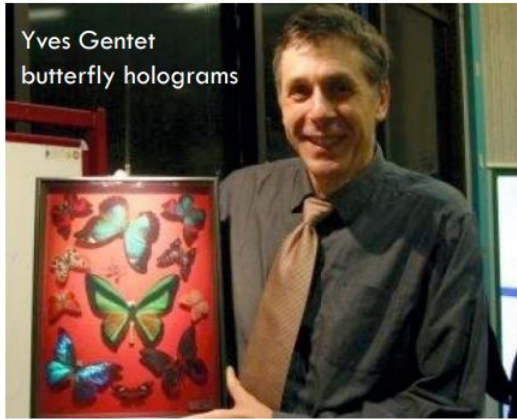
Objectif : mesurer la transmission atmosphérique sur site en parallèle de Rubin

- Télescope de 1.2m équipé d'un spectrographe
- Méthode : observer des étoiles de référence dont on connaît le spectre hors atmosphère
- Fit des paramètres atmosphériques sur +4000 spectres depuis janvier 2023 !

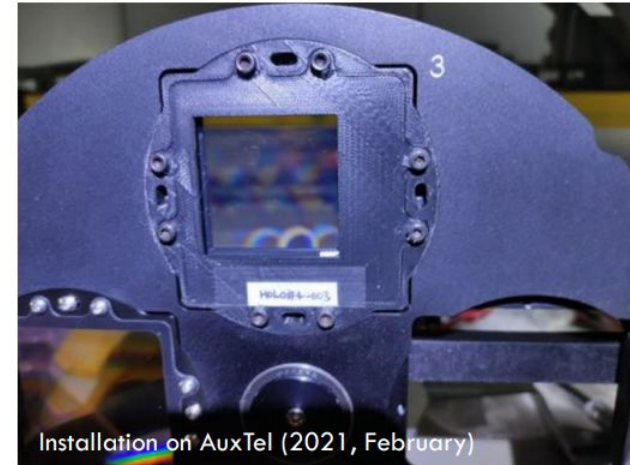


Spectrator

AuxTel : installation de l'hologramme



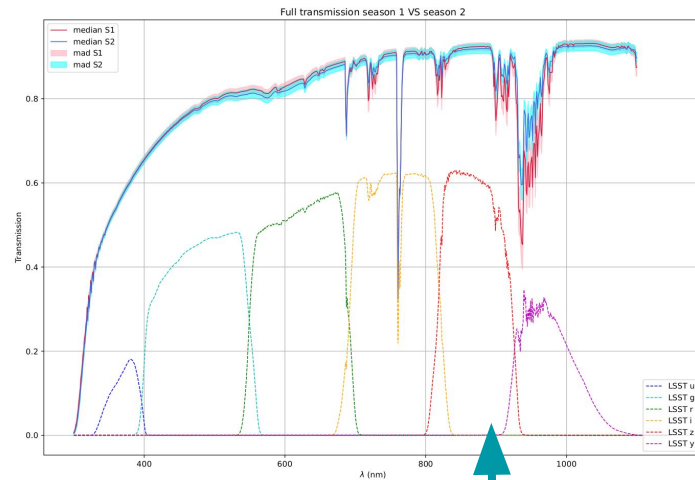
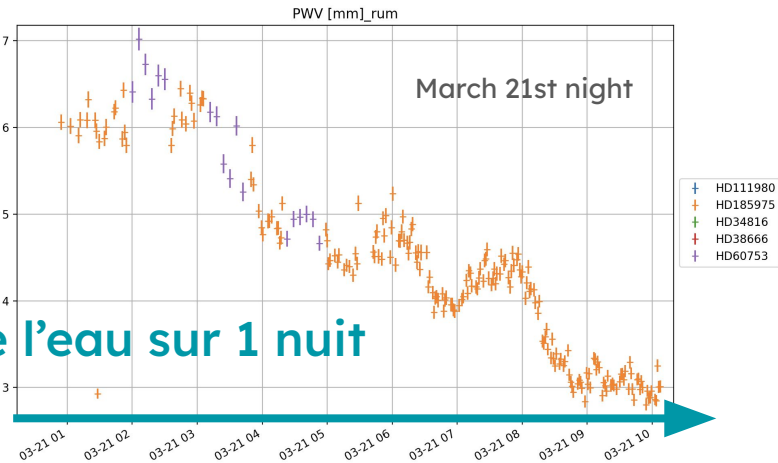
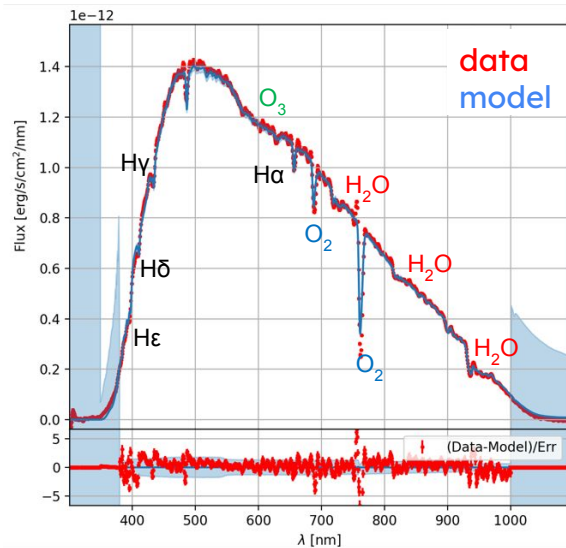
J. Neveu



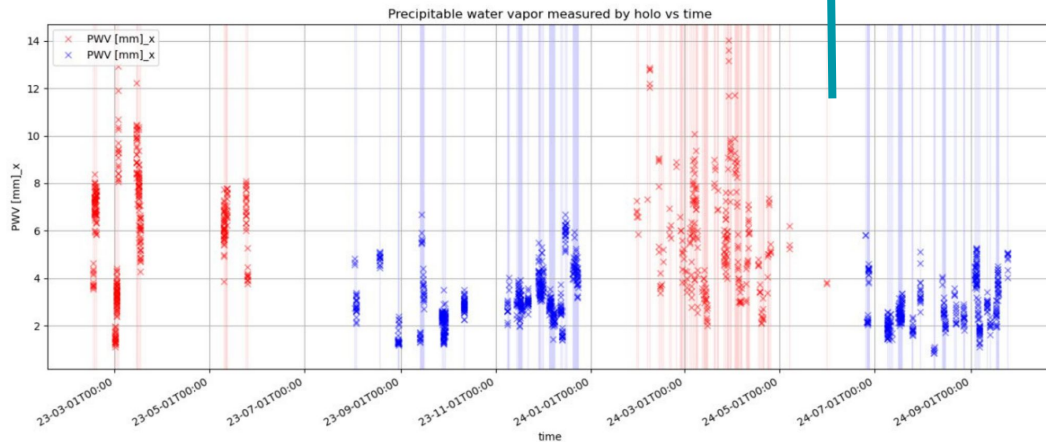
AuxTel

Variation de l'eau sur 1 nuit

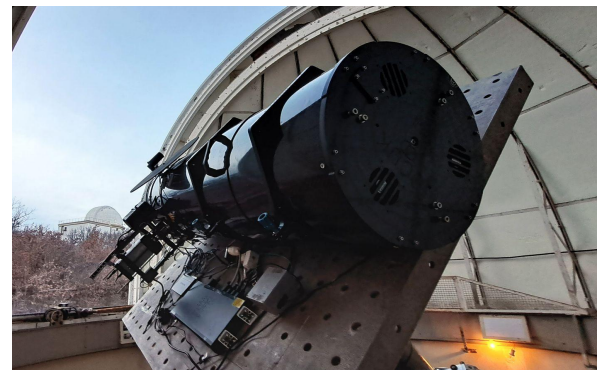
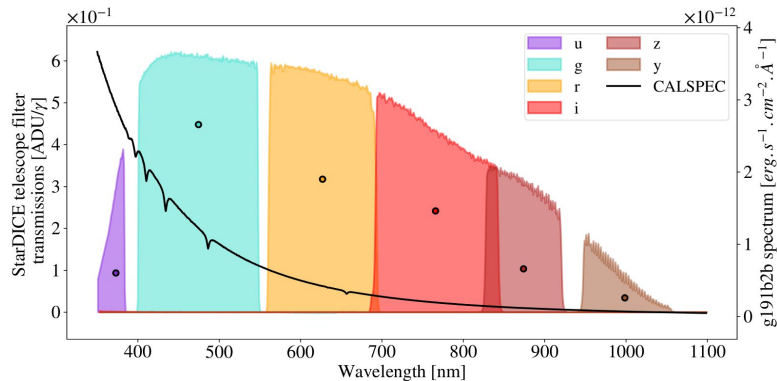
H β



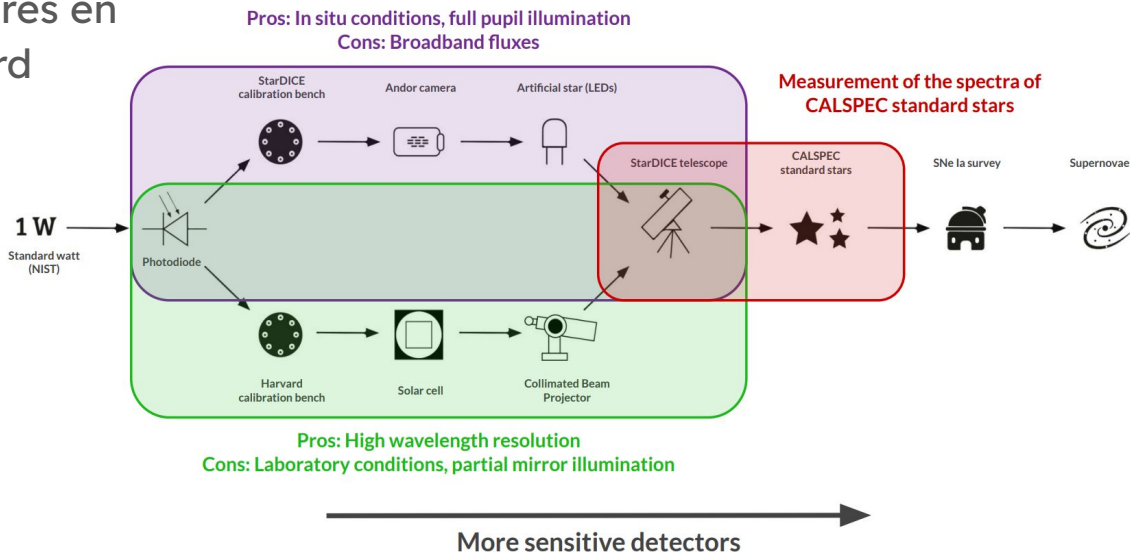
Effet saisonnier



StarDICE



Objectif : Chaîne métrologique pour transférer la calibration de flux de référence mesurés en laboratoire à celle des étoiles standard



StarDICE

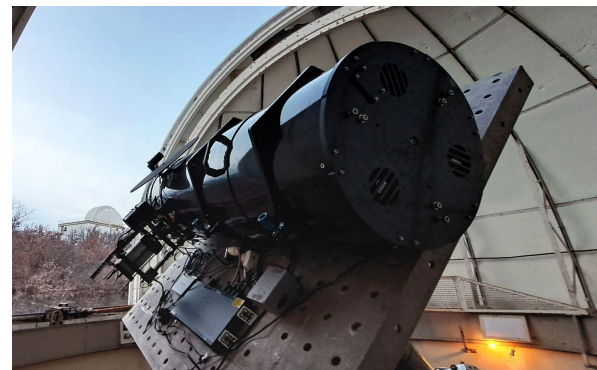
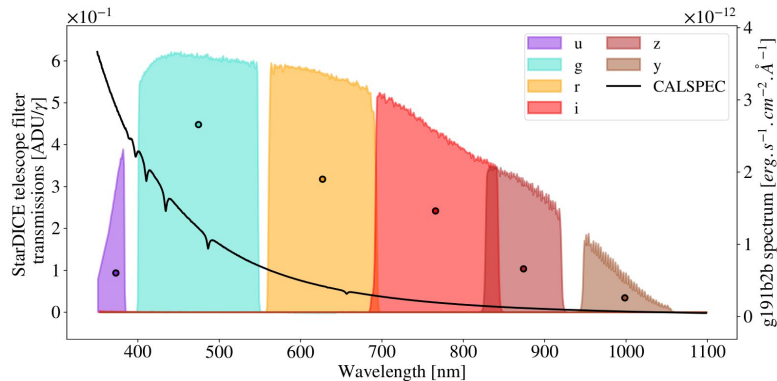
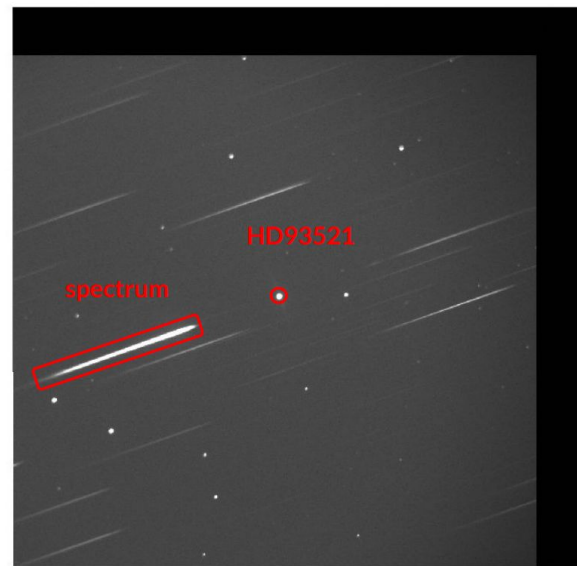


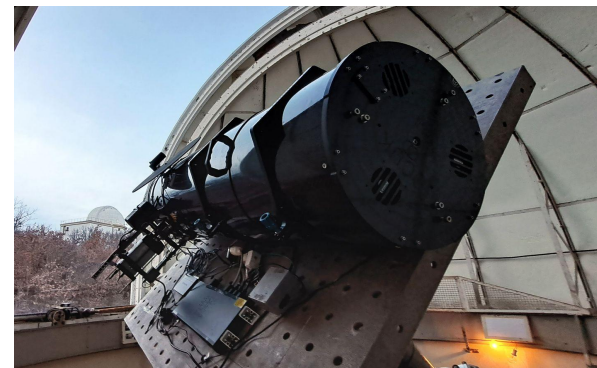
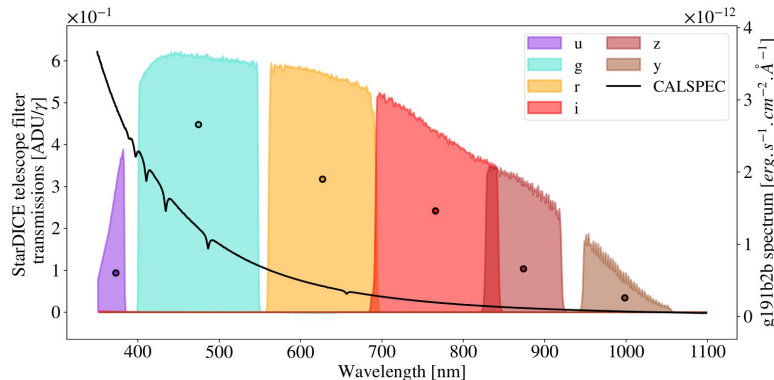
Image of HD93521 observed by StarDICE with the grating in the filterwheel

Objectif : Chaîne métrologique pour transférer la calibration de flux de référence mesurés en laboratoire à celle des étoiles standard

- Télescope de 40cm avec six bandes ugrizy + un réseau de diffraction

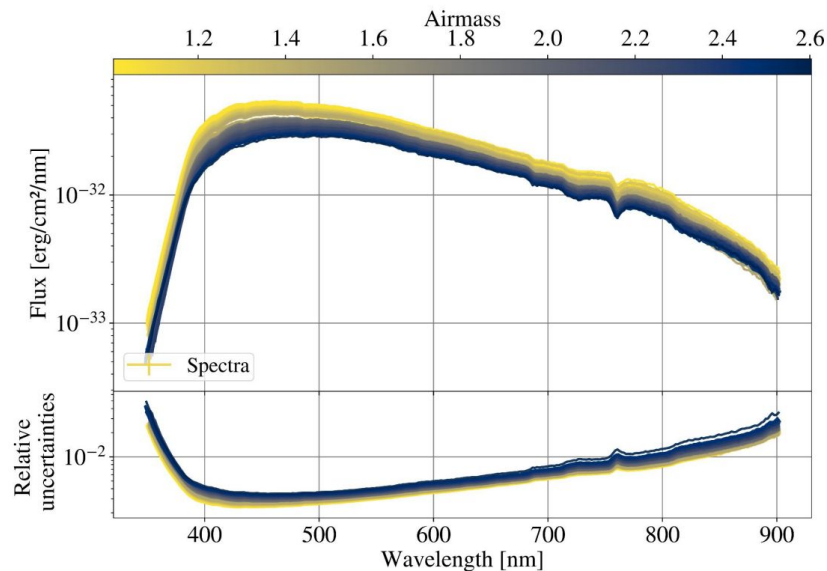


StarDICE



Objectif : Chaîne métrologique pour transférer la calibration de flux de référence mesurés en laboratoire à celle des étoiles standard

- Télescope de 40cm avec six bandes ugrizy + un réseau de diffraction
- 300 images à différents airmass \rightarrow spectres extraits avec une incertitude $< 0.1\%$ \rightarrow **méthode validée pour les étoiles isolées et brillantes !**



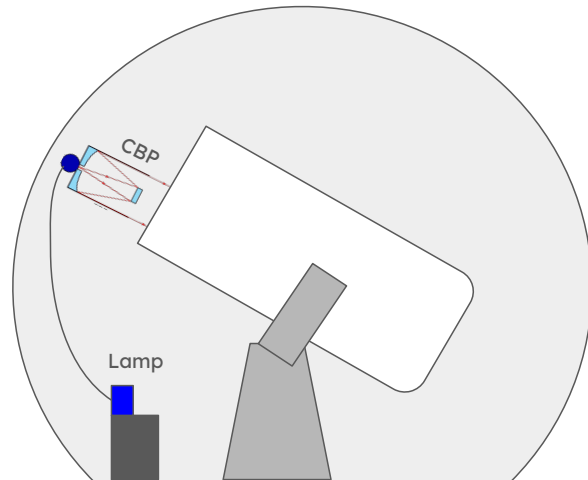
Traveling CBP

CBP (Collimated Beam Projector) → instrument tirant un faisceau de lumière parallèle monochromatique avec un **flux** et une **longueur d'onde** contrôlés (**pour mil / angström**)

→ Peut servir d'étoile artificielle

→ Outil puissant pour mesurer la transmission de télescope (filtres + optique)

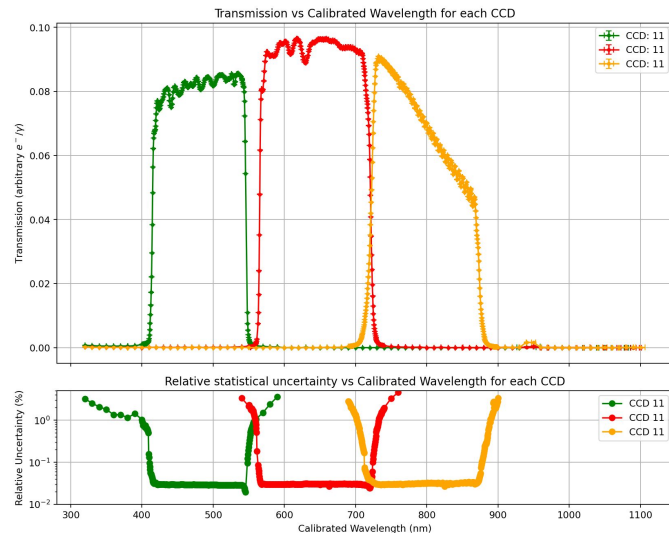
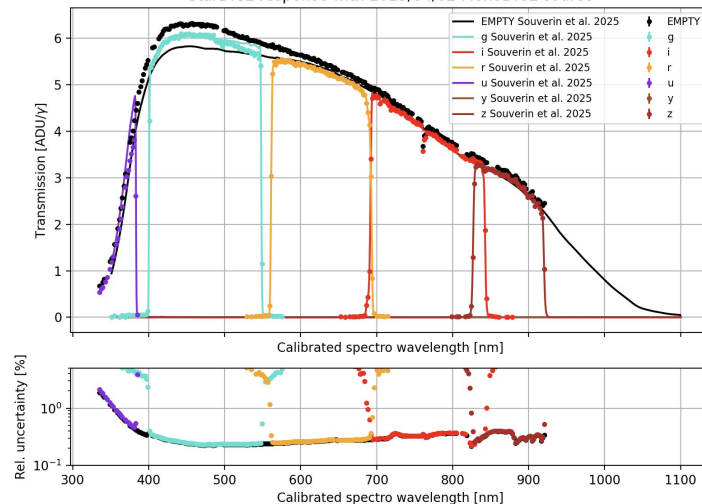
→ **Objectif : Réduire les incertitudes instrumentales de 1% à 0.1%**



Traveling CBP

Campagnes de mesures :

- Calibration des filtres de StarDICE (2025)
- Calibration des filtres de ZTF (2025)
- Calibration des filtres d'AuxTel (2026)



FINK

- Rubin : 10 millions d'alertes par nuit (1TB de data)
- FINK broker : analyse en temps réel des alertes de Rubin. Détecte, classe et redistribue les événements transitoires à la communauté scientifique mondiale.
- Objectifs scientifiques : astronomie multi-messagers, détection d'exoplanètes, microlensing, science extra-galactique (kilonovae, blazars, rayons gamma), étude du système solaire, détection de satellites...



IA et machine learning pour la cosmologie

Développement de méthodes de machine learning :

- Estimation des redshifts
- Détection d'événements
- Analyse de grands ensembles de données
- Génération d'image de galaxies

Participation à l'écriture de bibliothèques telles que Jax-Cosmo et Core Cosmology Library (CCL), notamment utilisée dans l'analyse des données de LSST

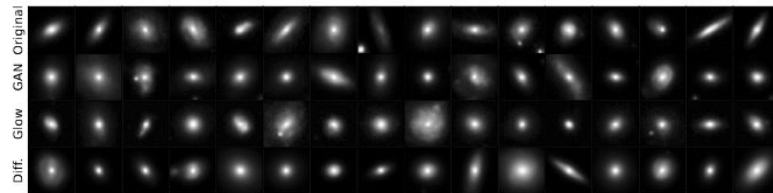


Figure 3. Examples of *validation* images from the original dataset (top row) and generated samples from different models trained with $N = 10^5$ images: the **light-weight-gan** GAN-based model (second row), the **Glow** flow-based model (third row), and the diffusion-based model with a U-Net denoiser (bottom row).



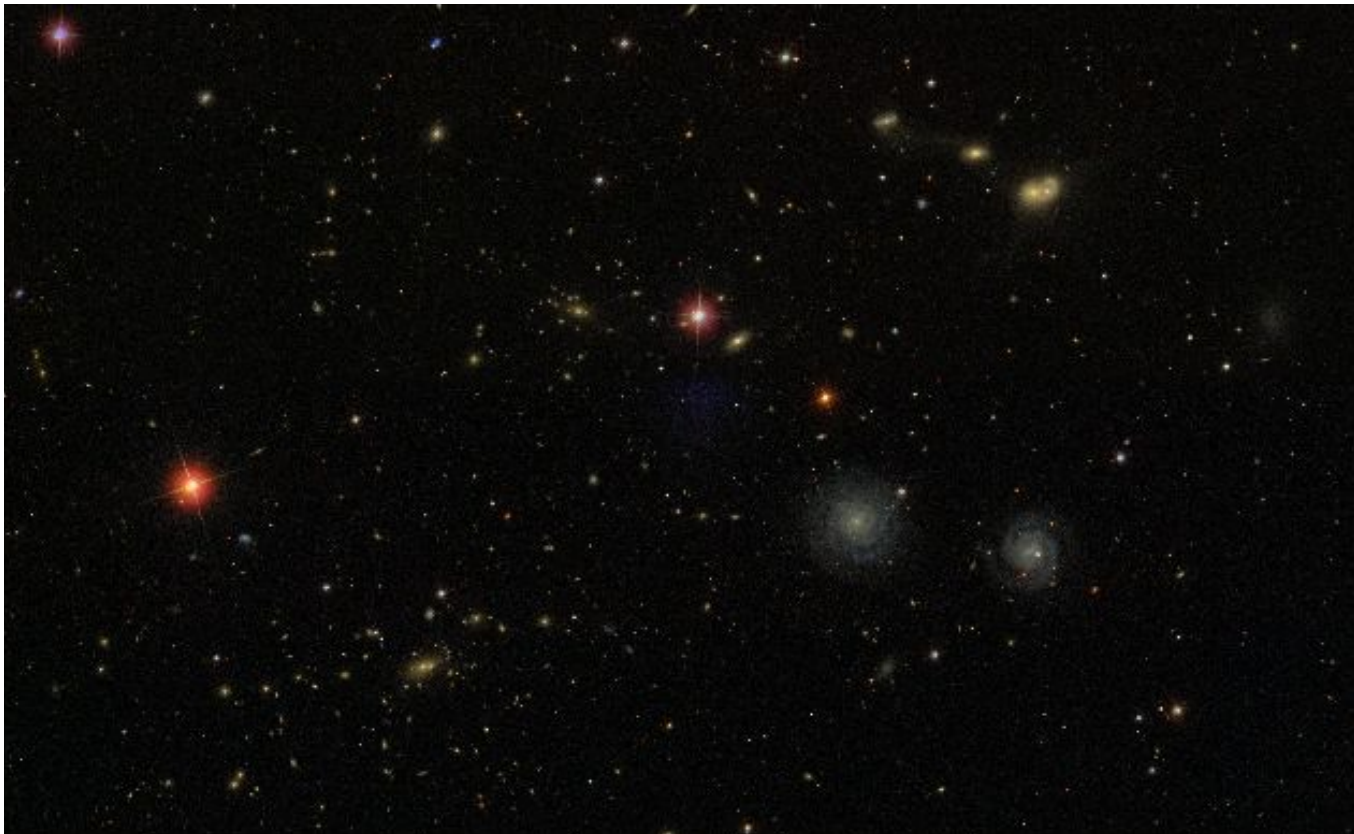
Équipe

Membres du groupe :

Jean-Eric Campagne, Sylvie Dagoret-Campagne, Jérémy Neveu, Julien Peloton, Marc Moniez, Enya Van den Abeele, Angelo Lamure-Fontanini, Julian Hamo

- **AuxTel** : Sylvie, Jérémy, Marc, Enya, Angelo
- **StarDICE** : Jérémy, Sylvie, Angelo, Marc, Enya
- **Traveling CBP** : Jérémy, Enya, Angelo
- **FINK** : Julien, Julian, Sylvie
- **IA / machine learning** : Jean-Eric, Angelo

Premières images : Rubin VS SDSS



Sloan Digital Sky Survey

Premières images : Rubin VS SDSS



Vera Rubin Observatory