

Mesure de la croissance des structures avec les galaxies du DESI BGS et les supernovae de type Ia de ZTF : vers une analyse jointe

Stage de fin d'études au LPNHE

Antoine Gilles-Lordet
encadré par Pauline Zarrouk et Nicolas Regnault

10 octobre 2024

Table of Contents

① Introduction

Contexte

Observations

Croissances des structures

② Chaîne d'analyse cosmologique avec SNe Ia

③ Exemples de contribution dans la chaîne LEMAÎTRE

④ Conclusion

Cosmologie

- Le modèle cosmologique basé sur la relativité générale le plus simple est Λ CDM
 - Décrit remarquablement bien les données
 - De nombreux programmes (Euclid, JWST, DESI, LSST...)...
 - ...pour différentes sondes cosmologiques : CMB, lentillage gravitationnel faible, SNe Ia, galaxies

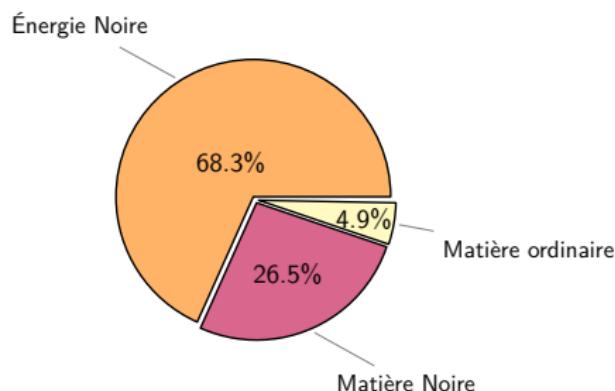


Figure 1 – Composition de l'Univers tel que décrit par Λ CDM

Energie noire

- L'énergie noire a été introduite pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'univers
 - Cette accélération a été découverte à l'aide de SNe Ia par S. Perlmutter, B. Schmidt et A. Riess (Prix Nobel 2011)
 - Constante cosmologique Λ ? Energie noire ? Modèle alternatif de gravité ?

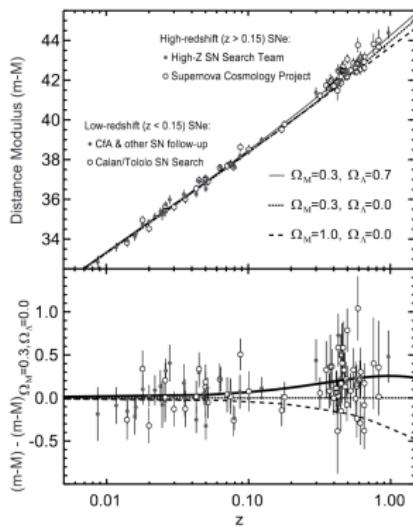


Figure 2 – Diagramme de Hubble construit par Perlmutter et Schmidt en 2003

Supernovae de type Ia

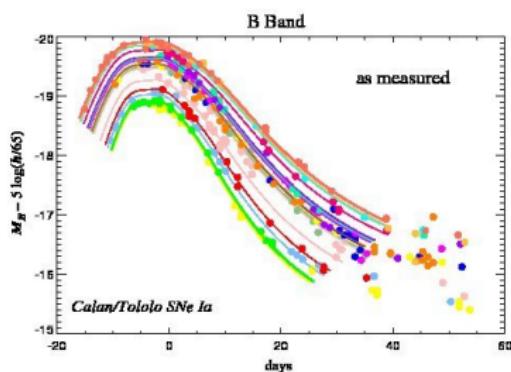


Figure 3 – SNe Ia avant normalisation du stretch x_1

Les magnitudes des SNela sont décrites par la formule de Tripp

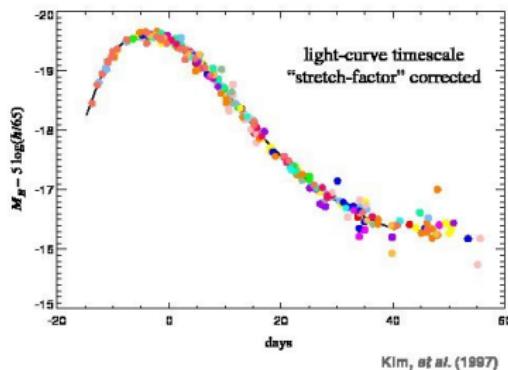


Figure 4 – SNe Ia après normalisation du stretch x_1

$$M_{b,SN}^* = M_b - \alpha x_{1,SN} + \beta c_{SN} + n(\sigma_{int}) \quad (1)$$

Zwicky Transient Facility

- Situé à l'Observatoire de Palomar, utilise le telescope P48
 - 1,22m de diamètre pour un champ de 47 degrés carré
 - 16 CCDs de 6144×6160 pixels
 - Couvre le ciel de l'hémisphère nord deux fois par nuit



Figure 5 – Telescope P48 utilisé par ZTF

Credits : Caltech/Palomar

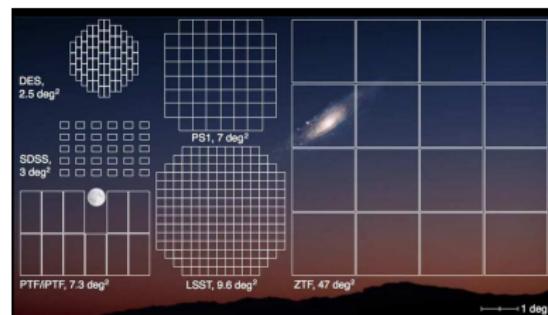


Figure 6 – Comparaison à l'échelle des champs de plusieurs relevés Credits : Caltech/Palomar

Observations des SNe Ia

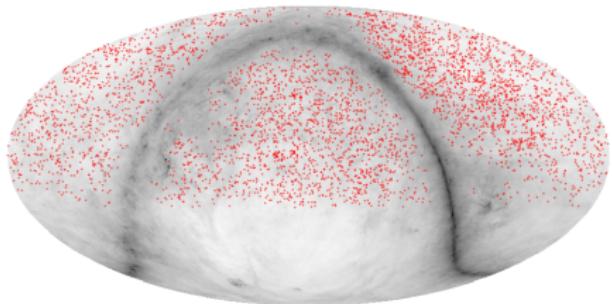


Figure 7 – SNe la observées par ZTF sur fond de carte de poussières déterminée par Planck

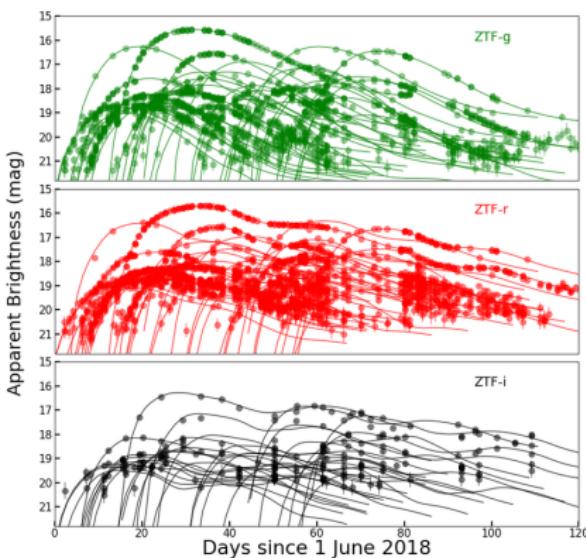


Figure 8 – Exemples de courbes de lumière de SNe Ia

Credits : Caltech/Palomar

Dark Energy Spectroscopic Instrument

- Utilise le Mayall Telescope à l'Observatoire de Kitt peak (USA)
- 4m de diamètre pour un champ de 8.0 degrés carré
- 5 000 fibres robotisées avec une pose de 30 minutes, au lieu de 1 000 en 1h30
- ~ 40 millions de galaxies ciblées
- Prise de données débutée en 2021, pour 7 ans



Figure 9 – Observatoire de Kitt Peak

Credits : University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory

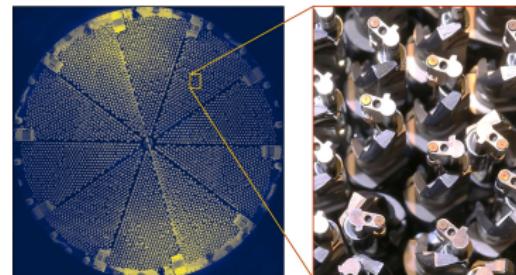


Figure 10 – Plan focal du Mayall Telescope et zoom sur les robots

Credits : DESI Collaboration

Observations des galaxies

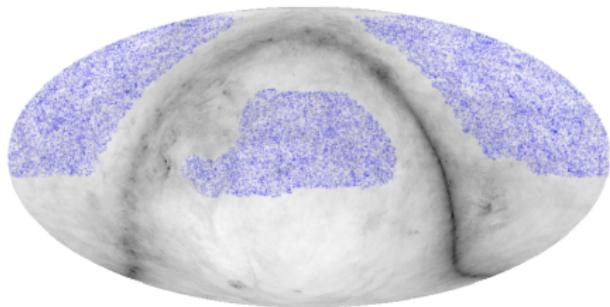


Figure 11 – Galaxies observées par DESI sur fond de carte de poussières déterminée par Planck

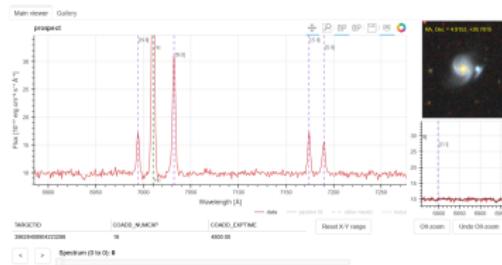


Figure 12 – Exemple de spectre mesuré par DESI

Credits : DESI Collaboration

Observations du même ciel

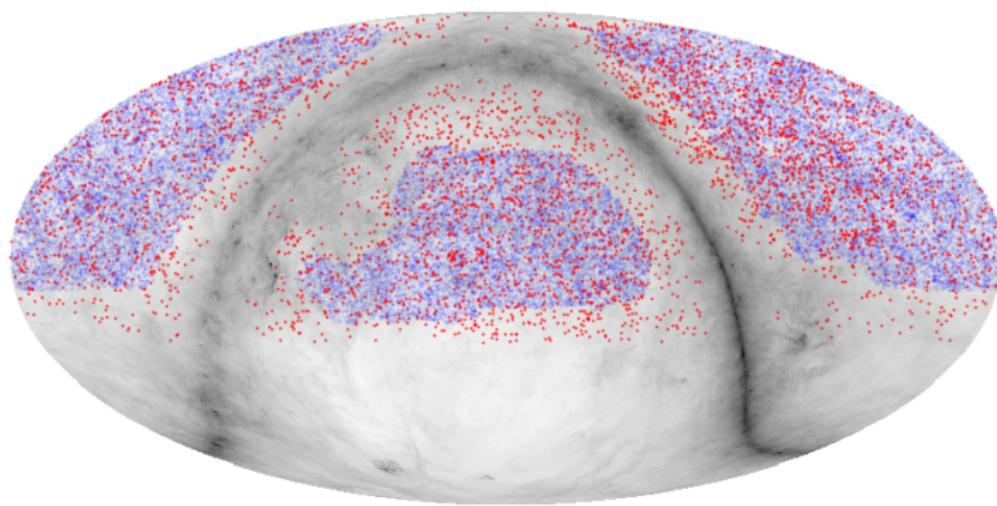
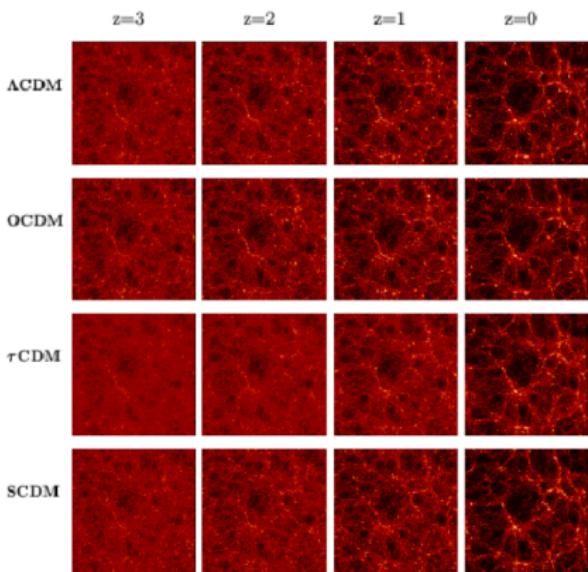


Figure 13 – SNe Ia de ZTF et galaxies de DESI

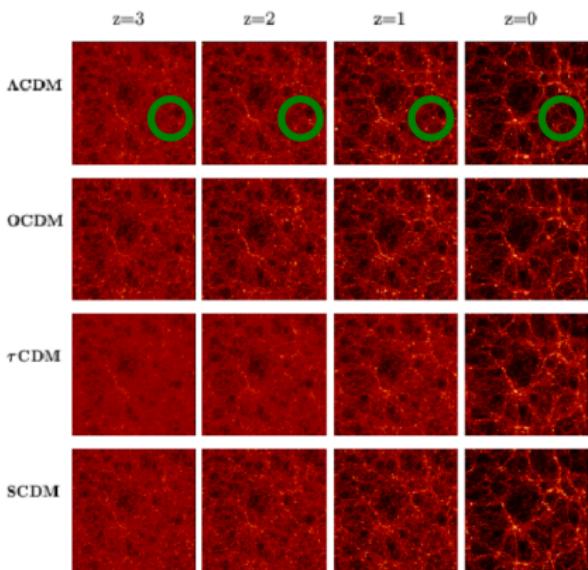
Croissance des structures dans l'Univers



- Taux de croissance des structures $f(z)$

Figure 14 – Formation des structures pour différentes compositions de l'Univers
Credits : Kauffmann, Colberg, Diaferio, and White

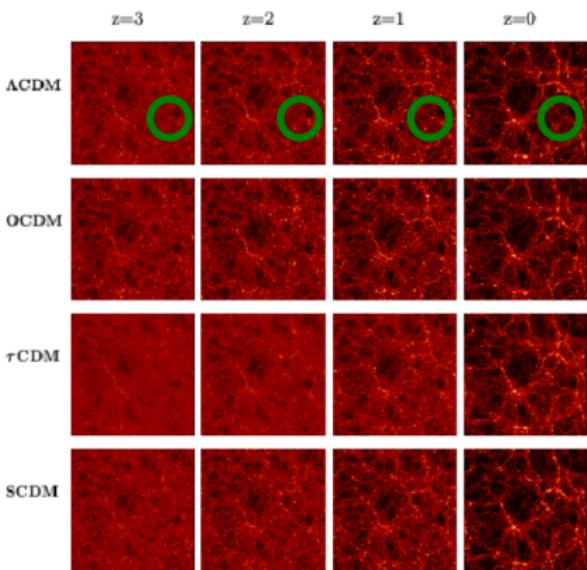
Croissance des structures dans l'Univers



- Taux de croissance des structures $f(z)$
- Écart-type de densité dans une sphère de 8 Mpc $\sigma_8(z)$

Figure 14 – Formation des structures pour différentes compositions de l'Univers
Credits : Kauffmann, Colberg, Diaferio, and White

Croissance des structures dans l'Univers



- Taux de croissance des structures $f(z)$
- Écart-type de densité dans une sphère de 8 Mpc $\sigma_8(z)$
- Paramètre composite $f\sigma_8$

Figure 14 – Formation des structures pour différentes compositions de l'Univers
Credits : Kauffmann, Colberg, Diaferio, and White

Analyse des structures

Clustering des galaxies :

- requiert de nombreuses galaxies
- peu performant à bas redshift

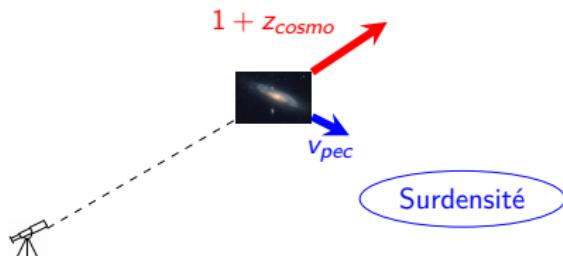


Figure 15 – Distortion des redshifts due aux vitesses particulières

Analyse des structures

Clustering des galaxies :

- requiert de nombreuses galaxies
- peu performant à bas redshift

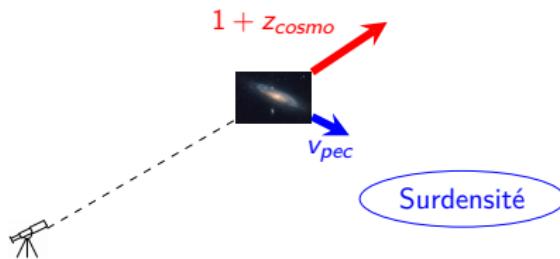


Figure 15 – Distortion des redshifts due aux vitesses particulières

Nouvelle sonde à bas redshift, les SNe Ia

- particulièrement performant à bas redshift

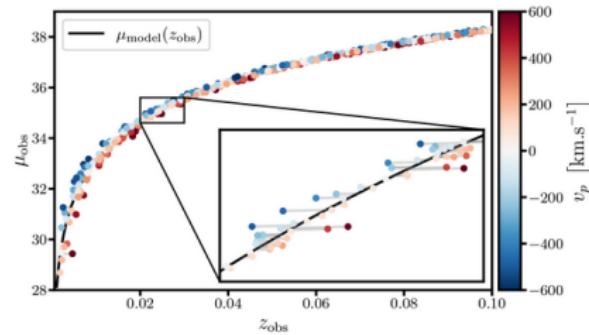


Figure 16 – Effets des vitesses particulières pour les SNe Ia
Credits : B. Carreres

Analyse jointe entre galaxies et SNe Ia

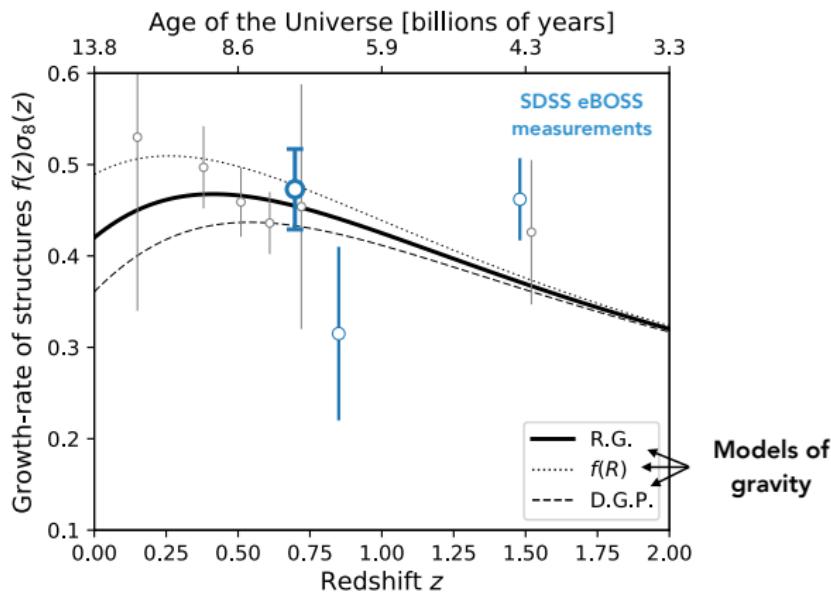


Figure 17 – Gain apporté par les vitesses particulières des SNe sur $f\sigma_8$

Credits : J. Bautista

Analyse jointe entre galaxies et SNe Ia

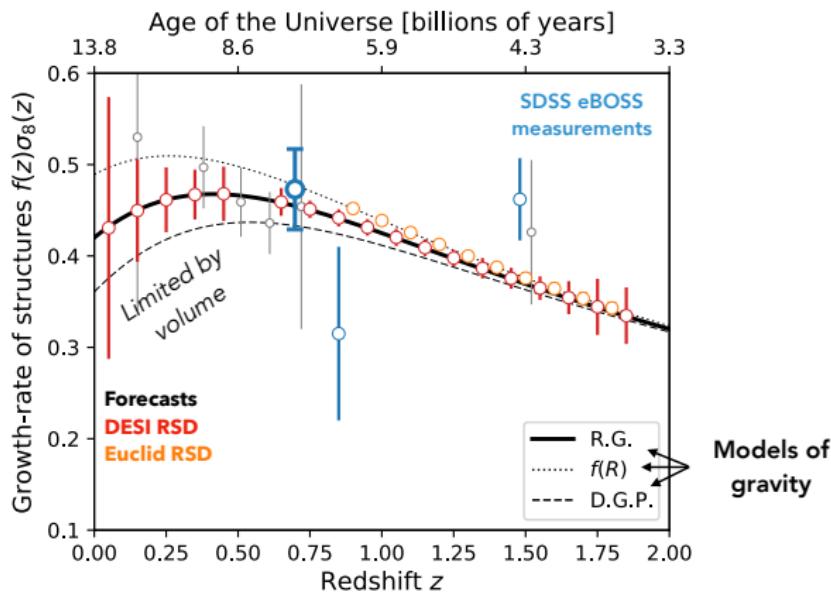


Figure 17 – Gain apporté par les vitesses particulières des SNe sur $f\sigma_8$

Credits : J. Bautista

Analyse jointe entre galaxies et SNe Ia

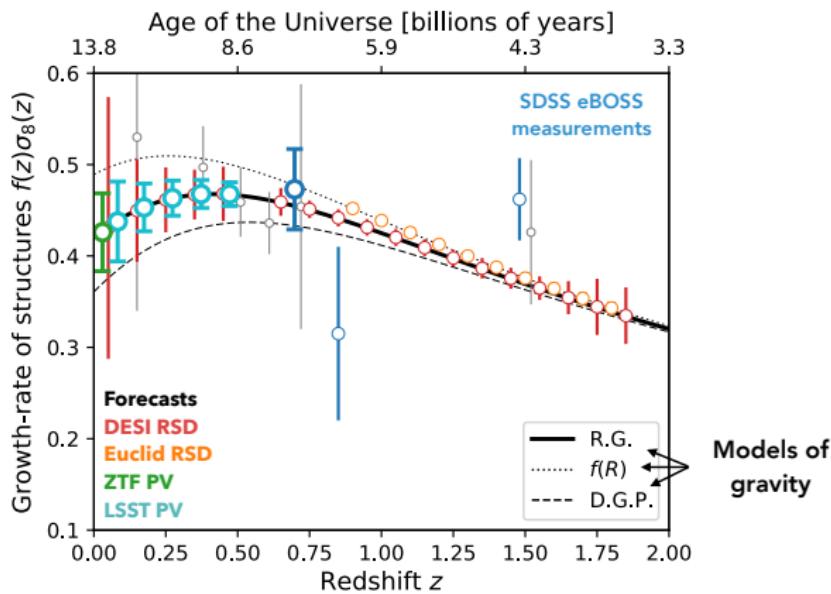


Figure 17 – Gain apporté par les vitesses particulières des SNe sur $f\sigma_8$

Credits : J. Bautista

Objectifs du stage

- Reconstruire les vitesses particulières des SNe Ia en vue d'une analyse jointe avec les galaxies de DESI

Objectifs du stage

- Reconstruire les vitesses particulières des SNe Ia en vue d'une analyse jointe avec les galaxies de DESI
- Nécessite un nouveau pipeline d'analyse des SNe Ia de ZTF capable de traiter les volumes de données

Objectifs du stage

- Reconstruire les vitesses particulières des SNe Ia en vue d'une analyse jointe avec les galaxies de DESI
- Nécessite un nouveau pipeline d'analyse des SNe Ia de ZTF capable de traiter les volumes de données

Mon travail

Mon travail : générer des simulations de supernovae en incluant les effets des vitesses particulières de DESI et les analyser pour reconstruire leurs vitesses particulières

Table of Contents

① Introduction

② Chaîne d'analyse cosmologique avec SNe Ia

Chaîne simplifiée avec SALT2.4

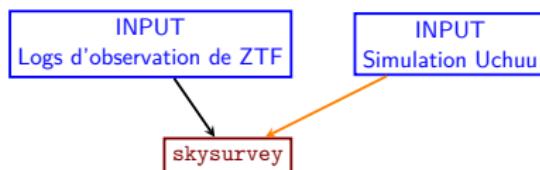
Chaîne LEMAÎTRE

Vitesses particulières obtenues

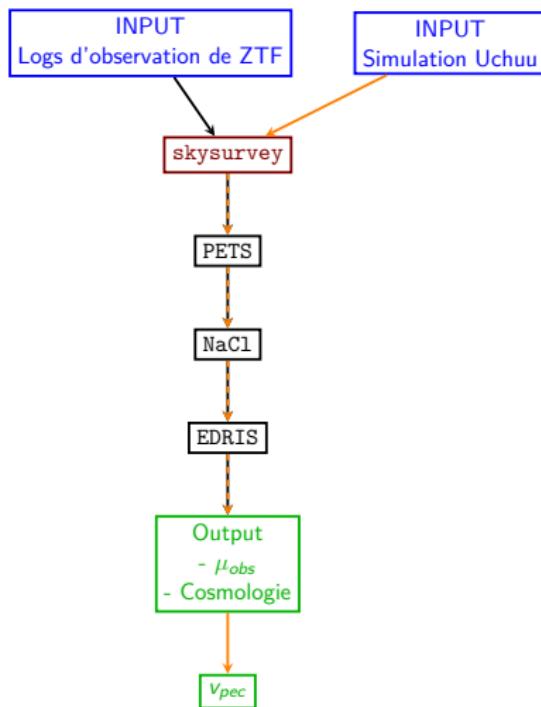
③ Exemples de contribution dans la chaîne LEMAÎTRE

④ Conclusion

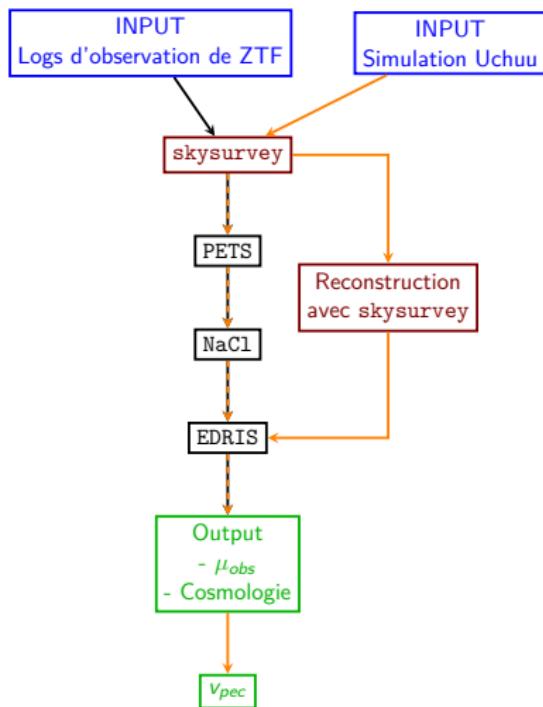
Plan de travail



Plan de travail



Plan de travail



Générations des SNe avec skysurvey : observables

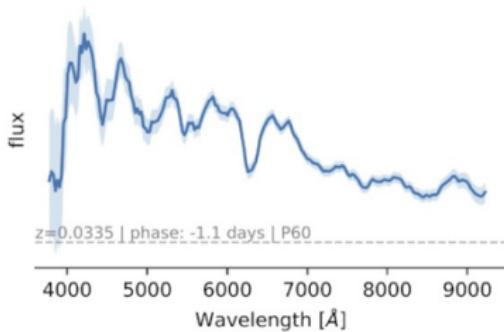
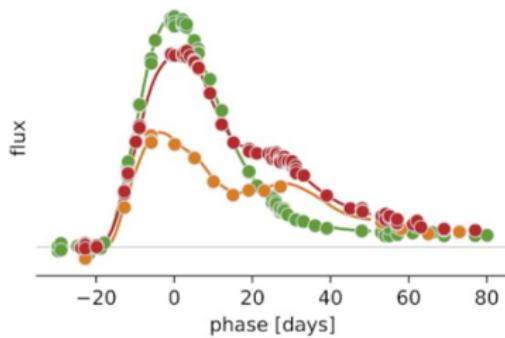


Figure 18 – Exemple de courbes de lumière et de spectre pour une SNe Ia observée par ZTF

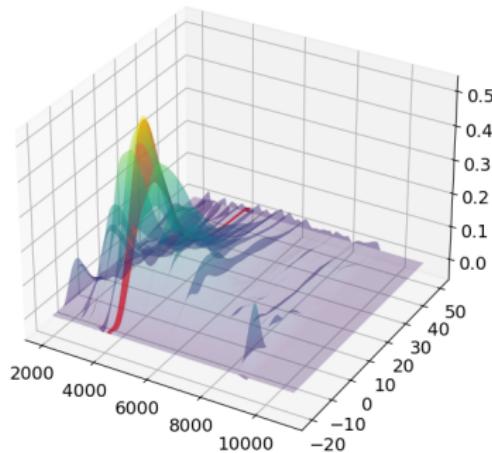
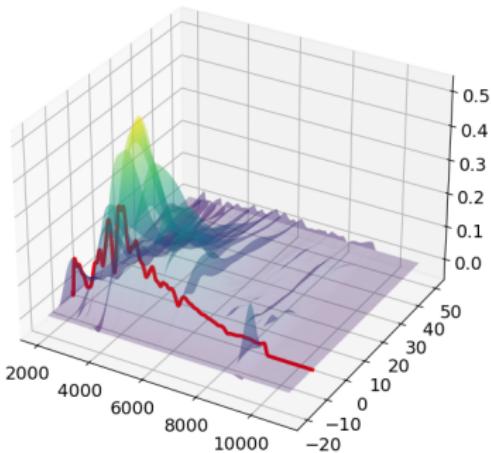
Credits : Mon Not R Astron Soc, Volume 510, Issue 2, February 2022, Pages 22282241

Générations des SNe avec skysurvey : modèle SALT2.4

- Le modèle SALT2.4 est décrit par la surface spectrale

$$F(p, \lambda) = x_0 \times [M_0(p, \lambda) + x_1 M_1(p, \lambda)] \times \exp[c CL(\lambda)] \quad (2)$$

- 4 paramètres par SNe Ia (x_0, x_1, c, t_{max})



Générations des SNe avec skysurvey : tirage des paramètres de standardisation

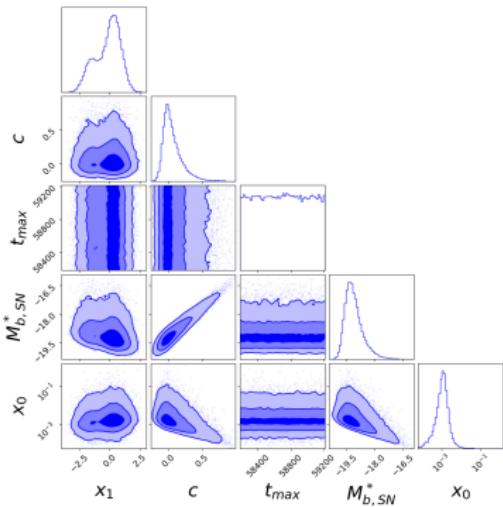
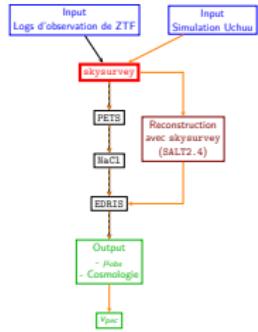


Figure 21 – Distribution des paramètres de standardisations

Générations des SNe avec skysurvey : tirage des positions

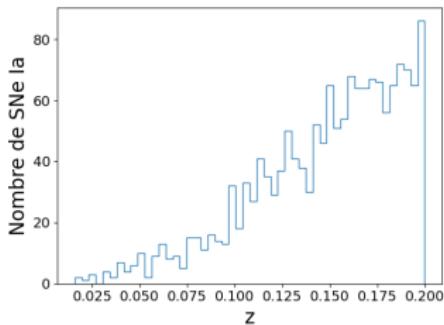
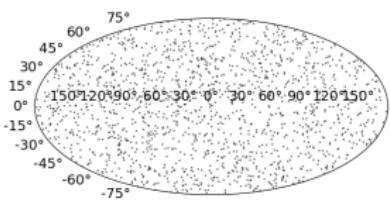
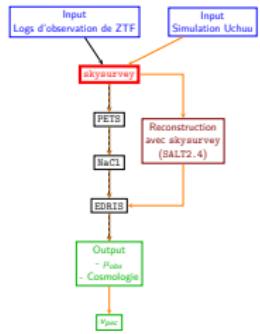


Figure 22 – Distributions angulaire et des redshifts par défaut dans skysurvey

Générations des SNe avec skysurvey : tirage des positions

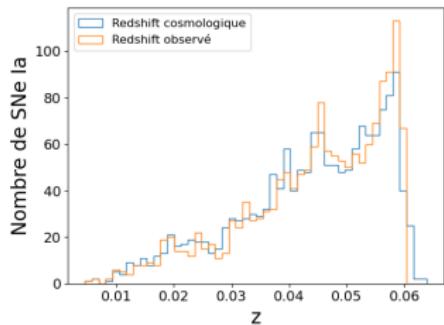
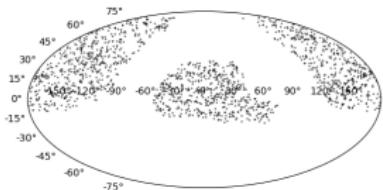
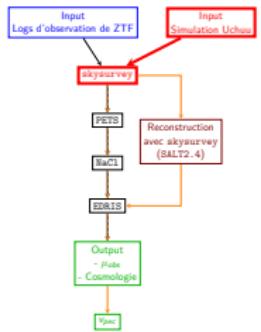


Figure 22 – Distributions angulaires et en redshift des SNe Ia tirées à partir du catalogue Uchuu

Courbes de lumière et spectres

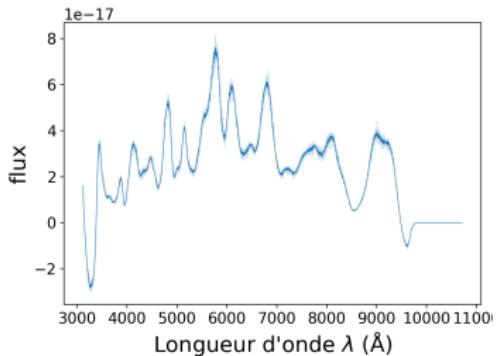
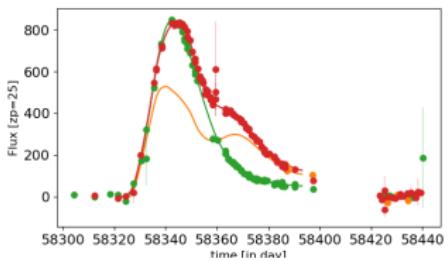
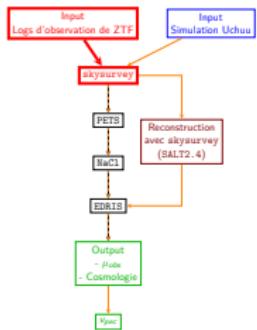
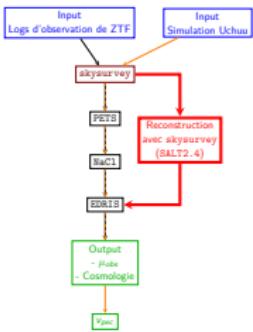


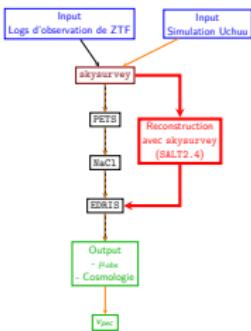
Figure 23 – Courbes de lumière et spectre simulés pour une SNe Ia

Reconstruction avec SALT2.4



- Réutiliser le modèle SALT2.4 pour reconstruire les paramètres de standardisations

Reconstruction avec SALT2.4



- Réutiliser le modèle SALT2.4 pour reconstruire les paramètres de standardisations
- Puis obtenir les modules de distances à l'aide de la formule

$$\mu_{SN} = -2.5 \log_{10} x_{0,SN} + \alpha x_{1,SN} - \beta c_{SN} \quad (3)$$

Paramètres de standardisation SALT2.4

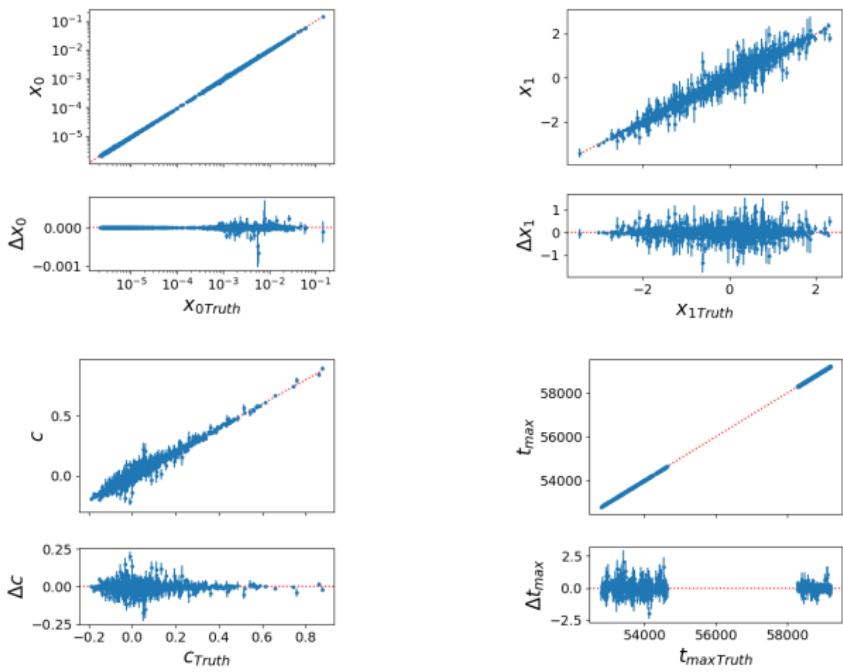
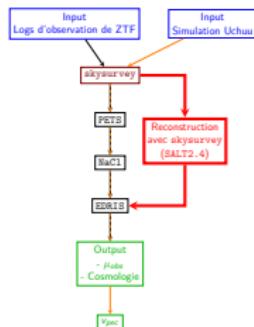


Figure 24 – Paramètres de standardisations reconstruits avec SALT2.4

Modules de distance SALT2.4

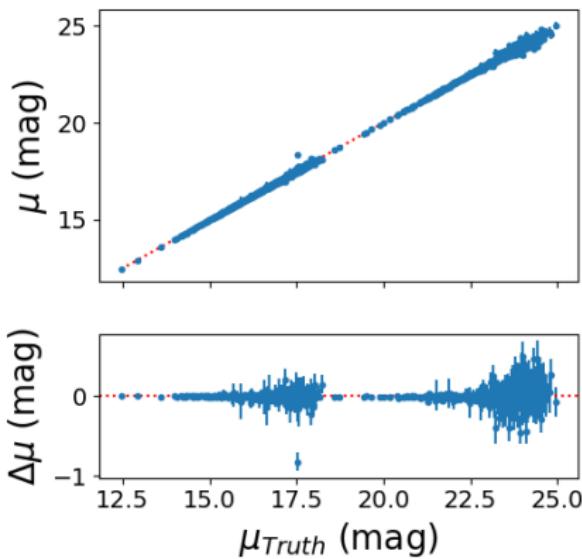
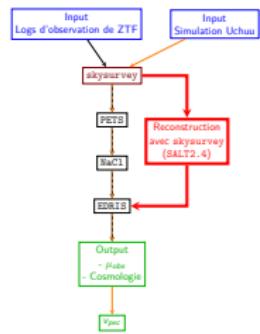


Figure 25 – Modules de distance avec SALT2.4

Modules de distance et cosmologie reconstruits par EDRIS

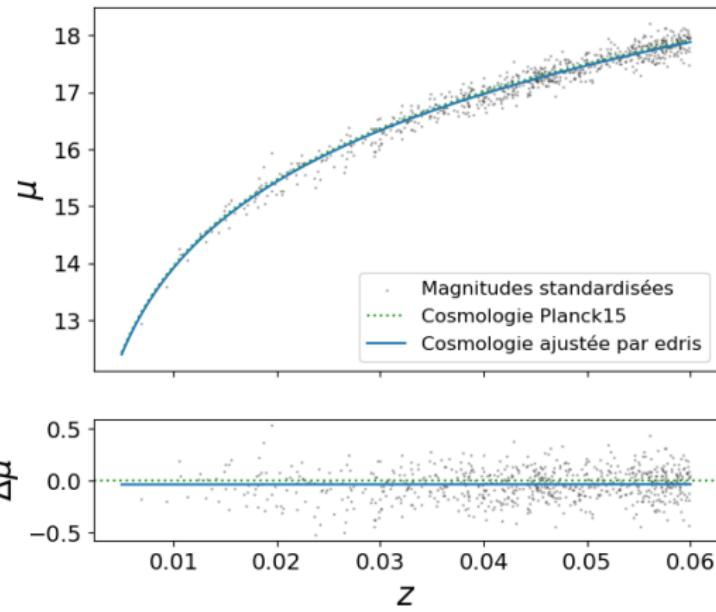
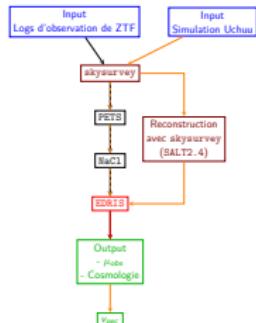


Figure 26 – Cosmologie ajustée par EDRIS pour les résultats SALT2, 4

Vitesses particulières

Interpolation de la cosmologie $\mu(z)$ trouvée par EDRIS pour obtenir $z(\mu)$, puis récupération des vitesses particulières par

$$v_{pec} = c(z_{obs} - z(\mu)) \quad (4)$$

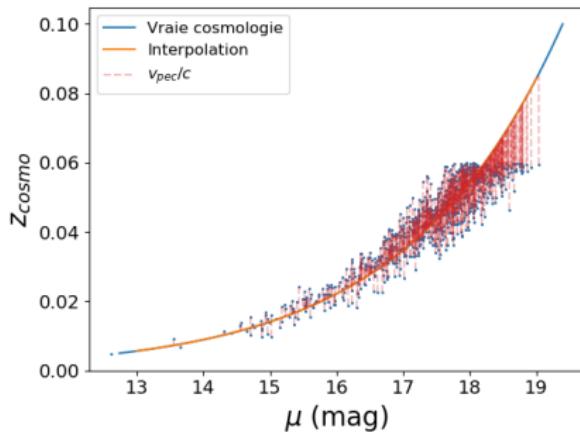


Figure 27 – Inversion de $\mu(z)$ en $z(\mu)$

Vitesses particulières reconstruites

- Erreur moyenne : $\overline{\Delta v_{pec, SALT2.4}} = -269.9 \text{ km.s}^{-1}$
- Dispersion des erreurs : $\sigma(\Delta v_{pec, SALT2.4}) = 791.9 \text{ km.s}^{-1}$
- Dispersion théorique des erreurs due à la dispersion intrinsèque : $\sigma(v_{pec, SALT2.4}, \sigma_{int}) = 581.5 \text{ km.s}^{-1}$

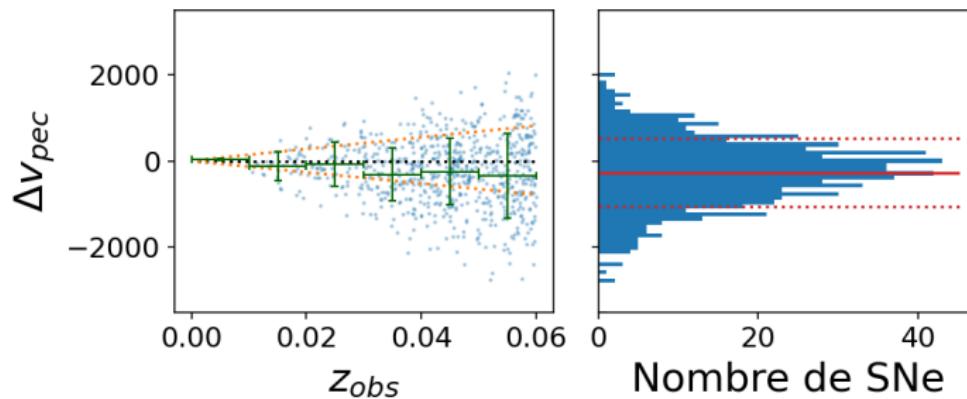
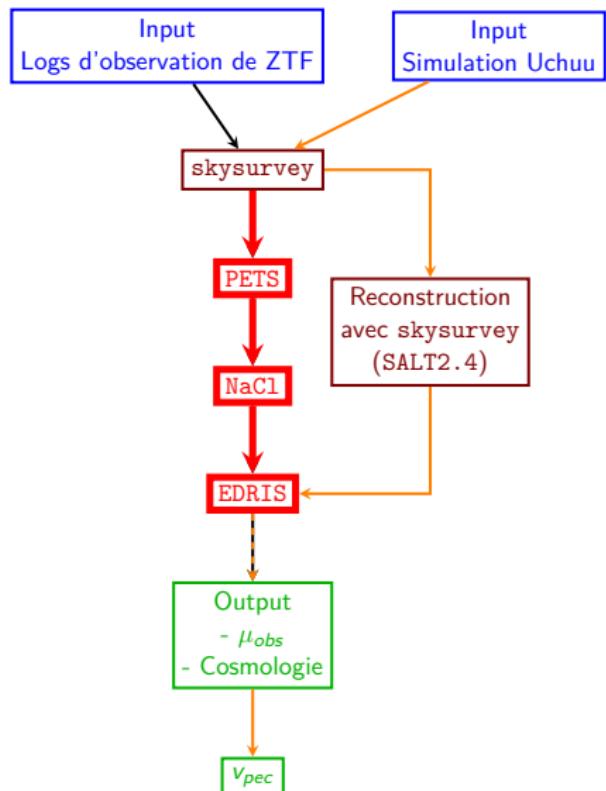


Figure 28 – Vitesses particulières reconstruites à partir de SALT2.4



Première intégration de la chaîne LEMAÎTRE.

- PETS : Sélection des SNe
- NaCl : Entraînement d'un modèle de SNe Ia et ajustement des paramètres de standardisation
- EDRIS : Ajustement d'un modèle cosmologique

Sélection avec PETs

Répond à la question : Est-ce que la date du maximum de luminosité t_{max} est bien définie ?

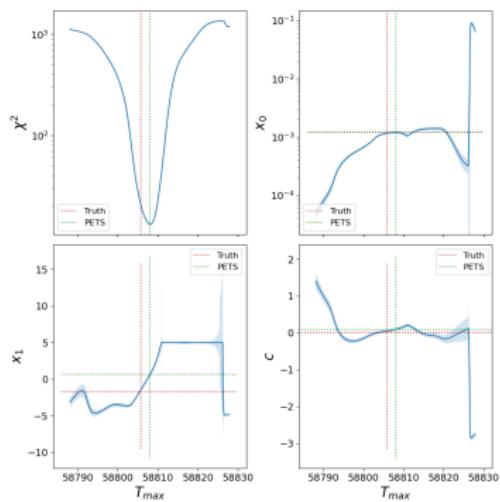


Figure 29 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETs

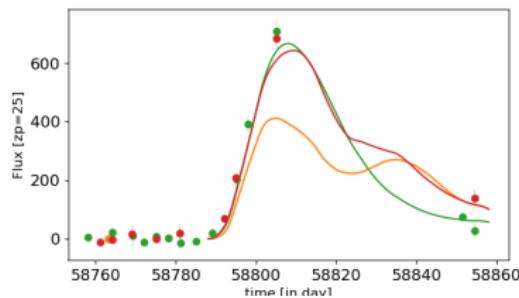


Figure 30 – Courbes de lumière obtenues par PETs

Sélection avec PETs

Répond à la question : Est-ce que la date du maximum de luminosité t_{max} est bien définie ? **Non**

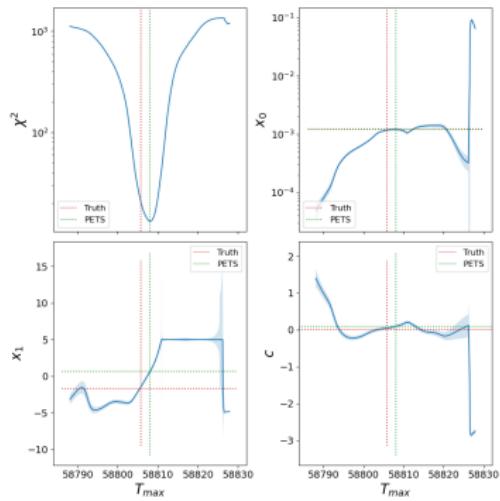


Figure 29 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETs

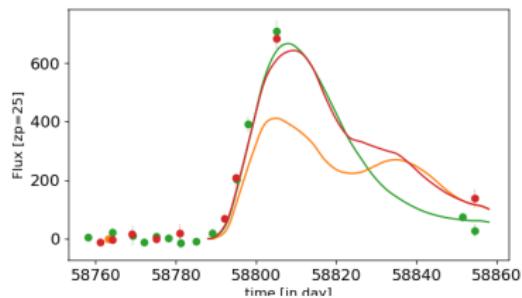


Figure 30 – Courbes de lumière obtenues par PETs

Sélection avec PETs

Répond à la question : Est-ce que la date du maximum de luminosité t_{max} est bien définie ?

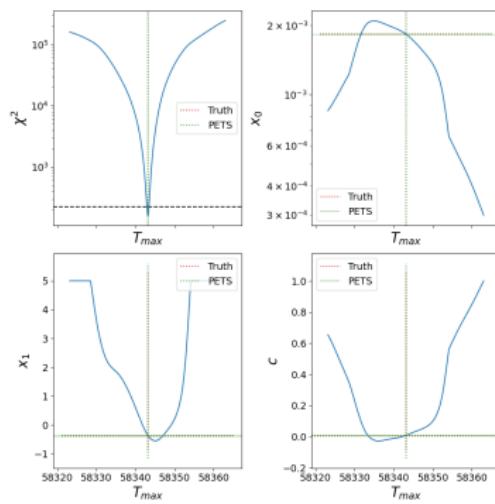


Figure 31 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETs

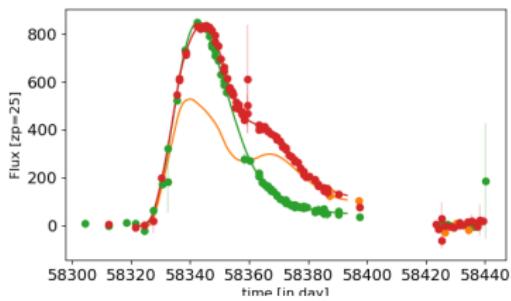


Figure 32 – Courbes de lumière obtenues par PETs

Sélection avec PETs

Répond à la question : Est-ce que la date du maximum de luminosité t_{max} est bien définie ? **Oui**

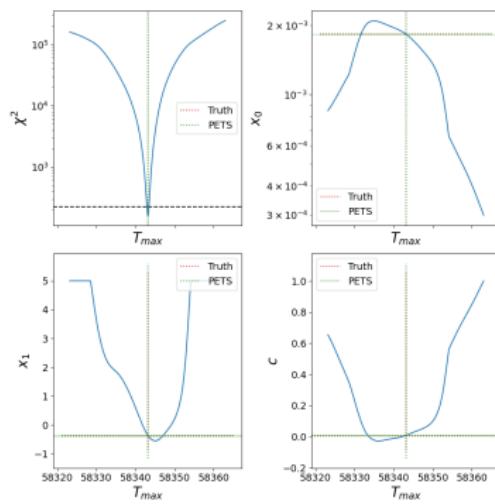


Figure 31 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETs

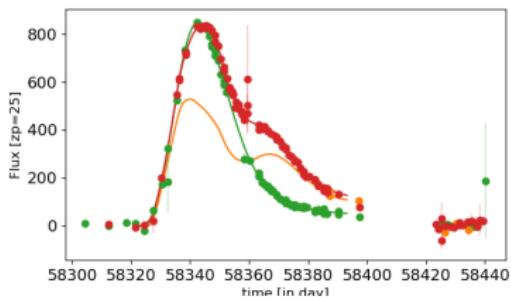


Figure 32 – Courbes de lumière obtenues par PETs

Reconstruction des modules de distance avec NaCl

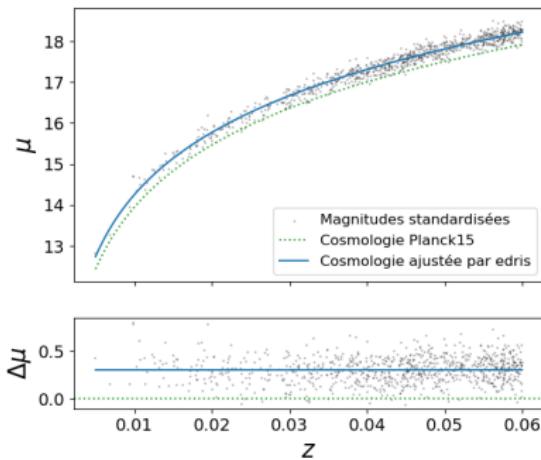
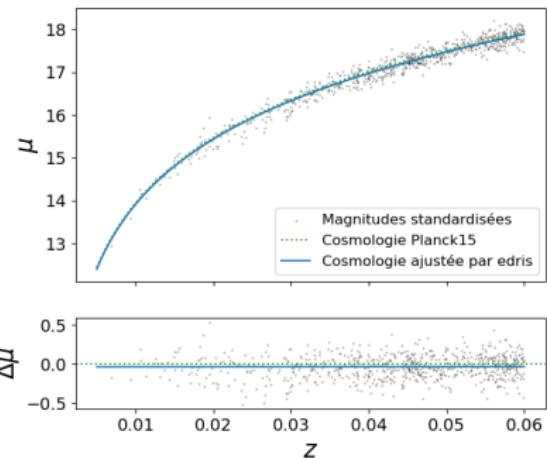


Figure 33 – Modules de distance et cosmologie déterminés par EDRIS pour SALT2.4 (gauche) et NaCl (droite)

NaCl vs Salt2.4

- Erreur moyenne : $\overline{\Delta v_{pec,NaCl}} = -265 \text{ km.s}^{-1} \sim \overline{\Delta v_{pec,SALT2.4}}$
- Dispersion des erreurs :
 $\sigma(\Delta v_{pec,NaCl}) = 685.6 \text{ km.s}^{-1} < 791.9 \text{ km.s}^{-1} = \sigma(\Delta v_{pec,SALT2.4})$
- Dispersion théorique des erreurs due à la dispersion intrinsèque :
 $\sigma(v_{pec,NaCl}, \sigma_{int}) = 578.3 \text{ km.s}^{-1}$

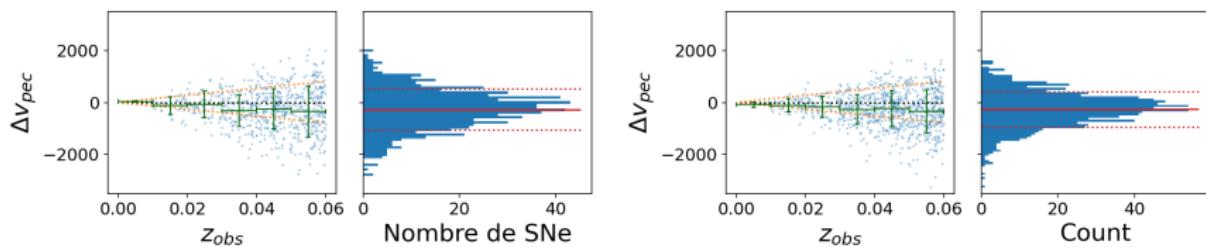


Figure 34 – Vitesses particulières reconstruites à partir de SALT2.4 (gauche) et NaCl (droite)

Table of Contents

① Introduction

② Chaîne d'analyse cosmologique avec SNe Ia

③ Exemples de contribution dans la chaîne LEMAÎTRE

Réglages des hyperparamètres dans NaCl

Standardisation des paramètres

④ Conclusion

Réglages de hyperparamètres dans NaCl

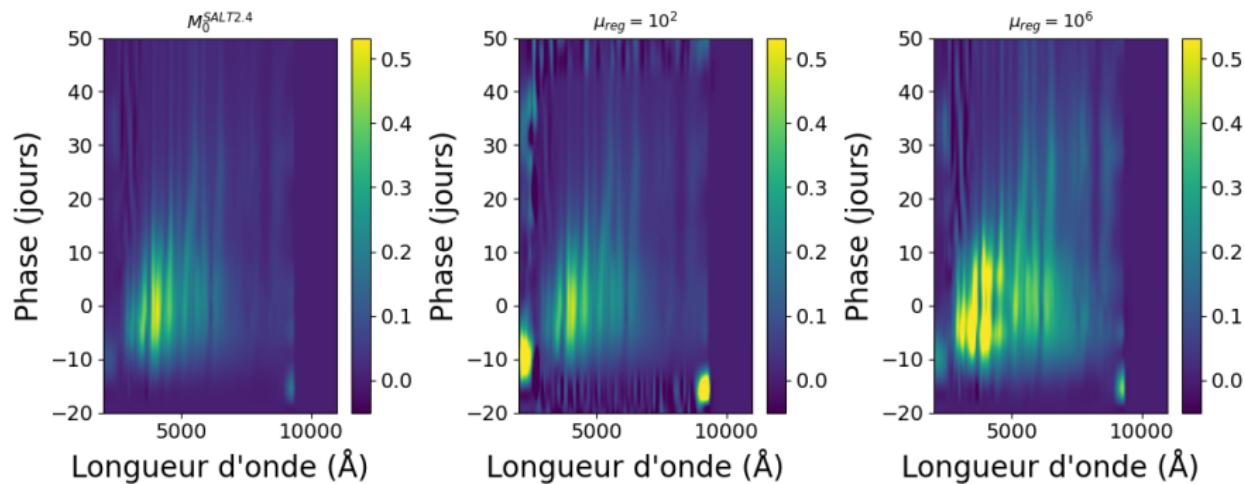


Figure 35 – Effet de μ_{reg} sur la reconstruction des modèles

Nécessité de réévaluer la standardisation après NaCl

Si on avait gardé $\alpha = 0.14$ et $\beta = 3.15$ pour remonter aux modules de distances

$$\mu = -2.5 \log_{10} x_{0,SN} - \alpha x_{1,SN} + \beta c_{SN} \quad (5)$$

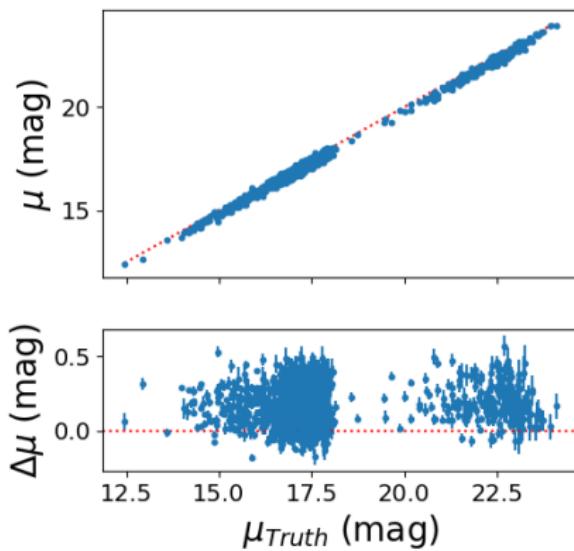
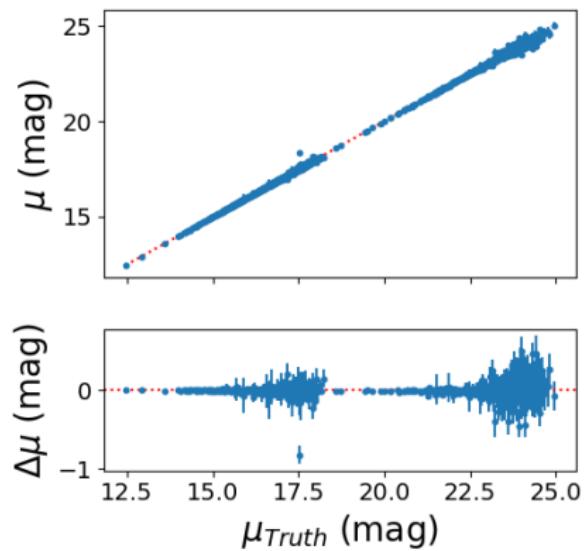


Table of Contents

① Introduction

② Chaîne d'analyse cosmologique avec SNe Ia

③ Exemples de contribution dans la chaîne LEMAÎTRE

④ Conclusion

Validation des objectifs

Perspectives futures

Conclusion

- ① Possibilité de générer des SNe Ia possédant des vitesses particulières, actuellement en cours d'intégration à skysurvey.
- ② Premiers tests du pipeline LEMAÎTRE, bientôt utilisé sur des données réelles
- ③ Les vitesses particulières sont reconstruites et peuvent être utilisées pour une analyse $f\sigma_8$

Perspectives futures

- Étude des effets de potentielles erreurs systématiques sur les vitesses particulières
- Analyse $f\sigma_8$ en utilisant un méthode de comparaison densité-vitesses lors de ma thèse, qui donnera également lieu à une publication

Méthode de comparaison densité-vitesses

- Une des nombreuses méthodes d'analyse jointe entre galaxies et SNe Ia

Méthode de comparaison densité-vitesses

- Une des nombreuses méthodes d'analyse jointe entre galaxies et SNe Ia
- En théorie linéaire des perturbations, le champ de vitesse est lié au champ de densité des galaxies

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{H_0 f}{4\pi b} \int_0^{R_{max}} d^3 \mathbf{r}' \delta_g(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} + \mathbf{V}_{ext} \quad (6)$$

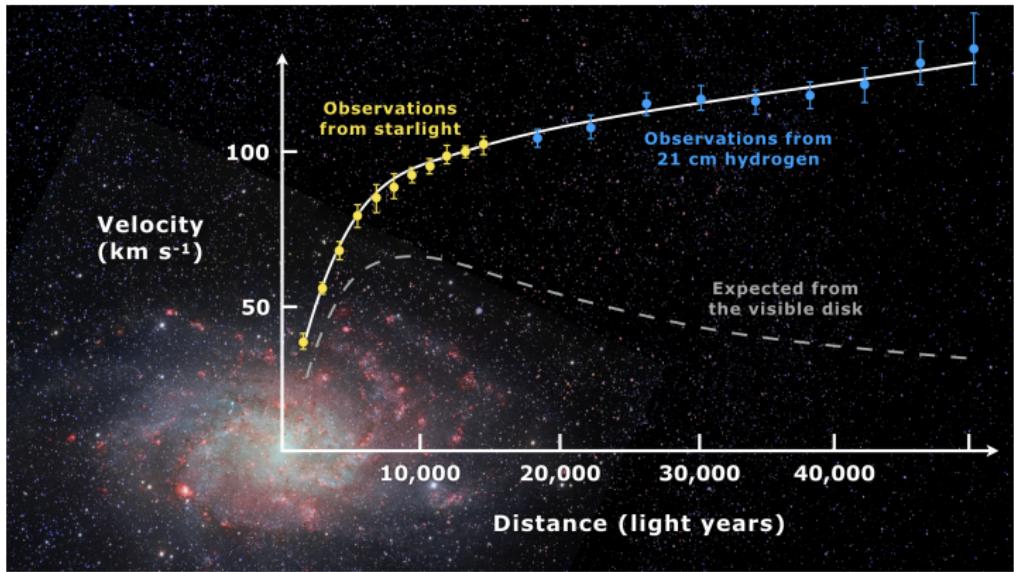
Méthode de comparaison densité-vitesses

- Une des nombreuses méthodes d'analyse jointe entre galaxies et SNe Ia
- En théorie linéaire des perturbations, le champ de vitesse est lié au champ de densité des galaxies

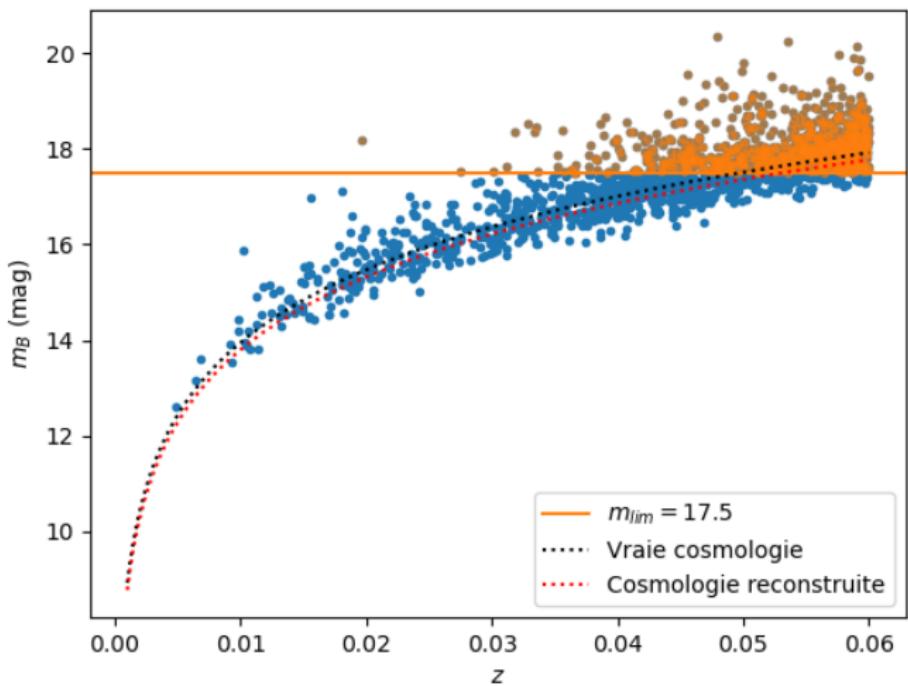
$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{H_0 f}{4\pi b} \int_0^{R_{max}} d^3 \mathbf{r}' \delta_g(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} + \mathbf{V}_{ext} \quad (6)$$

- Trouver le taux de croissance des structures f qui permet la meilleure reconstruction des vitesses particulières des SNe Ia

Pourquoi la matière noire ?



Biais de Malmquist



Avant correction des cartes de poussières

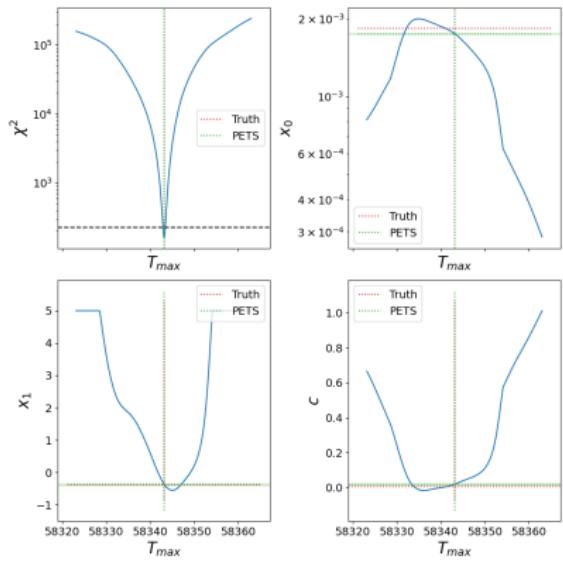


Figure 37 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETS

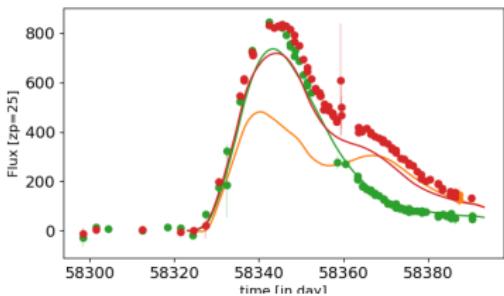


Figure 38 – Courbes de lumière obtenues par PETS

Après correction des cartes de poussières

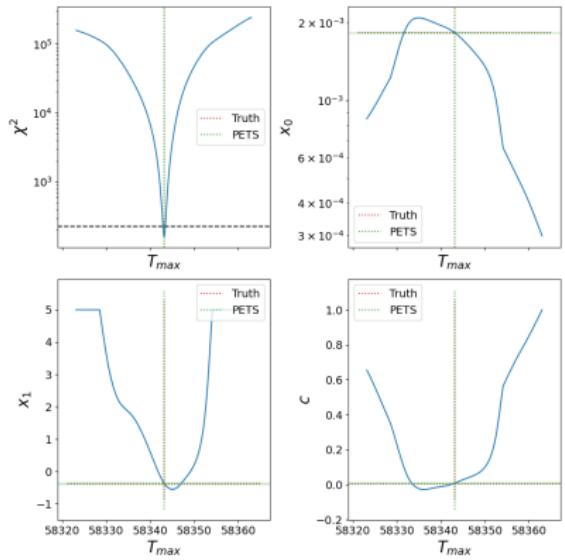


Figure 39 – Variation des paramètres en fonction de t_{max} utilisée par PETS

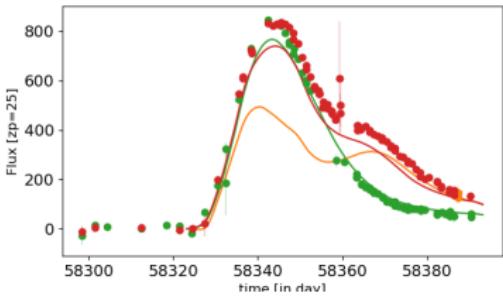
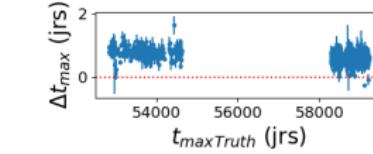
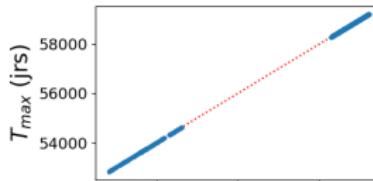
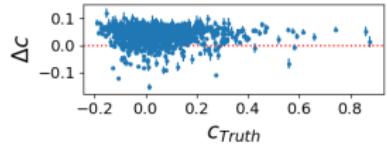
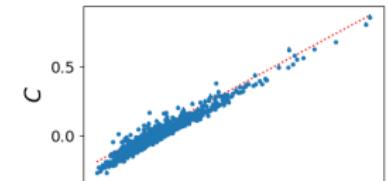
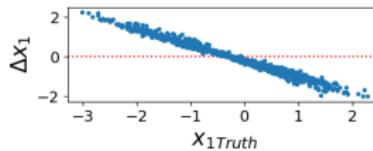
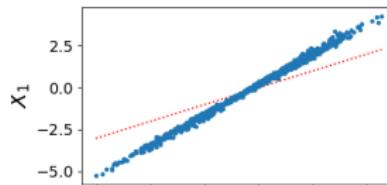
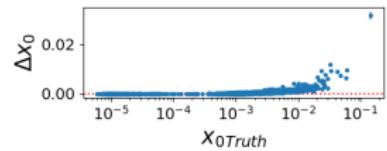
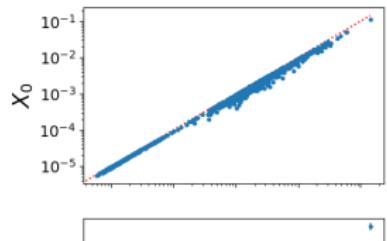


Figure 40 – Courbes de lumière obtenues par PETS

NaCl



Dispersion intrinsèque et biais

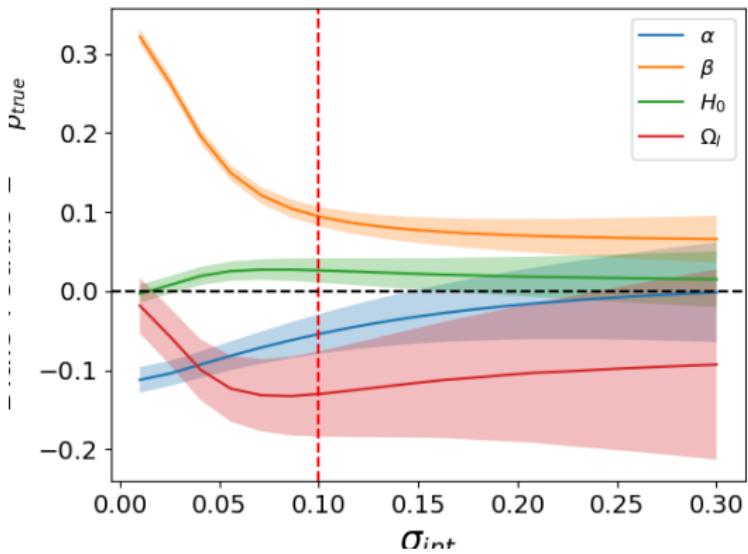


Figure 42 – Biais sur les paramètres reconstruits par EDRIS à partir de la reconstruction SALT2.4 en fonction de la dispersion intrinsèque σ_{int}

Méthode de comparaison densité-vitesses : exemples de résultats

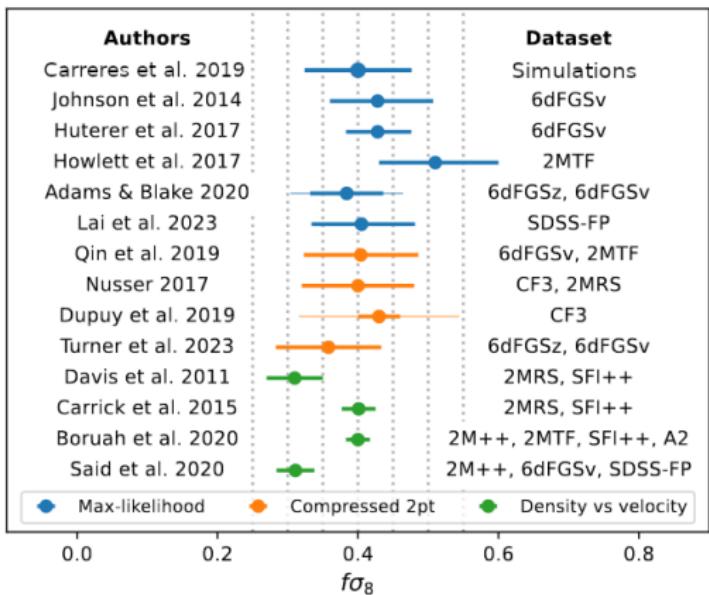


Figure 43 – Mesure $f\sigma_8$ réalisée par B. Carreres