



Université Claude Bernard



Lyon 1

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED52

École Doctorale de Physique et Astrophysique

Spécialité de doctorat : Physique

Discipline : Cosmologie Observationnelle

Soutenue publiquement le jj/mm/aaaa, par :

Nora NICOLAS

Propriétés intrinsèques des supernovae de type Ia et leurs conséquences sur les paramètres cosmologiques

Devant le jury composé de :

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

M./Mme. XXX XXX

Président-e

Rapporteur-e

Rapporteur

Examineur-ice

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Invité

Remerciements

Résumé

Abstract

Introduction générale

Table des matières

1	Contexte cosmologique	13
1.1	Bases de relativité générale	14
1.1.1	Concepts initiaux	14
1.1.2	Métrique et équations de conservation	14
1.1.3	Définition de la constante cosmologique	14
1.2	Introduction du modèle standard de la cosmologie	14
1.2.1	Univers plat, homogène et isotrope	14
1.2.2	Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	14
1.2.3	Le modèle Λ CDM	14
1.3	Mesure cosmologiques	14
1.3.1	Âge de l'Univers	14
1.3.2	Distance de luminosité	14
1.3.3	Intérêt des supernovae de type Ia	14
2	Supernovae de type Ia	17
2.1	Fin de vie des étoiles	18
2.1.1	Classification	18
2.1.2	Physique de l'explosion	18
2.2	Propriétés	18
2.2.1	Courbe de lumière	18
2.2.2	Spectroscopie	18
2.3	Variabilités	18
2.3.1	Progéniteur	18
2.3.2	Galaxie hôte	18
2.4	Standardisation	18
2.4.1	Corrélations	18
2.4.2	Modèle SALT2.4	18
2.5	Cosmologie avec les SNe Ia	18
2.5.1	Diagramme de Hubble	18
2.5.2	Détermination des paramètres cosmologiques	18
2.5.3	Biais actuels	18
3	Création d'un échantillon complet	19
3.1	Notion de complétude	20
3.1.1	Stratégies d'observations	20
3.1.2	Biais de Malmquist et solution	20
3.2	Présentation des sondages	21
3.2.1	The Nearby Supernova factory	21
3.2.1.1	Introduction	21
3.2.1.2	Détection des supernovae	21
3.2.1.3	Suivi spectro-photométrie	22

3.2.1.4	Taux de formation stellaire spécifique spectroscopique . . .	22
3.2.1.5	Description des données conservées	22
3.2.2	Sloan Digital Sky Survey	23
3.2.3	Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System	23
3.2.4	SuperNovae Legacy Survey	23
3.2.5	Hubble Space Telescope	23
3.2.6	Autres sondages : CfA1-4 et CSP	24
3.3	Échantillon d'étude	24
3.3.1	Confection	24
3.3.1.1	Approche statistique	24
3.3.1.2	Approche analytique	26
3.3.2	Présentation	28
3.3.3	Confirmation d'hypothèse	30
4	Évolution avec le <i>redshift</i>	33
4.1	Concept d'âge	34
4.1.1	Travaux précédents	34
4.1.2	Implications	34
4.2	Modélisation du <i>stretch</i>	34
4.2.1	Paramétrisations	34
4.2.2	Implémentation	34
4.3	Résultats	34
4.3.1	Comparaison aux données	34
4.3.2	Prédictions	34
5	Impact sur la cosmologie : simulations	35
5.1	SNANA : overview	36
5.1.1	Inputs	36
5.1.2	Tools	36
5.2	La masse comme traceur	36
5.2.1	Modélisation	36
5.2.2	Utilisation	36
5.3	Implémentation	36
5.3.1	Corrélations testées	36
5.3.2	Résultats	36
6	Résultats et discussion	37
6.1	XXX	38
6.1.1	XXX	38
6.1.2	XXX	38
6.2	XXX	38
6.2.1	XXX	38
6.2.2	XXX	38
	Conclusions	39

Contexte cosmologique

Time is an illusion, a construct made
out of human memory

Blake CROUCH, *Revelations*

Bien que la cosmologie ne s'en tienne pas aux concepts récents tels qu'on les connaît et les vulgarise, c'est avec les travaux d'EINSTEIN au début du XX^e siècle que notre compréhension du monde cosmique prend son essor.

Sommaire

1.1 Bases de relativité générale	14
1.1.1 Concepts initiaux	14
1.1.2 Métrique et équations de conservation	14
1.1.3 Définition de la constante cosmologique	14
1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie	14
1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope	14
1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	14
1.2.3 Le modèle Λ CDM	14
1.3 Mesure cosmologiques	14
1.3.1 Âge de l'Univers	14
1.3.2 Distance de luminosité	14
1.3.3 Intérêt des supernovae de type Ia	14

1.1 Bases de relativité générale

1.1.1 Concepts initiaux

1.1.2 Métrique et équations de conservation

1.1.3 Définition de la constante cosmologique

1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie

1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope

Univers plat Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

1.2.3 Le modèle Λ CDM

1.3 Mesure cosmologiques

1.3.1 Âge de l'Univers

1.3.2 Distance de luminosité

1.3.3 Intérêt des supernovae de type Ia

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend

consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Supernovae de type Ia

The end is where we start from

Jack HARKNESS, *Torchwood*

Sommaire

2.1	Fin de vie des étoiles	18
2.1.1	Classification	18
2.1.2	Physique de l'explosion	18
2.2	Propriétés	18
2.2.1	Courbe de lumière	18
2.2.2	Spectroscopie	18
2.3	Variabilités	18
2.3.1	Progéniteur	18
2.3.2	Galaxie hôte	18
2.4	Standardisation	18
2.4.1	Corrélations	18
2.4.2	Modèle SALT2.4	18
2.5	Cosmologie avec les SNe Ia	18
2.5.1	Diagramme de Hubble	18
2.5.2	Détermination des paramètres cosmologiques	18
2.5.3	Biais actuels	18

2.1 Fin de vie des étoiles

2.1.1 Classification

2.1.2 Physique de l'explosion

2.2 Propriétés

2.2.1 Courbe de lumière

t_0

c

x_0

x_1

2.2.2 Spectroscopie

2.3 Variabilités

2.3.1 Progéniteur

2.3.2 Galaxie hôte

2.4 Standardisation

2.4.1 Corrélations

2.4.2 Modèle SALT2.4

2.5 Cosmologie avec les SNe Ia

2.5.1 Diagramme de Hubble

2.5.2 Détermination des paramètres cosmologiques

2.5.3 Biais actuels

Pour ces raisons, on étudie l'évolution des SNe Ia

Création d'un échantillon complet

Citation

Autaire

Afin d'améliorer l'état de l'art dans le domaine de la cosmologie observationnelle à l'aide de SNe Ia et en vue de tester l'évolution de leurs propriétés avec le reshift, la première étape de ce projet a été de choisir l'échantillon d'étude.

Sommaire

3.1	Notion de complétude	20
3.1.1	Stratégies d'observations	20
3.1.2	Biais de Malmquist et solution	20
3.2	Présentation des sondages	21
3.2.1	The Nearby Supernova factory	21
3.2.2	Sloan Digital Sky Survey	23
3.2.3	Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System	23
3.2.4	SuperNovae Legacy Survey	23
3.2.5	Hubble Space Telescope	23
3.2.6	Autres sondages : CfA1-4 et CSP	24
3.3	Échantillon d'étude	24
3.3.1	Confection	24
3.3.2	Présentation	28
3.3.3	Confirmation d'hypothèse	30

3.1 Notion de complétude

Cette thèse repose sur l'étude statistique des propriétés des SNe Ia, et repose donc en premier lieu sur l'échantillon de données sur lesquelles développer notre raisonnement. Pour qu'il soit intéressant il doit être suffisamment grand, mais également représentatif de la population des SNe Ia, c'est-à-dire au plus proche d'être un tirage aléatoire de tout ce qu'il peut exister comme SNe Ia dans la nature. On parle alors d'échantillon complet. Ce concept est donc largement dépendant de la manière dont les données sont relevées.

3.1.1 Stratégies d'observations

Les supernovae sont des phénomènes transitoires, c'est-à-dire des objets dont le flux lumineux varie dans le temps, mais qui sont également brefs et rares : elles durent typiquement quelques semaines et surviennent environ une fois par siècle et par galaxie. Leur observation requiert donc des stratégies particulières. Pour déterminer leurs courbes de lumière (2.2.1) il est nécessaire d'avoir un champ de mesure suffisamment profond pour ne pas se contenter que de leur luminosité au maximum. Différentes approches peuvent entrer en jeu : les recherches ciblées et les recherches non ciblées.

Les recherches ciblées consistent à se focaliser sur des amas de galaxies connus en vue d'augmenter la probabilité d'observer des supernovae ; il paraît en effet évident que plus la concentration en étoiles est forte, plus on s'attend à avoir une haute probabilité que certaines d'entre elles entament leur fin de vie et leur explosion en supernova. Cependant, une telle pratique implique une sélection des environnements des SNe et donc un biais sur la nature des données recueillies ; dans le cas des amas de galaxies, l'environnement favorisé sera celui contenant des progéniteurs vieux, dans des galaxies massives avec peu de formation stellaire. Afin d'étudier la potentielle évolution de la population des SNe, il faut réduire au maximum ces biais et favoriser la récolte d'un échantillon représentatif de toute la zoologie des SNe Ia.

Les recherches non-ciblées utilisent de grands champ de caméra pour sonder de larges portions du ciel. Originellement (SCP, [Perlmutter et al., 1999](#)), leur procédé était d'effectuer une détection photométrique avant d'opérer une identification spectroscopique, confirmant leur caractère de SN Ia ou non, pour finalement décider de programmer ou non un suivi photométrique permettant l'établissement de leur courbe de lumière. Une telle pratique limite les biais mais donne des courbes de lumières pauvres en points de mesure avant le maximum de luminosité, impactant l'ajustement des courbes. Ces méthodes ont évolué pour devenir des recherches *glissantes* ([Astier et al., 2006](#)). Elles consistent à balayer régulièrement le ciel en observant un même champ dans un même filtre de manière répétée tous les quelques jours, afin d'à la fois détecter et extraire les courbes de lumières des SNe Ia, même si leur identification est effectuée après leur maximum de luminosité.

3.1.2 Biais de Malmquist et solution

De tels sondages ne sont cependant pas exempts d'effets de sélection. En effet, même une recherche glissante s'effectue avec un appareil de mesure ayant une capacité limitée à

détecter une source lumineuse : les objets de magnitude apparente plus élevée (luminosité plus faible) que ce seuil de détection ne seront pas inclus. Or, comme chaque astre voit sa luminosité décroître avec le carré de la distance qui le sépare de l’observation (1.3.2), cette limite implique que les astres de magnitude absolue plus élevée seront relevés à de plus grandes distances que les autres, laissant croire qu’à partir d’une certaine distance les objets sont intrinsèquement plus lumineux.

Dans le cadre des SNe Ia dont on suppose la magnitude absolue similaire, on pourrait en première approche négliger cet effet. Cependant, comme exposé en Section 2.4.1, il a été déterminé que la magnitude absolue des supernovae de type Ia est corrélée avec leur *stretch* et leur couleur de telle sorte que les plus faibles soient celles de petit *stretch* et de couleur rouge. Ainsi, proche du seuil de détection, les SNe Ia ne sont pas sélectionnées de manière homogène, et l’échantillon recueilli sera une sous-population laissant penser qu’avec la distance, les SNe Ia ont en moyenne un plus haut *stretch* et sont de couleur bleue. De tels sondages sont dits à magnitude limitée.

Le cadre de notre étude nécessite un échantillon qu’on appelle « volume-limité », pour lequel on suppose que la population résulte bien d’un tirage aléatoire de ce qui existe dans la nature. Les sondages modernes reposant sur des recherches glissantes, il nous a donc fallu les réduire pour les utiliser.

3.2 Présentation des sondages

On présente dans cette section les différents sondages utilisés dans notre étude, principalement non-ciblés.

3.2.1 The Nearby Supernova factory

3.2.1.1 Introduction

La collaboration *The Nearby Supernova factory* (SNfactory, Aldering et al., 2002) est créée peu de temps après la découverte de l’expansion accélérée de l’Univers (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999) avec pour but un suivi spectro-photométrique d’une précision d’environ 1% de SNe Ia proches. L’objectif est de peupler la partie basse du diagramme de Hubble ($0.03 < z < 0.08$), qui ne contenait alors qu’une vingtaine de SNe Ia (Hamuy et al., 1996), permettant une meilleure détermination de la constante de Hubble H_0^2 . La faible distance du sondage permet d’éviter d’appliquer des corrections photométriques dues au décalage vers le rouge (corrections K , voir Section ?). La mission tente également d’étudier précisément les propriétés des SNe Ia grâce au traceur LsSFR (Section ?) afin de mieux comprendre leur diversité, mettre en évidence différentes populations de supernovae et améliorer leur standardisation grâce à une meilleure compréhension de leurs variabilités et ainsi réduire les erreurs systématiques dans les mesures de paramètres cosmologiques.

3.2.1.2 Détection des supernovae

Le programme a été sujet à plusieurs évolutions au cours de son fonctionnement, notamment pour la découverte de nouveaux candidats. Ce sont d’autres télescopes qui alertent la communauté. En premier lieu, jusqu’à fin 2008, le télescope de 1,2m du mont

Palomar en Californie ([Rabinowitz et al., 2003](#)) scannait 500 deg² du ciel chaque soir avec la caméra QUEST de 112 capteurs CCD. À partir de 2010, les candidats de SNe proviennent d'une coopération avec *Palomar Transient Factory* (PTF, [Law et al., 2009](#)) et de données publiques. La caméra QUEST fut ensuite déplacée à La Silla au Chili (LSQ, [Hadjisaka et al., 2012](#)) pour reprendre, mi-2012, l'activité de recherche de SNe pour SNfactory. Les candidats potentiels sont à chaque fois programmés pour observation spectroscopique afin de les identifier en tant que SNe Ia et décider de leur suivi selon des critères de qualité (nombre de points de mesure, proche et avant du maximum, non-contamination pas la luminosité de la Lune notamment).

3.2.1.3 Suivi spectro-photométrie

Le typage spectroscopique, quand il n'a pas déjà été réalisé par d'autres collaboration ayant donné l'alerte, est assuré par le *SuperNovae Integral Field Spectrograph* (SNIFS, [Lantz et al., 2004](#)) du télescope de l'Université d'Hawaii de 2,2 m au sommet du Mauna Kea, mis en service en 2004. Il s'avère plus efficace qu'un typage photométrique qui nécessite plusieurs observations dans différents filtres de couleur, bien que ces dernières soient plus simple à mettre en place.

Ce spectrographe dit « à champ intégral » récolte des « cubes », des données en 3 dimensions, deux spatiales représentant un point dans le ciel plus une dimension de longueur d'onde ; chaque point de ce relevé se nomme *spaxel*, pour « spatial picture element », et ensemble forment une grille de 15×15 pour un champ de vue total de $6'', 4 \times 6'', 4$ dans deux longueurs d'ondes : une voie bleue (B) de 3200 à 5200 Å et une voie rouge (R) de 5100 à 10 000 Å.

En plus de cette voie, SNIFS possède une voie photométrique utilisant 5 filtres *ugriz* pour suivre l'absorption atmosphérique, et une voie de guidage avec un filtre V pour aider le télescope à la focalisation. Le champ de ces caméras est de $4',5 \times 9'$.

3.2.1.4 Taux de formation stellaire spécifique spectroscopique

La spécificité de SNIFS est de permettre des mesures spectroscopiques de l'environnement immédiat des SNe, développée dans [Rigault et al. \(2013\)](#) et résumée dans [Rigault et al. \(2020\)](#). Ce procédé commence par modéliser le spectre du ciel que l'on soustrait aux cubes avant d'extraire le spectre de l'environnement dans un rayon de 1 kpc projeté autour de la position des SNe Ia. Ces données permettent de détecter l'émission de raies $H\alpha$, l'un des indicateurs traditionnellement les plus utilisés pour mesurer le taux de formation stellaire (*stellar formation rate*, SFR ; cf. [Kennicutt \(1998\)](#)).

Description principe

3.2.1.5 Description des données conservées

De 2004 à 2013, SNfactory a classifié 1364 objets dont plus de 1000 supernovae, observé 645 SNe Ia au moins une fois et en a suivi plus de 271 SNe Ia, avec au moins 5 points de mesure ([Copin, 2013](#)).

Sur celles-ci, 198 ont des mesures satisfaisant les contraintes nécessaires à l'établissement de leur courbe de lumière et sont associées à une galaxie hôte permettant de déterminer leur redshift ; pour efficacement déterminer les propriétés locales de leur environnement,

TABLE 3.1 – Critères de sélection des SNe Ia suivies par SNfactory.

Critères de sélection	Nb de SNe Ia
Suivies	271
Courbe de lumière + hôte	198
$0.02 < z < 0.08$	160
Hôte g et i non contaminées	147
SNe Ia « normales »	141
SNf LSQ ou PTF seulement	114

seules les SNe entre $z = 0.02$ et $z = 0.08$ sont conservées, amenant l'échantillon à 160 objets.

Les données pour lesquelles les images des galaxies hôtes dans les bandes photométriques g et i sont contaminées par la luminosité des SNe sont également rejetées ; ces bandes s'avèrent en effet nécessaires à la détermination de la masse stellaire de la galaxie. Cette coupe réduit l'échantillon à 147 objets.

Les SNe considérées comme trop « anormales » sont exclues car supposées non représentatives de la population générale que l'on souhaite étudier. Elles sont au nombre de 6.

Finalement, parmi ces 141, ne sont conservées que celles provenant directement des collaborations internes **ou uniquement celles SNIFSées?**, c'est-à-dire celles de SNf, PTF et LSQ. L'échantillon final est alors de 114 données. L'ensemble de ces critères de sélection est résumé Table 3.1.

Grâce au suivi spectroscopique de tous les candidats à $r \lesssim 19,5$ mag et ces limitations en redshift, ces données sont considérées comme étant limitées en volume, c'est-à-dire un tirage aléatoire des populations sous-jacentes de SNe Ia.

3.2.2 Sloan Digital Sky Survey

Le sondage *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, ?, ?) est un programme d'observation astronomique majeur qui a débuté en 2000 et est encore actif aujourd'hui. Il possède un télescope optique dédié de 2,5 m à Apache Point au Nouveau Mexique, dont la première lumière date de 1998. Le programme se divise en quatre phases d'observation de différents objets astrophysiques, de simples étoiles aux grandes structures de l'Univers.

Data : Sako 2014 ; télescope Gunn 2006 ; camera Gunn 1998 ; filtres *ugriz* Fukugita 1996.

3.2.3 Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System

3.2.4 SuperNovae Legacy Survey

3.2.5 Hubble Space Telescope

Ces données à haut redshift, incluses dans Pantheon, se révèlent d'une grande importance par leur poids dans le diagramme de Hubble pour tester l'évolution des propriétés des SNe. À ces distances, le typage peut s'avérer difficile mais la classification était suffisamment

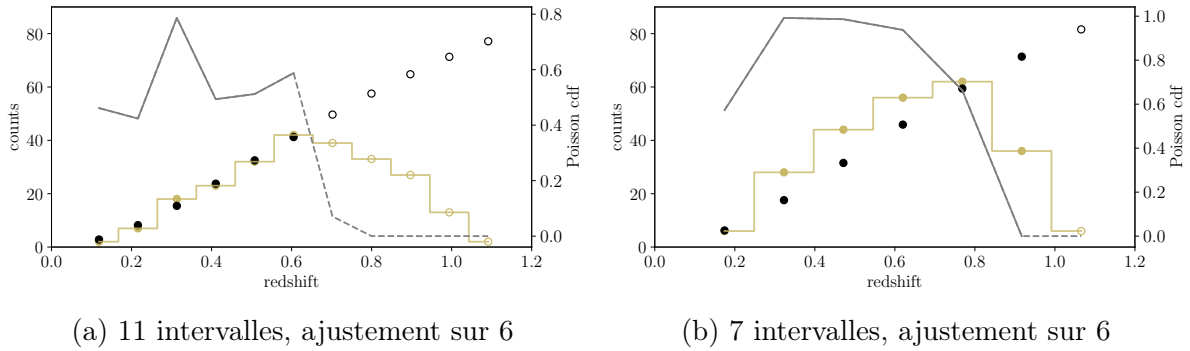


FIGURE 3.1 – Exemple d'ajustement statistique pour deux tirages aléatoires d'histogrammes de SNLS

robuste pour les inclure dans l'analyse cosmologique (Scolnic et al., 2018) ; ces données ne sont donc pas sujettes aux coupes en redshifts de la Section 3.3.1.

3.2.6 Autres sondages : CfA1-4 et CSP

3.3 Échantillon d'étude

Nous détaillons dans cette Section la procédure de construction de notre échantillon volume-limité comme expliqué partie 3.1.2. Notre étude se base sur les données de la combinaison de sondage Pantheon (Scolnic et al., 2018), en remplaçant la combinaison ciblée LOWZ par les données SNfactory dont la sélection est maîtrisée et permettant une étude de sous-population grâce au LsSFR. Les données de HST étant complètes, la confection de notre échantillon se concentre sur les sondages SDSS, PS1 et SNLS ; leur nature non-ciblée et limitée en magnitude permet d'en construire une portion limitée en volume.

3.3.1 Confection

Nous détaillons ici deux des approches mises en place visant à déterminer la portion des sondages que l'on peut considérer limitées en volume.

3.3.1.1 Approche statistique

À partir des données publiées dans Scolnic et al. (2018)¹, il est possible de tracer l'histogramme des SNe Ia en fonction du redshift ; un exemple est montré Figure 3.1 pour les données de SNLS. En supposant une densité volumique de supernovae uniforme, chaque intervalle de redshift comprend un volume de plus en plus grand et on s'attend donc à observer toujours plus de SNe Ia avec la distance.

La chute de nombre de SNe Ia provient de cette limitation du sondage à mesurer la luminosité. Notre première approche a été de se baser sur une étude statistique pour essayer de récupérer la valeur estimée à partir de laquelle chaque sondage s'écarte d'un modèle volumétrique. Le protocole est le suivant :

1. https://archive.stsci.edu/hlsps/ps1cosmo/scolnic/data_fitres

- Les bornes minimales et maximales des données sont augmentées d'une faible valeur aléatoire (entre 0.06 et 0.12 à gauche et entre 1.10 et 1.15 à droite, pour SNLS) afin d'assurer une variation du centre des intervalles ;
- On choisit aléatoirement entre 5 et 20 intervalles pour tracer l'histogramme ;
- On initialise un modèle volumétrique $a \times (V(z_2) - V(z_1))$ avec a la densité volumique de SNe Ia, paramètre libre du modèle, auquel on passe comme donnée les bords des intervalles.
- Les valeurs du modèle sont comparées aux hauteurs des intervalles de l'histogramme, permettant l'ajustement du modèle par une loi de Poisson cumulée :

$$P(x < X) = \lambda e^{(x/b)} \quad (3.1)$$

- On choisit aléatoirement un intervalle maximal après lequel l'ajustement s'arrête, avec un minimum de 3 intervalles (cas de la Figure 3.1a), 10 fois pour chaque histogramme ;
- On sauve les positions et valeurs de probabilité des intervalles ajustés et crée une interpolation linéaire des résultats ;
- Ces 5 étapes sont répétées 1000 fois et on calcule la médiane et l'écart type des 10 000 interpolations calculées.

Le modèle retenu dans notre analyse est défini par :

$$V(z) = \frac{4\pi}{3} \times d_C^3(z) \quad (3.2)$$

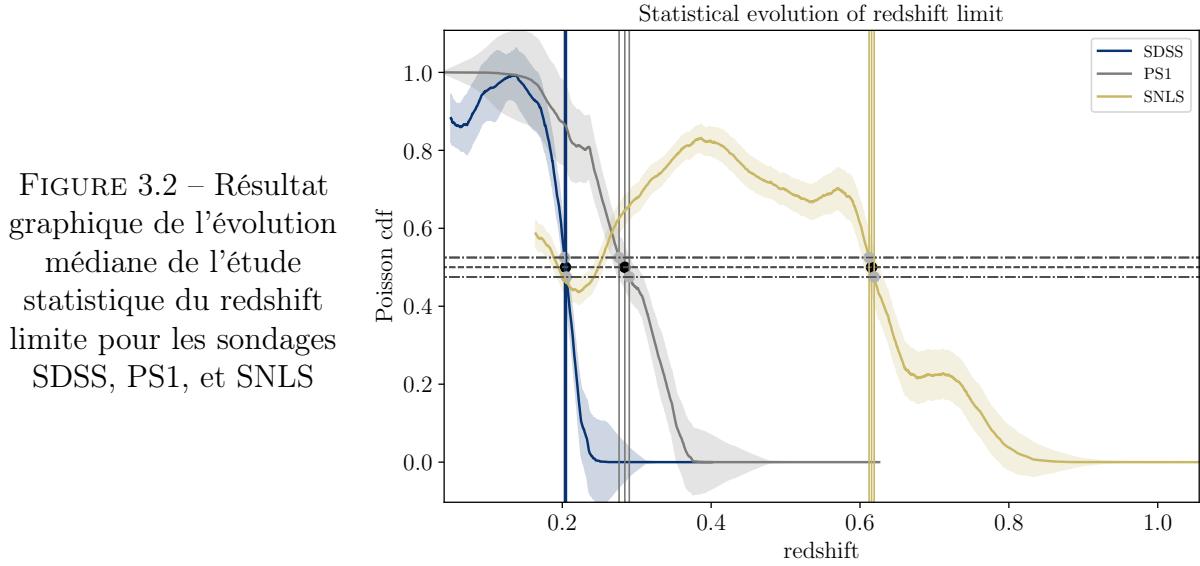
avec $d_C(z)$ la distance comobile

$$d_C(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \quad \text{avec} \quad (3.3)$$

$$E(z) \triangleq \frac{H(z)}{H_0} = [\Omega_R(1+z)^4 + \Omega_M(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda]^{1/2} \quad (3.4)$$

On a choisi la cosmologie issue de la collaboration Planck ([Planck Collaboration et al., 2020](#)) :

- $H_0 = 67,74 \text{ km Mpc}^{-1} \text{ s}^{-1}$;
- $\Omega_R = 5.389 \times 10^{-5}$;
- $\Omega_M = 0.3075$;
- $\Omega_k = 0$;
- $\Omega_\Lambda = 0.6910$



Le résultat de ces calculs donne une estimation du redshift à partir duquel chaque sondage n'a plus la capacité à recueillir toutes les SNe Ia, représentée Figure 3.2. En estimant z_{lim} comme étant la valeur à laquelle la médiane des distributions cumulées chute à 0.5 et les erreurs basse et haute à 0.525 et 0.475 respectivement, on obtient les valeurs de la Table 3.2.

Cette première approche présente une robustesse certaine dans l'établissement des évolutions statistiques en répétant le processus précédent. Cependant, le sens de variation non constant du résultat de SNLS et de PS1 ne permettent pas de forte confiance dans la correspondance de ce protocole au but de cette étude ; de plus, le choix de la valeur de la fonction de répartition à laquelle on peut considérer le sondage complet n'est pas motivée mathématiquement ou physiquement de manière systématique. Cette conclusion nous a amené à une approche combinant à la fois la réalité de la sélection astrophysique instrumentale et les équations de distribution de luminosité de SN Ia avec leurs paramètres x_1 , c et z .

3.3.1.2 Approche analytique

En supposant que ces sondages ont un typage spectroscopique et suivi photométrique suffisant, ils devraient avoir des effets de sélection de sous-population de SNe Ia négligeables en deçà d'un certain redshift permettant l'acquisition de toute la zoologie de stretch et couleur. Les données de SNe Ia issues de l'ajustement par SALT2.4 ne contiennent que des données avec un maximum de $x_1 = \pm 3$ et de $c = \pm 0.3$ (Guy et al., 2007; Betoule et al., 2014, cf Section 2.4.2).

La magnitude absolue d'une supernova à son maximum de luminosité est, d'après l'équation ?? :

$$M = M_0 - \alpha x_1 + \beta c$$

avec $M_0 = -19,36$ mag dans le filtre photométrique B de Bessell (Kessler et al., 2009; Scolnic et al., 2014), $\alpha = 0.158$ et $\beta = 3.14$ (Table 7, Scolnic et al., 2018). On détermine

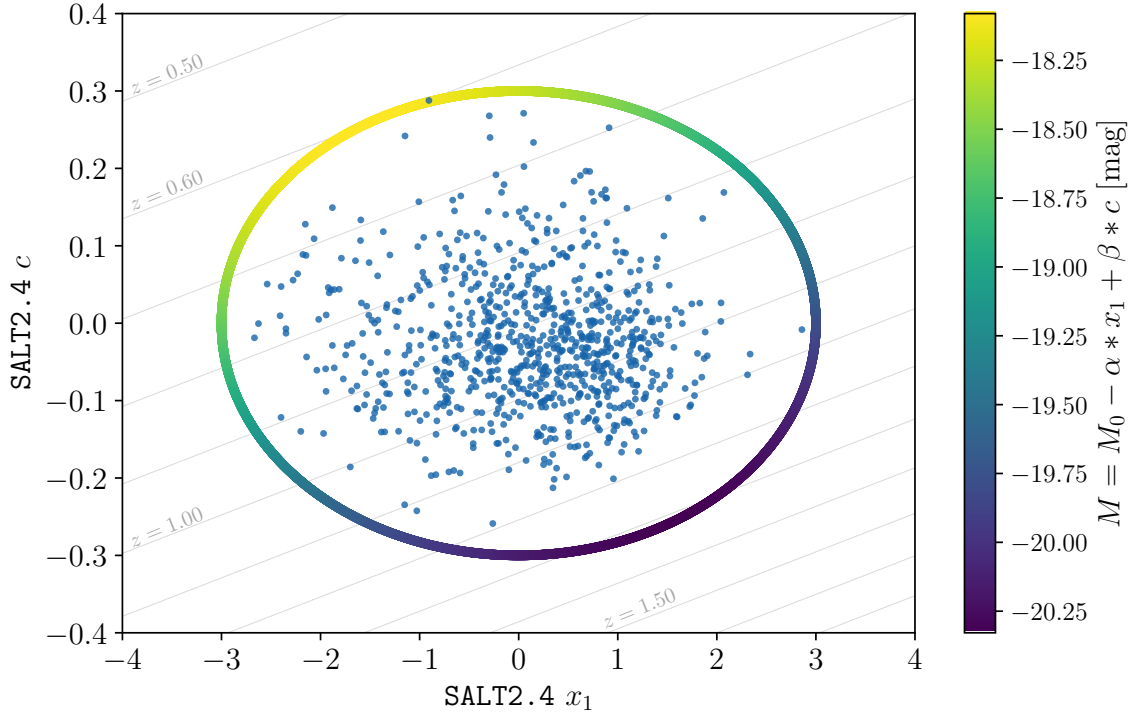


FIGURE 3.3 – Distribution des paramètres de courbe de lumière de stretch (x_1) et de couleur (c) issus d'un ajustement par SALT2.4 pour les données de SNe Ia des sondages SDSS, PS1 et SNLS combinés du catalogue Pantheon. Chaque supernova est représentée par un point bleu. L'ellipse limite des paramètres ($x_1 = \pm 3, c = \pm 0.3$) est représentée avec un gradient de couleur correspondant à la magnitude absolue standardisée en utilisant les valeurs de Scolnic et al. (2018) pour les coefficients α et β . Les lignes diagonales grises représentent l'évolution de $m = m_{\text{lim}}$ en fonction de z dans le plan (x_1, c) entre $z = 0.50$ et $z = 1.70$ pour la magnitude limite $m_{\text{lim}} = 24,8$ mag du sondage SNLS.

cette quantité sur l'ellipse limite des paramètres grâce au paquet `sncosmo`², représentée par un gradient de couleur Figure 3.3. On trouve alors que la supernova la moins lumineuse est celle de paramètres $x_1 = -1.65$ et $c = 0.25$ dont le maximum de magnitude absolue standardisée est $M_{\text{min}}^{t_0} = -18,31$ mag.

Cependant, pour établir une courbe de lumière, une supernova doit être observée typiquement au moins 5 jours avant et une semaine après son pic de luminosité, donnant une magnitude absolue limite effective d'approximativement $M_{\text{lim}} = -18,00$ mag. En connaissant les magnitudes limites de chaque sondage et avec l'équation reliant le module de distance aux magnitudes observée et absolue

$$\mu(z) = m - M \quad (3.5)$$

on peut déterminer le redshift limite z_{lim} en-delà duquel la SN Ia la moins lumineuse ne sera pas observée. On a ainsi défini un ensemble de redshifts limites définissant un échantillon fiduciel en prenant la limite suggérée par cette analyse.

Cependant, cette solution pourrait ne pas être optimale étant donné qu'elle ignore les efficacités de suivi spectroscopiques pour les redshifts en-dessous de z_{lim} ; c'est pourquoi

2. <https://sncosmo.readthedocs.io/en/stable/>

nous avons également déterminé un autre ensemble de coupes définissant un échantillon « conservatif ». Cet échantillon est plus petit et donc sera statistiquement moins pertinent, mais également moins sujet aux effets de sélection. Ainsi si l'évolution des propriétés des SNe Ia avec le redshift est encore sondable dans l'échantillon conservatif, il serait encore plus présent dans un échantillon dont l'absence d'effets de sélection est effectuée avec plus de précision que nos coupes en redshift.

Pour SNLS dont les supernovae sont typiquement entre $0.4 < z < 0.8$, la bande B de Bessell dans un référentiel au repos correspond approximativement à son filtre i , de magnitude limite à 5σ de 24,8 mag³. Ceci implique $z_{\text{lim}} = 0.60$, en accord avec Neill et al. (2006); Perrett et al. (2010), et Bazin et al. (2011). D'autre part, la Figure 14 de Perrett et al. (2010), suggère une plus basse limite à $z_{\text{lim}} = 0.55$. Nous avons donc choisi $z = 0.60$ et $z = 0.55$ comme redshifts limites de SNLS pour les échantillons fiduciel et conservatif respectivement.

De la même manière pour PS1 leurs SNe Ia sont entre $0.2 < z < 0.4$; la profondeur à 5σ dans la bande g est de 23,1 mag d'après Rest et al. (2014) et mène à $z_{\text{lim}} = 0.31$, en correspondance avec la Figure 6 de Scolnic et al. (2018) par exemple. De manière conservative, cette figure suggère une limite plus prononcée à $z_{\text{lim}} = 0.27$; ces deux valeurs constituent donc les redshifts limites de PS1 pour la partie fiducielle et conservative, respectivement, de notre échantillon.

Dans le même intervalle pour SDSS la magnitude limite est de 22,5 mag d'après Dilday et al. (2008) et Sako et al. (2008); cette valeur impliquerait $z_{\text{lim}} = 0.24$, mais les sondages SDSS se sont confrontés à une limitation dans leurs capacités spectroscopiques. Comme indiqué dans Kessler et al. (2009) Section 2, les données de la première année de SDSS ont favorisé les SNe Ia de magnitude $r < 20,5$ mag pour identification spectroscopique, ce qui correspondrait à une coupe de redshift à 0.15. Le reste du programme a bénéficié de meilleures ressources spectroscopiques et Kessler et al. (2009) et Dilday et al. (2008) font preuve d'une complétude raisonnable jusqu'à $z = 0.2$. En nous basant sur ces faits, on a choisi $z_{\text{lim}} = 0.20$ et $z_{\text{lim}} = 0.15$ pour nos échantillons fiduciel et conservatif respectivement.

Cette approche est totalement systématique et reproductible, **insert github pages notebook ?** et donne des z_{lim} similaires à l'approche statistique; cette observation conforte donc les résultats et choix de magnitude limite, et ce sont ces résultats analytiques que l'on a conservés dans notre étude.

3.3.2 Présentation

La composition finale de notre échantillon est synthétisée Table 3.2. Les distributions en redshift des 3 sondages coupés sont présentées Figure 3.4. On y observe que les limites sont globalement situées avant le pic de ces histogrammes, suivant la logique guidant cette chute (cf. Section 3.1).

En combinant les 5 sondages de notre analyse, on peut tracer leur distribution de stretch en fonction du redshift. On en présente un graphique Figure 3.5. Supposant l'échantillon

3. <https://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/cfhtlsfinalreleaseexecsummary.html>

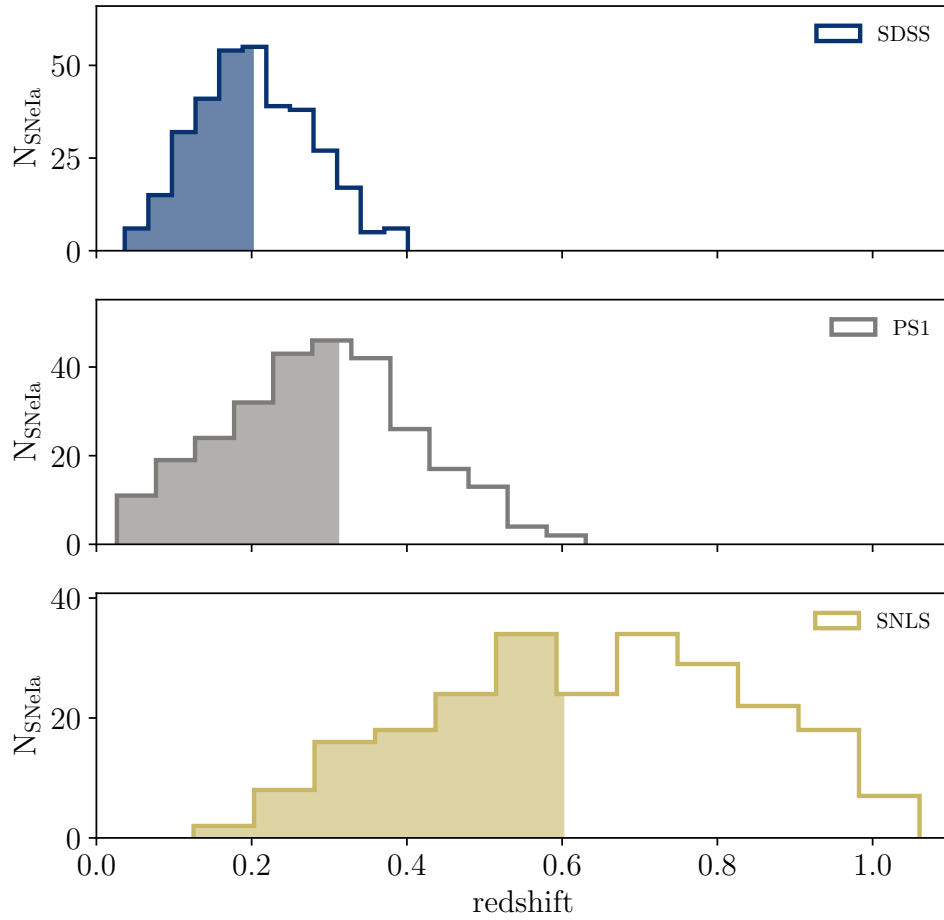


FIGURE 3.4 – *De haut en bas* : Histogrammes en redshift des SNe Ia des sondages SDSS, PS1 et SNLS (données de Pantheon, [Scolnic et al., 2018](#)). Les parties colorées représentent les distribution de SNe Ia conservées dans notre analyse, considérées exemptes d'effets de sélection observationnels (cf. Section 3.3.1.2). Les couleurs foncées (claires) représentent les limites conservatives (fiducielles) nos coupes de sélection indiquées dans la Table 3.2.

TABLE 3.2 – Composition en SNe Ia de notre échantillon.

Sondage	z_{lim}		N_{SN}
	Statistique	Analytique	
SNf		0.08	114
SDSS	$0.204^{+0.001}_{-0.001}$	0.20 (0.15)	167 (82)
PS1	$0.284^{+0.006}_{-0.008}$	0.31 (0.27)	160 (122)
SNLS	$0.615^{+0.003}_{-0.003}$	0.60 (0.55)	102 (78)
HST	–	–	26
Total	–	–	569 (422)

notes. L'échantillon et notamment le nombre de SNe utilisées suivent les limites analytiques. Les nombres entre parenthèse correspondent aux limites conservatives.

affranchi d'effets de sélection, on peut lire sur ce graphique une première idée de l'évolution en redshift que l'on suppose issue du changement des propriétés moyennes des SNe Ia avec l'âge de leur environnement. En effet, on observe que la fraction de SNe Ia présentant un faible stretch, typiquement $x_1 < -1$, semble décroître avec le redshift alors que la population de stretch > 1 semble toujours peuplée ; à noter qu'ici le redshift est en échelle logarithmique, expliquant le tassement horizontal. Cette idée est confirmée dans le chapitre suivant, Section 4.3.

3.3.3 Confirmation d'hypothèse

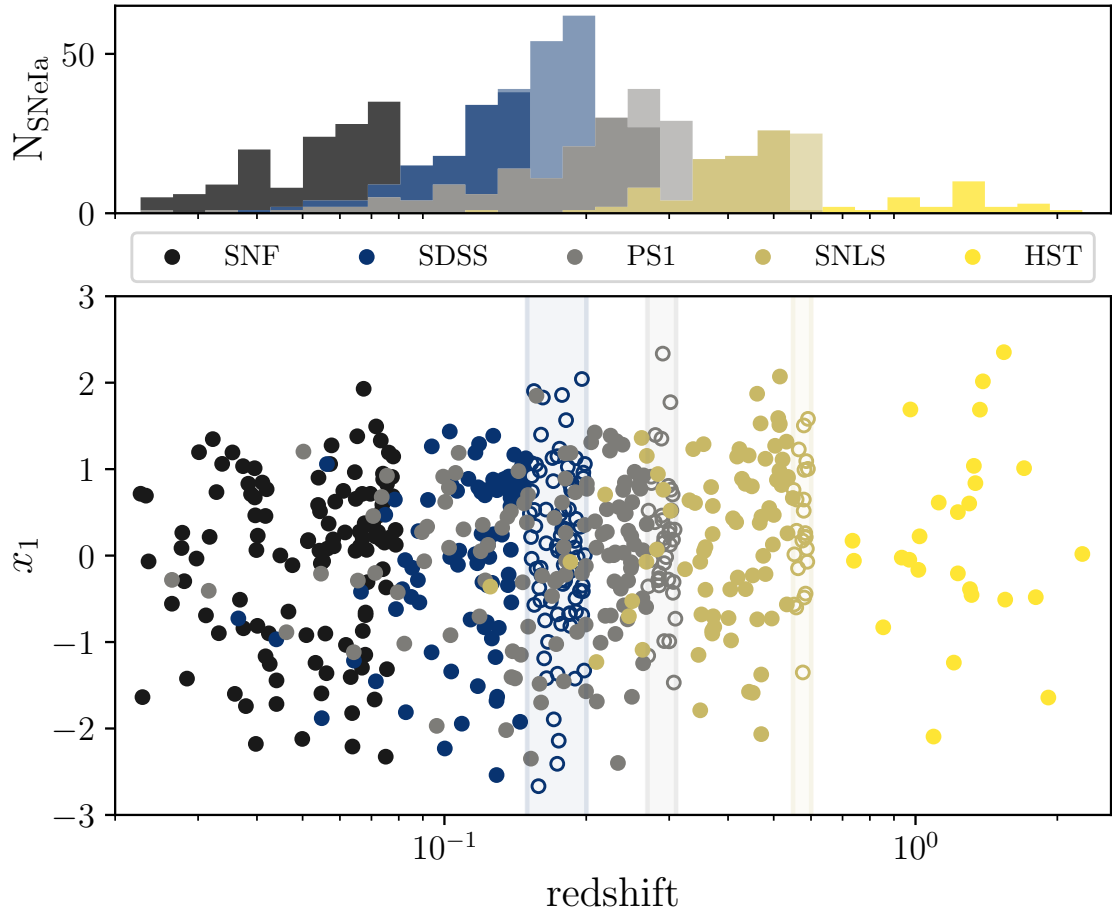


FIGURE 3.5 – *En bas* : stretch des courbes de lumière ajustées avec **SALT2.4** en fonction du redshift en échelle logarithmique pour chaque sondage de cette analyse (cf. légende). Les points pleins (creux) correspondent aux limites conservatives (fiducielles). *En haut* : histogrammes en redshift superposés, en sombre (clair) pour les limites conservatives (fiducielles).

Évolution avec le *redshift*

Citation

Autaire

Sommaire

4.1	Concept d'âge	34
4.1.1	Travaux précédents	34
4.1.2	Implications	34
4.2	Modélisation du <i>stretch</i>	34
4.2.1	Paramétrisations	34
4.2.2	Implémentation	34
4.3	Résultats	34
4.3.1	Comparaison aux données	34
4.3.2	Prédictions	34

4.1 Concept d'âge

4.1.1 Travaux précédents

4.1.2 Implications

4.2 Modélisation du *stretch*

4.2.1 Paramétrisations

Avec LsSFR

Sans LsSFR

4.2.2 Implémentation

4.3 Résultats

4.3.1 Comparaison aux données

4.3.2 Prédictions

ZTF

Impact sur la cosmologie : simulations

Citation

Autaire

Sommaire

5.1	SNANA : overview	36
5.1.1	Inputs	36
5.1.2	Tools	36
5.2	La masse comme traceur	36
5.2.1	Modélisation	36
5.2.2	Utilisation	36
5.3	Implémentation	36
5.3.1	Corrélations testées	36
5.3.2	Résultats	36

5.1 SNANA : overview

5.1.1 Inputs

5.1.2 Tools

5.2 La masse comme traceur

5.2.1 Modélisation

5.2.2 Utilisation

5.3 Implémentation

5.3.1 Corrélations testées

5.3.2 Résultats

Résultats et discussion

– XXX –

Sommaire

6.1	XXX	38
6.1.1	XXX	38
6.1.2	XXX	38
6.2	XXX	38
6.2.1	XXX	38
6.2.2	XXX	38

- 1) Drift mieux
- 2) Forward model stylé
- 3) Age cool
- 4) SNANA pas au point

6.1 XXX

6.1.1 XXX

6.1.2 XXX

6.2 XXX

6.2.1 XXX

6.2.2 XXX

Conclusions

Bibliographie

- Aldering, G., Adam, G., Antilogus, P., et al. 2002, *Overview of the Nearby Supernova Factory*, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4836, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries, ed. J. A. Tyson & S. Wolff, 61–72 [↑ Page 21](#)
- Astier, P., Guy, J., Regnault, N., et al. 2006, *The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set*, *A&A*, 447, 31 [↑ Page 20](#)
- Bazin, G., Ruhlmann-Kleider, V., Palanque-Delabrouille, N., et al. 2011, *Photometric selection of Type Ia supernovae in the Supernova Legacy Survey*, *A&A*, 534, A43 [↑ Page 28](#)
- Betoule, M., Kessler, R., Guy, J., et al. 2014, *Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples*, *A&A*, 568, A22 [↑ Page 26](#)
- Copin, Y. 2013, *Spectro-photométrie à champ intégral dans le cadre du projet “The Nearby Supernova Factory”*, Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard – Lyon I, [HAL thèses](#) [↑ Page 22](#)
- Dilday, B., Kessler, R., Frieman, J. A., et al. 2008, *A Measurement of the Rate of Type Ia Supernovae at Redshift $z \approx 0.1$ from the First Season of the SDSS-II Supernova Survey*, *ApJ*, 682, 262 [↑ Page 28](#)
- Guy, J., Astier, P., Baumont, S., et al. 2007, *SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators*, *A&A*, 466, 11 [↑ Page 26](#)
- Hadjiyska, E., Rabinowitz, D., Baltay, C., et al. 2012, *La Silla-QUEST Variability Survey in the Southern Hemisphere*, in New Horizons in Time Domain Astronomy, ed. E. Griffin, R. Hanisch, & R. Seaman, Vol. 285, 324–326 [↑ Page 22](#)
- Hamuy, M., Phillips, M. M., Suntzeff, N. B., et al. 1996, *The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type IA Supernovae*, *AJ*, 112, 2391 [↑ Page 21](#)
- Kennicutt, R. 1998, *Emission-Line Diagnostics of Galaxy Evolution with NGST*, in ESA Special Publication, Vol. 429, LIA Colloq. 34: The Next Generation Space Telescope: Science Drivers and Technological Challenges, ed. B. Kaldeich-Schürmann, 81 [↑ Page 22](#)
- Kessler, R., Bernstein, J. P., Cinabro, D., et al. 2009, *SNANA: A Public Software Package for Supernova Analysis*, *PASP*, 121, 1028 [↑ Page 26](#), [↑ Page 28](#)
- Lantz, B., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2004, *SNIFS: a wideband integral field spectrograph with microlens arrays*, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5249, Optical Design and Engineering, ed. L. Mazuray, P. J. Rogers, & R. Wartmann, 146–155 [↑ Page 22](#)

- Law, N. M., Kulkarni, S. R., Dekany, R. G., et al. 2009, *The Palomar Transient Factory: System Overview, Performance, and First Results*, [PASP](#), **121**, 1395 [↑ Page 22](#)
- Neill, J. D., Sullivan, M., Balam, D., et al. 2006, *The Type Ia Supernova Rate at $z \sim 0.5$ from the Supernova Legacy Survey*, [AJ](#), **132**, 1126 [↑ Page 28](#)
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, [ApJ](#), **517**, 565 [↑ Page 20](#), [↑ Page 21](#)
- Perrett, K., Balam, D., Sullivan, M., et al. 2010, *Real-time Analysis and Selection Biases in the Supernova Legacy Survey*, [AJ](#), **140**, 518 [↑ Page 28](#)
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al. 2020, *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, [A&A](#), **641**, A6 [↑ Page 25](#)
- Rabinowitz, D., Baltay, C., Emmet, W., et al. 2003, *The Palomar-QUEST large-area CCD camera*, in American Astronomical Society Meeting Abstracts, Vol. 203, American Astronomical Society Meeting Abstracts, [38.12](#) [↑ Page 22](#)
- Rest, A., Scolnic, D., Foley, R. J., et al. 2014, *Cosmological Constraints from Measurements of Type Ia Supernovae Discovered during the First 1.5 yr of the Pan-STARRS1 Survey*, [ApJ](#), **795**, 44 [↑ Page 28](#)
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, [AJ](#), **116**, 1009 [↑ Page 21](#)
- Rigault, M., Brinnel, V., Aldering, G., et al. 2020, *Strong dependence of Type Ia supernova standardization on the local specific star formation rate*, [A&A](#), **644**, A176 [↑ Page 22](#)
- Rigault, M., Copin, Y., Aldering, G., et al. 2013, *Evidence of environmental dependencies of Type Ia supernovae from the Nearby Supernova Factory indicated by local $H\alpha$* , [A&A](#), **560**, A66 [↑ Page 22](#)
- Sako, M., Bassett, B., Becker, A., et al. 2008, *The Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey: Search Algorithm and Follow-up Observations*, [AJ](#), **135**, 348 [↑ Page 28](#)
- Scolnic, D., Rest, A., Riess, A., et al. 2014, *Systematic Uncertainties Associated with the Cosmological Analysis of the First Pan-STARRS1 Type Ia Supernova Sample*, [ApJ](#), **795**, 45 [↑ Page 26](#)
- Scolnic, D. M., Jones, D. O., Rest, A., et al. 2018, *The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample*, [ApJ](#), **859**, 101 [↑ Page 24](#), [↑ Page 26](#), [↑ Page 27](#), [↑ Page 28](#), [↑ Page 29](#)