

Présentation des sondages

« *Simplicity is the final achievement. After one has played notes and more notes, it is simplicity that emerges as the crowning reward of art.* »

CHOPIN

Comme nous en avons discuté initialement (voir Chapitre ??), les SNe Ia sont un excellent outil pour sonder les propriétés de l'Univers. Depuis la découverte de son expansion accélérée (RIESS et al. 1998 ; PERLMUTTER et al. 1999), de nombreux relevés cosmologiques visant à acquérir des données de SNe Ia ont vu le jour.

La diversité des régions d'Univers à sonder implique des stratégies variées, et chaque sondage s'inscrit dans un contexte particulier avec ses propres instruments, caractéristiques et objectifs scientifiques. S'ils permettent ensemble d'améliorer la statistique de ces mesures, leurs différentes approches de relevé sont parfois notables et il convient de comprendre leurs ancrages pour en comprendre les spécificités.

Ainsi nous présentons dans ce chapitre les sondages dont nous utilisons les données ou qui apparaissent dans cette thèse. Les cinq premiers constituent notre échantillon de base, alors que les deux derniers ont une présence limitée dans notre étude. Un comparatif des caractéristiques des sondages est présenté Tableau I.4.

Sommaire

I.1 The Nearby Supernova factory	3
I.1.1 Introduction	3
I.1.2 Détection des supernovae	3
I.1.3 Suivi spectrophotométrique	3
I.1.4 Description des données conservées	4
I.2 Sloan Digital Sky Survey	5
I.2.1 Introduction	5
I.2.2 Détection des supernovae	6
I.2.3 Suivi spectrophotométrique	7
I.2.4 Données conservées	7
I.3 Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System	8
I.3.1 Introduction	8
I.3.2 Détection des supernovae	8
I.3.3 Suivi spectrophotométrique	9
I.3.4 Données conservées	10
I.4 Supernova Legacy Survey	11
I.4.1 Introduction	11
I.4.2 Détection des supernovae	11
I.4.3 Suivi spectrophotométrique	12
I.4.4 Données conservées	12
I.5 HUBBLE Space Telescope	13
I.5.1 Introduction	13
I.5.2 Détection des supernovae	14
I.5.3 Suivi spectrophotométrique	14
I.5.4 Données conservées	15
I.6 Autres sondages : CfA1-4 et CSP	15
I.7 Complément : Zwicky Transient Facility	16
I.7.1 Introduction	16
I.7.2 Détection des supernovae	16
I.7.3 Suivi spectrophotométrique	17
I.7.4 Données conservées	18
I.8 Résumé et comparaison	18

I.1 The Nearby Supernova factory

I.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 spectrophotométrique d'une précision d'environ 1% de SNe Ia proches. Un de ses objectifs est de peupler la partie basse du diagramme de HUBBLE ($0,03 < z < 0,08$) pour permettre son ancrage à bas redshift, qui ne contenait alors qu'une vingtaine de SNe Ia ([HAMUY et al. 1996](#)). Par sa nature purement spectrophotométrique, la mission tente également d'étudier précisément les propriétés des SNe Ia. En effet, une étude fine spectrale est nécessaire 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. Avec les données de SNf, [RIGAULT et al. \(2020\)](#) ont montré une forte corrélation entre le traceur LsSFR (Section ??) et les propriétés des SNe Ia, établissant la base de notre analyse sur l'âge des SNe Ia.

I.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 deg^2 du ciel chaque soir avec la caméra QUEST de 112 capteurs CCD, observant en bandes *UBVRI*. 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, [HADJIYSKA 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 par la luminosité de la Lune notamment). Les transmissions des filtres *UBVRI* de La Silla issues du service de profils de filtres du *Spanish Virtual Observatory* (SVO¹, [RODRIGO et SOLANO 2020](#)) sont tracées Figure I.1a, et un exemple de courbe de lumière d'une SN identifiée par SNf est donné Figure I.1b.

I.1.3 Suivi spectrophotométrique

Le typage spectroscopique, quand il n'a pas déjà été réalisé par d'autres collaborations 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 2,2m 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 simples à mettre en place.

1. <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?asttype=astro>

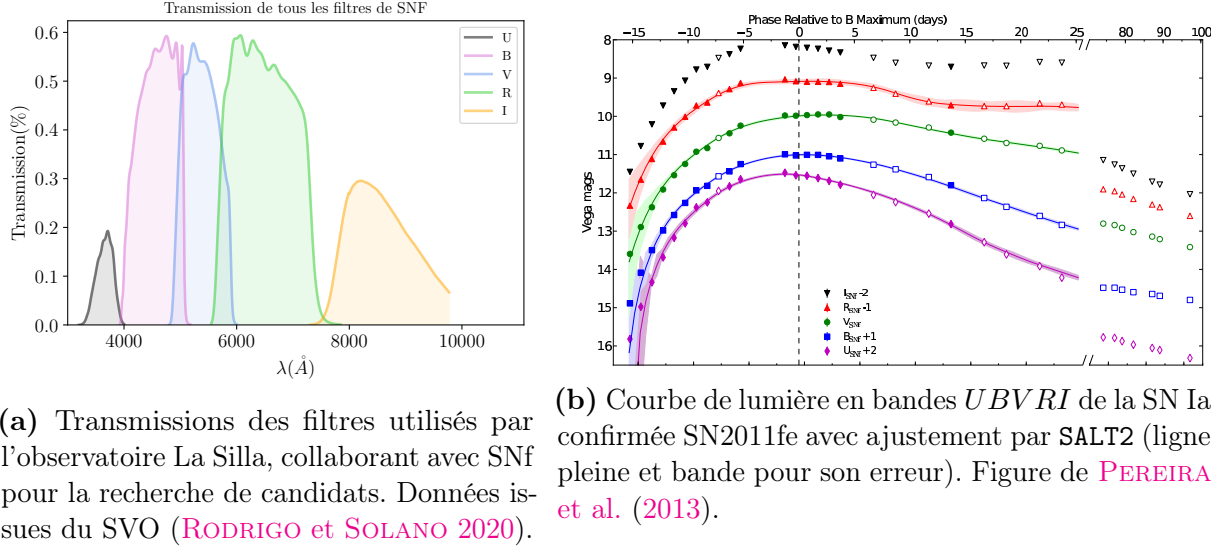


FIGURE I.1 – Caractéristiques du sondage SNF.

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 $4'.5 \times 9'$.

I.1.4 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. Afin de déterminer efficacement les propriétés locales de leur environnement, 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. En effet, ces bandes s'avèrent 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, 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 Tableau I.1.

Tableau I.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

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. On présente Figure I.2 les distributions de redshift, étirement et couleur de ces 114 SNe Ia.

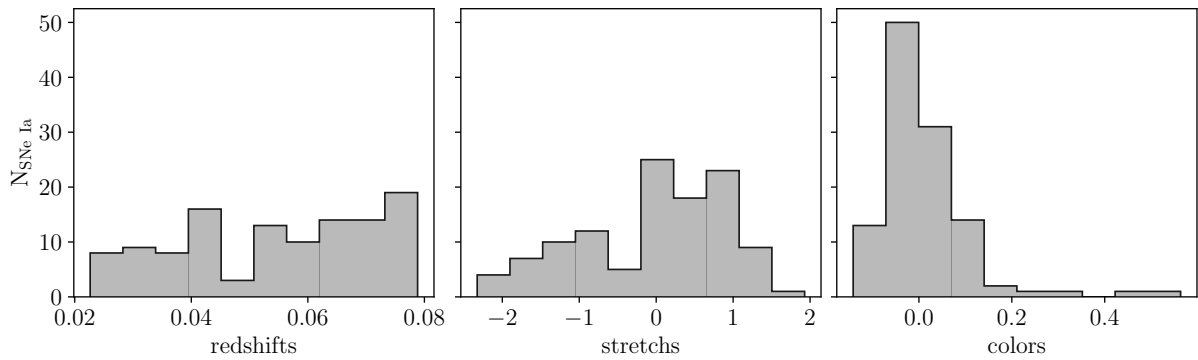


FIGURE I.2 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d'étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 114 données de SNfactory.

I.2 Sloan Digital Sky Survey

I.2.1 Introduction

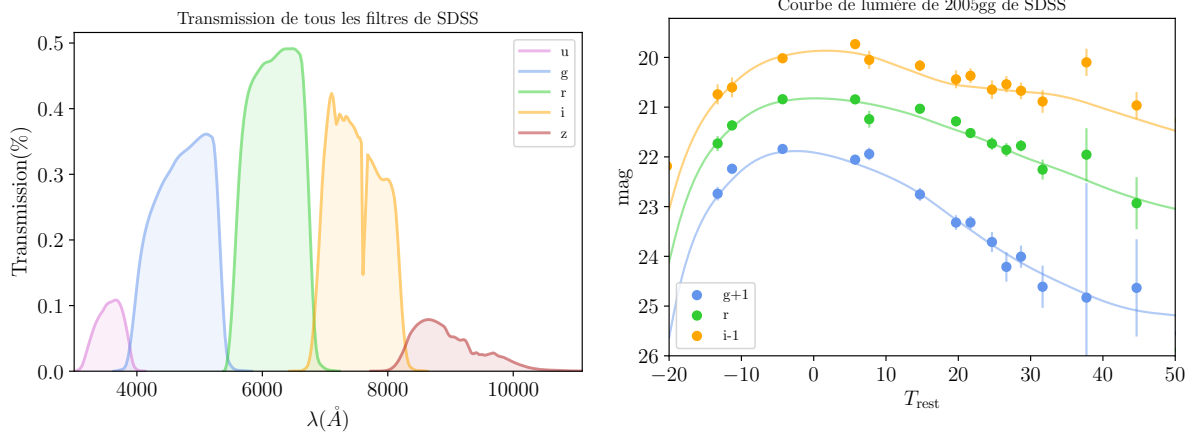
Le *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, [FRIEMAN et al. 2008](#) ; [SAKO et al. 2008, 2018](#)) est un sondage astronomique majeur qui a débuté en 2000 et est encore actif aujourd'hui². Le programme se divise en cinq phases d'observation de différents objets astrophysiques, de simples étoiles aux grandes structures de l'Univers. La partie supernova du sondage est une des trois composantes de la seconde phase et s'étend de 2005 à 2008 ; ce sera la seule que nous détaillerons ici. Son objectif principal est de répondre au manque de données astrophysiques à redshifts intermédiaires par rapport aux sondages de l'époque : l'intervalle de redshifts sondés est entre $0,05 \lesssim z \lesssim 0,45$, partie encore peu peuplée en 2005. À cela s'ajoute la volonté de réduire les limitations systématiques des autres programmes afin

2. <https://www.sdss5.org/>

d'améliorer les contraintes sur les propriétés de l'énergie sombre, par l'utilisation de sa combinaison unique de couverture céleste, précision photométrique et grande sensibilité. Ceci est rendu possible grâce à la première phase du sondage qui a apporté une large base de données d'images de références, de catalogues d'objets et de calibration photométrique.

I.2.2 Détection des supernovae

La stratégie d'observation de SDSS se concentre sur 300 deg² du ciel faiblement affectée par l'extinction galactique, nommée Bande 82, en y répétant l'acquisition. Elle est réalisée grâce au télescope optique dédié de 2,5 m (GUNN et al. 2006) à Apache Point au Nouveau Mexique, couplé à une caméra CCD (GUNN et al. 1998) à 5 filtres optiques (*ugriz*, FUKUGITA et al. 1996) qui tournent avec une cadence relativement haute, environ une acquisition toutes les 4 à 5 nuits. Les transmissions de ces filtres sont tracées Figure I.3a. Le procédé d'acquisition est similaire à celui de SNf, étant tous les deux des sondages à recherche glissante : différentes images du ciel sont comparées pour détecter les phénomènes transitoires et créer des courbes de lumière. Cette stratégie a permis à SDSS de détecter la majeure partie de ses SNe bien avant leur maximum d'émission (pour $z \lesssim 0,3$) avec des courbes bien échantillonnées en plusieurs bandes photométriques (cf. Figure I.3b).



(a) Transmissions des filtres utilisés par le sondage SDSS. Données tirées du SVO (RODRIGO et SOLANO 2020).

(b) Courbe de lumière en bandes *gri* de la SN Ia confirmée 2005gg, à $z = 0,230$. Figure produite avec les données du sondage et de l'analyse Pantheon (SCOLNIC et al. 2018).

FIGURE I.3 – Caractéristiques du sondage SDSS.

Pour discriminer entre bruit de fond et réelle variation astronomique, une inspection visuelle par un humain était systématiquement nécessaire jusqu'en 2006, *via* une interface web comportant les images dans les filtres *gri* et d'autres informations pertinentes. Des 5 filtres utilisés, ce sont donc ces trois-là qui forment les meilleures mesures. Après cette date, la détection est en partie laissée au logiciel *autoscanter*. Sur les trois saisons d'observation, ce sont 10258 nouveaux objets transitoires qui ont été découverts.

I.2.3 Suivi spectrophotométrique

Le typage de SDSS utilise de nombreux différents télescopes : le HET de 9,2 m (HILL et al. 1998), le ARC³ de 3,5 m, Subaru de 8,2 m (KASHIKAWA et al. 2000), le WHT⁴ de 4,2 m, le MDM⁵ de 2,4 m, le Keck de 10 m (OKE et al. 1995), le TNG⁶ de 3,5 m, le NTT de 3,6 m (DEKKER et al. 1986), le NOT⁷ de 2,5 m, les télescopes de *Magellan*⁸ de 6,5 m et le SALT de 11 m (BURGH et al. 2003). Plusieurs de ces télescopes pouvaient être prévus pour observation la même nuit, rendant au total le temps alloué à la spectroscopie supérieur au temps alloué à l'acquisition optique, permettant l'acquisition de tous les candidats à $z \lesssim 0,15$.

Cependant, le nombre de candidats par nuit excède largement les capacités de suivi spectroscopique, obligeant les opérateurs à faire une sélection des cibles à analyser. Ainsi, une vérification visuelle a également été réalisée en comparant les courbes de lumière dans les bandes *gri* avec des bibliothèques de différents modèles pour en estimer les paramètres (redshift, date du maximum de flux, magnitude apparente, contamination galactique...) et permettre de prioriser les cibles à suivre spectroscopiquement. Notamment, les SNe Ia les plus prioritaires sont celles qui sont bien séparées du centre galactique ($\gtrsim 1''$), avec un contraste de luminosité SN/galaxie raisonnable (critère visuel), et dont la galaxie hôte est relativement rouge. Le sondage requiert généralement deux détections avant le suivi spectroscopique, mais par manque de candidats à bas redshift ce critère a pu être réduit, contrairement aux données à $z \gtrsim 0,2$ où les candidats ne manquent pas. L'algorithme choisi par SDSS se rapproche fortement de celui du sondage SNLS, cf Section I.4.

En combinant les trois saisons d'observation, la phase II de SDSS a spectroscopiquement confirmé 499 SNe Ia (SAKO et al. 2018).

I.2.4 Données conservées

Après l'acquisition des données, une sélection supplémentaire s'applique pour ne retenir que les données dites « cosmologiques », c'est-à-dire qui correspondent aux exigences de qualité pour être insérées dans le diagramme de HUBBLE. Pour SDSS, en appelant T_{rest} le temps en jours par rapport au maximum d'émission en bande *B*, les critères sur les courbes de lumière avancés dans KESSLER et al. (2009) sont les suivants :

- 1) Au moins 1 mesure avant $T_{\text{rest}} < 0$ jour ;
- 2) Au moins 1 mesure après $T_{\text{rest}} > 10$ jours ;
- 3) Au moins 5 mesures entre $-15 < T_{\text{rest}} < 60$ jours ;
- 4) Au moins 1 mesure avec un rapport signal sur bruit > 5 en bande *g*, *r* et *i* ;
- 5) $\mathcal{P}_{\text{fit}} > 0,001$, où \mathcal{P}_{fit} est la probabilité d'optimisation par degré de liberté donné par le programme MLCS2K2, similaire à SALT2.4 (cf. Section ??).

3. <http://www.apo.nmsu.edu/arc35m/Instruments/DIS/#B>

4. http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/whtisis.html

5. <http://www.astronomy.ohio-state.edu/MDM/CCDS/>

6. <http://www.tng.iac.es/instruments/lrs/>

7. <http://www.not.iac.es/instruments/alfosc/>

8. <http://www.lco.cl/magellan-telescopes/>

Dans l'analyse finale de [SCOLNIC et al. \(2018\)](#), les données photométriques qui sont considérées aberrantes ($> 4\sigma$) sont retirées. Le nombre total de données conservées est alors de 335. La Figure I.4 en présente les histogrammes en redshift, étirement et couleur.

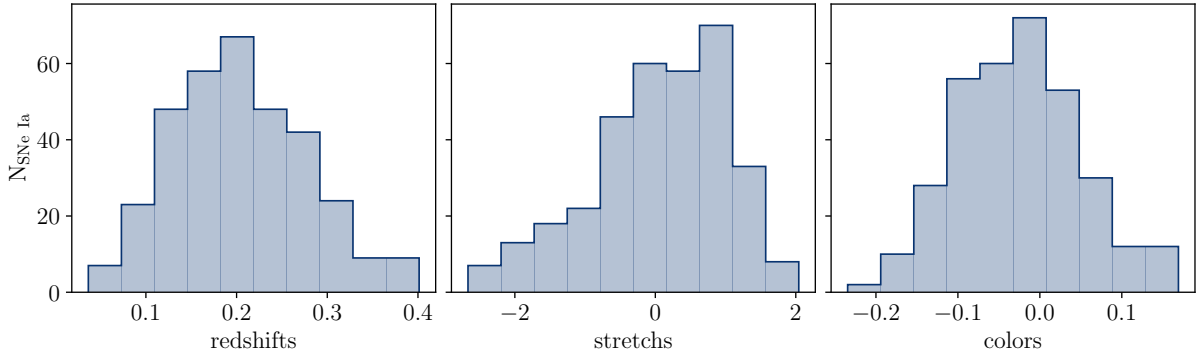


FIGURE I.4 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d'étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 335 données de SDSS.

I.3 Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System

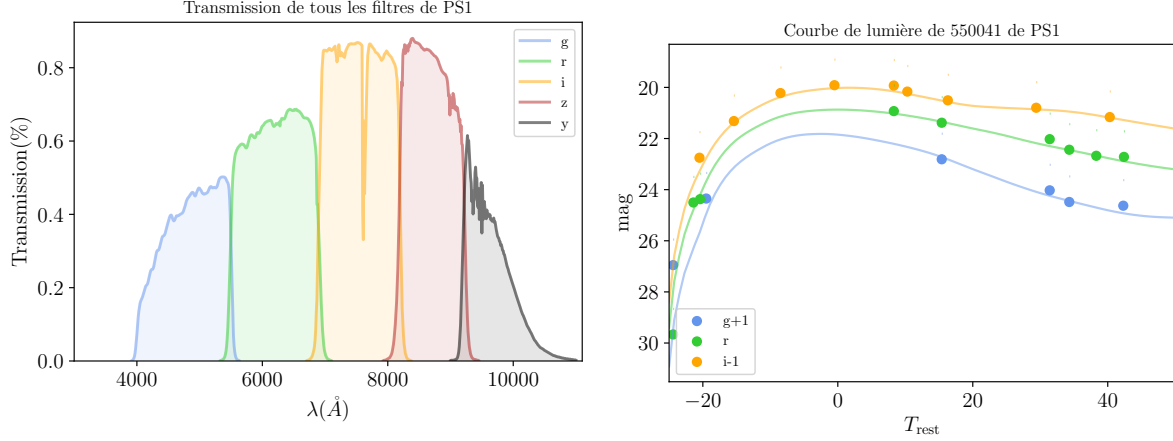
I.3.1 Introduction

Le *Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System* (Pan-STARRS, [CHAMBERS et al. 2016](#) ; [SCOLNIC et al. 2018](#)) est un site d'imagerie et de traitement de données astronomiques à grand champ, dont le premier télescope, PS1 (se confondant par la suite avec le nom du sondage) est situé au sommet du Mont Haleakala sur l'île Maui de la chaîne d'îles hawaïenne. Son relevé a commencé en 2009 pour se terminer en 2014. Son intervalle de redshifts sondés s'étend de $0,02 < z < 0,65$, et ses objectifs scientifiques sont nombreux. Cela inclut la photométrie de précision d'étoiles dans la Voie Lactée, le sondage du système solaire avec recherche d'astres dangereux dans les environs de la Terre, l'étude des phénomènes transitoires et la volonté de poser de nouvelles contraintes sur l'énergie et la matière sombres. Ces deux derniers objectifs sont ceux qui nous importent.

I.3.2 Détection des supernovae

Les relevés de PS1 sont réalisés grâce au sous-programme *Medium Deep Survey* (MDS) se concentrant sur 10 champs déjà bien étudiés de 7 deg^2 chacun, pour une surface totale de 70 deg^2 et comptabilisant 25% du temps de PS1. Sa cadence est de 7 jours par filtre sur une période de 6 à 8 mois avec une profondeur de champ en bande g de 23,1 mag. Son télescope ([HODAPP et al. 2004](#)) est composé d'un miroir primaire de 1,8 m et d'un secondaire de 0,9 m, couplés à la *Gigapixel Camera #1* (GPC1, [KAISER et al. 2010](#) ; [TONRY et al. 2006](#)) observant une zone du ciel de $3,3$ de diamètre. Les observations s'effectuent par l'utilisation combinée de 5 filtres *grizy_{P1}*. Ils sont globalement similaires à ceux de SDSS (voir Section I.2) à l'exception de la bande g_{P1} qui est 20 nm plus étendu du côté rouge du

spectre et la bande z_{P1} qui a une coupe plus nette à 922 nm. Les transmissions des filtres sont tracées Figure I.5a, et un exemple de courbe de lumière est présenté Figure I.5b.



(a) Transmissions des filtres *grizy* de la caméra utilisée par PS1. Données tirées du SVO (RoDRIGO et SOLANO 2020). (b) Courbe de lumière en bandes *gri* de la SN Ia confirmée 550041, à $z = 0,26$.

FIGURE I.5 – Caractéristiques du sondage PS1.

I.3.3 Suivi spectrophotométrique

Comme SDSS, PS1 utilise de nombreux instruments pour le suivi spectroscopique : le *Blue Channel Spectrograph* (SCHMIDT et al. 1989) et le *Hectospec* (FABRICANT et al. 2005) sur le télescope MMT de 6,5 m, les spectrographes de *Gemini Multi-Object Spectrographs* (GMOS, HOOK et al. 2004), le *Low Dispersion Survey Spectrograph-3* (LDSS3⁹) et le *Magellan Echellette* (MagE, MARSHALL et al. 2008) sur le télescope *Magellan Clay* de 6,5 m, le *Inamori-Magella Areal Camera and Spectrograph* (IMACS, DRESSLER et al. 2011) sur le télescope *Magellan Baade* de 6,5 m, le spectrographe ISIS sur le WHT¹⁰ de 4,2 m, et le DEIMOS (FABER et al. 2003) sur le Keck de 10 m (OKE et al. 1995).

Les critères les plus importants pour la sélection de candidats à observer spectroscopiquement sont la position et la luminosité : *Magellan* et *Gemini* ne peuvent pointer que 5 des 10 champs du MDS, et certains appareils ne peuvent acquérir des données qu'à $r_{P1} \lesssim 21,5$ mag. La quantité de données observées par PS1 a souffert d'un manque de maintenant et d'accès aux télescopes ainsi que du mauvais temps, réduisant l'efficacité de suivi. L'évolution de ce paramètre en fonction de la magnitude est discutée dans le chapitre suivant. En résumé, la limite de détection pour identifier les phénomènes transitoires produit des courbes de lumière de qualité pour les SNe Ia de $m < 24$, alors que l'échantillon spectroscopique est principalement constitué d'objets de $m < 22$. Au total, ce sont 365 SNe Ia confirmées qui constituent l'échantillon de PS1.

9. <http://www.lco.cl/telescopes-information/magellan/instruments-1/ldss-3-1>

10. http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/whtisis.html

Tableau I.2 – Critères de sélection des SNe Ia suivies par PS1.

Critères de sélection	Nb de SNe Ia
Confirmées	365
Courbe de lumière	332
$\sigma_{x_1} < 1$	303
$\sigma_{\text{pkmjd}} < 2$	303
$-0,3 < c < 0,3$	293
$-3 < x_1 < 3$	288
$E(B - V)_{\text{MW}} < 0,20$	288
$T_{\text{max}} > 5$	282
Coupe par BBC	279

Notes. Le nombre de SNe est tiré de l’analyse de Pantheon (SCOLNIC et al. 2018).

I.3.4 Données conservées

Comme pour SDSS, pour une analyse cosmologique de qualité, chaque SN Ia se doit d’avoir une courbe de lumière bien échantillonnée afin de contraindre correctement les paramètres d’optimisation et que ses propriétés permettent de limiter les biais systématiques dans la distance finale. Ainsi, SCOLNIC et al. (2018) utilisent les coupes suivantes :

- 1) Optimisation donnant $\chi^2/\text{NDOF} < 3,0$ (avec NDOF le nombre de degrés de liberté), réduisant le sondage à 332 données ;
- 2) Erreur sur x_1 (σ_{x_1}) $< 1,0$, laissant 303 SNe Ia ;
- 3) Erreur sur le pic de magnitude (σ_{pkmjd}) $< 2,0$, ne causant aucune coupe ;
- 4) Paramètre de couleur c tel que $-0,3 < c < 0,3$, rejetant 10 SNe Ia pour 293 restantes ;
- 5) Paramètre d’étirement x_1 tel que $-3 < x_1 < 3$, que 5 SNe Ia ne vérifient pas ;
- 6) Extinction de la Voie Lactée $E(B - V)_{\text{MW}} < 0,20$ mag, ne s’appliquant pas aux données de PS1 grâce à la faible extinction des champs du MDS ;
- 7) Au moins une mesure à $T_{\text{rest}} > 5$ jours, excluant 6 SNe Ia pour un total de 282 SNe Ia.

Une ultime coupe de l’analyse cosmologique par *BEAMS with Bias Correction* (BBC, KESSLER et SCOLNIC 2017) réduit cet échantillon à 279 données. La méthode BBC impose que les propriétés d’une SN se retrouvent dans les 99.999% d’un échantillon simulé de 500 000 SNe du même sondage ; en l’occurrence les 3 SNe Ia ne passant pas cette restriction ont pour paramètres (x_1, c) : $(-2,915, 0,083)$, $(-1,702, 0,271)$, et $(-0,893, 0,298)$. Ce procédé sera discuté Chapitre ?? . Le Tableau I.2 résume cette sélection, et la Figure I.6 présente les histogrammes en redshifts, étirement et couleur de ces 279 données.

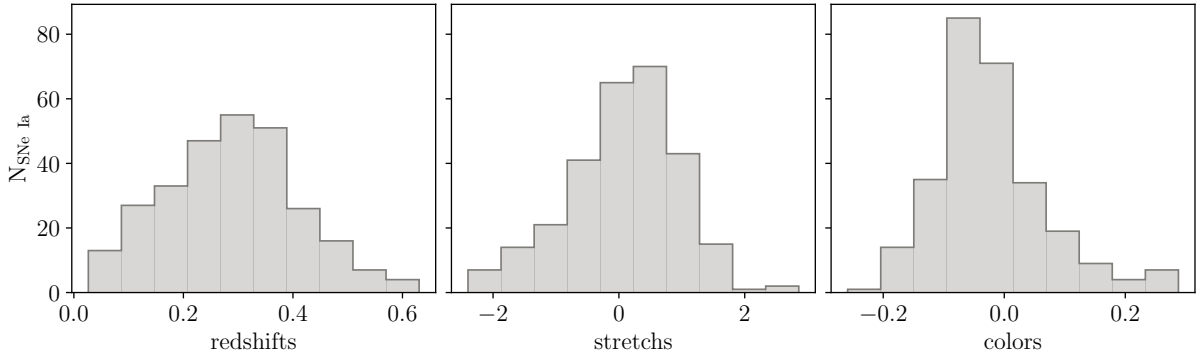


FIGURE I.6 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 279 données de PS1.

I.4 Supernova Legacy Survey

I.4.1 Introduction

Le *SuperNova Legacy Survey* (SNLS, [ASTIER et al. 2006](#) ; [SULLIVAN et al. 2011](#)) est un programme astronomique s’étendant sur 5 ans entre 2003 et début 2009, dont le but principal est de mesurer l’expansion de l’Univers à l’aide de SNe Ia *via* la mesure du paramètre d’état de l’énergie sombre w à 5% de précision statistique et 10% en incluant les effets systématiques. Il a été conçu dans le but d’améliorer significativement les sondages passés grâce à sa recherche glissante d’une part, mais également grâce à l’exploitation du service d’observation à la fois pour la photométrie et la spectroscopie, réduisant l’impact du mauvais temps. L’utilisation d’un seul instrument d’imagerie pour observer les mêmes champs réduit les incertitudes systématiques photométriques. L’observation de service optimise à la fois le rendement du temps d’observation spectroscopique et l’échantillonnage de la courbe de lumière.

I.4.2 Détection des supernovae

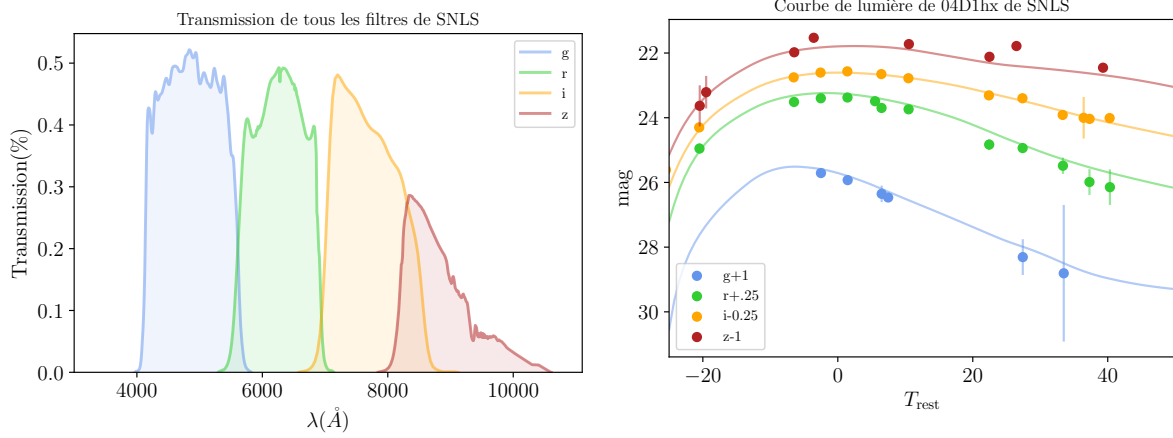
SNLS utilise la caméra MegaCam ([BOULADE et al. 2003](#)), associée au télescope Canada-France-Hawaï¹¹, en se concentrant sur la partie profonde du CFHTLS¹² représentant 4 deg^2 du ciel réparti sur 4 champs de 1 deg^2 chacun et à faible extinction galactique. L’acquisition se fait en 4 bandes $g'r'i'z'$ avec une cadence de 7 jours et une profondeur de 25,0 mag en bande r ¹³ (et 25,5 mag en bande g). Le système de filtre de SNLS est similaire à celui de SDSS (cf. Section I.2), les bandes g et i étant un peu plus vers le rouge. Les quatre bandes de SNLS permettent au sondage mesurer la couleur de toutes les SNe Ia sur l’intervalle de redshifts sondés. En effet, avec la distance les corrections K deviennent notables, et la couleur est définie *via* la différence $B - V$ à bas redshift et $U - B$ à haut redshift. Ceci s’effectue grâce à un contrôle de correspondance entre ces mesures pour des SNe de redshift moyen combinant des mesures précises dans ces quatre bandes. Les

11. <https://www.cfht.hawaii.edu/>

12. <https://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/>

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

transmissions des filtres sont tracées Figure I.7a, et un exemple de courbe de lumière est donné Figure I.7b



(a) Transmissions des filtres de MegaCam utilisés par SNLS. Données tirées du SVO (RODRIGO et SOLANO 2020). (b) Courbe de lumière en bandes *griz* de la SN Ia confirmée 04D1hx, à $z = 0,56$. Figure produite avec les données du sondage et de l'analyse Pantheon (SCOLNIC et al. 2018).

FIGURE I.7 – Caractéristiques du sondage SNLS.

I.4.3 Suivi spectrophotométrique

Par la profondeur de son acquisition, SNLS utilise des télescopes dont les miroirs ont un diamètre entre 8 et 10 m : le Keck (OKE et al. 1995 ; ELLIS et al. 2008), le Very Large Telescope (VLT, BALLAND et al. 2009) et les télescopes Gemini (HOOK et al. 2004) pour le typage et la détermination du redshift. Toutes les données de SNLS doivent être confirmées spectroscopiquement. La partie photométrique du sondage délivrant plus de candidats qu'il n'est possible d'observer spectroscopiquement, un classement des phénomènes transitoires a dû être effectué. Ce classement est déterminé en vue d'optimiser le rendement en SNe Ia, et utilise à la fois un outil de sélection photométrique réalisant un ajustement de courbe de lumières en temps réel pour éviter la contamination avec d'autres types de SNe Ia, mais aussi une base de données de tous les phénomènes transitoires observés pour écarter les étoiles variables qui varient sur des temps longs (plus d'une année). Les candidats les moins lumineux, $i > 24,5$ mag (probablement à $z > 1$) et ceux dont la luminosité n'est que faiblement supérieure à celle de leur galaxie hôte (complexifiant l'identification) ne sont pas observés : avec cette méthode, environ 70% des candidats observés se sont avérés être des SNe Ia (ASTIER et al. 2006). Sur la totalité de l'existence de ce sondage, ce sont 242 supernovae qui ont été suivies et confirmées.

I.4.4 Données conservées

Toujours suivant SCOLNIC et al. (2018), les données conservées répondent aux coupes mentionnées Section I.3, les mêmes que pour PS1. L'échantillon final se compose alors de 236 SNe Ia. Une présentation graphique des données en redshift, étirement et couleur de ces données est présentée Figure I.8.

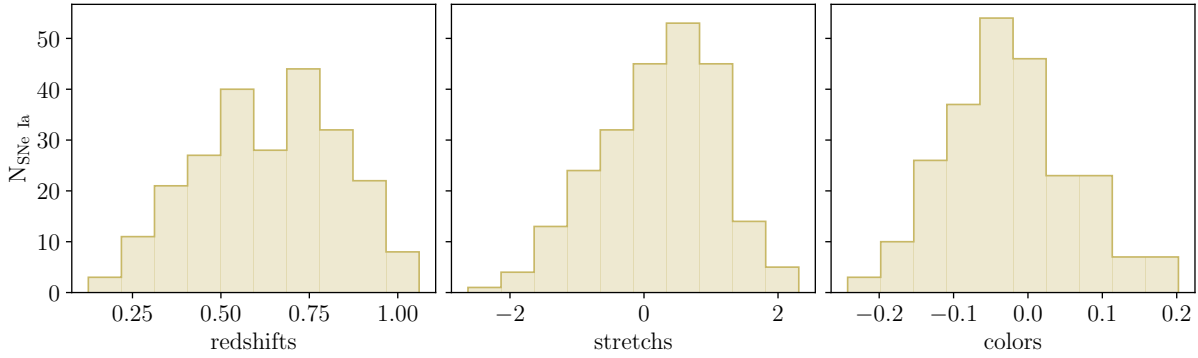


FIGURE I.8 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 236 données de SNLS.

I.5 HUBBLE Space Telescope

Plusieurs sondages permettant l’acquisition de données de SNe Ia ont été effectués avec le télescope spatial HUBBLE (HST¹⁴) : le *Great Observatories Origins Deep Survey* (GOODS, GIAVALISCO et al. 2004 ; STROLGER et al. 2004 ; RIESS et al. 2007), le *Supernova Cosmology Project* (SCP, SUZUKI et al. 2012), et les sondages *Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey* (CANDELS, RODNEY et al. 2014) et *Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble* (CLASH, GRAUR et al. 2014). Tous ces sondages recueillent des données à $z > 1$ qui se révèlent d’une grande importance par leur poids dans le diagramme de HUBBLE pour tester l’évolution des propriétés des SNe. Ils sont combinés par la suite sous le nom « HST ». Ainsi, par souci d’efficacité, nous ne détaillons ici que les résultats issus de GOODS qui constituent la plus grande part des données à haut redshift de notre échantillon.

I.5.1 Introduction

Le sondage HUBBLE *Higher z Supernova Search* (HHZSS, STROLGER et al. 2004), sous-programme de GOODS, est un des premiers sondages de recherche de SNe depuis l’espace. Son but principal est d’étudier la présence de biais astrophysiques rendant les SNe Ia intrinsèquement moins lumineuses avec la distance, imitant une preuve de l’existence de l’énergie sombre. Ce programme vise à relever des données au-delà de $z = 1$, entre $1 < z < 2$. Dans cette plage, les SNe Ia devraient exploser à une époque de décélération cosmique, devenant ainsi relativement plus brillantes qu’à des décalages vers le rouge plus faibles. On s’attend à ce que cela se distingue clairement des simples effets de mesure astrophysiques, permettant une meilleure connaissance des SNe Ia. Étudier de manière approfondie et fiable ces SNe Ia et réaliser les observations de suivi nécessaires pour une telle étude nécessite des observations plus profondes que ce qui peut être réalisé avec des télescopes terrestres. Les observations de ce sondage s’étendent sur une plage 8 mois.

14. https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/story/index.html

I.5.2 Détection des supernovae

Ce programme utilise la *Advanced Camera for Surveys*¹⁵ (ACS). GOODS combine des observations multibandes extrêmement profondes de l’ultraviolet à l’optique (dans le référentiel au repos) par le biais des filtres F435W, F606W, F775W et F850LP, avec une magnitude limite pour F850LP ≈ 26 . Deux champs ont été observés pour une surface totale d’acquisition de 300 arcmin², chacun à haute latitude écliptique pour permettre aux opérations au sol d’observer depuis les deux hémisphères. Sa cadence est d’environ 45 jours, suffisante pour détecter les SNe Ia vers le maximum d’émission pour $z \approx 1$ et avant le maximum pour $z > 1,3$, dû à l’étalement de la courbe de lumière du fait de l’expansion (dans le référentiel au repos le temps de montée typique est de ≈ 20 jours). Elle permet également de s’assurer qu’une SN dépassant le seuil de détection ne repasse pas en-dessous avant la seconde observation. Les transmissions des filtres utilisés par le sondage sont tracées Figure I.9.

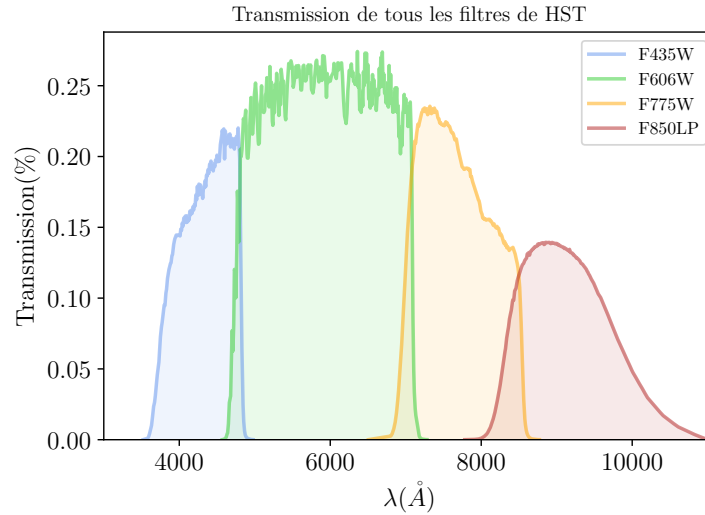


FIGURE I.9 – Transmissions des filtres de ACS utilisés par HST. Données tirées du SVO (RODRIGO et SOLANO 2020).

I.5.3 Suivi spectrophotométrique

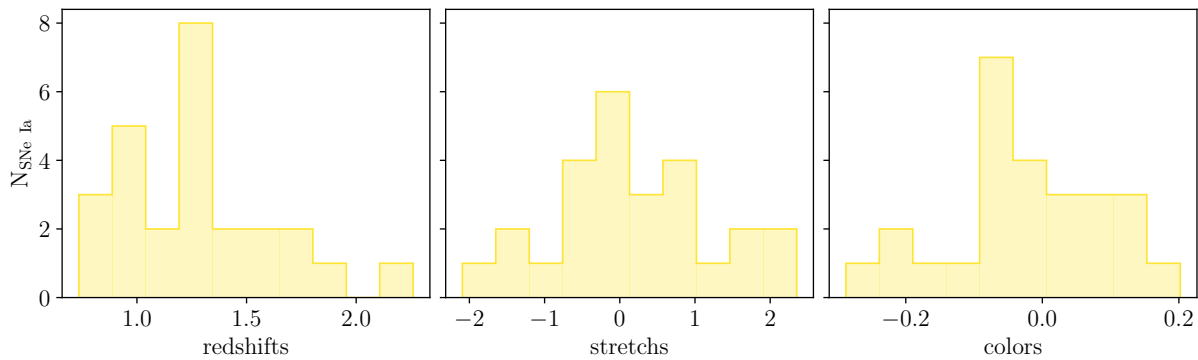
Le HST, grâce à sa présence dans l’espace notamment, permet de produire des spectres avec un rapport signal sur bruit significativement supérieur à ce qu’il est possible d’atteindre par rapport à un instrument au sol. Il est cependant limité par sa faible résolution spectrale et le recouvrement de multiples ordres spectraux d’autres sources proches : ainsi, seules les SNe avec une séparation angulaire notable d’avec leur hôte et d’autres sources lumineuses ont été observées. Une méthode secondaire d’identification des SNe Ia par photométrie a été utilisée pour optimiser la confirmation spectroscopique. RIESS et al. (2007) détaillent les données ayant la plus haute qualité, qualifiées de « dorées » : celles dont la classification est certaine (rapport signal sur bruit $\gtrsim 20$) et dont la photométrie est suffisante pour

15. <https://www.nasa.gov/content/hubble-space-telescope-advanced-camera-for-surveys>

Tableau I.3 – Nombre de SNe Ia composant notre échantillon HST selon les sondages à haut redshifts.

Sondage	Nb de SNe Ia	z moyen
SCP	3	1,092
GOODS	15	1,120
CLASH	2	1.555
CANDELS	6	1,732
Total	26	1,278

Notes. Le nombre de SNe est tiré de l’analyse de Pantheon.

**FIGURE I.10** – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 26 données de HST.

amener à une estimation de distance robuste, facilement caractérisée par les erreurs de mesure. On relève 42 données de [STROLGER et al. \(2004\)](#) et 21 de [RIESS et al. \(2007\)](#).

I.5.4 Données conservées

À ces distances, le typage peut s’avérer difficile mais la classification des données « dorées » est suffisamment robuste pour les inclure dans l’analyse cosmologique de ([SCOLNIC et al. 2018](#)) ; ces données ne sont donc pas sujettes à d’autres coupes. En combinant SCP, GOODS, CLASH et CANDELS, ce sont 26 données qui constituent l’échantillon HST. Le détail des données par sondage est indiqué Tableau I.3 et la distribution des paramètres en redshift, étirement et couleur est montrée Figure I.10.

I.6 Autres sondages : CfA1-4 et CSP

Enfin, bien que ces sondages n’apparaissent pas dans la première partie de cette étude, nous utilisons d’autres données à bas redshifts que celles issues de SNfactory. Comme pour la section précédente, ces données proviennent d’une combinaison de sondages : celles des 4 relevés du *Center for Astrophysics* de Harvard, nommés CfA1 à 4 ([RIESS et al. 1999](#) ; [JHA et al. 2006](#) ; [HICKEN et al. 2009a,b, 2012](#)) et des 2 publications du *Carnegie Supernova Project* (CSP, [CONTRERAS et al. 2010](#) ; [FOLATELLI et al. 2010](#) ; [STRITZINGER et al. 2011](#)).

Ils ne feront pas l’objet de plus de détails étant donné que ce sont tous les sondages à recherche ciblée que l’on écarte de notre échantillon et qui n’interviendront que dans le Chapitre ???. Cette combinaison de sondages, résultant en 172 SNe Ia après les coupes de [SCOLNIC et al. \(2018\)](#), est appelée *LOWZ*, leurs données s’étalant entre $0,01 < z < 0,07$. Une présentation de leurs distributions de paramètres en redshift, étirement et couleur est cependant donnée Figure [I.11](#).

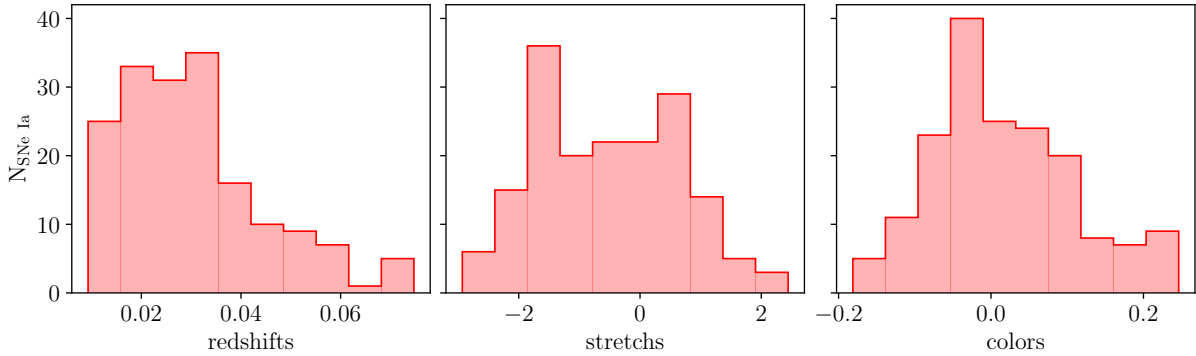


FIGURE I.11 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 172 données de LOWZ.

I.7 Complément : Zwicky Transient Facility

I.7.1 Introduction

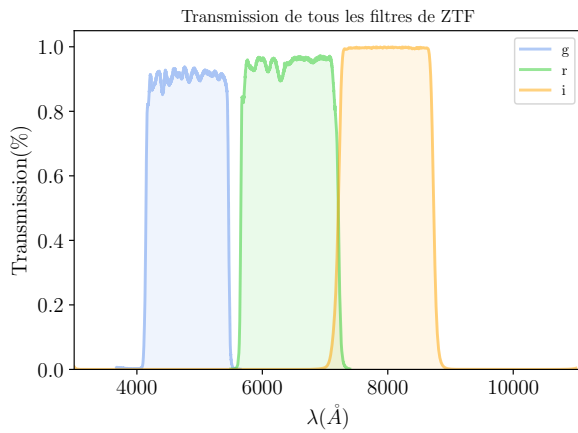
Le sondage de la *Zwicky Transient Facility* (ZTF, [BELLM et al. 2019](#) ; [DEKANY et al. 2020](#)) est un relevé cosmologique à grand champ qui a commencé ses opérations en 2018. Comme d’autres sondages, plusieurs groupes de travail composent ce relevé, tous participants à l’établissement de l’échantillon de SNe Ia. C’est le *Bright Transient Survey* (BTS) qui y contribue en majeure partie, la collaboration lui dédiant $\approx 80\%$ de son temps d’observation total. L’échantillon acquit par ZTF se place comme le nouveau sondage de référence à bas redshift, permettant de remplacer les données ciblées des sondages CfA et CSP et l’utilisation d’instruments d’alerte extérieurs à la collaboration de SNf par un seul échantillon homogène à recherche glissante.

Aux prémices de cette thèse, ces données n’étaient pas encore publiées, la première phase ayant terminé en novembre 2020, et aujourd’hui ce sont les résultats de la seconde phase qui sont en cours de production. C’est pourquoi son implémentation n’est que limitée dans notre étude, et sert à discuter des améliorations à la partie principale de notre travail, voir Section ??.

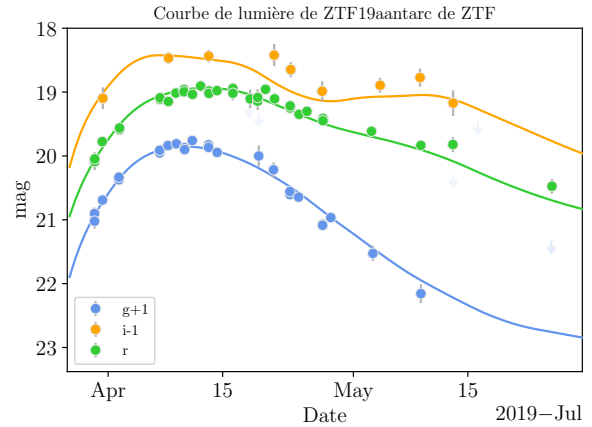
I.7.2 Détection des supernovae

Le sondage utilise la caméra ZTF montée sur le télescope P48 Schmidt, à l’Observatoire du Mont Palomar (comme SNf à l’époque, voir Section [I.1.2](#)), et se concentre sur la partie nord du ciel. Son champ de vision est de 47 deg^2 , le plus grand de tous les sondages jusque-là, intègre 3 filtres *gri* nommés *ztf :g*, *ztf :r* et *ztf :i* et a une cadence moyenne de

3 jours tous champs et filtres confondus. Ses caractéristiques uniques lui permettent de d’observer la totalité du ciel visible plus d’une fois par nuit en moyenne avec une magnitude limite typique de 20,5 mag, impliquant un rendu en SNe extrêmement élevé avec environ 1×10^5 alertes de candidats par nuit. En moyenne, les données récoltées ont environ 10 points de mesure avant le maximum d’émission, dont la médiane se situe à -13 jours, là où d’autres sondages manquent de données. Ceci permet une caractérisation très efficace de l’étirement des SNe Ia qui repose notamment sur l’échantillonnage pré-explosion. Les transmissions des filtres sont présentées Figure I.12a et un exemple de courbe de lumière produite *via* le module `ztfidr`¹⁶ est donné Figure I.12b.



(a) Transmissions des filtres de la caméra du sondage ZTF. Données tirées du SVO (RODRIGO et SOLANO 2020).



(b) Courbe de lumière en bandes *gri* de la SN Ia confirmée ZTF19aantarc, à $z = 0,099$. Figure produite avec les données (à paraître) de la seconde publication du sondage *via* le module `ztfidr`¹⁶.

FIGURE I.12 – Caractéristiques du sondage ZTF.

I.7.3 Suivi spectrophotométrique

À la différence des autres sondages, ZTF a un accès complet au spectrographe à champ intégral *SED machine* (SEDm, voir BLAGORODNOVA et al. 2018 ; RIGAULT et al. 2019) intégré au télescope P60, également au Mont Palomar. Par rapport au SNIFS (Section I.1.3), le champ de vue passe de $6''.4 \times 6''.4$ à $28'' \times 28''$ et la caméra de guidage se voit dotée de 4 filtres *ugri*. Son objectif est d’acquérir tout candidat transitoire de magnitude inférieure à 18,5 mag. L’automatisation de ce système permet une grande efficacité de détection et de suivi. Le sondage travaille également avec le télescope P200 de 5 m et le Keck de 10 m, et se verra prochainement accompagné d’une seconde SEDm sur un télescope de 2,5 m à Kitt Peak. Ainsi, des 1×10^5 alertes par nuit, ce sont typiquement 7 qui sont des SNe Ia. On compte à peu près 3700 SNe Ia spectroscopiquement confirmées dans les données de la seconde publication.

16. <https://github.com/MickaelRigault/ztfidr>

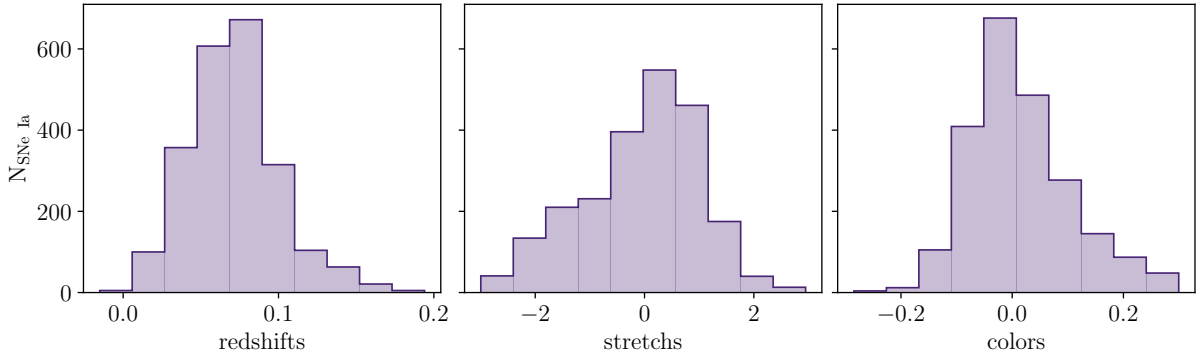


FIGURE I.13 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour les 2246 données de ZTF.

I.7.4 Données conservées

Comme pour le reste des sondages, ZTF inclut des sélections supplémentaires sur les données pour qu’elles soient de qualité « cosmologique ». Leurs critères sont les suivants :

- 1) Les données doivent provenir d’une image sans label indiquant une mauvaise qualité ;
- 2) Seuls les points photométriques détectés à 5σ sont considérés ;
- 3) Au moins 7 mesures entre $-15 < T_{\text{rest}} < 30$ jours ;
- 4) Au moins 2 bandes avant et après le maximum d’émission parmi tous ces points.

En plus de ces critères de qualité, l’échantillon retenu dans notre analyse suit les sélections suivantes :

- 5) $-0,3 < c < 0,3$ et $\sigma_c < 0,3$;
- 6) $-3 < x_1 < 3$ et $\sigma_{x_1} < 1$.

Ceux-ci assurent l’utilisation conjointe avec les autres sondages. Ainsi réduit, ce sont 2246 SNe Ia qui composent notre ensemble de données ZTF. La distribution des paramètres de ces données en redshift, étirement et couleur est montrée Figure I.13.

I.8 Résumé et comparaison

Pour permettre une meilleure visualisation des diverses caractéristiques des sondages traités dans cette thèse, nous donnons un graphique combiné des distributions de tous les sondages Figure I.14, et présentons Tableau I.4 une comparaison des éléments que nous considérons comme principaux dans ces sondages.

Au travers des sections précédentes, nous avons pu avoir un aperçu de la complexité que représentent les relevés cosmologiques. La variété des intervalles de redshifts et donc des caractéristiques des sondages impose des instruments variés, des stratégies spécifiques, mais également des calibrations différentes. Travailler avec de nombreux pipelines d’analyse rend la combinaison de sondages fastidieuse. C’est cet aspect que les prochains grands

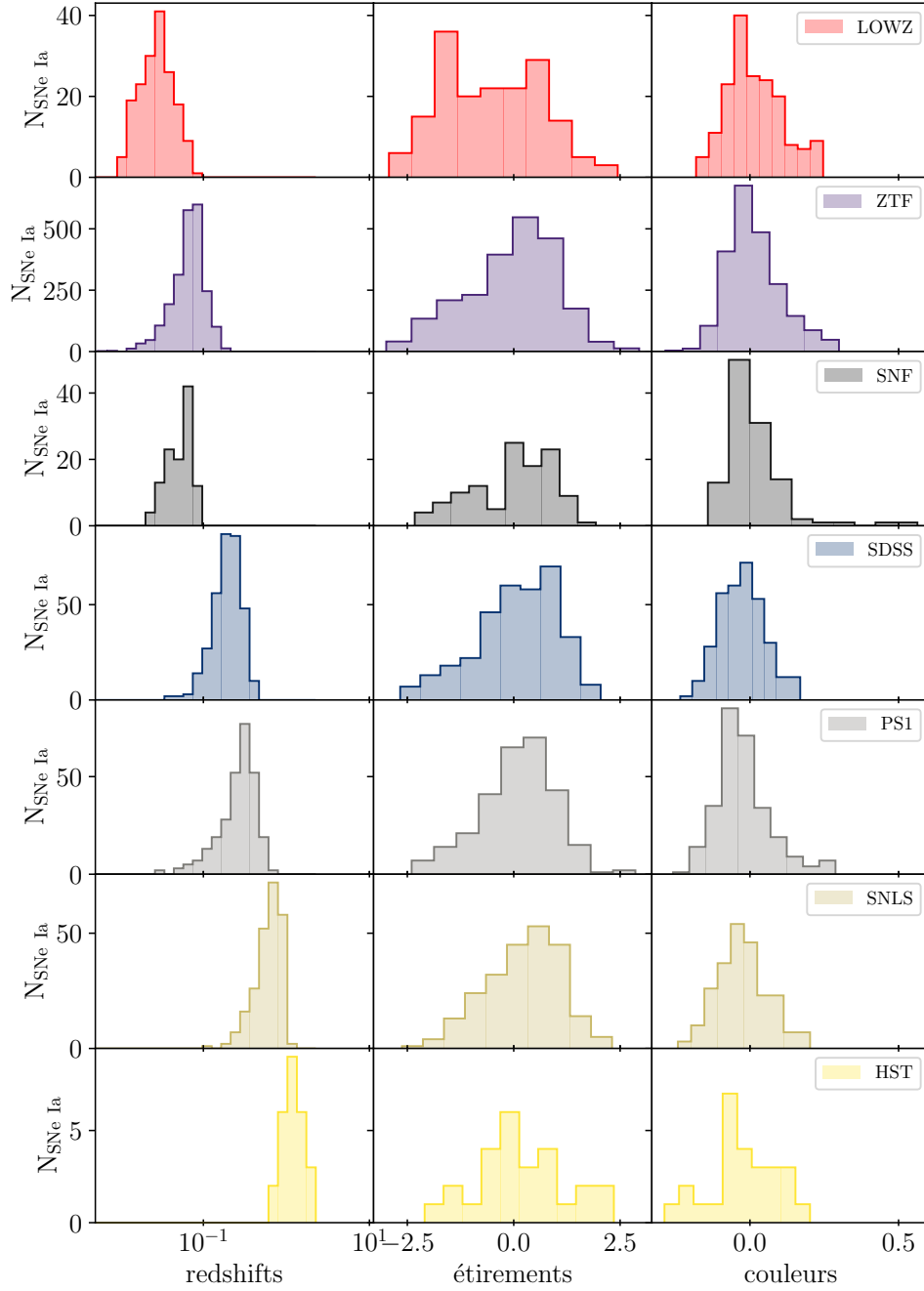


FIGURE I.14 – Distributions des paramètres de redshift (à gauche), d’étirement (au milieu) et de couleur (à droite) pour tous les sondages utilisés dans cette étude. Le redshift est tracé en échelle logarithmique, nécessaire pour représenter des données à la fois riches à $z \lesssim 0,05$ et jusqu’à $z \approx 2$.

relevés cosmologiques tentent d’améliorer : le sondage *Vera Rubin Observatory*, via le *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST, [IVEZIĆ et al. 2019](#)), a pour objectif de couvrir un intervalle de redshifts extrêmement grand, et le sondage de la *Zwicky Transient Facility* répond aux difficultés particulières de la partie à faible redshift de la cosmologie, notamment l’ancrage de la valeur de H_0 . À lui seul, il est d’ores et déjà pratiquement deux fois plus grand que tous les autres sondages réunis et représente le futur de la cosmologie basée sur

les SNe Ia.

Tableau I.4 – Comparaison des caractéristiques des sondages utilisés.

Sondage	Surface (deg ²)	Cadence (jours)	Filtres	Profondeur (mag)	Intervalle z	N_{SN}
SNf	500	1	BV	$r \lesssim 19,5$	$0,02 < z < 0,08$	114
LOWZ ¹	–	–	<i>UBVRI</i>	–	$0,01 < z < 0,07$	172
ZTF	Ciel nord	3	<i>ztf:gri</i>	$r \lesssim 20,4$	$0,00 < z < 0,19$	2246
SDSS	300	4	<i>ugriz</i>	$r \lesssim 22,5$	$0,04 < z < 0,40$	335
PS1	70	7	<i>grizy_{P1}</i>	$r \lesssim 23,1$	$0,03 < z < 0,63$	279
SNLS	4	7	<i>g'r'i'z'</i>	$r \lesssim 25,0$	$0,13 < z < 1,06$	236
HST ²	0,08	45	<i>griz</i> ³	F850LP $\lesssim 26$	$0,74 < z < 2,26$	26
Total						3408 ⁴

Notes. Le nombre de SNe est tiré de l'analyse de Pantheon.

¹ Caractéristiques non pertinentes en temps que sondages ciblés.

² Caractéristiques pour GOODS, intervalle et nombre de SNe Ia pour tous les sondages HST.

³ Relativement équivalent, cf. Figure I.9.

⁴ 990 sans LOWZ ou ZTF, ce qui constitue la base de notre échantillon.

Figures

I.1	Caractéristiques du sondage SNF.	4
I.2	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de SNf .	5
I.3	Caractéristiques du sondage SDSS.	6
I.4	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de SDSS	8
I.5	Caractéristiques du sondage PS1.	9
I.6	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de PS1 .	11
I.7	Caractéristiques du sondage SNLS.	12
I.8	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de SNLS	13
I.9	Transmissions des filtres de la caméra du sondage HST	14
I.10	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de HST	15
I.11	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de LOWZ	16
I.12	Caractéristiques du sondage ZTF.	17
I.13	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de ZTF	18
I.14	Distributions des paramètres de redshift, étirement et couleur de tous les sondages utilisés dans cette étude	19

Tableaux

I.1	Critères de sélection des SNe Ia suivies par SNfactory.	5
I.2	Critères de sélection des SNe Ia suivies par PS1.	10
I.3	Nombre de SNe Ia de notre échantillon HST selon la source	15
I.4	Comparaison des caractéristiques des sondages utilisés.	20

Bibliographie

- ALDERING G., ADAM G., ANTILOGUS P. et al. 2002, « Overview of the Nearby Supernova Factory », dans 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 ↑ [Section I.1.1](#)
- 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 ↑ [Section I.4.1](#), ↑ [Section I.4.3](#)
- BALLAND C., BAUMONT S., BASA S. et al. 2009, « The ESO/VLT 3rd year Type Ia supernova data set from the supernova legacy survey », [A&A](#), 507, 85 ↑ [Section I.4.3](#)
- BELLM E. C., KULKARNI S. R., GRAHAM M. J. et al. 2019, « The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results », [PASP](#), 131, 018002 ↑ [Section I.7.1](#)
- BLAGORODNOVA N., NEILL J. D., WALTERS R. et al. 2018, « The SED Machine: A Robotic Spectrograph for Fast Transient Classification », [PASP](#), 130, 035003 ↑ [Section I.7.3](#)
- BOULADE O., CHARLOT X., ABBON P. et al. 2003, « MegaCam: the new Canada-France-Hawaii Telescope wide-field imaging camera », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, 72–81 ↑ [Section I.4.2](#)
- BURGH E. B., NORDSIECK K. H., KOBULNICKY H. A. et al. 2003, « Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, 1463–1471 ↑ [Section I.2.3](#)
- CHAMBERS K. C., MAGNIER E. A., METCALFE N. et al. 2016, « The Pan-STARRS1 Surveys », [arXiv e-prints](#), [arXiv:1612.05560](#) ↑ [Section I.3.1](#)
- CONTRERAS C., HAMUY M., PHILLIPS M. M. et al. 2010, « The Carnegie Supernova Project: First Photometry Data Release of Low-Redshift Type Ia Supernovae », [AJ](#), 139, 519 ↑ [Section I.6](#)
- 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](#) ↑ [Section I.1.4](#)
- DEKANY R., SMITH R. M., RIDDLE R. et al. 2020, « The Zwicky Transient Facility: Observing System », [PASP](#), 132, 038001 ↑ [Section I.7.1](#)

- DEKKER H., DELABRE B. et DODORICO S. 1986, « ESO's multimode instrument for the Nasmyth focus of the 3.5 m New Technology Telescope. », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 627, *Instrumentation in astronomy VI*, ed. D. L. Crawford, 339–348 ↑ Section I.2.3
- DRESSLER A., BIGELOW B., HARE T. et al. 2011, « IMACS: The Inamori-Magellan Areal Camera and Spectrograph on Magellan-Baade », *PASP*, 123, 288 ↑ Section I.3.3
- ELLIS R. S., SULLIVAN M., NUGENT P. E. et al. 2008, « Verifying the Cosmological Utility of Type Ia Supernovae: Implications of a Dispersion in the Ultraviolet Spectra », *ApJ*, 674, 51 ↑ Section I.4.3
- FABER S. M., PHILLIPS A. C., KIBRICK R. I. et al. 2003, « The DEIMOS spectrograph for the Keck II Telescope: integration and testing », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, 1657–1669 ↑ Section I.3.3
- FABRICANT D., FATA R., ROLL J. et al. 2005, « Hectospec, the MMT's 300 Optical Fiber-Fed Spectrograph », *PASP*, 117, 1411 ↑ Section I.3.3
- FOLATELLI G., PHILLIPS M. M., BURNS C. R. et al. 2010, « The Carnegie Supernova Project: Analysis of the First Sample of Low-Redshift Type-Ia Supernovae », *AJ*, 139, 120 ↑ Section I.6
- FRIEMAN J. A., BASSETT B., BECKER A. et al. 2008, « The Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey: Technical Summary », *AJ*, 135, 338 ↑ Section I.2.1
- FUKUGITA M., ICHIKAWA T., GUNN J. E. et al. 1996, « The Sloan Digital Sky Survey Photometric System », *AJ*, 111, 1748 ↑ Section I.2.2
- GIAVALISCO M., FERGUSON H. C., KOEKEMOER A. M. et al. 2004, « The Great Observatories Origins Deep Survey: Initial Results from Optical and Near-Infrared Imaging », *ApJ*, 600, L93 ↑ Section I.5
- GRAUR O., RODNEY S. A., MAOZ D. et al. 2014, « Type-Ia Supernova Rates to Redshift 2.4 from CLASH: The Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble », *ApJ*, 783, 28 ↑ Section I.5
- GUNN J. E., CARR M., ROCKOSI C. et al. 1998, « The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera », *AJ*, 116, 3040 ↑ Section I.2.2
- GUNN J. E., SIEGMUND W. A., MANNERY E. J. et al. 2006, « The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey », *AJ*, 131, 2332 ↑ Section I.2.2
- HADJIYSKA E., RABINOWITZ D., BALTAY C. et al. 2012, « La Silla-QUEST Variability Survey in the Southern Hemisphere », dans *New Horizons in Time Domain Astronomy*, ed. E. Griffin, R. Hanisch, & R. Seaman, Vol. 285, 324–326 ↑ Section I.1.2
- HAMUY M., PHILLIPS M. M., SUNTZEFF N. B. et al. 1996, « The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type IA Supernovae », *AJ*, 112, 2391 ↑ Section I.1.1

- HICKEN M., CHALLIS P., JHA S. et al. 2009a, « CfA3: 185 Type Ia Supernova Light Curves from the CfA », [ApJ](#), **700**, 331 ↑ [Section I.6](#)
- HICKEN M., CHALLIS P., KIRSHNER R. P. et al. 2012, « CfA4: Light Curves for 94 Type Ia Supernovae », [ApJS](#), **200**, 12 ↑ [Section I.6](#)
- HICKEN M., WOOD-VASEY W. M., BLONDIN S. et al. 2009b, « Improved Dark Energy Constraints from ~100 New CfA Supernova Type Ia Light Curves », [ApJ](#), **700**, 1097 ↑ [Section I.6](#)
- HILL G. J., NICKLAS H. E., MACQUEEN P. J. et al. 1998, « Hobby-Eberly Telescope low-resolution spectrograph », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 3355, *Optical Astronomical Instrumentation*, ed. S. D'Odorico, 375–386 ↑ [Section I.2.3](#)
- HODAPP K. W., KAISER N., AUSSEL H. et al. 2004, « Design of the Pan-STARRS telescopes », [Astronomische Nachrichten](#), **325**, 636 ↑ [Section I.3.2](#)
- HOOK I. M., JØRGENSEN I., ALLINGTON-SMITH J. R. et al. 2004, « The Gemini-North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes », [PASP](#), **116**, 425 ↑ [Section I.3.3](#), ↑ [Section I.4.3](#)
- IVEZIĆ Ž., KAHN S. M., TYSON J. A. et al. 2019, « LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products », [ApJ](#), **873**, 111 ↑ [Section I.8](#)
- JHA S., KIRSHNER R. P., CHALLIS P. et al. 2006, « UBVRI Light Curves of 44 Type Ia Supernovae », [AJ](#), **131**, 527 ↑ [Section I.6](#)
- KAISER N., BURGETT W., CHAMBERS K. et al. 2010, « The Pan-STARRS wide-field optical/NIR imaging survey », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7733, *Ground-based and Airborne Telescopes III*, ed. L. M. Stepp, R. Gilmozzi, & H. J. Hall, 77330E ↑ [Section I.3.2](#)
- KASHIKAWA N., INATA M., IYE M. et al. 2000, « FOCAS: faint object camera and spectrograph for the Subaru Telescope », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4008, *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 104–113 ↑ [Section I.2.3](#)
- KESSLER R., BECKER A. C., CINABRO D. et al. 2009, « First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters », [ApJS](#), **185**, 32 ↑ [Section I.2.4](#)
- KESSLER R. et SCOLNIC D. 2017, « Correcting Type Ia Supernova Distances for Selection Biases and Contamination in Photometrically Identified Samples », [ApJ](#), **836**, 56 ↑ [Section I.3.4](#)
- LANTZ B., ALDERING G., ANTILOGUS P. et al. 2004, « SNIFS: a wideband integral field spectrograph with microlens arrays », dans 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 ↑ [Section I.1.3](#)

- 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 ↑ [Section I.1.2](#)
- MARSHALL J. L., BURLES S., THOMPSON I. B. et al. 2008, « The MagE spectrograph », dans Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7014, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, ed. I. S. McLean & M. M. Casali, 701454 ↑ [Section I.3.3](#)
- OKE J. B., COHEN J. G., CARR M. et al. 1995, « The Keck Low-Resolution Imaging Spectrometer », *PASP*, **107**, 375 ↑ [Section I.2.3](#), ↑ [Section I.3.3](#), ↑ [Section I.4.3](#)
- PEREIRA R., THOMAS R. C., ALDERING G. et al. 2013, « Spectrophotometric time series of SN 2011fe from the Nearby Supernova Factory », *A&A*, **554**, A27 ↑ [Section I.1b](#)
- PERLMUTTER S., ALDERING G., GOLDHABER G. et al. 1999, « Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae », *ApJ*, **517**, 565 ↑ [Section I](#), ↑ [Section I.1.1](#)
- RABINOWITZ D., BALTAY C., EMMET W. et al. 2003, « The Palomar-QUEST large-area CCD camera », dans American Astronomical Society Meeting Abstracts, Vol. 203, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 38.12 ↑ [Section I.1.2](#)
- 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 ↑ [Section I](#), ↑ [Section I.1.1](#)
- RIESS A. G., KIRSHNER R. P., SCHMIDT B. P. et al. 1999, « BVRI Light Curves for 22 Type Ia Supernovae », *AJ*, **117**, 707 ↑ [Section I.6](#)
- RIESS A. G., STROLGER L.-G., CASERTANO S. et al. 2007, « New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z \geq 1$: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy », *ApJ*, **659**, 98 ↑ [Section I.5](#), ↑ [Section I.5.3](#), ↑ [Section I.5.3](#)
- 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 ↑ [Section I.1.1](#)
- RIGAULT M., NEILL J. D., BLAGORODNOVA N. et al. 2019, « Fully automated integral field spectrograph pipeline for the SEDMachine: pysedm », *A&A*, **627**, A115 ↑ [Section I.7.3](#)
- RODNEY S. A., RIESS A. G., STROLGER L.-G. et al. 2014, « Type Ia Supernova Rate Measurements to Redshift 2.5 from CANDELS: Searching for Prompt Explosions in the Early Universe », *AJ*, **148**, 13 ↑ [Section I.5](#)
- RODRIGO C. et SOLANO E. 2020, « The SVO Filter Profile Service », dans XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, 182 ↑ [Section I.1.2](#), ↑ [Section I.1a](#), ↑ [Section I.3a](#), ↑ [Section I.5a](#), ↑ [Section I.7a](#), ↑ [Section I.9](#), ↑ [Section I.12a](#)

- 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
↑ [Section I.2.1](#)
- SAKO M., BASSETT B., BECKER A. C. et al. 2018, « The Data Release of the Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey », [PASP](#), **130**, 064002 ↑ [Section I.2.1](#), ↑ [Section I.2.3](#)
- SCHMIDT G. D., WEYMANN R. J. et FOLTZ C. B. 1989, « A Moderate-Resolution, High-Throughput CCD Channel for the MMT Spectrograph », [PASP](#), **101**, 713 ↑ [Section I.3.3](#)
- 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 ↑ [Section I.3b](#), ↑ [Section I.2.4](#), ↑ [Section I.3.1](#), ↑ [Section ??](#), ↑ [Section I.3.4](#), ↑ [Section I.7b](#), ↑ [Section I.4.4](#), ↑ [Section I.5.4](#), ↑ [Section I.6](#)
- STRITZINGER M. D., PHILLIPS M. M., BOLDT L. N. et al. 2011, « The Carnegie Supernova Project: Second Photometry Data Release of Low-redshift Type Ia Supernovae », [AJ](#), **142**, 156 ↑ [Section I.6](#)
- STROLGER L.-G., RIESS A. G., DAHLEN T. et al. 2004, « The Hubble Higher z Supernova Search: Supernovae to $z \sim 1.6$ and Constraints on Type Ia Progenitor Models », [ApJ](#), **613**, 200 ↑ [Section I.5](#), ↑ [Section I.5.1](#), ↑ [Section I.5.3](#)
- SULLIVAN M., GUY J., CONLEY A. et al. 2011, « SNLS3: Constraints on Dark Energy Combining the Supernova Legacy Survey Three-year Data with Other Probes », [ApJ](#), **737**, 102 ↑ [Section I.4.1](#)
- SUZUKI N., RUBIN D., LIDMAN C. et al. 2012, « The Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey. V. Improving the Dark-energy Constraints above $z > 1$ and Building an Early-type-hosted Supernova Sample », [ApJ](#), **746**, 85 ↑ [Section I.5](#)
- TONRY J., ONAKA P., LUPPINO G. et ISANI S. 2006, « The Pan-STARRS Gigapixel Camera », dans The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, [E47](#) ↑ [Section I.3.2](#)