
Variabilités intrinsèques des SNe Ia et leurs conséquences sur les paramètres cosmologiques

Résumé : L'étude des supernovae de type Ia a de nombreuses utilités en physique. Elle sert notamment à la détermination de paramètres cosmologiques, comme la constante de Hubble ou le paramètre d'état de l'énergie noire. Afin d'améliorer la précision et la justesse des mesures existantes, les incertitudes statistiques et systématiques doivent être traitées correctement. Si l'ajout de données permet de réduire les incertitudes statistiques, il n'y a que l'étude du comportement physique des supernovae qui permet de réduire les incertitudes systématiques. Dans ce rapport, nous discutons comment l'établissement de lois d'évolution du paramètre de durée d'explosion d'une supernova en fonction du redshift permettrait d'atteindre ce but.

Mots-clés : Cosmologie, supernovae

Stage supervisé par :
RIGAULT Mickaël, Chercheur
rigault@ipnl.in2p3.fr
[Site personnel](#)

Institut de Physique des Deux Infinis
Université Lyon 1
4 rue Enrico Fermi – bâtiment Dirac
69622 Villeurbanne Cedex
<https://www.ip2i.in2p3.fr>

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce stage et de ce rapport de stage, et particulièrement Mickaël RIGAULT pour son encadrement sans faille. Son dynamisme et son implication à ma compréhension de ce domaine m'ont grandement aidée à développer ma passion pour ce sujet. Il m'a ainsi permis d'être au cœur de développements cosmologiques aux perspectives enrichissantes. C'est avec lui que j'ai réellement pu entrer dans le domaine de la recherche comme je n'avais jamais pu le faire auparavant, que ce soit en publiant un article ou en participant à des conférences internationales en France et à l'étranger, impliquant de nombreux-ses chercheur-euses dont j'ai pu lire les article.

Je remercie également toute l'équipe Cosmo de l'IP2I qui m'a accueillie chaleureusement. Dès mon arrivée dans cette équipe, j'ai su que je pourrai y passer trois belles années bien entourée.

Table des matières

Remerciements	0
1 Introduction	1
2 Cosmologie avec les supernovae de type Ia	1
2.1 Chandelles standards et diagramme de Hubble	1
2.2 Les SNe Ia	2
2.3 Courbes de lumière	3
2.4 Incertitudes systématiques	4
3 Construction de l'échantillon d'étude	7
3.1 Effets de sélection	7
3.2 Détermination du redshift limite	8
3.3 Échantillon utilisé	9
4 Évolution intrinsèque des SNe Ia	10
4.1 Modèle SNf d'évolution du stretch	11
4.2 Implémentation aux échantillons	12
4.3 Modifications et comparaisons	14
5 Conclusion et perspectives	16
Bibliographie	18

I - Introduction

En cosmologie, l'étude des supernovae de type Ia (SNe Ia) permet de mesurer l'histoire de l'expansion de l'univers et ainsi d'étudier la physique des éléments fondamentaux qui le composent, et notamment celle de l'énergie noire [PERLMUTTER et al.(1999), RIESS et al.(1998)]. Avec aujourd'hui ≈ 1000 SNe Ia, les incertitudes systématiques commencent à dominer le budget d'erreur lors de la mesure des paramètres cosmologiques [BETOULE et al.(2014), SCOLNIC et al.(2018)]. Parmi celles-ci, l'un des effet dominant est lié à notre connaissance limitée de la physique même des SNe Ia [SULLIVAN et al.(2010), RIGAULT et al.(2013), RIGAULT et al.(2015)].

La cosmologie avec les SNe Ia repose sur le fait qu'il est possible de prédire leur luminosité à toute distance de nous, et donc à tout moment dans le passé. Les SNe Ia sont ainsi supposées être des chandelles standards (ou plutôt standardisables, nous le verrons) de la cosmologie. Cependant, la physique des étoiles change avec l'histoire de l'univers : serait-il alors possible que la physique des SNe Ia change également ? Si oui, est-ce que cela pourrait impacter la détermination des paramètres cosmologiques ? et de combien ?

Dans ce rapport, nous étudions un paramètre intrinsèque à la physique de l'explosion du progéniteur en SNe Ia : l'étalement de la courbe de lumière, dit "stretch" [PHILLIPS(1999)], et nous nous intéressons à son évolution potentielle en fonction de l'âge de l'univers. Si nous trouvons qu'il évolue, alors nous aurons déterminé que la physique des SNe Ia change en fonction du temps comme suggéré par [HOWELL et al.(2009), RIGAULT et al.(2013), CHILDRESS et al.(2014), RIGAULT et al.(2018)].

Nous commencerons section 2 par présenter la cosmologie avec les SNe Ia en revenant sur le concept de chandelles standard(isable)s et la détermination des paramètres cosmologiques. Nous enchaînerons ensuite section 3 avec le travail effectué pour s'affranchir des effets de sélection des données et nous présenterons les échantillons utilisés. Nous finirons section 4 en présentant les différents modèles d'évolution du stretch et les méthodes pour les comparer, avant de conclure et de discuter des travaux à venir.

Dans la suite de ce rapport, et pour éviter la surcharge de lignes de code, le-a lecteur-ice pourra se référer aux ressources mises en ligne publiquement sur [GitHub](https://github.com/Nora-n/variaIa/tree/master/variaIa) (https ://github.com/Nora-n/variaIa/tree/master/variaIa).

II - Cosmologie avec les supernovae de type Ia

II - 1. Chandelles standards et diagramme de Hubble

En astronomie, la mesure d'un flux lumineux (F) est généralement exprimé en magnitude (m), tel que :

$$m - m_0 = -2.5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right), \quad (1)$$

où m_0 (F_0) représente une magnitude (flux) de référence. Le flux étant relié à la luminosité L d'une source lumineuse à la distance d_L par $F = L \times (4\pi d_L^2)^{-1}$, on a alors :

$$m - m_0 = -2.5 \log \left(\frac{L}{4\pi d_L^2} \right) + C. \quad (2)$$

La magnitude m , dite « apparente », dépend donc de la distance. On définit la magnitude *absolue* – liée cette fois à la luminosité intrinsèque du corps observé – comme la magnitude apparente qu'aurait la source si elle était située à une distance de 10 pc :

$$M = -2.5 \log \left(\frac{L}{4\pi (10 \text{ pc})^2} \right) + C \quad (3)$$

On peut alors définir le *module de distance* μ qui représente la distance de la source par :

$$\mu \equiv m - M = 5 \log(d_L) - 5 \quad (4)$$

avec d_L en parsec.

En considérant un univers plat homogène et isotrope, l'équation de FRIEDMANN-LEMAÎTRE mène à une expression de d_L dépendant des paramètres cosmologiques d'après la relation

$$d_L = (1+z) \times c \left(\int_0^z dz' \left[\Omega_R (1+z')^4 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} \right), \quad (5)$$

avec Ω_R la densité d'énergie de rayonnement, Ω_M la densité d'énergie de matière, et Ω_Λ la densité d'énergie noire. Pour un univers plat elles sont reliées par la relation

$$1 = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda. \quad (6)$$

Ainsi, le module de distance μ permet de déterminer d_L *via* la mesure de la magnitude apparente m , si la magnitude absolue M est connue. On appelle « chandelle standard » un objet dont M est ainsi prédictible. Remarquez que pour des mesures de distances relatives, M n'a pas besoin d'être connu absolument, mais simplement d'être le même entre les objets que nous comparons. Les SNe Ia sont de tels objets et sont également extrêmement brillantes ce qui nous permet de faire des mesures de distances à l'échelle cosmologique (milliards d'années lumière).

II - 2. Les SNe Ia

Si les SNe Ia sont considérées comme des chandelles standards, c'est parce qu'elles obéissent au même mécanisme d'explosion. Bien qu'il soit encore mal compris, on sait qu'il résulte de l'augmentation de la masse de naines blanches, des étoiles inertes très denses, qui mènerait à une explosion thermonucléaire lorsqu'elles atteignent la masse critique de CHANDRASEKHAR de $1.4 M_\odot$. Cette augmentation peut suivre de l'accrétion d'un compagnon qui est généralement une géante rouge, ou de la fusion de deux naines blanches.

Elles sont beaucoup étudiées en cosmologie du fait de leur forte luminosité permettant une mesure de magnitude jusqu'à des redshifts de l'ordre de $z \approx 1$, ce qui équivaut à une analyse des propriétés cosmologiques de l'Univers quand il avait la moitié de son âge actuel. Elles sont notamment les meilleures candidates pour les études à bas redshift, leur luminosité (sur une courte période) pouvant dépasser celle de leur galaxie hôte contenant des centaines de milliards d'étoiles, et qui, d'après l'équation 5, est la zone d'Univers où le paramètre d'énergie noire domine (pour $z \leq 1$, c'est le terme en Ω_Λ qui domine étant donné la puissance $-1/2$ sur le crochet). Un des buts de l'utilisation des SNe Ia en cosmologie est de mieux comprendre le comportement de cette énergie noire, sa densité précise et l'évolution de sa densité.

Mais en réalité, il existe une dispersion naturelle d'environ 40% des magnitudes absolues des SNe Ia. Elles ne sont donc pas parfaitement standards et cette dispersion correspond à une imprécision de $\approx 20\%$ sur la valeur de la distance déduite. Cependant, il existe des relations empiriques qui permettent de réduire cette dispersion d'un facteur trois, ce qui en fait l'un des outils de mesure de distances les plus précis en astronomie.

II - 3. Courbes de lumière

Les SNe Ia sont des objets astronomiques dit transitoires : leur flux évolue en fonction du temps. La forme de cette évolution dépend de la physique intrinsèque à l'explosion du progéniteur – les éléments radioactifs créés et détruits notamment. Les éléments extrinsèques, notamment les milieux interstellaires de la galaxie hôte et de notre propre galaxie, eux, peuvent affecter la luminosité relative entre les gammes de longueurs d'onde observées – les poussières interstellaires absorbent plus dans le bleu que dans le rouge, faisant paraître les objets plus rouges qu'ils ne le sont. On appelle « courbe de lumière » l'évolution de la luminosité d'un objet en fonction du temps. La figure 1 montre les courbes de lumière d'une SNe Ia (SN2011fe) dans cinq bandes spectrales [PEREIRA et al.(2013)].

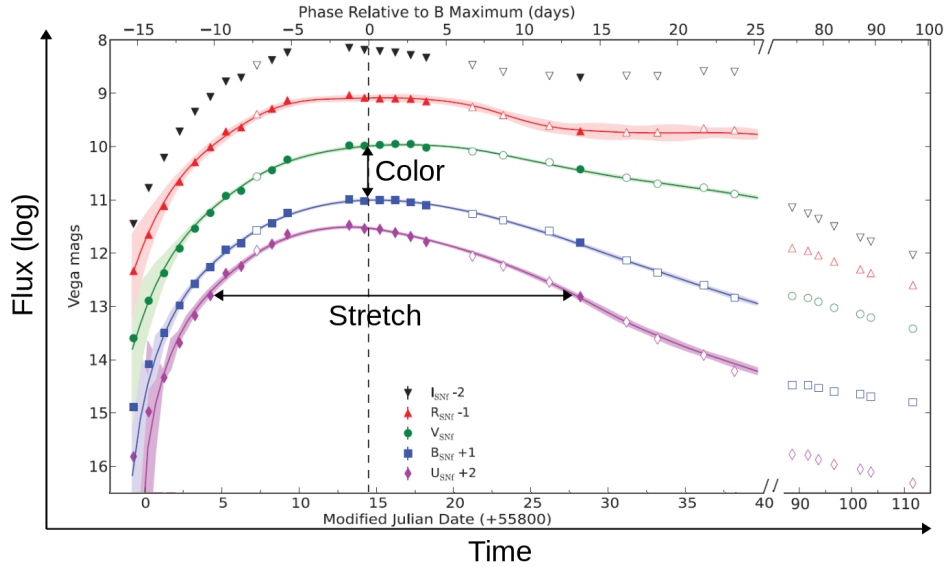


FIGURE 1 – Exemple de courbe de lumière d'une supernova depuis son explosion pour différentes longueurs d'ondes. On peut y définir un paramètre de couleur et un paramètre de *stretch* qui estime la durée d'explosion de ladite SNe Ia. [PEREIRA et al.(2013)]

Ainsi, la chandelle standard de la SNe Ia est en réalité définie comme sa luminosité dans la bande bleue ($\approx 5000 \text{ \AA}$) à son maximum de luminosité.

Les courbes de lumières des SNe Ia sont paramétrées par trois éléments :

- 1) Le maximum de luminosité dans la bande B, il s'agit du « m des SNe Ia » ;
- 2) La couleur (« c »), définie par la différence de magnitude au maximum d'émission entre les bandes vertes et bleues ;
- 3) Le *stretch* (« x_1 »), définissant l'élargissement de la courbe de lumière.

L'algorithme SALT2 [GUY et al.(2007), GUY et al.(2010)] permet d'ajuster ces paramètres. La définition de ces paramètres n'est pas anodine : il existe une corrélation entre M_B (la magnitude absolue des SNe Ia dérivée de m_B) et le stretch x_1 et la couleur c (mais pas entre x_1 et c par construction). Les SNe Ia à évolution lente (grand stretch) ont une luminosité intrinsèque plus grande (relation "brighter-slower") [PHILLIPS(1999)] et les SNe Ia les plus bleues sont plus lumineuses (relation "brighter-bluer") [TRIPP(1998), RIESS & LIVIO(2006)]. Ces relations sont illustrées figure 2.

Pour réduire la dispersion naturelle de magnitude absolue des SNe Ia, on peut alors inclure ces relations linéaires dans l'expression de la magnitude absolue, de telle sorte que :

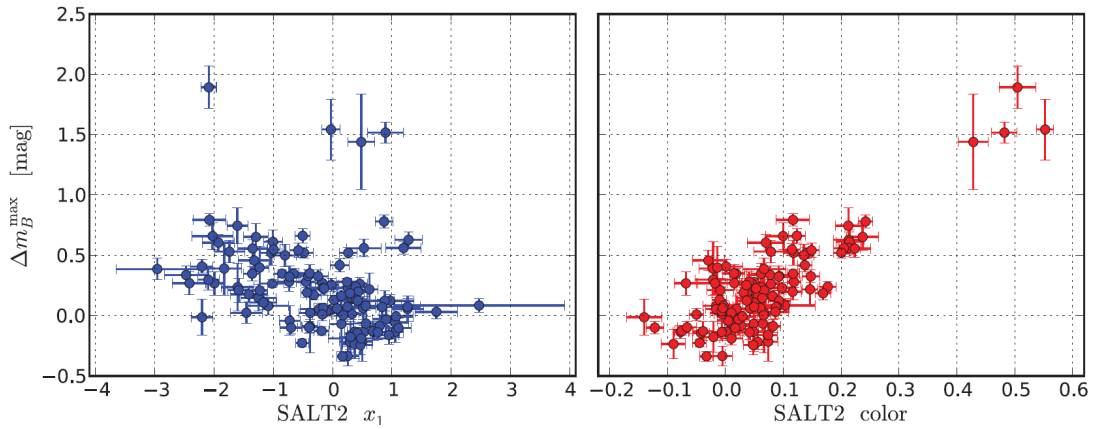


FIGURE 2 – Corrélations entre la différence de luminosité maximale d’une supernova dans le bleu et les paramètres de stretch (« x_1 ») et de couleur (« color ») d’après l’algorithme SALT2.

$$M_B^{\text{corr}} \equiv M_B^{\text{max}} + (\alpha x_1 - \beta c) \quad (7)$$

où α est le coefficient du stretch, et β celui de la couleur, tous les deux positifs ; M_B^{corr} est la nouvelle définition de la magnitude absolue des SNe Ia, dite « standardisée ». Ces trois paramètres sont ajustés simultanément sur l’ensemble des données disponibles.

Ces relations supplémentaires permettent de réduire l’incertitude sur la mesure de distance, puisque la dispersion de magnitude absolue est réduite à $\approx 0.15\text{mag}$ [BETOULE et al.(2014)], soit une précision en distance de l’ordre de 8%. La nouvelle définition du module de distance (standardisé) des SNe Ia est :

$$\mu = m - M + \alpha x_1 - \beta c \quad (8)$$

La réduction de la dispersion dans le diagramme de Hubble est illustrée figure 3 avec les données de SNfactory [RIGAULT et al.(2018)].

L’utilisation de cette relation a alors permis d’améliorer la précision des mesures de distance, et ainsi discriminer différentes valeurs possibles pour les paramètres cosmologiques : cela a mené à la découverte de l’expansion accélérée de l’Univers *via* une valeur non-nulle de Ω_Λ pour laquelle un prix Nobel a été decerné en 2011. La dernière compilation des SNe Ia est présentée fig 4.

II - 4. Incertitudes systématiques

Depuis la découverte de l’accélération de l’expansion de l’univers, qui ne se basait que sur une centaine de données de SNe Ia, plus de données ont été accumulées, et la précision sur les mesures de Ω_M et Ω_Λ s’est améliorée. Nous pouvons maintenant mesurer le paramètre d’équation d’état de l’énergie noire w , qui devrait valoir -1 s’il s’agit d’une constante cosmologique Λ . Aujourd’hui avec ≈ 1000 SNe Ia, w est mesuré avec une précision de 5% et est compatible avec -1 [BETOULE et al.(2014), SCOLNIC et al.(2018)]. Dans un futur proche (2022), le *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST, récemment renommé *Vera Rubin Survey Telescope*) installé au Chili devrait acquérir ≈ 10000 SNe Ia par an. Un des objectifs principaux du sondage cosmologique est de mesurer w au pourcent, mais surtout, de mesurer w_a , l’évolution potentielle de w en fonction du temps, à 10% ; w_a devrait être 0 si l’énergie noire est une simple constante cosmologique. Cependant, déjà aujourd’hui, les erreurs systématiques dominent le budget total d’erreur de la mesure des paramètres cosmologiques avec les SNe Ia, comme illustré fig 5.

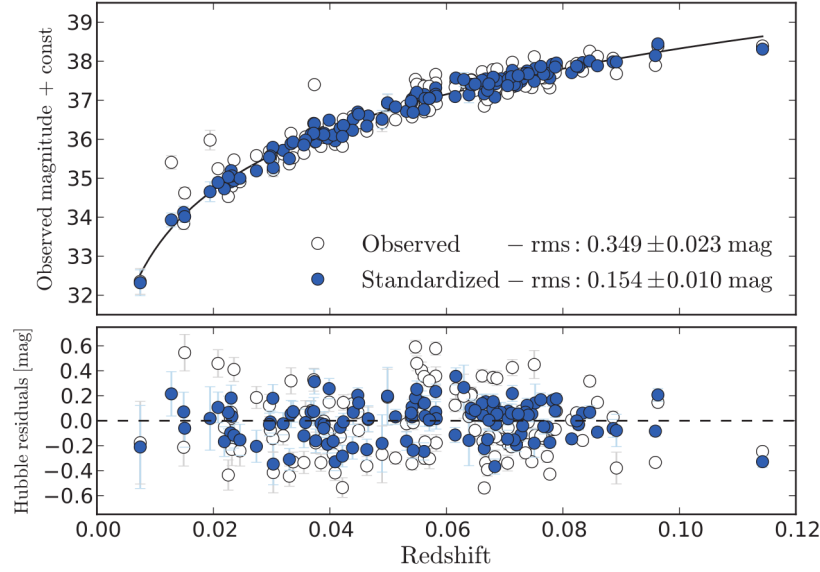


FIGURE 3 – Diagramme de Hubble avec, en haut, la magnitude apparente avant et après le processus de standardisation, qui consiste à inclure les corrélations entre la magnitude absolue et les paramètres de stretch et de couleur, respectivement en blanc et en bleu. En bas, on a le *résidu* ne montrant que la dispersion autour de la courbe noire, indiquant l'évolution de la luminosité prédite par la loi de Hubble.

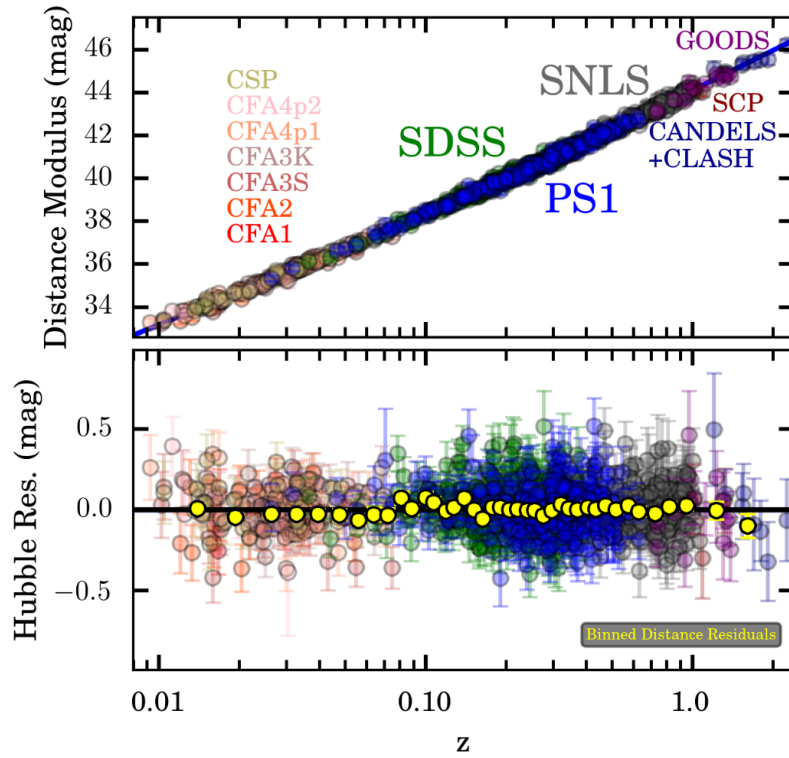


FIGURE 4 – En haut, diagramme de Hubble actuel (en couleurs, une par échantillon d'observation) et diagramme résiduel où l'on a retiré l'évolution théorique du module de distance. [SCOLNIC et al.(2018)]

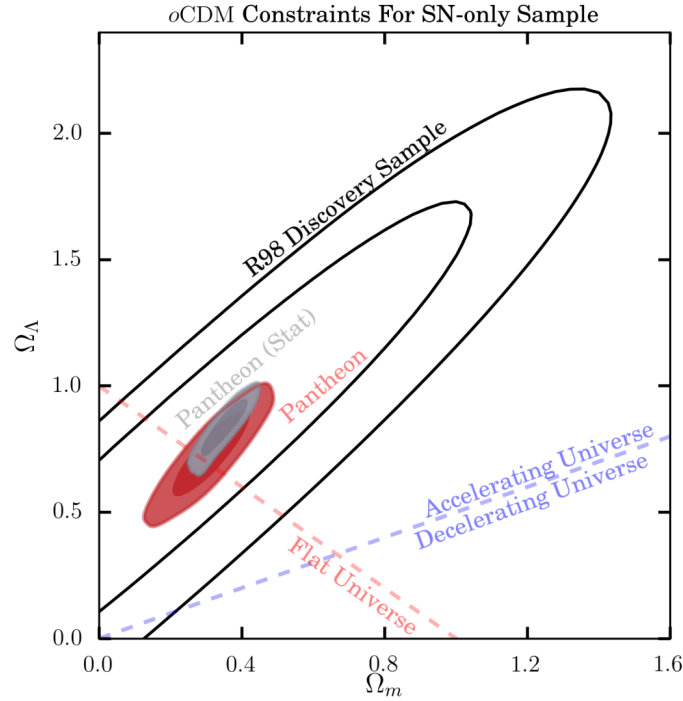


FIGURE 5 – *Contour plot* indiquant la précision à 68 et 90% de la mesure des paramètres Ω_M et Ω_Λ pour la découverte historique de RIESS ET. AL (R98, en blanc) se basant sur 100 données de SNe Ia, et pour les échantillons actuels utilisant environ 1000 SNe Ia (en rouge). En gris est indiquée la part des incertitudes statistiques à l'incertitude totale. [SCOLNIC et al.(2018)]

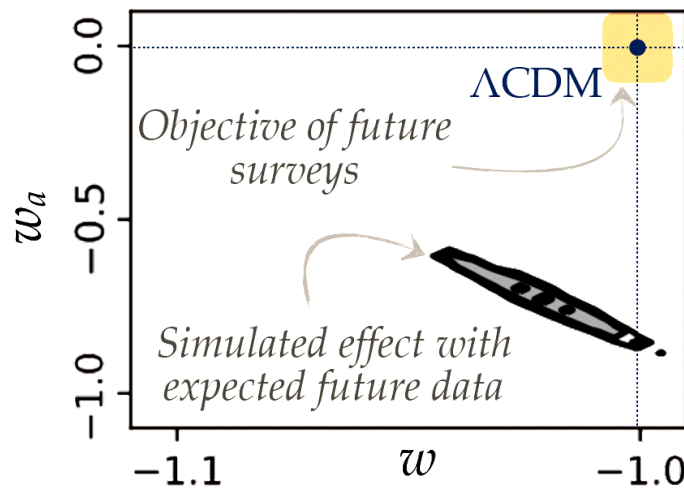


FIGURE 6 – Erreur attendue sur la mesure de w et w_a en ne considérant que la réduction des erreurs statistiques sans prendre en compte les erreurs systématiques.

Pour continuer à améliorer les mesures cosmologiques, il est donc nécessaire de travailler sur les sources d'erreurs systématiques, faute de quoi il sera impossible d'exploiter l'immense masse de données fournie par LSST. Une des erreurs dominantes et encore peu étudiée est l'impact de notre connaissance limitée de la physique des SNe Ia sur la mesure des paramètres cosmologiques [RIGAUULT et al.(2018)] et notamment sur l'évolution potentielle de M_B^{corr} en fonction du redshift. La fig 6 montre une estimation de l'impact potentiel qu'aurait une évolution réaliste de la physique des SNe Ia en fonction du temps sur l'estimation des paramètres (w , w_a). Non seulement l'erreur systématique associée est plus grande que la précision souhaitée pour LSST, mais surtout la zone mesurée est en désaccord complet avec ce qui est attendu. La mesure est donc non seulement moins précise, mais elle est aussi faussée. C'est dans ce cadre que s'inscrit mon stage et la thèse qui en découle.

III - Construction de l'échantillon d'étude

Dans ce stage, nous avons cherché à mesurer si la propriété intrinsèque de stretch des SNe Ia changeait en fonction du temps, ou, ce qui est équivalent, du redshift. Comme nous l'avons vu section 2.3, le stretch est une propriété purement intrinsèque à l'explosion du progéniteur en SNe Ia. Ainsi, si nous pouvons détecter une évolution de la distribution de stretch en fonction du redshift, alors nous aurons prouvé qu'en effet les SNe Ia changent avec le temps. Il nous faut donc comparer des SNe Ia dans plusieurs gammes de redshift et comparer leurs distributions de stretch. Cependant, les effets de sélection affectent ces distributions : il est donc dans un premier temps nécessaire de savoir quelles SNe Ia sont affectées ou non par ces effets de sélection.

Nous discutons les effets de sélection plus en détails section 3.1, puis, dans la section 3.2 nous montrons comment construire un échantillon complet (i.e. affranchis des effets de sélection) ; échantillons que nous utiliserons par la suite pour nos analyses (cf. section 4).

III - 1. Effets de sélection

L'observation du nombre de SNe Ia en fonction du redshift illustre l'existence d'effets de sélection : si l'on suppose une répartition homogène et isotrope des supernovae dans l'espace, alors on s'attend à avoir un nombre croissant de SNe Ia avec le redshift (z), tel que $N_{\text{SNe Ia}} \propto z^3$. Mais lorsque l'on regarde la distribution de SNe Ia en fonction du redshift, comme montré fig 7 pour l'échantillon de SNLS [ASTIER et al.(2006), BETOULE et al.(2014)], si cette relation semble vérifiée jusqu'à une certaine distance (la distribution croît), nous constatons qu'à partir d'un certain redshift, le nombre de SNe Ia observé réduit. Dans ce cas, la transition semble s'effectuer autour de $z \approx 0.7$.

Pour comprendre cette distribution, rappelons nous que nous mesurons l'évolution du flux des SNe Ia pour en dériver la distance (voir section 2.1). Or, les instruments (caméras ou spectrographes) ont une limite de détection de flux en-dessous de laquelle les objets ont une luminosité trop faible pour être détectée. Pour les SNe Ia, qui ont toutes une luminosité relativement similaire, cela signifie qu'à partir d'une certaine distance, leur flux sera trop faible pour être détecté. C'est ce que nous observons fig. 7 : à $z \lesssim 0.7$ toutes les SNe Ia sont assez lumineuses pour être observées, à $z \gtrsim 0.7$ les SNe Ia relativement sous-lumineuses manquent en premier, puis celles de moins en moins lumineuses jusqu'à ce qu'elles soient toutes trop faibles car trop lointaines.

Si cette sélection en luminosité était indépendante du stretch alors il n'y aurait pas de problème, nous pourrions utiliser toutes les SNe Ia pour notre analyse. Cependant, comme discuté section 2.3, à cause de la relation "brighter-slower", les SNe Ia les moins lumineuses sont également celles qui ont un plus petit stretch en moyenne. Ainsi, une fois passé un certain redshift (ici $z \sim 0.7$) la distribution de stretch de l'échantillon n'est plus représentative de ce que la nature fournit. C'est pourquoi, pour

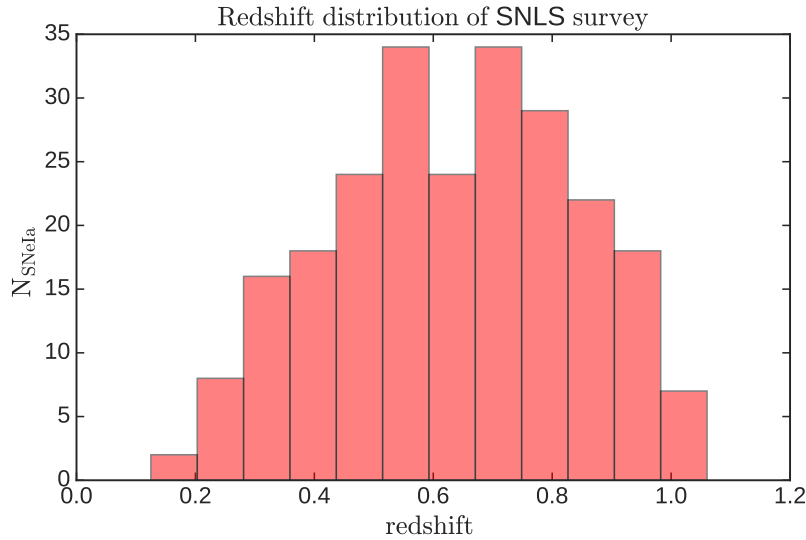


FIGURE 7 – Histogramme du nombre de SNe Ia observées en fonction du redshift pour les données de l'échantillon SNLS (SuperNova Legacy Survey).

étudier l'évolution de la distribution de stretch des SNe Ia en fonction du redshift, il faut exclure les SNe Ia au-delà de ce redshift caractéristique qui dépend de l'instrument utilisé, et donc de l'échantillon.

L'objectif est donc de trouver, pour chaque échantillon, la valeur de ce redshift caractéristique et de considérer seulement les SNe Ia de cet échantillon disposant d'un redshift inférieur à ce redshift limite. Nous pouvons ensuite combiner les SNe Ia des différents échantillons pour notre étude du stretch en fonction du redshift puisqu'elles seront toutes représentatives de ce que la nature crée.

III - 2. Détermination du redshift limite

Pour déterminer le redshift limite au delà duquel les effets de sélection deviennent non-négligeables, l'approche qui a été choisie repose sur la comparaison entre l'évolution attendue du nombre de SNe Ia par intervalle de redshift et l'évolution observée. Une étude plus rigoureuse aurait été de s'intéresser aux caractéristiques de limite de détection de chaque instrument, mais nous ne disposons pas, pour ce stage, de ces informations.

Comme discuté précédemment, on s'attend à avoir un nombre de supernovae qui croît proportionnellement à z^3 . En utilisant l'histogramme précédent, on a, pour chaque intervalle, le nombre de supernovae observées. En définissant une fonction de paramètre a telle que $N_{\text{SNe Ia}} = a \times V(z)$, où $V(z)$ est le volume d'univers à un redshift donné, on peut trouver pour chaque milieu d'intervalle le nombre attendu de supernovae observées selon cette fonction. On peut alors utiliser une statistique poissonienne pour trouver la probabilité d'avoir ce nombre attendu sachant qu'on en a effectivement observé le nombre correspondant aux intervalles. Le paramètre libre a est dérivé en maximisant cette probabilité.

Comme illustré figure 8, lorsqu'on dérive a en ne considérant que les premiers intervalles de redshift la correspondance est bonne. On augmente ensuite le redshift limite utilisé pour dériver a et on compare la qualité de la minimisation. Le redshift limite est celui à partir duquel la qualité de la minimisation décroît. Cependant, cette méthode dépend du choix initial du nombre d'intervalles de redshift. Pour s'affranchir de cela nous avons, pour chaque échantillon, appliqué 100 fois la méthode précédente en changeant à chaque fois de manière aléatoire le nombre d'intervalles (entre 5 et 13) tout en changeant les bornes globales de redshift inférieure et supérieure.

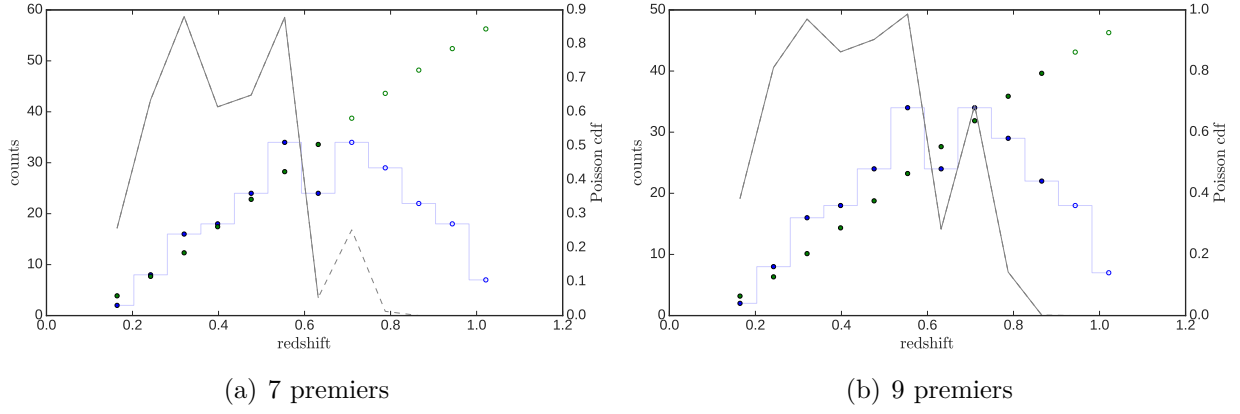


FIGURE 8 – Graphique présentant l'évolution de la probabilité poissonnienne d'observer un nombre de supernovae correspondant à la fonction $N_{\text{SNe Ia}} = a \times V(z)$ sachant que l'on en a observé le nombre correspondant à l'intervalle. En pointillés est représenté ce que l'on obtiendrait en extrapolant ce que cette probabilité deviendrait en prenant plus d'intervalles.

Les courbes d'évolution de la probabilité poissonnienne sont enregistrées puis interpolées linéairement. La figure 9 montre l'évolution médiane (et écart-type pour la bande d'erreur) de la probabilité que le nombre de SNe Ia observées par l'échantillon considéré à un redshift donné soit compatible avec celui attendu si l'échantillon était complet. Le redshift maximal est celui à partir duquel on est à 30% de cette probabilité. Les conséquences du choix de cette valeur sur les résultats de l'analyse qui en découle seront testées par la suite.

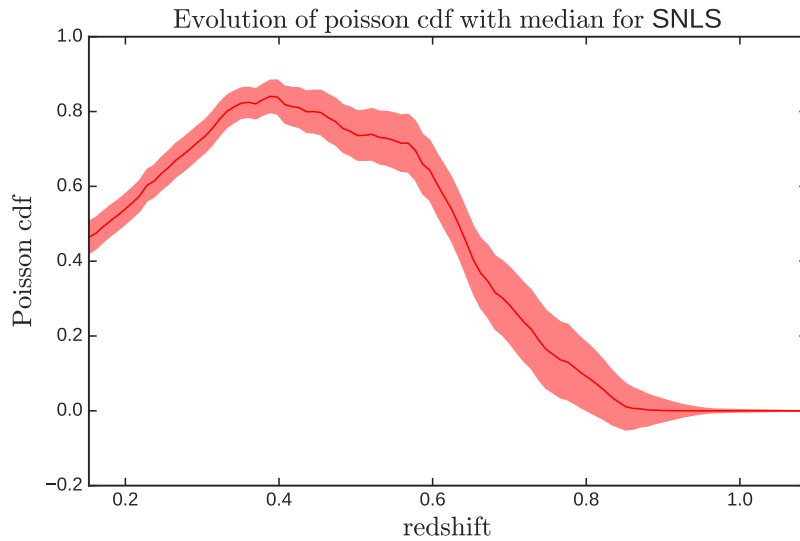


FIGURE 9 – Résultat du procédé de détermination du redshift maximal à partir duquel les effets de sélections ne sont pas anodins.

III - 3. Échantillon utilisé

Une fois déterminé le redshift limite pour chacune des sources de SNe Ia, nous pouvons constituer notre échantillon d'étude. Celui-ci est, par construction, représentatif de ce que la nature produit. La table 1 récapitule l'origine des SNe Ia et la fig. 10 montre le stretch en fonction du redshift pour toutes les SNe Ia considérées (sauf SNfactory et HST, voir ci-après) ; celles que nous utiliserons ont un marqueur plein.

TABLE 1 – Nombre de SNe Ia pour chaque échantillon complet

Échantillon	Nombre de SNe Ia
SNf	141
PS1	178
SDSS	206
SNLS	138
HST	26

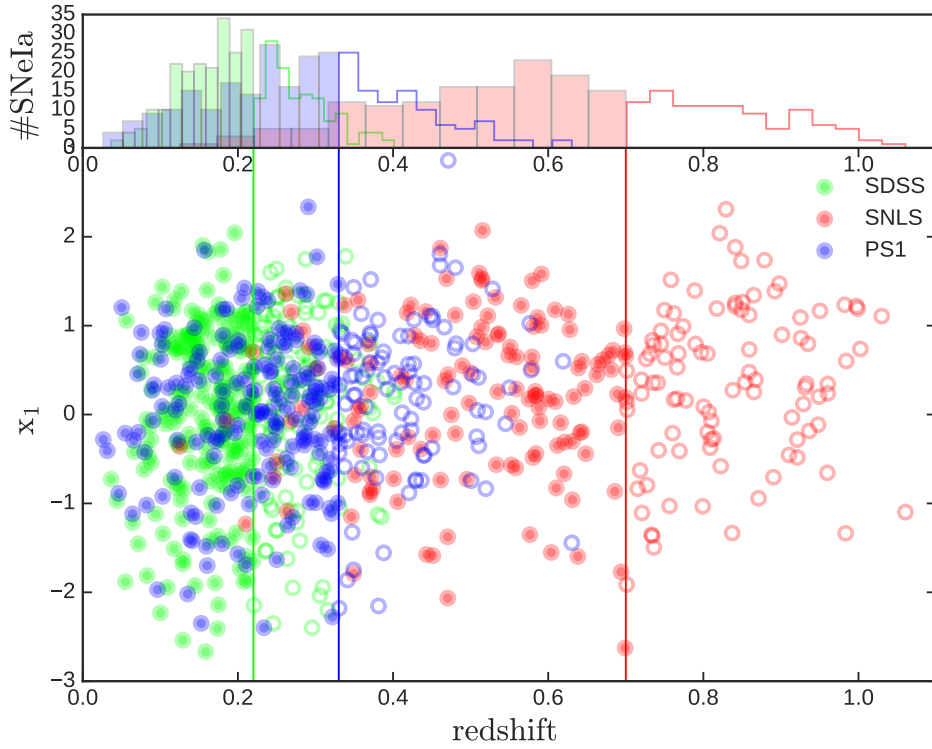


FIGURE 10 – Représentation des données des échantillons subissant des effets de sélection après application du procédé : les points creux représentent les données ignorées.

Aux trois échantillons provenant de [SCOLNIC et al.(2018)] et dont nous avons extrait notre échantillon complet, peut s'ajouter un quatrième échantillon, celui de the Nearby Supernova factory (SNfactory) [WOOD-VASEY et al.(2004)] et les données proviennent de [RIGAULT et al.(2018)]. Contrairement aux autres sondages, SNfactory utilise des sondages indépendants pour trouver les SNe Ia qu'il suit. Ces derniers ont un niveau de détection plus profond que les autres et ainsi, l'échantillon de SNfactory n'est pas affecté par des effets de sélection [RIGAULT et al.(2018)]. Nous utiliserons donc l'ensemble des données provenant de ce sondage (voir 1). Il en va de même pour les quelques SNe Ia à grand redshift mesurées par le Hubble Space Telescope (HST) issues de [SCOLNIC et al.(2018)].

Notre échantillon est donc constitué de 689 SNe Ia couvrant un domaine de redshift allant de $z = 0.02$ à $z = 2.26$.

IV - Évolution intrinsèque des SNe Ia

En plus des données liées aux courbes de lumière (stretch, couleur, magnitude), les données de SNfactory disposent également d'une mesure de la probabilité qu'une SNe Ia soit issue d'un

progéniteur jeune ($\lesssim 500$ Myr) ou vieux ($\gtrsim 1$ Gyr). [RIGAUULT et al.(2018)] ont montré une corrélation forte entre le stretch des SNe Ia et le *Local specific star formation rate* (LsSFR), le traceur de la probabilité qu’une SNe Ia soit jeune ou vieille. Cette corrélation est montrée fig 11(a).

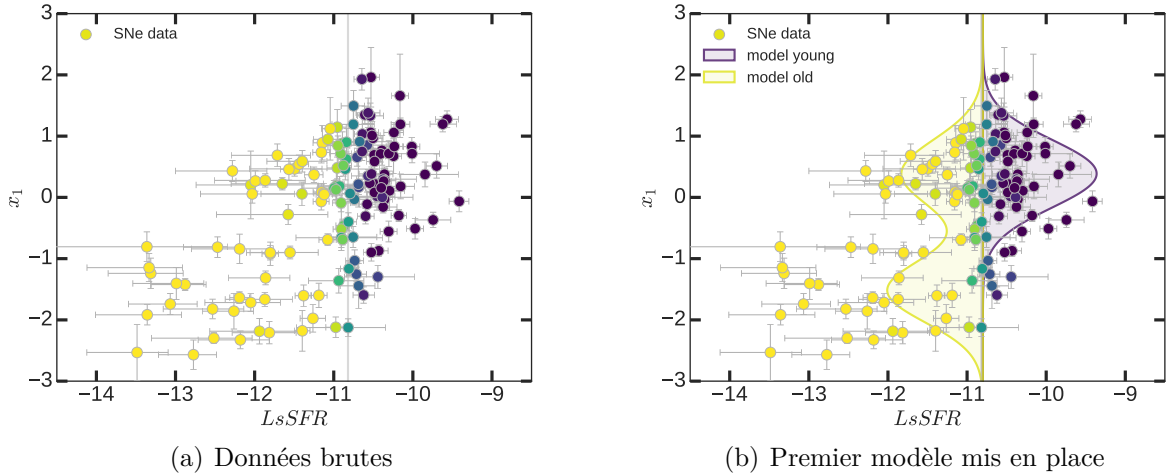


FIGURE 11 – Stretch des supernovae étudiées par la collaboration SNF en fonction de $\log(\text{LsSFR})$. La couleur représente la probabilité pour une supernova d’être issue d’un jeune progéniteur.

Le LsSFR est le ratio entre le taux de formation stellaire (SFR, traceur du nombre de jeunes étoiles) et la masse (traceur du nombre d’étoiles largement dominé par celles de la séquence principale comme le soleil). Or, le taux de formation d’étoiles dans l’univers est très dépendant du redshift et est maximum vers un redshift de 2, quand l’univers avait approximativement le tiers de son âge actuel [MADAU et al.(2014)]. Il y avait ainsi ≈ 40 fois plus de formation d’étoiles à un redshift de 1 qu’aujourd’hui. La masse n’évolue que lentement avec le redshift. Puisque le stretch et le LsSFR sont corrélés, il est donc probable que la distribution de stretch des SNe Ia évolue également avec le redshift.

Pour tester cette hypothèse, nous allons dans un premier temps construire un modèle décrivant la distribution de stretch en fonction du LsSFR. Ce modèle est présenté section 4.1 où nous présentons également le modèle d’évolution du LsSFR en fonction du redshift donné dans [RIGAUULT et al.(2018)]. Dans la section 4.2 nous testerons ce modèle sur les données de la littérature. Nous généraliserons ensuite ce modèle dans la section 4.3 et nous comparerons différents modèles, y compris des modèles sans évolution avec le redshift, afin de déterminer lequel est le plus probable.

IV - 1. Modèle SNf d’évolution du stretch

[RIGAUULT et al.(2018)] appellent $\delta(z)$ la fraction de jeunes étoiles dans un échantillon et $\psi(z)$ la fraction de vieilles. Suivant [MANNUCCI et al.(2005), SCANNAPIECO & BILDSTEN(2005), SULLIVAN et al.(2006)], ils supposent que les fractions de jeunes et vieilles étoiles sont respectivement proportionnelles au SFR et à la masse stellaire. Le ratio des deux est donc proportionnel au LsSFR qui évolue comme $(1+z)^{2.8 \pm 0.2}$ d’après [TASCA et al.(2015)]. Ainsi [RIGAUULT et al.(2018)] donne :

$$\frac{\delta(z)}{\psi(z)} \equiv \text{LsSFR}(z) = K \times (1+z)^\varphi \quad (9)$$

avec $\varphi = 2.8$. Sachant que $\delta(z) + \psi(z) = 1$, on a :

$$\delta(z) = \left(K^{-1} \times (1+z)^{-\varphi} + 1 \right)^{-1} ; \quad (10)$$

$$\psi(z) = \left(K \times (1+z)^{+\varphi} + 1 \right)^{-1} \quad (11)$$

La valeur de LsSFR séparant les jeunes et vieilles SNe Ia est choisie telle qu'il y ait autant de supernovae de chaque sorte dans l'échantillon de SNfactory, à $z \approx 0.05$, ce qui impose $K = 0.87$.

En s'appuyant sur la forme du nuage de point montré fig. 11(a), notre modèle de distribution du stretch pour les jeunes et les vieilles SNe Ia a été le suivant :

- **jeunes** : une gaussienne de moyenne μ_1 et d'écart type σ_1 , soit $\mathcal{N}_1 \equiv \mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1)$,
- **vieilles** : une combinaison linéaire entre \mathcal{N}_1 (même que pour les jeunes) et une seconde gaussienne $\mathcal{N}_2 \equiv \mathcal{N}(\mu_2, \sigma_2)$.

Ainsi, la probabilité d'observer une SNe Ia "i" jeune avec un stretch x_1^i d'erreur dx_1^i est :

$$p(x_1^i, dx_1^i | \mu_1, \sigma_1) = \mathcal{N} \left(\mu_1, \sqrt{\sigma_1^2 + dx_1^{i2}} \right) (x_1^i) \quad (12)$$

et pour une SNe Ia vieille :

$$p(x_1^i, dx_1^i | \mu_{1,2}, \sigma_{1,2}, a) = a \times \mathcal{N} \left(\mu_1, \sqrt{\sigma_1^2 + dx_1^{i2}} \right) (x_1^i) + \quad (13)$$

$$(1-a) \times \mathcal{N} \left(\mu_2, \sqrt{\sigma_2^2 + dx_1^{i2}} \right) (x_1^i),$$

où a est le facteur d'amplitude relative entre les deux modes \mathcal{N}_1 et \mathcal{N}_2 . En ajustant ce modèle sur les données de SNfactory (voir fig. 11(a)), nous trouvons les résultats table 2. Pour une question de nomenclature pour la suite, nous désignerons ce modèle : 3G2M2S_{SNf}, car il est composé de 3 gaussiennes (deux vieilles, une jeune) mais composé de seulement deux valeurs centrales μ et deux écart-types σ et dont tous les paramètres libres ont été ajustés sur les données de SNf.

IV - 2. Implémentation aux échantillons

La détermination des données complètes discutée partie 3.2 nous a permis de déterminer le stretch et le redshift moyens des 5 échantillons étudiés (SNf, PS1, SDSS, SNLS, HST). Le stretch moyen de chacun de ces sous-échantillons pour les données complètes que nous utilisons est montré fig. 12.

On remarque que plus le redshift est important, plus le stretch moyen semble grand. Si l'on se rappelle que les SNe Ia à faible stretch sont quasi-uniquement des SNe Ia vieilles (voir fig 11(a)) et que la fraction de vieilles SNe Ia diminue avec le redshift (pour la gamme de redshift couvert par les SNe Ia), alors l'évolution visible fig. 12 est celle à laquelle nous nous attendions.

La distribution normalisée de stretch à un redshift donné $\Delta(x_1|z)$ est la somme pondérée des distributions de stretch des jeunes et des vieilles SNe Ia étant donné leurs fractions relatives à ce redshift. Ainsi, dans le cas du modèle 3G2M2S_{SNf} et en supposant l'évolution des fractions de jeunes SNe Ia de [RIGAULT et al.(2018)] :

$$\Delta(x_1|z) = \delta(z) \times \mathcal{N}_1 + (1 - \delta(z)) \times (a\mathcal{N}_1 + (1-a)\mathcal{N}_2) \quad (14)$$

Ce modèle est entièrement prédictif et ne dispose d'aucun paramètre libre ; ils sont tous fixés par les données de SNf. La fig. 12 montre que notre modèle est particulièrement bien en accord avec les mesures issues des données de la littérature.

TABLE 2 – Valeurs des paramètres pour différents modèles. En rouge les données aberrantes.

Modèle	a	f	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2
3G2M2S _{SNf}	0.48 ± 0.07	none	0.39 ± 0.07	0.56 ± 0.05	-1.5 ± 0.1	0.52 ± 0.09
3G2M2S	0.48 ± 0.17	none	0.36 ± 0.08	0.61 ± 0.05	-1.3 ± 0.2	0.60 ± 0.12
3G2M2SF	0.1 ± 0.6	0.2 ± 0.6	-0.9 ± 0.7	0.7 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.1
3G2M1S	0.47 ± 0.07	none	0.35 ± 0.04	0.61 ± 0.03	-1.25 ± 0.10	σ_1
3G2M1SF	0.2 ± 0.9	0.7 ± 0.3	0.36 ± 0.04	0.60 ± 0.03	-1.23 ± 0.10	σ_1
2G2M2S	none	none	0.49 ± 0.04	0.54 ± 0.03	-0.72 ± 0.08	0.83 ± 0.07
2G2M2SF	none	0.3 ± 0.2	-0.9 ± 0.6	0.7 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.56 ± 0.09

Modèle	μ	σ
1G1M1S	0.01 ± 0.04	0.90 ± 0.03

Modèle	μ	σ_-	σ_+
1G1M2S	0.16617 ± 0.00004	1.07 ± 0.04	0.69 ± 0.03

Modèle	a	f	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	m_3	σ_3
3G3M3S	0.14 ± 0.08	none	0.51 ± 0.06	0.54 ± 0.04	-1.9 ± 0.2	0.29 ± 0.11	-0.55 ± 0.12	0.67 ± 0.15
3G3M3SF	0.2 ± 0.2	0.10 ± 0.04	-1.7 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1

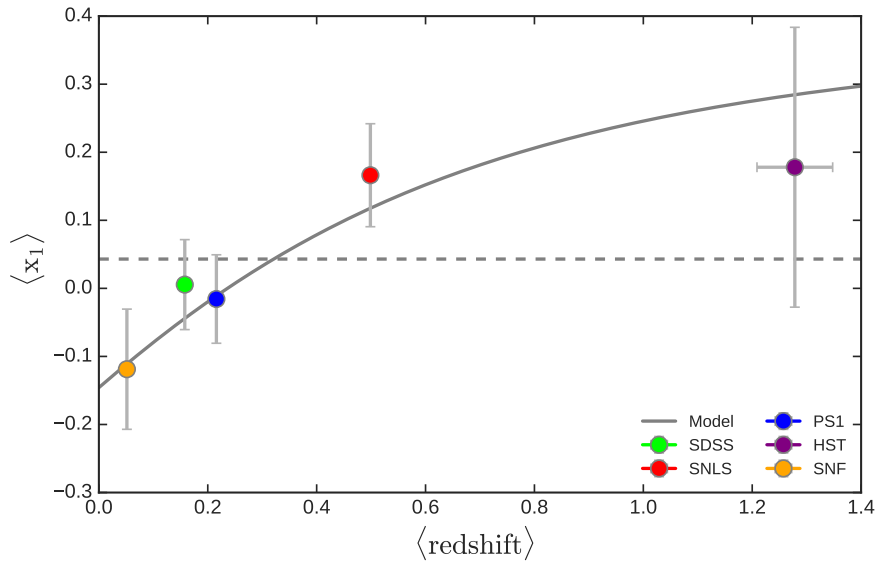


FIGURE 12 – Extrapolation du modèle déterminé à partir des données de SNf sur la gamme de redshifts étudiés par les échantillons étudiés en gris ; moyenne des stretches et des redshifts des échantillons respectivement en ordonnée et en abscisse.

Alternativement, nous pouvons séparer les SNe Ia par gammes de redshift plutôt que par échantillon d'origine. Cela est montré fig. 13. Nous pouvons également ajuster l'ensemble des paramètres du modèle – hormis les paramètres d'évolution de la fraction de jeunes et de vieilles qui sont fixes – non plus sur les données de SNf mais sur l'ensemble des données. Si l'on fait ainsi, on trouve les résultats table 2. Ce modèle, appelé 3G2M2S, est illustré fig. 13 et est similaire avec celui ajusté sur les données de SNf.

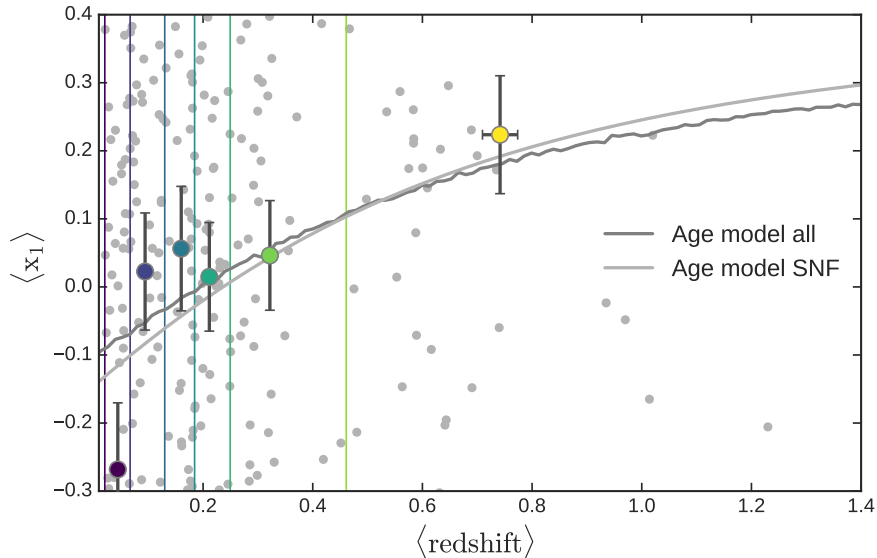


FIGURE 13 – Implémentation du modèle 3G2M2S en utilisant toutes les données. La gamme de redshifts a été divisée en 6 intervalles qui contiennent le même nombre de données.

IV - 3. Modifications et comparaisons

Le modèle que nous avons mis en place et qui est décrit eq. 14, semble une relativement bonne description des données; cf. section 4.2. Cependant, d'autres modèles auraient pu être implémentés. Notamment, la question est de savoir si un modèle sans évolution de population avec le redshift, i.e. $\delta(z) = \text{constant}$, peut également être une bonne représentation des données. Il s'agit là de l'hypothèse nulle de notre analyse où l'on cherche à savoir s'il existe une évolution de la population des SNe Ia avec le redshift.

Nous avons en tout comparé dix modèles différents : quatre disposant d'une évolution avec le redshift ($\delta(z)$ de [RIGAULT et al.(2018)] et donné eq. 10) mais ayant différentes fonctions de distributions de stretch pour les jeunes et les vieilles SNe Ia; et six sans évolution avec le redshift ($\delta(z) = \text{constant}$), et ayant différentes fonctions de distributions de stretch. Les modèles disposant d'une évolution avec le redshift sont :

- 3G2M2S, c'est le modèle décrit section 4.2;
- 3G2M1S, c'est le même modèle que 3G2M2S en supposant que toutes les gaussiennes ont le même écart type ($\sigma_1 \equiv \sigma_2$);
- 2G2M2S ou Howell, il s'agit du modèle présenté par [HOWELL et al.(2009)] où les stretches des SNe Ia jeunes et vieilles ont chacun leur propre distribution gaussienne;

- 3G3M3S, c'est un modèle similaire à 3G2M2S, ici encore le stretch des SNe Ia jeunes est décrit par une simple distribution gaussienne et celui des vieilles par une double gaussienne, mais avec trois gaussiennes indépendantes.

Les modèles ne disposant pas d'évolution avec le redshift sont les mêmes que ceux que l'on vient de présenter, mais dont on a forcé $\delta(z) = f$ où f est une constante ajustée en même temps que les autres paramètres. Nous avons également ajouté deux autres modèles pertinents pour l'analyse :

- 1G1M1S, le modèle le plus simple, la distribution de stretch des SNe Ia est une simple gaussienne ;
- 1G1M2S ou Kessler, le modèle de distribution de stretch présenté dans [KESSLER et al.(2017)], et utilisé dans les dernières analyses cosmologiques [SCOLNIC et al.(2018)]. Il s'agit d'un modèle de gaussienne asymétrique tel que :

$$p(x_1^i, dx_1^i | \mu, \sigma_-, \sigma_+) = \begin{cases} \mathcal{N}\left(\mu, \sqrt{\sigma_-^2 + dx_1^{i2}}\right)(x_1^i) & \text{si } x_1^i \geq \mu \\ \mathcal{N}\left(\mu, \sqrt{\sigma_+^2 + dx_1^{i2}}\right)(x_1^i), & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$$

Pour comparer les différents modèles, nous utilisons le *Akaike Information Criterion* corrigé pour des échantillons de taille finie [BURNHAM et al.(2002)]. Il s'agit d'un test statistique similaire à celui du rapport des vraisemblances, mais qui pénalise pour l'utilisation de paramètres libres supplémentaires tel que :

$$\text{AICc} = \text{AIC} + \left(\frac{2k(k+1)}{n-k-1} \right) \quad (16)$$

avec $\text{AIC} = 2k - 2 \ln(\mathcal{L})$, où k le nombre de paramètres libres, \mathcal{L} la vraisemblance.

Le modèle avec le plus petit AICc est statistiquement considéré comme le meilleur. Un autre modèle se compare à lui à travers son $\Delta\text{AICc} \equiv \text{AICc}_{\text{best}} - \text{AICc}_{\text{other}}$, sachant que la probabilité que ce second modèle soit au moins aussi représentatif des données que le meilleur modèle est donnée par :

$$p(\text{other} > \text{best}) = \exp(\Delta\text{AICc}/2) \quad (17)$$

Ainsi, un modèle avec $|\Delta\text{AICc}| < 2$ est semblable au meilleur modèle (à $\approx 1\sigma$) ; si $2 < |\Delta\text{AICc}| < 10$ il est défavorisé ($\lesssim 3\sigma$) ; si $10 < |\Delta\text{AICc}| < 20$ alors il est fortement défavorisé ($\lesssim 5\sigma$) et si $20 < |\Delta\text{AICc}|$ il est exclu. La table 3 rassemble les vraisemblances et les tests de AICc pour l'ensemble des modèles décrits précédemment.

Le premier modèle mis en place section 4.2 n'est finalement pas celui minimisant la perte d'information. Il apparaît qu'une répartition avec un unique écart-type soit plus représentative de la réalité (3G2M1S). Cependant, avec un $|\Delta\text{AICc}| = 2$, 3G2M1S et 3G2M2S sont comparables. Plus généralement les modèles disposant d'une évolution de la fraction de jeune et vieille SNe Ia avec le redshift semblent être de bonnes représentations des données en comparaison du meilleur modèle ($|\Delta\text{AICc}| < 5$). Par contre, ceux n'en disposant pas, ceux avec un (F) table 3, sont systématiquement les plus mauvais. Leur $|\Delta\text{AICc}|$ est supérieur à 5, et ils sont donc défavorisés, voire même exclus pour le modèle de [KESSLER et al.(2017)] ou celui de la simple gaussienne.

D'après nos données, il est donc fortement probable qu'il existe une évolution de la distribution de stretch des SNe Ia en fonction du redshift induite par une évolution d'âge du progéniteur comme suggéré par [HOWELL et al.(2009), RIGAULT et al.(2013), RIGAULT et al.(2018)].

TABLE 3 – Comparaison des modèles. NR représente les modèles implémentés durant ce stage. (F) indique les modèles pour lesquels il n’y a pas d’évolution de la fraction de SNe Ia jeunes et vieilles en fonction du redshift.

Nom modèle	Description	Param. libres	$\ln \mathcal{L}$	AIC_c	ΔAIC_c (from NR 1S)	Proba (from NR 1S)
3G2M1S	NR 1S	4	1815	1823	0.0	1.0
3G2M2S	NR 2S	5	1815	1825	-2.0	3.6×10^{-1}
2G2M2S	Howell	4	1818	1826	-3.4	1.8×10^{-1}
3G3M3S	NR 3S	7	1812	1826	-3.6	1.6×10^{-1}
3G3M3SF	NR 3S (F)	8	1813	1829	-6.3	4.3×10^{-2}
2G2M2SF	Howell (F)	5	1823	1833	-9.9	7.0×10^{-3}
3G2M1SF	NR 1S (F)	5	1823	1833	-10.4	5.5×10^{-3}
3G2M2SF	NR 2S (F)	6	1823	1835	-12.0	2.5×10^{-3}
1G1M2S	Kessler (F)	3	1837	1843	-20.2	4.1×10^{-5}
1G1M1S	1 gauss. (F)	2	1872	1876	-53.5	2.4×10^{-12}

V - Conclusion et perspectives

L’utilisation des SNe Ia en cosmologie repose sur le fait qu’elles soient des chandelles standardisables, c’est-à-dire qu’avec un nombre limité de paramètres, nous soyons capable de déterminer leur luminosité. Ces paramètres sont issus de leurs courbes de lumières. Le temps d’évolution de cette courbe, appelé stretch, est un des deux paramètres fondamentaux. Il est directement relié à la physique, encore largement inconnue, de l’explosion du progéniteur en SNe Ia. Cette méconnaissance est aujourd’hui un facteur limitant pour les analyses cosmologiques car elle questionne notre capacité à prédire correctement la magnitude des SNe Ia à n’importe quel redshift.

Dans ce stage nous avons utilisé la distribution de stretch de données de la littérature pour tester si celle-ci évoluait en fonction du redshift, ce qui serait une preuve que la physique des SNe Ia elle-même en dépend. Après avoir construit un sous-échantillon à partir de ces données pour en extraire un dépourvu d’effets de sélection – effets qui auraient faussés nos mesures –, nous avons modélisé l’évolution du stretch des SNe Ia en fonction du redshift. Plusieurs formes de distributions ont été testées mais celles-ci peuvent se ranger en deux catégories : celles disposant d’une évolution de la fraction de jeunes et vieilles SNe Ia en fonction du redshift, et celles n’en disposant pas. En s’appuyant sur le test statistique AIC_c , nous avons déterminé qu’il est fortement probable qu’il existe une évolution de la distribution de stretch des SNe Ia en fonction du redshift induite par une évolution d’âge du progéniteur comme suggéré. Nous avons également exclu que le modèle actuellement utilisé en cosmologie pour décrire la distribution de stretch des SNe Ia (sans évolution de redshift) soit une représentation correcte des données. Un article décrivant nos travaux est en cours de rédaction et devrait être rapidement soumis au journal européen *Astronomy & Astrophysics*.

Dans le futur, nous allons améliorer la construction de l’échantillon d’étude, notamment en travaillant sur les conséquences du changement du redshift limite des échantillons publics sur nos résultats. Mais surtout, nous allons nous intéresser aux conséquences de nos travaux sur la détermination des paramètres cosmologiques. Il s’agira là du début de mon travail de thèse.

Références

- [ASTIER et al.(2006)] The Supernova Legacy Survey : Measurement of Ω_m , Ω_Λ and w from the First Year Data Set, Astier, P. , Guy, J. et al. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 447, 31, arXiv : astro-ph/0510447
- [BETOULE et al.(2014)] Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples, Betoule, M., Kessler, R. et al. 2014, *Astronomy and Astrophysics*, 568, A22
- [BURNHAM et al.(2002)] Model Selection and Multimodel Inference : A Practical Information-Theoretic Approach, K. P. Burnham and D. R. Anderson, Springer-Verlag, 2 ed.
- [CHILDRESS et al.(2014)] Ages of Type Ia supernovae over cosmic time Childress, M. J., Wolf, C., & Zahid, H. J. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445, 1898
- [GUY et al.(2007)] SALT2 : using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators, Guy, J., Astier, P. et al. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 466, 11
- [GUY et al.(2010)] The Supernova Legacy Survey 3-year sample : Type Ia supernovae photometric distances and cosmological constraints, Guy, J., Sullivan, M. et al. 2010, *Astronomy and Astrophysics*, 523, A7
- [HOWELL et al.(2007)] Predicted and Observed Evolution in the Mean Properties of Type Ia Supernovae with Redshift, D. A. Howell, M. Sullivan et al. 2009, *The Astrophysical Journal*, 667, p. L37.
- [HOWELL et al.(2009)] The Effect of Progenitor Age and Metallicity on Luminosity and ^{56}Ni Yield in Type Ia Supernovae, Howell, D. A., Sullivan, M. et al. 2009, *The Astrophysical Journal*, 691, 661
- [KESSLER et al.(2017)] Correcting Type Ia Supernova Distances for Selection Biases and Contamination in Photometrically Identified Samples, R. Kessler and D. Scolnic, *The Astrophysical Journal*, 836 (2017), p. 56.
- [MADAU et al.(2014)] Cosmic Star Formation History, Madau, P., Dickinson, M. 2014, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 415, arXiv : 1403.0007
- [MANNUCCI et al.(2005)] The supernova rate per unit mass, Mannucci, F., Della Valle, M. et al. 2005, *Astronomy and Astrophysics*, 433, 807
- [PEREIRA et al.(2013)] Spectrophotometric time series of SN 2011fe from the Nearby Supernova Factory, Pereira, R., Thomas, R. C. et al. 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 554, A27
- [PERLMUTTER et al.(1999)] Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae, Perlmutter, S., Aldering, G. et al. 1999, *The Astrophysical Journal*, 517, 565, arXiv : astro-ph/9812133
- [PHILLIPS(1999)] The Absolute Magnitudes of Type Ia Supernovae - NASA/ADS, Phillips, M. M. 1999, *Astrophysical Journal Letters*, v.413, p.L105
- [RIESS et al.(1998)] Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, Riess, A. G., Filippenko, A. V. et al. 1998, *The Astronomical Journal*, 116, 1009, arXiv : astro-ph/9805201

- [RIESS & LIVIO(2006)] The First Type Ia Supernovae : An Empirical Approach to Taming Evolutionary Effects in Dark Energy Surveys from SNe Ia at $z > 2$, Riess, A. G. & Livio, M. 2006, *The Astrophysical Journal*, 648, 884
- [RIGAULT et al.(2015)] Confirmation of a Star Formation Bias in Type Ia Supernova Distances and its Effect on the Measurement of the Hubble Constant, Rigault, M., Aldering, G. et al. 2015, *The Astrophysical Journal*, 802, 20
- [RIGAULT et al.(2018)] Strong Dependence of Type Ia Supernova Standardization on the Local Specific Star Formation Rate, Rigault, M., Brinnel, V. et al. 2018, arXiv e-prints, arXiv :1806.03849
- [RIGAULT et al.(2013)] Evidence of environmental dependencies of Type Ia supernovae from the Nearby Supernova Factory indicated by local $H\alpha$, Rigault, M., Copin, Y. et al. 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 560, A66
- [SCANNAPIECO & BILDSTEN(2005)] The Type Ia Supernova Rate, Scannapieco, E. & Bildsten, L. 2005, *The Astrophysical Journal*, 629, L85
- [SCOLNIC et al.(2018)] The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample, Scolnic, D. M., Jones, D. O. et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 859, 101
- [SULLIVAN et al.(2010)] The dependence of Type Ia Supernovae luminosities on their host galaxies, Sullivan, M., Conley, A. et al. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 782
- [SULLIVAN et al.(2006)] Rates and Properties of Type Ia Supernovae as a Function of Mass and Star Formation in Their Host Galaxies, Sullivan, M., Le Borgne, D. et al. 2006, *The Astrophysical Journal*, 648, 868
- [TASCA et al.(2015)] The evolving star formation rate : M_\star relation and sSFR since $z \simeq 5$ from the VUDS spectroscopic survey, Tasca, L. a. M., Le Fèvre, O. et al. 2015, *Astronomy and Astrophysics*, 581, A54
- [TRIPP(1998)] A two-parameter luminosity correction for Type IA supernovae, Tripp, R. 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 331, 815
- [WOOD-VASEY et al.(2004)] The Nearby Supernova Factory, Wood-Vasey, W. M., Aldering, G. et al. 2004, *New Astronomy Reviews*, 48, 637, arXiv : astro-ph/0401513