

Perspectives et discussion

« A common mistake that people make when trying to design something completely foolproof is to underestimate the ingenuity of complete fools »

Douglas ADAMS, *Mostly Harmless*

Au travers de cette thèse, nous avons utilisé un certain lot de données pour mettre en place un modèle d'évolution de l'étirement des SNe Ia avec le redshift. Nous avons pour cela dû effectuer des coupes en redshift afin de limiter les effets de sélection dans l'échantillon, amenant notre nombre total de SNe Ia à 569. Ce modèle a permis de donner des premières indications fortes sur le fait que les propriétés des SNe Ia dérivent avec le redshift, établissant que tout modèle non-dérivant ne saurait décrire aussi bien les données que celui proposé. Nous avons ensuite implémenté ce modèle ainsi que la marche de magnitude basée sur l'âge dans l'outil de simulation et d'analyses cosmologiques SNANA. Cette étude nous a permis de tester les biais potentiels sur le calcul du paramètre cosmologique w , que l'on trouve autour de 4%.

Depuis la première partie de cette étude, nous avons accès à de nouvelles données bientôt publiques grâce aux travaux d'envergure menés par la *Zwicky Transient Facility* (ZTF, [BELLM et al. 2019](#)). Elles s'avèrent particulièrement utile par leur localisation autour de $z \lesssim 0,1$; nous proposons Section [I.1](#) de les inclure à notre analyse première afin de raffiner le modèle.

Les simulations effectuées avec SNANA se sont vues limitées par le temps de calcul et la complexité de la prise en main des logiciels. Nous proposons Section [I.2](#) des pistes d'amélioration en vue de continuer cette étude et ouvrir la voix à l'implémentation complète de l'âge dans cet outil.

Sommaire

I.1 Étirement : inclusion des données de ZTF	2
I.1.1 Prédiction	2
I.1.2 Implémentation	3
I.1.3 Résultats	4
I.1.4 Conclusion	6
I.2 Simulations : améliorations	8
I.2.1 Types de simulations	8
I.2.2 Variation de paramètres	9
I.2.3 Traceurs environnementaux	9

I.1 Étirement : inclusion des données de ZTF

Dans le Chapitre ??, nous avons considéré une modélisation simple par mélange Gaussien à deux populations. Des données supplémentaires exemptes de biais de MALMQUIST significatifs nous permettraient de l'affiner. Notamment, les données aux extrémités à bas et haut redshifts du diagramme de HUBBLE sont particulièrement utiles pour l'analyse de cette dérive. Si les programmes de relevé de SNe Ia à haut redshifts Subaru et SeeChange ne sont pas encore disponibles, les données fournies par la *Zwicky Transient Facility* (ZTF, [BELL et al. 2019](#) ; [GRAHAM et al. 2019](#)) nous ont permis d'établir un échantillon extrêmement riche à bas redshift, 2246 SNe Ia entre $0,0 < z < 0,19$ (voir Chapitre ??, Tableau ??). L'établissement de sa partie limitée en volume a été détaillée Chapitre ??, et se compose de 638 SNe Ia dans sa partie fiducielle, pour un redshift limite de 0,055.

I.1.1 Prédiction

Étant donné la faible valeur de ce redshift moyen, le grand échantillonnage et sa qualité non-ciblée, nous nous attendons à ce que les données d'étirement de ce sondage suivent la distribution du modèle de référence pris à très bas redshift. Notamment, ce modèle suppose la présence d'un pic dans la quantité de données à petit étirement, autour de $x_1 \approx -1,5$ (voir, par exemple, la courbe jaune de la ligne 2 et colonne 1 de la Figure ??). C'est en effet ce que nous observons dans l'histogramme des données d'étirement de ce sondage, peu importe la coupe choisie. Nous présentons Figure I.1 l'histogramme des données fiducielles de ZTF sur lequel nous présentons le modèle de base ajusté sur l'échantillon de base (modèle ci-après appelé N21) et son erreur.

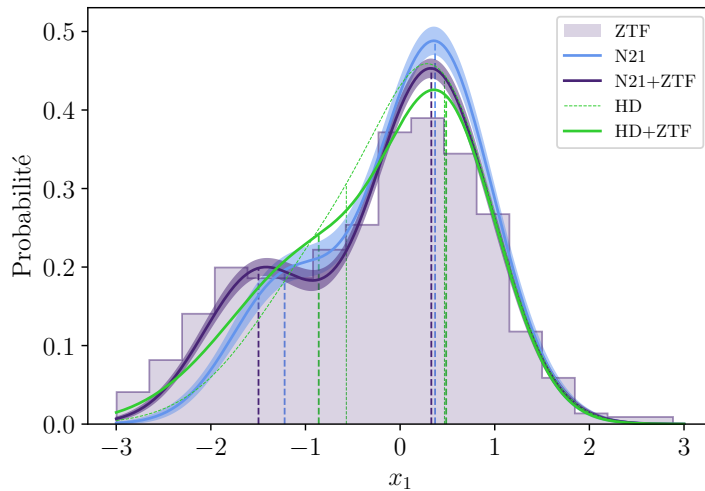


FIGURE I.1 – En violet : histogramme des étirements de ZTF. En bleu (violet) et leurs bandes : modèles de base ajustés sur l'échantillon de base, N21, (échantillon avec ZTF, N21+ZTF) au redshift moyen de ZTF et leur erreur. En fins pointillés verts (ligne continue) : modèles Howell+dérive ajustés sur l'échantillon de base, HD (échantillon avec ZTF, HD+ZTF).

Nous remarquons que s'il existe bien un pic de petit étirement, le modèle N21 ne le caractérise que partiellement ; la distribution du modèle étant écartée d'environ 0,30 de cce que nous pourrions considérer comme la moyenne de ce mode de petit étirement. Il reste bien plus proche que le modèle Howell+dérive ajusté sur l'échantillon de base (ci-après HD), représenté en fins pointillés verts Figure I.1.

Tableau I.1 – Valeurs des paramètres issus des meilleurs ajustements du modèle de distribution de l’étirement de base lorsqu’il est appliqué à l’ensemble de données fiduciel seulement (569 SNe Ia), à l’échantillon fiduciel avec ZTF (1207) ou à l’échantillon conservatif avec ZTF (815).

Échantillon	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	a
Fiduciel	0.37 ± 0.04	0.61 ± 0.03	-1.22 ± 0.11	0.56 ± 0.07	0.51 ± 0.07
Fiduciel+ZTF	0.33 ± 0.03	0.64 ± 0.02	-1.50 ± 0.06	0.58 ± 0.04	0.45 ± 0.04
Conservatif+ZTF	0.35 ± 0.03	0.61 ± 0.02	-1.50 ± 0.06	0.54 ± 0.04	0.45 ± 0.04

Notes. La différence principale se situe sur la position de la moyenne du mode de bas étirement, μ_2 , complètement incompatible avec la moyenne résultant de l’ajustement avec les données de base ; nous notons également l’augmentation de l’amplitude de ce mode *via* la réduction du paramètre a décrivant l’amplitude relative des deux modes dans la distribution sous-jacente de la population vieille.

I.1.2 Implémentation

Nous constatons que même si le sondage SNf a permis l’établissement d’un modèle robuste *via* l’utilisation du LsSFR comme traceur de l’âge, le manque de données à bas redshift limite la force de ces résultats. C’est pourquoi nous proposons d’inclure les données de ZTF dans cette étude. Les résultats de l’ajustement de ce modèle à l’ensemble des 1207 (respectivement 815) SNe Ia de l’échantillon fiduciel+ZTF (conservatif+ZTF) sont présentés dans le Tableau I.1. Comme attendu, les paramètres du mode de grand étirement (μ_1, σ_1) ne diffèrent pas significativement des résultats précédents, mais la moyenne du mode de petit étirement μ_2 est bien plus basse et écartée de $\approx 3\sigma$ des résultats de base. Nous pouvons également noter une baisse de l’amplitude du mode 1 dans la combinaison linéaire composant la distribution sous-jacente de la vieille population, donnant donc plus d’amplitude au mode de petits étirements.

Le modèle de base ajusté sur l’échantillon incluant les données de ZTF est ci-après nommé N21+ZTF, de même pour le modèle Howell+dérive qui sera nommé HD+ZTF. Nous donnons Figure I.1 les représentations graphiques de ces quatre distributions au redshift moyen des données de ZTF. Nous constatons que le modèle N21+ZTF possède alors un second pic de bas étirements plus éloigné en moyenne que le modèle N21, donnant un meilleur ajustement quand nous le comparons à l’histogramme des étirements de ZTF, comme attendu. Le modèle HD+ZTF bénéficie aussi de l’inclusion de ces données, sa moyenne de petits étirements étant plus proche de la valeur centrale de ce pic ; elle reste cependant toujours plus éloignée que celle définie par le modèle N21. Les évolutions prédites de l’étirement avec le redshift (x_1 attendu compte tenu de la distribution de l’équation ??) sont illustrées sous la forme d’une bande violette pour N21+ZTF et bleue pour N21 dans la Figure I.2, qui tiennent compte des erreurs des paramètres et de leurs covariances. Cette figure montre que l’étirement moyen mesuré des SNe Ia par intervalle de redshift (contenant tous le même nombre de données selon l’échantillon utilisé pour l’ajustement) suit de près notre modélisation de la dérive avec le redshift ; cependant les deux modèles N21 et N21+ZTF ne sont pas compatibles entre eux. Nous avons également représenté les évolutions des modèles HD et HD+ZTF en vert pointillé et plein respectivement. Alors que dans la Figure I.1 la moyenne du mode de petit étirement de HD+ZTF se rapproche plus du pic de la distribution de ZTF que celle de HD, il s’écarte beaucoup plus du modèle

de base ajusté sur l'échantillon combiné que ce dernier. Alors que dans N21, ce modèle était relativement compatible avec le modèle de référence, l'ajout des données de ZTF le rend incompatible avec le modèle de base.

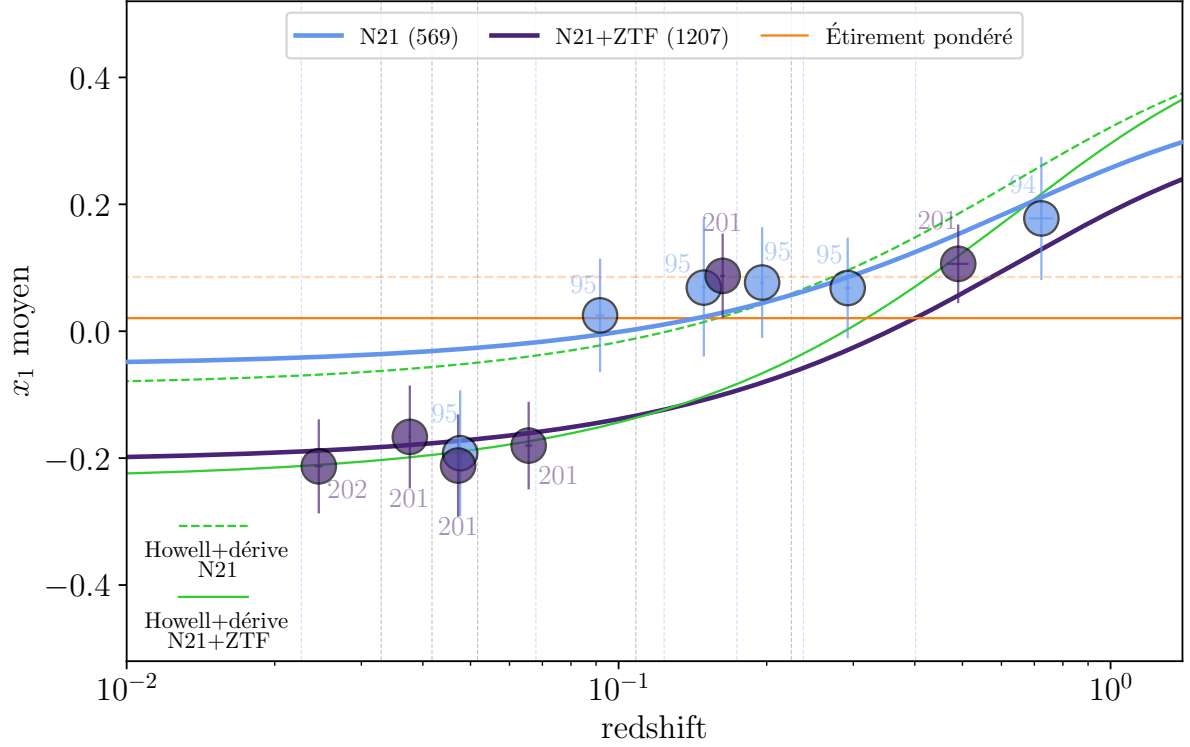


FIGURE I.2 — En bleu (et sa bande) : évolution de l'étirement moyen (x_1) des SNe Ia issu d'un ajustement **SALT2.4** en fonction du redshift pour notre modèle de base ajusté sur les données de base, nommé N21 (et son erreur). En violet (et sa bande) : même modèle mais ajusté sur les données de base combinées aux données de ZTF, nommé N21+ZTF (et son erreur). Ces deux modèles ne sont pas compatibles entre eux. Les marqueurs montrent la moyenne pondérée de l'étirement mesurée dans des intervalles de redshift de tailles d'échantillon égales pour chaque ensemble de données, indiquées en bleu clair et en violet clair à côté de chaque point de mesure pour les modèles N21 et N21+ZTF, respectivement. La ligne horizontale orange pleine (pointillée) représente l'étirement pondéré des données. La ligne verte (pointillée) représente le meilleur ajustement du modèle Howell+dérive ajusté sur l'échantillon fiduciel combiné à ZTF (fiduciel de base). Alors que dans N21, ce modèle était relativement compatible avec le modèle de référence, l'ajout des données de ZTF le rend incompatible avec le modèle de référence.

I.1.3 Résultats

Nous présentons les résultats quantitatifs de cette étude sous la même forme que précédemment, à l'aide du Tableau I.2, illustrée par le graphique Figure I.3.

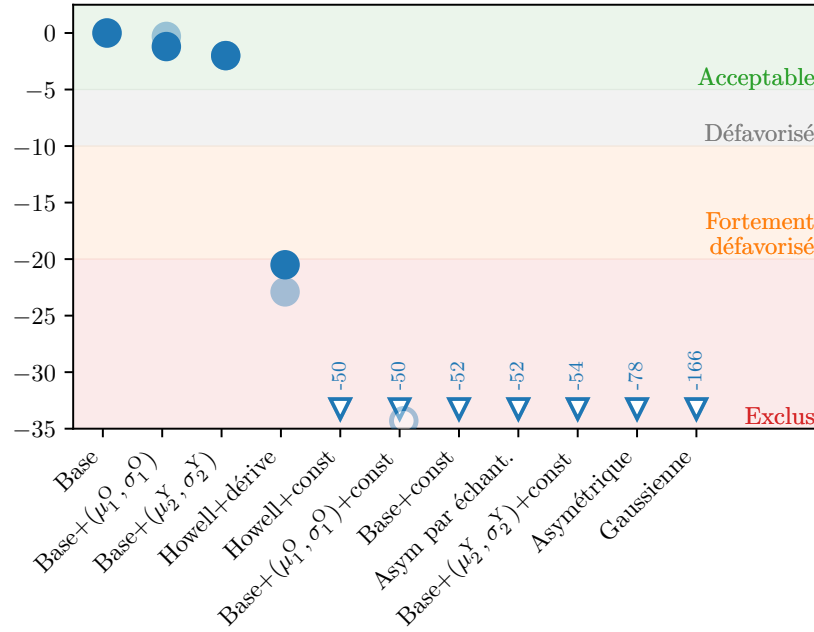


FIGURE I.3 – ΔAIC entre le modèle de référence et les autres modèles en utilisant les données de ZTF (voir Tableau I.2). La légende suit celle de la Figure ?? . En suivant ces valeurs d'AIC, tous les modèles sans dérive (marqueurs ouverts) sont exclus car ils représentent moins bien les données que le modèle de référence, avec dérive.

Tableau I.2 – Comparaison de la capacité relative de chaque modèle à décrire les données en utilisant les données de ZTF

Nom	dérive	k	Échantillon fiduciel+ZTF (1207 SNe)			Échantillon conservatif+ZTF (815 SNe)		
			$-2\ln(L)$	AIC	ΔAIC	$-2\ln(L)$	AIC	ΔAIC
Base	$\delta(z)$	5	3348,7	3358,7	–	2215,5	2225,5	–
Base+ (μ_1^O, σ_1^O)	$\delta(z)$	7	3345,9	3359,9	-1,2	2211,8	2225,8	-0,3
Base+ (μ_2^Y, σ_2^Y)	$\delta(z)$	6	3348,7	3360,7	-2,0	2215,5	2227,5	-2,0
Howell+dérive	$\delta(z)$	4	3371,1	3379,1	-20,5	2240,4	2248,4	-22,9
Howell+constant	f	5	3398,3	3408,3	-49,6	2252,8	2262,8	-37,2
Base+ (μ_1^O, σ_1^O) +const	f	8	3393,1	3409,1	-50,4	2243,8	2259,8	-34,3
Base+const	f	6	3398,3	3410,3	-51,6	2252,8	2264,8	-39,2
Asym. par échant.	Par échant.	3×6	3374,3	3410,3	-51,7	2240,9	2276,9	-51,3
Base+ (μ_2^Y, σ_2^Y) +const	f	7	3398,3	3412,3	-53,6	2252,8	2266,8	-41,2
Asymétrique	–	3	3431,1	3437,1	-78,5	2278,3	2284,3	-58,8
Gaussienne	–	2	3520,5	3524,5	-165,8	2365,6	2369,6	-144,0

Notes. Pour chaque modèle considéré, nous indiquons si le modèle dérive ou non, son nombre de paramètres libres k , et pour les échantillons fiduciel et conservatif, $-2\ln(L)$ (voir Équation ??), l'AIC et la différence d'AIC (ΔAIC) entre ce modèle et le modèle de base, choisi comme référence car présentant l'AIC le plus faible.

Nous voyons ici que l'incompatibilité visuelle entre HD+ZTF et N21+ZTF se traduit très fortement au niveau de la différence d'AIC. En effet, nous remarquons d'abord que le modèle de base s'établit encore comme le modèle de référence. Les différentes variations au modèle de la Section ?? restent proches du modèle de base, mais toujours défavorisés par l'AIC. En revanche, cette fois ci l'écart d'AIC avec le modèle Howell+dérive est de 20,7, excluant cette modélisation comme bonne représentation des données par rapport au modèle de base. L'exclusion des modèles non-dérivants est également renforcée, le premier modèle non-dérivant ayant un AIC 49,7 plus petit que notre modèle de référence, et 29,2 plus petit que Howell+dérive. Le modèle asymétrique pur est toujours exclu, mais cette fois rendu à l'avant-dernière place du classement.

Bien que l'ajout de ces données donne plus de robustesse aux conclusions principales sur la dérive de l'étirement avec le redshift, la question se pose de la qualité de ces nouveaux paramètres pour décrire les échantillons déjà existants. Pour cela, nous avons calculé la quantité $-2\ln(L)$ pour chacun des modèles N21 et N21+ZTF, ajustés sur leurs échantillons respectifs, quand nous les comparons aux données des sondages. La Figure I.4 et le Tableau I.3 résument ces résultats.

Tableau I.3 – Valeurs des quantités $-2\ln(L)$ des modèles N21 et N21+ZTF par sondage.

Modèle	Sondage							
	SNF	ZTF	SDSS	PS1	SNLS	HST	Base	Base+ZTF
N21	272,9	1948,2	446,6	399,4	262,9	75,0	1456,7	3404,9
N21+ZTF	274,6	1874,5	450,0	407,2	268,1	74,4	1474,2	3348,7
Variation	1,66	-73,69	3,45	7,76	5,23	-0,57	17,53	-56,16

Notes. N21 correspond au modèle de base ajusté sur l'échantillon fiduciel de base. N21+ZTF correspond au même modèle mais ajusté sur l'échantillon fiduciel de base combiné à celui de ZTF.

Nous observons que le modèle N21 présente une meilleure capacité à décrire les données qui ne sont pas ZTF, avec une différence de $-2\ln(L)$ augmentant de SNf à PS1 où nous trouvons une différence de 7,76 en faveur de N21, avant de redescendre jusqu'à avoir une différence de -0,57 en faveur de N21+ZTF. En revanche, chaque modèle présente une meilleure capacité à décrire son échantillon que l'autre, comme attendu. Nous pouvons avancer que l'intégration de ce nouvel ensemble de données, statistiquement supérieur au précédent et sur une plage limitée de redshift, biaise la capacité du modèle à représenter les données en lui imposant de reproduire les caractéristiques de cet échantillon particulier. Nous insistons cependant sur le fait que ces données sont préliminaires, contenant notamment des SNe Ia n'était pas de qualité cosmologique ayant une tendance à présenter des étirements particulièrement bas ; ces résultats sont donc encourageants pour la présence d'une distribution avec deux pics d'étirements d'amplitude relative correcte, et le travail nécessaire qui suivra permettra sans doute d'améliorer cette étude.

I.1.4 Conclusion

Grâce aux début de publication des résultats du nouveau sondage ZTF, nous avons pu étendre l'étude initiale du Chapitre ?? et créer un nouveau sous-échantillon limité en volume, faisant passer notre échantillon combiné de 569 à 1207 SNe Ia (et de 422 à

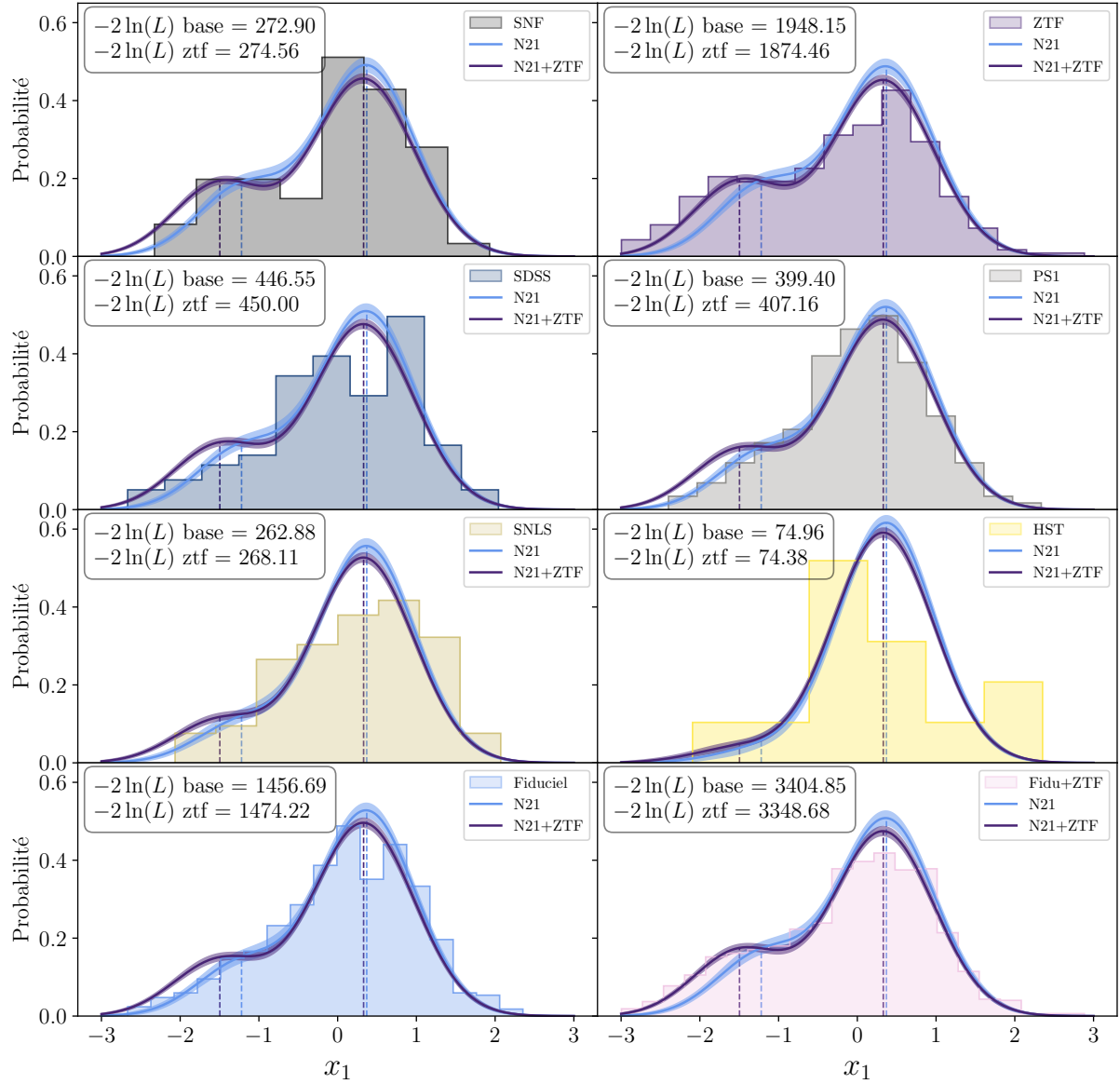


FIGURE I.4 – Comparaison de la capacité des modèles N21 et N21+ZTF à représenter les données des sondages. Pour chaque sondage, nous traçons l’histogramme correspondant et les modèles N21 et N21+ZTF au redshift moyen dudit sondage en ligne (et bande) bleue et violette respectivement (et leurs erreurs). Le modèle N21 présente un meilleur ajustement pour chacun des sondages sauf pour ZTF, rendant l’accord bien plus qualitatif quand ce dernier est inclus dans l’échantillon total que quand il ne l’est pas.

815 avec les coupes conservatives). Ainsi, compte tenu de l'ensemble de données actuel, nous suggérons l'utilisation du modèle de population d'étirements évoluant avec le redshift suivant :

$$X_1(z) = \delta(z) \times \mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \delta(z)) \times [a \times \mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1^2) + (1 - a) \times \mathcal{N}(\mu_2, \sigma_2^2)] , \quad (??)$$

avec $a = 0.45$, $\mu_1 = 0.33$, $\mu_2 = -1.50$, $\sigma_1 = 0.64$, et $\sigma_2 = 0.58$ (voir Tableau I.1), et d'utiliser le modèle de dérive de la population d'âge avec le redshift suivant :

$$\delta(z) = (K^{-1} \times (1 + z)^{-2.8} + 1)^{-1} \quad (??)$$

avec $K = 0.87$.

Au travers de l'ajout des données de ZTF à notre étude, nous avons pu rendre plus robuste la conclusion selon laquelle les modèles d'étirements des SNe Ia n'incluant pas de dérive avec le redshift étaient tous exclus en tant que bonnes représentations de données par rapport aux modèles dérivants, mais nous avons également renforcé la pertinence du modèle de base à cet effet. Si l'accord sur les autres sondages est moindre que précédemment, nous pouvons nous attendre à ce que des données telles que celles du LSST à moyen redshift ou Subaru à haut redshift permettent de rééquilibrer cette différence statistique sur la plage de redshifts sondés pour continuer d'améliorer cette définition de sous-populations, tout en continuant à utiliser les qualités du sondage ZTF à cet effort.

I.2 Simulations : améliorations

Dans le chapitre précédent, nous avons implémenté le premier modèle d'étirement à l'ensemble de logiciels **SNANA**. Bien que les résultats de ces simulations soient concluant, nous proposons différentes approches et perspectives qui permettraient d'étendre ces analyses.

I.2.1 Types de simulations

Nous pouvons implémenter différentes manières d'effectuer ces simulations, que nous appelons « types ».

En premier lieu, nous pourrions réduire les incertitudes statistiques de l'approche précédente en augmentant le nombre de données simulées ; ceci demanderait en retour d'augmenter drastiquement la taille de l'échantillon de BiasCor, déjà proche de 10^6 données mais qui ne permet pas de corriger toutes les SNe des données simulées ($\approx 15\%$ n'ont pas de BiasCor).

Pour étudier l'impact des modélisations sur l'état de la cosmologie actuelle, une approche serait de simuler un grand nombre de fois (≈ 100) des échantillons de la taille de l'échantillon de Pantheon (≈ 1000) et de combiner les résultats, permettant ainsi d'avoir des incertitudes statistiques réalistes.

Ces types et des variations ont été implémentées, mais la complexité des simulations avec **SNANA** nous ont amené à modifier les paramètres de simulation jusqu'au dernier moment, rendant impossible le fait d'effectivement réaliser ces types de simulations tout en restant à notre portée pour le futur.

I.2.2 Variation de paramètres

Avec l’ajout des données de ZTF, notre modèle d’évolution de l’étirement avec le redshift a été augmenté. Ces nouveaux paramètres pourraient être utilisés, notamment pour tenter de représenter plus efficacement l’échantillon ciblé LOWZ qui présente un pic de petits étirements autour de $x_1 \approx -1.50$. À cet effet, nous pourrions utiliser non pas de le redshift de l’échantillon mais directement la fraction attendue pour décrire l’étirement de la HOSTLIB utilisée pour simuler cet échantillon ; cette approche briserait en quelque sorte l’approche prospective de notre étude, mais apparaît comme nécessaire pour simuler des données elles-mêmes sélectionnées.

Dans toute cette thèse, nous avons utilisé l’équation de l’évolution de la fraction de jeunes étoiles $\delta(z)$ donnée dans le Chapitre ??, avec les résultats des paramètres K et ϕ de RIGAUD et al. (2020) ; ceux-ci pourraient être variés, notamment le paramètre K qui est obtenu pour fixer la fraction de jeunes étoiles à 50% à $z = 0,05$.

I.2.3 Traceurs environnementaux

Comme nous avons pu le voir, l’ajout du traceur de l’âge d’une SN permettrait d’augmenter la robustesse de notre étude et pourrait s’avérer être un outil probant des propriétés intrinsèques des SNe Ia. Nous pourrions étendre d’autant plus ces analyses en intégrant d’autres traceurs utilisés en cosmologie, comme la couleur locale.

En plus des effets environnementaux des SNe Ia dont nous avons pu discuter Chapitre ??, de récentes études (BROUT et SCOLNIC (2021)) proposent d’intégrer les effets de rougissement dus à la poussière des galaxies conjointement aux variations intrinsèques des couleurs des SNe Ia dans le modèle SALT2. Ceci a permis de mieux décrire les propriétés des SNe les plus rouges, et propose une approche pour décrire la marche de magnitude basée sur la masse causée par une différence sur le paramètre β effectif selon la masse des galaxies hôtes. POPOVIC et al. (2021) ont intégré cette approche à leurs simulations pour établir une approche prospective de détermination des distributions mères de poussière et de couleur, et trouvent une incertitude systématique due à ces effets sur la mesure de w de 0,005. Ces résultats sont prometteurs en vue d’améliorer la recherche sur les effets des propriétés des galaxies hôtes sur les échantillons de SNe Ia, et pourraient à terme amener à une modélisation continue de dépendance avec la masse des galaxies hôtes plutôt qu’une modélisation en marche de magnitude. L’inclusion de ces approches augmenterait alors également notre étude.

Figures

I.1 Accord entre les modèles N21+ZTF et HD+ZTF et l’histogramme des étirements de ZTF	2
I.2 Évolution de l’étirement moyen des SNe Ia en fonction du redshift issu de la prédiction de notre modèle de base selon l’échantillon utilisé . . .	4
I.3 ΔAIC entre le modèle de base et les autres modèles	5
I.4 Comparaison de la capacité des modèles N21 et N21+ZTF à représenter les données des sondages	7

Tableaux

I.1 Valeurs des paramètres du modèle d’étirement de base selon l’échantillon avec les données de ZTF	3
I.2 Comparaison de la capacité relative de chaque modèle à décrire les données par rapport au modèle de base avec les données de ZTF . . .	5
I.3 Capacité des modèles N21 et N21+ZTF à représenter les données . . .	6

Bibliographie

- 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](#), ↑ [Section I.1](#)
- BROUT D. et SCOLNIC D. 2021, « It’s Dust: Solving the Mysteries of the Intrinsic Scatter and Host-galaxy Dependence of Standardized Type Ia Supernova Brightnesses », [ApJ](#), **909**, 26 ↑ [Section I.2.3](#)
- GRAHAM M. J., KULKARNI S. R., BELLM E. C. et al. 2019, « The Zwicky Transient Facility: Science Objectives », [PASP](#), **131**, 078001 ↑ [Section I.1](#)
- POPOVIC B., BROUT D., KESSLER R. et SCOLNIC D. 2021, « The Pantheon+ Analysis: Forward-Modeling the Dust and Intrinsic Colour Distributions of Type Ia Supernovae, and Quantifying their Impact on Cosmological Inferences », [arXiv e-prints](#), [arXiv:2112.04456](#) ↑ [Section I.2.3](#)
- 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.2.2](#)