

efforts de calibration pour la cosmologie observationnelle ([FITZPATRICK 1999](#) ; [SCHLAFLY et FINKBEINER 2011](#) ; [POPOVIC et al. 2021](#)).

### I.1.3 Masse stellaire

La masse stellaire  $M_*$ , exprimée en unité de masses solaires ( $M_\odot$ )<sup>3</sup>, constitue une autre caractéristique des galaxies. N'étant pas une observable directe, elle se déduit par d'autres paramètres. [TAYLOR et al. \(2011\)](#) présentent une méthode de détermination de  $M_*$  relativement simple se basant sur la couleur des galaxies *via* les magnitudes ( $K$  corrigées)  $g$  et  $i$  des galaxies, telle que :

$$\log(M_*[M_\odot]) = 1,16 + 0,70(g - i) - 0,40M_i \quad (\text{I.1})$$

avec  $M_i$  la magnitude absolue de la galaxie dans la bande  $i$ . D'une manière plus générale, celle-ci est déterminée par un ajustement de distributions spectrales d'énergie<sup>4</sup> (en anglais, *spectral energy distributions*, SED) générées à partir de modèles d'évolution stellaire (prenant notamment en entrée une masse stellaire initiale et une paramétrisation de l'historique de formation stellaire) avec la SED de la galaxie étudiée ([WALCHER et al. 2011](#)). Ce paramètre se trouve être un indicateur très utilisé en cosmologie moderne, de par sa capacité à prédire d'autres caractéristiques des galaxies.

### I.1.4 Taux de formation stellaire

En dehors de la masse à l'instant  $t_0$  de l'observation, le taux de formation stellaire (en anglais *stellar formation rate*, SFR), exprimé en unité de masses solaires formées par année (c'est-à-dire  $M_\odot \text{ an}^{-1}$ ), se trouve être une caractéristique cruciale pour décrire les propriétés des étoiles d'une galaxie. Son estimation se base sur l'émission de raies  $H\alpha$ , l'un des indicateurs traditionnellement les plus utilisés pour mesurer le SFR ([KENNICUTT 1998](#)). Il repose sur le fait que les étoiles massives ( $\gtrsim 20 M_\odot$ ) génèrent des photons ultraviolets (donc à haute énergie) capables d'ioniser les gaz d'hydrogène de leur environnement ([CALZETTI 2013](#)) en grande quantité. Ces atomes excités vont ensuite se recombiner, produisant diverses raies d'émission dont certaines dans la série de BALMER, fournissant les raies  $H\alpha$  dont la longueur d'onde dans le vide est  $\lambda_{H\alpha} = 656,5 \text{ nm}$ . L'étude de cette raie permet l'estimation de la formation stellaire du fait que les étoiles massives ont une courte durée de vie, à l'échelle de millions d'années, et que leur capacité à générer de tels photons ionisants décroît très rapidement : le flux généré décroît de deux ordres de grandeurs en approximativement 10 Millions. La présence d'hydrogène ionisé est donc un indicateur direct de la présence de « jeunes » étoiles, c'est-à-dire de moins de 100 Millions, et du taux de formation stellaire *via* la correspondance donnée dans [CALZETTI \(2013\)](#) :

$$\text{SFR}(H\alpha) [M_\odot \text{ an}^{-1}] = 5,45 \times 10^{-42} L(H\alpha) [\text{erg s}^{-1}] \quad (\text{I.2})$$

avec  $L(H\alpha)$  la luminosité des raies d'émission, obtenue par un ajustement spectral.

3. nous avons typiquement  $10^8 M_\odot < M_* < 10^{12} M_\odot$

4. c'est-à-dire une mesure de flux lumineux en fonction de la longueur d'onde

### I.1.5 Taux de formation stellaire spécifique spectroscopique et âge

Il est possible de tracer la fraction de jeunes étoiles *via* l'utilisation du taux de formation stellaire *spécifique*, sSFR, tel que :

$$\text{sSFR} = \frac{\text{SFR}}{M_*} \quad (\text{I.3})$$

On l'appelle alors « local », et on le dénote LsSFR, quand ce ratio calculé dans un environnement projeté de 1 kpc autour de l'astre en question. Cette approche locale a pour but de déterminer plus précisément l'âge qu'avec des caractéristiques globales (morphologie, masse stellaire totale...).

Il est attendu que la formation stellaire soit plus élevée à haut redshift (au début de l'histoire de l'Univers) qu'à bas redshift, où les galaxies sont plus vieilles et plus massives. Ainsi, le sSFR est un ordre de magnitude plus élevé à  $z = 1,5$  qu'à  $z = 0$  (voir [MADAU et DICKINSON 2014](#), pour une étude complète). En pratique, les mesures de [TASCA et al. \(2015\)](#) trouvent une dépendance en redshift :

$$\text{sSFR} \propto (1 + z)^{2,8 \pm 0,2} \quad (\text{I.4})$$

Les travaux de [RIGAULT et al. \(2020\)](#) combinent alors la fraction de jeunes étoiles ( $\delta(z)$ ) et de vieilles étoiles ( $\psi(z)$ , telle que  $\delta(z) + \psi(z) = 1$ ) ainsi que l'équation I.4 pour déduire :

$$\text{LsSFR}(z) \triangleq \frac{\delta(z)}{\psi(z)} = K \times (1 + z)^\phi \quad (\text{I.5})$$

$$\text{et ainsi } \delta(z) = (K^{-1} \times (1 + z)^{-\phi} + 1)^{-1} \quad (\text{I.6})$$

$$\psi(z) = (K \times (1 + z)^{+\phi} + 1)^{-1} \quad (\text{I.7})$$

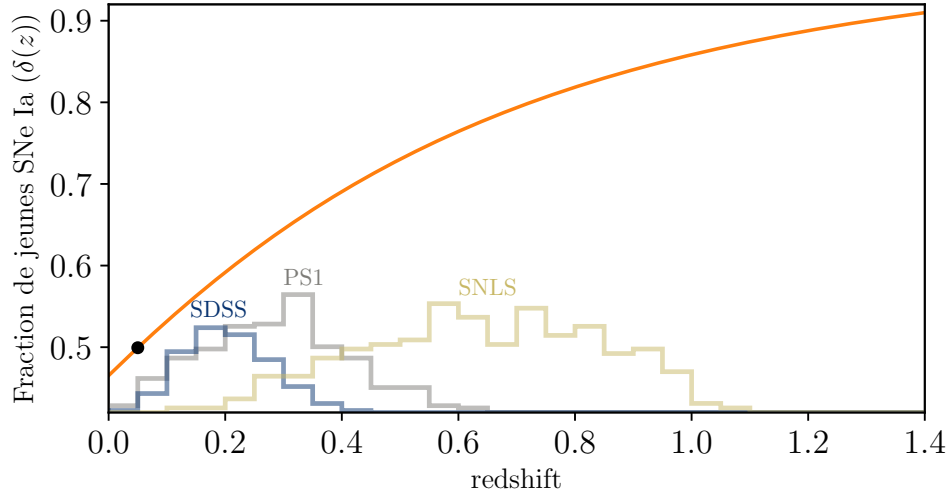
avec  $K = 0,87$  en fixant  $\delta(0,05) = \psi(0,05) = 0,5$  et  $\phi = 2,8$ . Nous donnons Figure I.3 une représentation graphique de l'évolution de la fraction de jeunes étoiles en fonction du redshift.

## I.2 Corrélations des SNe Ia à l'environnement

Ces indicateurs d'environnement peuvent être utilisés seuls ou conjointement pour tenter de corréler les SNe Ia à d'autres paramètres mesurables ou estimables. Par exemple, il a été démontré que l'étirement d'une SN Ia est corrélé à la morphologie et à la masse de la galaxie hôte (voir Figures I.4a et I.4b, respectivement).

De plus, [MANNUCCI et al. \(2005\)](#) ; [SCANNAPIECO et BILDSTEN \(2005\)](#) avancent l'existence de deux populations de SNe Ia, dont le taux d'apparition de l'une serait proportionnel à la masse stellaire globale et celui des secondes proportionnel au taux de formation stellaire. Cette dichotomie de taux de SNe Ia selon la masse d'une part et le SFR d'autre part a lancé la notion d'âge de SNe Ia, partant d'abord de deux types :

- **Les prompts** : elles sont associées à des étoiles relativement jeunes, entre 100 et 500 Millions d'années, de taux proportionnel au SFR ;



**FIGURE I.3** – Évolution de la fraction de jeunes étoiles en fonction du redshift. La fraction est fixée à 50% à  $z = 0,05$ , représentée par le point noir. Les histogrammes représentent l'évolution du nombre de SNe Ia relevées par différent sondage, montrant l'évolution de l'âge attendu des SNe à l'intérieur même des relevés.

- **Les tardives**, associées à des étoiles vieilles, de plus de 1 Gans, et de taux proportionnel à  $M_*$ .

Ainsi, le LsSFR serait également un traceur de l'âge des SNe Ia en plus de décrire l'évolution de la fraction de jeunes étoiles avec le redshift. Une étude complète de la capacité de ce traceur à déterminer l'âge d'une SNe Ia a été effectuée dans BRIDAY (2021) ; BRIDAY et al. (2022).

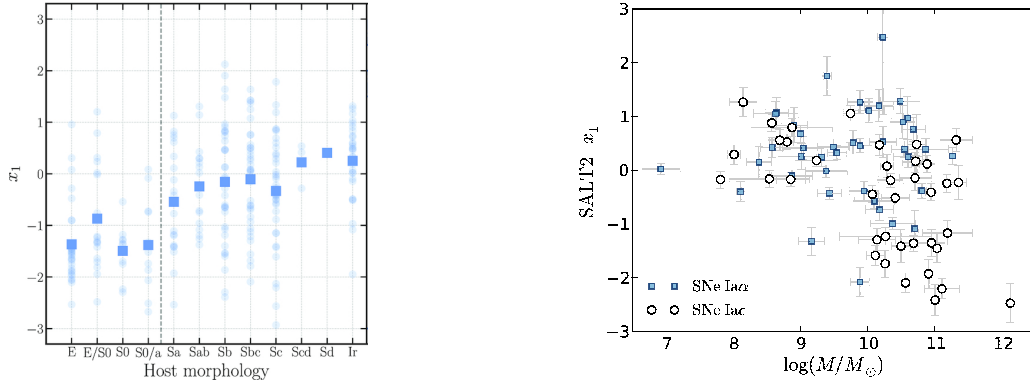
Cependant, afin d'améliorer la mesure des paramètres cosmologiques, il faut avoir une correction sur leur luminosité qui elle-même améliore la mesure de leurs distances *via* l'équation de TRIPP. À cet effet, de multiples « marches de magnitudes » ont été implémentées dans les études astrophysiques. Elles se basent sur une différence de luminosité entre deux populations de SNe Ia, discriminées par la valeur d'un paramètre. Nous présentons dans cette section les marches de magnitudes basées sur la masse (Section I.2.1) et sur l'âge (Section I.2.2) avant de motiver l'origine de notre thèse (Section I.2.4).

### I.2.1 Marche de magnitude basée sur la masse

La première implémentation d'une correction de magnitude avec l'environnement est celle basée sur la masse de la galaxie hôte. En effet, dès 2010 des études ont observé une dépendance de la magnitude standardisée des SNe Ia avec la masse de leurs galaxies hôtes (voir par exemple KELLY et al. 2010 ; BETOULE et al. 2014). Nous présentons Figure I.5 un récent graphique de cette dépendance.

Dans ces études, il a été observé que les galaxies les plus massives ( $M_* > 10^{10} M_\odot$ ) abritent des SNe Ia en moyenne plus lumineuses de  $\gamma = -0,050$  mag que celles ayant un hôte moins massif. Cette corrélation se traduit par l'ajout d'un décalage en magnitude de  $+0,025$  mag pour les premières, et de  $-0,025$  mag pour les secondes, tel que :

$$\mu = m_B - M + \alpha x_1 - \beta c \pm \gamma/2 \quad (\text{I.8})$$



(a) Corrélation entre l'étirement de 330 SNe Ia de l'échantillon Pantheon (SCOLNIC et al. 2018) et la morphologie de leurs galaxies hôtes. Figure de PRUZHINSKAYA et al. (2020).

(b) Corrélation entre l'étirement d'une SN et la masse de sa galaxie hôte. La forme en « L » indique que ces distributions ne sont pas aléatoires. Figure de RIGAULT et al. (2013).

**FIGURE I.4** – Corrélations entre l'étirement d'une SN Ia et la morphologie (à gauche) ou la masse de sa galaxie hôte (à droite)

L'origine de cette corrélation reste cependant peu motivée autrement qu'empiriquement. En effet, comme présenté au début de la Section I.1, les galaxies sont des objets larges, et leurs propriétés globales ne peuvent que partiellement décrire la physique de toutes les SNe Ia qui s'y trouveraient.

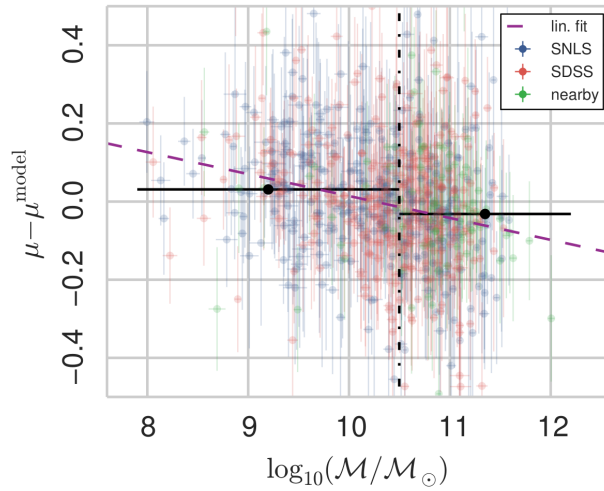
### I.2.2 Marche de magnitude basée sur l'âge

L'utilisation du LsSFR vise à réduire cette incertitude, en utilisant des propriétés environnementales locales plutôt que globales. À cet effet, RIGAULT et al. (2020) rapportent une marche de magnitude basée sur l'âge de  $\gamma = 0,13$  mag, dont nous présentons un graphique Figure I.6a.

Cette approche de deux populations apporte une dimension supplémentaire à la corrélation environnementale : l'évolution avec le redshift. En effet, étant donné que la fraction de jeunes étoiles évolue selon l'Équation I.6, la marche de magnitude moyenne varie avec le redshift, pouvant mener à des estimations plus précises basées sur l'utilisation de paramètres plus pertinents (car locaux). Nous notons notamment que RIGAULT et al. (2020) ont mesuré la marche de magnitude trouvée en utilisant la masse des galaxies hôtes de leur échantillons, et trouvent en effet une différence proche des autres études avec  $\gamma = 0,065$  mag comme le montre la Figure I.6b. Cette étude montre la différence d'efficacité d'un paramètre à discriminer deux populations et les conséquences que de telles différences causent sur la mesure d'un même paramètre. Cette question est l'objet principal de la thèse de BRIDAY (2021) qui a montré que le LsSFR se trouve être un meilleur traceur des propriétés des SNe Ia que les autres.

### I.2.3 Implications en cosmologie moderne

Cette correction en fonction de la masse est actuellement utilisée pour corriger les SNe Ia qui sont utilisées dans la détermination de  $H_0$ . En effet, la mesure directe de  $H_0$



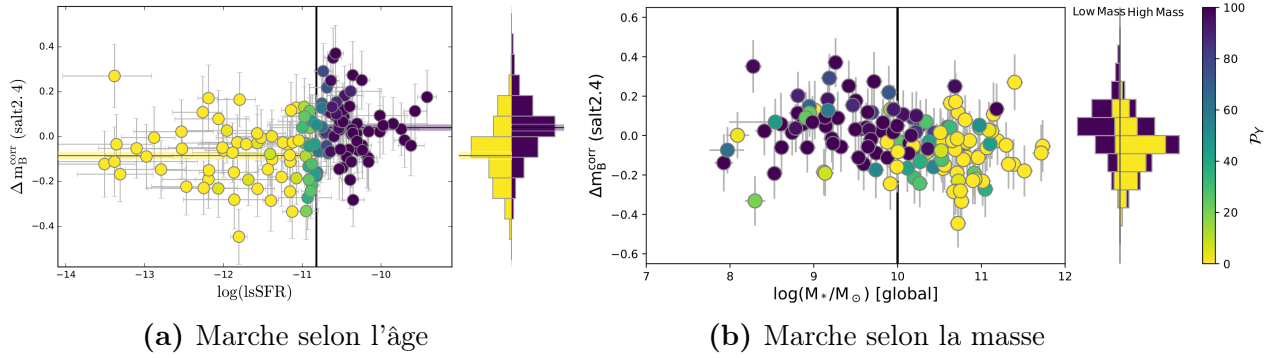
**FIGURE I.5** – Différences entre les magnitudes corrigées des SNe Ia et le modèle cosmologique de référence selon la masse de leurs galaxies hôtes. Nous observons que les SNe Ia pour lesquelles  $M_* < 10^{10} M_\odot$  sont en moyenne moins lumineuses de  $+0,050$  mag que celles de  $M_* > 10^{10} M_\odot$ . Figure de [ROMAN et al. \(2018\)](#).

se base sur la mesure de distances avec les SNe Ia, comme nous avons pu le voir dans le Chapitre ??, mais celle-ci doit être calibrée en premier lieu. Pour cela, l'équipe *Supernovae and  $H_0$  for the Equation of State of dark energy* (SH0ES, Supernovae et  $H_0$  pour l'équation d'état de l'énergie sombre [RIESS et al. 2021](#)) utilise des céphéides, de jeunes étoiles parmi les plus brillantes et dont la magnitude absolue varie périodiquement ; l'étude de cette loi magnitude-période en permet la calibration et donc l'ancrage d'une première distance.

SH0ES applique cette étude pour des galaxies à la fois hôtes de céphéides et de SNe Ia, calibrant ainsi la distance des SNe Ia en fonction de leur magnitude. Cependant, l'environnement de ces galaxies est particulier, et est corrigée par l'équipe en utilisant la standardisation en magnitude basée sur la masse ; ceci augmente la valeur de  $H_0$  de  $0,3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  par rapport à une absence de standardisation, pour une valeur finale de  $H_0 = [73,04 \pm 1,04] \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Ce résultat, pourtant d'une qualité d'étude irréfutable, est en désaccord à  $5\sigma$ <sup>5</sup> avec la mesure indirecte du programme *Planck*+ $\Lambda$ CDM ([PLANCK COLLABORATION et al. 2020](#)), tout aussi irréfutablement précis, donnant  $H_0 = [67,4 \pm 0,5] \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  ; cette tension est au cœur de nombreuses discussions sur l'origine des différences.

L'utilisation de la marche de magnitude basée sur l'âge permet de réduire cette incohérence étant donné que dans ces galaxies environ 95% des environnements sont jeunes ; ainsi, [RIGAULT et al. \(2015\)](#) proposent l'utilisation de cette corrélation âge-magnitude qui induirait sur la plus récente valeur une réduction de  $-1,94$  sur la mesure directe, amenant la valeur à  $H_0 = [71,10 \pm 1,04] \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  et réduisant la tension. Cet exemple permet de mesurer l'importance de la considération de l'environnement des SNe Ia dans leur correcte utilisation cosmologique.

5. c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une chance sur 1 million que ces deux valeurs soient cohérentes et que les mesures différentes soient le résultat d'une incertitude de calcul



**FIGURE I.6** – Marches de magnitudes selon l'âge (à gauche) ou la masse (à droite). Figures de [RIGAULT et al. \(2020\)](#). Pour chacune des figures, nous avons en *encadré* les différences entre les magnitudes corrigées des SNe Ia et le modèle cosmologique de référence en fonction du paramètre concerné ; et à *côté* les histogrammes pondérés par l'âge ou la masse. Les lignes horizontales représentent les moyennes des deux populations (et leurs erreurs). Les couleurs correspondent à la probabilité qu'une SN Ia soit jeune, voir barre de couleur. Nous observons que les SNe Ia vieilles sont plus lumineuses de  $-0,130$  mag que les jeunes, alors que les SNe dans des environnements massifs ne le sont que de  $-0,065$  mag.

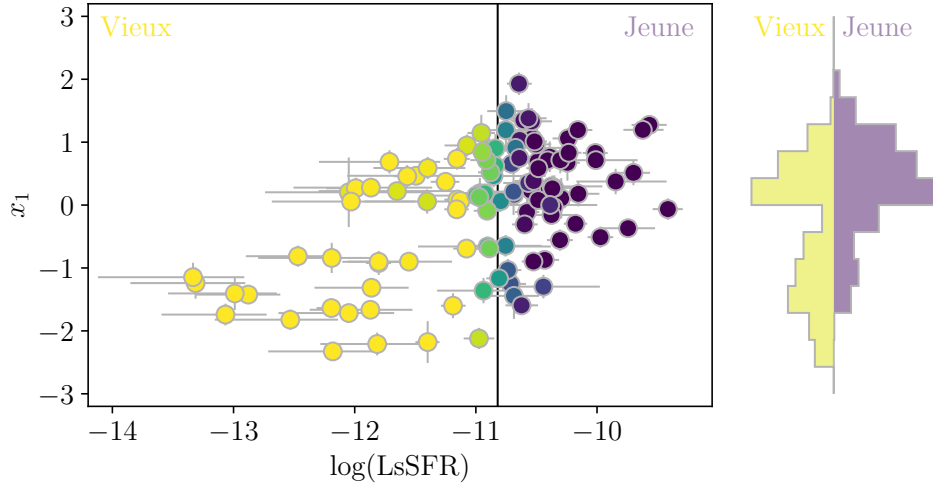
#### I.2.4 Ancrage de notre thèse : étude de l'étirement en fonction de l'âge

La mesure de caractéristiques des SNe Ia en fonction de leur âge a également amené [RIGAULT et al. \(2020\)](#) à étudier la distribution des étirements de dans leur échantillon. Cette étude révèle une dépendance de l'étirement en fonction de l'âge des SNe Ia, comme l'indique la Figure I.7, reproduite pour cette thèse.

Cette étude permet d'augmenter l'étude du LsSFR comme traceur correct des propriétés intrinsèques des SNe Ia en mettant en lumière la possible existence de distributions sous-jacentes d'étirement différentes selon l'âge d'une SN Ia, et donc appuyer l'existence de deux populations de SNe Ia qui seraient le mieux discriminées par l'âge. En effet, l'histogramme de la Figure I.7 laisse à penser que les SNe Ia vieilles sont distribuées différemment des jeunes, présentant un pic de probabilité fort à  $x_1 \approx -1$ .

Comme nous l'avons vu au début de la Section I.2, une telle corrélation est intéressante mais n'impactera pas directement la détermination des distances des SNe Ia, n'agissant pas directement sur la magnitude. Cependant, comme pour la marche de magnitude basée sur l'âge, la fraction de jeunes étoiles varie avec le redshift selon l'Équation I.6, et avec elle l'importance d'une distribution d'étirement par rapport à l'autre. Nous pourrions ainsi déterminer l'évolution de la distribution de l'étirement des SNe Ia en fonction du redshift. Ce phénomène n'est, à notre connaissance, pas étudié sous cette forme à ce jour mais joue un pourtant rôle important dans les simulations numériques de SNe Ia, celles-ci utilisant des distributions de probabilité desquelles tirer des valeurs d'étirement pour reproduire ce que les sondages observent.

C'est dans ce contexte que s'ancre notre thèse. Afin de réaliser cette étude, nous allons présenter les sondages dont nous allons utiliser les données (Chapitre ??) afin de constituer un échantillon correspondant à nos restrictions (Chapitre ??) ; celles-ci seront utilisées pour déterminer la possible évolution de l'étirement avec le redshift (Chapitre ??). Le modèle qui en découle sera injecté dans un programme de simulation (Chapitre ??)



**FIGURE I.7** – *Principal* : étirement de courbe de lumière ( $x_1$ ) issu d’un ajustement par SALT2.4 en fonction du LsSFR pour certaines SNe de [RIGAULT et al. \(2020\)](#), figure reproduite. La couleur correspond à la probabilité  $p_y$  que la SN Ia soit jeune, voir Figure I.6. À droite : histogramme pondéré par  $p_y$  des étirements des SNe. Les contributions de la population jeune et âgée sont indiquées en violet et en jaune, respectivement.

qui nous permettra de sonder le biais attendu sur la valeur de  $w$  si cette dépendance environnementale est incorrectement prise en compte dans les études sur les paramètres cosmologiques (Chapitre ??).

## Figures

---

I.1	Classification morphologique des galaxies . . . . .	2
I.2	Exemples de morphologies de galaxies . . . . .	3
I.3	Évolution de la fraction de jeunes étoiles en fonction du redshift . . . .	6
I.4	Corrélations entre l'étirement d'une SN Ia et la morphologie ou la masse de sa galaxie hôte . . . . .	7
I.5	Marche de magnitude basée sur la masse . . . . .	8
I.6	Marches de magnitudes selon l'âge et la masse . . . . .	9
I.7	Dispersion de l'étirement en fonction du LsSFR . . . . .	10

---





# Bibliographie

- BETOULE M., KESSLER R., GUY J. et al. 2014, « Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples », [A&A](#), **568**, [A22](#) ↑ [Section I.2.1](#)
- BRIDAY M. 2021, « Étude de l’impact de l’environnement galactique sur la standardisation des Supernovae de Type Ia », Thèse, Université Claude Bernard – Lyon I, [HAL thèses](#) ↑ [Section I.2](#), ↑ [Section I.2.2](#)
- BRIDAY M., RIGAULT M., GRAZIANI R. et al. 2022, « Accuracy of environmental tracers and consequences for determining the Type Ia supernova magnitude step », [A&A](#), **657**, [A22](#) ↑ [Section I.2](#)
- CALZETTI D. 2013, « Star Formation Rate Indicators », dans *Secular Evolution of Galaxies*, ed. J. Falcón-Barroso & J. H. Knapen, [419](#) ↑ [Section I.1.4](#)
- FITZPATRICK E. L. 1999, « Correcting for the Effects of Interstellar Extinction », [PASP](#), **111**, [63](#) ↑ [Section I.1.2](#)
- HUBBLE E. P. 1926, « Extragalactic nebulae. », [ApJ](#), **64**, [321](#) ↑ [Section I.1.1](#)
- HUBBLE E. P. 1936, « Realm of the Nebulae », *Realm of the Nebulae* ↑ [Section I.1.1](#), ↑ [Section I.1](#)
- KELLY P. L., HICKEN M., BURKE D. L., MANDEL K. S. et KIRSHNER R. P. 2010, « Hubble Residuals of Nearby Type Ia Supernovae are Correlated with Host Galaxy Masses », [ApJ](#), **715**, [743](#) ↑ [Section I.2.1](#)
- KENNICUTT R. 1998, « Emission-Line Diagnostics of Galaxy Evolution with NGST », dans ESA Special Publication, Vol. 429, *LIA Colloq. 34: The Next Generation Space Telescope: Science Drivers and Technological Challenges*, ed. B. Kaldeich-Schürmann, [81](#) ↑ [Section I.1.4](#)
- MADAU P. et DICKINSON M. 2014, « Cosmic Star-Formation History », [ARA&A](#), **52**, [415](#) ↑ [Section I.1.5](#)
- MANNUCCI F., DELLA VALLE M., PANAGIA N. et al. 2005, « The supernova rate per unit mass », [A&A](#), **433**, [807](#) ↑ [Section I.2](#)
- PLANCK COLLABORATION, AGHANIM N., AKRAMI Y. et al. 2020, « Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters », [A&A](#), **641**, [A6](#) ↑ [Section I.2.3](#)
- 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.1.2](#)

- PRUZHINSKAYA M. V., NOVINSKAYA A. K., PAUNA N. et ROSNET P. 2020, « The dependence of Type Ia Supernovae SALT2 light-curve parameters on host galaxy morphology », [MNRAS](#), 499, 5121 ↑ [Section I.4a](#)
- RIESS A. G., YUAN W., MACRI L. M. et al. 2021, « A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team », [arXiv e-prints](#), [arXiv:2112.04510](#) ↑ [Section I.2.3](#)
- RIGAULT M., ALDERING G., KOWALSKI M. et al. 2015, « Confirmation of a Star Formation Bias in Type Ia Supernova Distances and its Effect on the Measurement of the Hubble Constant », [ApJ](#), 802, 20 ↑ [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.1.5](#), ↑ [Section I.2.2](#), ↑ [Section I.6](#), ↑ [Section I.2.4](#), ↑ [Section I.7](#)
- RIGAULT M., COPIN Y., ALDERING G. et al. 2013, « Evidence of environmental dependencies of Type Ia supernovae from the Nearby Supernova Factory indicated by local  $H\alpha$  », [A&A](#), 560, A66 ↑ [Section I.4b](#)
- ROMAN M., HARDIN D., BETOULE M. et al. 2018, « Dependence of Type Ia supernova luminosities on their local environment », [A&A](#), 615, A68 ↑ [Section I.5](#)
- SCANNAPIECO E. et BILDSTEN L. 2005, « The Type Ia Supernova Rate », [ApJ](#), 629, L85 ↑ [Section I.2](#)
- SCHLAFLY E. F. et FINKBEINER D. P. 2011, « Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD », [ApJ](#), 737, 103 ↑ [Section I.1.2](#)
- 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.4a](#)
- TASCA L. A. M., LE FÈVRE O., HATHI N. P. et al. 2015, « The evolving star formation rate:  $M_*$  relation and sSFR since  $z \simeq 5$  from the VUDS spectroscopic survey », [A&A](#), 581, A54 ↑ [Section I.1.5](#)
- TAYLOR E. N., HOPKINS A. M., BALDRY I. K. et al. 2011, « Galaxy And Mass Assembly (GAMA): stellar mass estimates », [MNRAS](#), 418, 1587 ↑ [Section I.1.3](#)
- WALCHER J., GROVES B., BUDAVÁRI T. et DALE D. 2011, « Fitting the integrated spectral energy distributions of galaxies », [Ap&SS](#), 331, 1 ↑ [Section I.1.3](#)