

Variabilités environnementales des SNe Ia

« Citation »

AUTAIRE, *Livre*

Dans le chapitre précédent, nous avons vu comment la physique des SNe Ia permettait de les utiliser comme des indicateurs de distance suffisamment précis pour mesurer la quantité d'énergie noire de l'Univers (*via* le paramètre w), amenant à la découverte de son expansion accélérée. Les SNe Ia permettent également de mesurer le taux d'expansion actuel, nommé H_0 , en se concentrant sur la partie de bas redshift du diagramme de HUBBLE.

Avec l'augmentation rapide du nombre de SNe Ia utilisables pour la cosmologie, la mesure des paramètres cosmologiques (H_0 ou w par exemple) commence à ne plus être limitée par l'incertitude statistique mais par l'incertitude systématique, c'est-à-dire par notre connaissance de leur physique intrinsèque comme celle ayant permis leur standardisation. De nombreux efforts sont déployés pour étudier la manière dont nous pouvons continuer à corriger les distances des SNe Ia avec d'autres paramètres.

Dans ce chapitre, nous présentons différents paramètres d'environnements galactiques dans lesquels nous pouvons trouver des SNe Ia (Section I.1) avant d'étudier la corrélation de leurs propriétés avec les environnements les plus intéressants (Section I.2). De cette Section découle notre travail de thèse.

Sommaire

I.1 Présentation d'environnements galactiques	2
I.1.1 Morphologie	2
I.1.2 Couleur	3
I.1.3 Masse stellaire	4
I.1.4 Taux de formation stellaire	4
I.1.5 Taux de formation stellaire spécifique spectroscopique et âge	5
I.2 Corrélations des SNe Ia à l'environnement	5
I.2.1 Marche de magnitude basée sur la masse	6
I.2.2 Marche de magnitude basée sur l'âge	7
I.2.3 Implications en cosmologie moderne	7
I.2.4 Ancre de notre thèse : étude de l'étirement en fonction de l'âge	9

I.1 Présentation d'environnements galactiques

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les caractéristiques des SNe Ia en tant qu'objets individuels ; cependant, elles font la plupart du temps partie d'un système bien plus large, les galaxies. Leur étude constitue un pan entier de l'astrophysique et de la cosmologie, et nous n'avons pas prétention à donner ici une zoologie complète de ce que sont les galaxies. Pour suivre le déroulé de cette thèse, nous nous contenterons de les décrire comme un ensemble d'astres et de poussières en interaction gravitationnelle, pouvant comporter de 10^8 à 10^{14} étoiles et formant un tout dont le diamètre va de 1000 à 10 000 pc.

Comme pour les SNe d'une manière générale (Ia, Ib...), il existe différents types de galaxies et différentes caractéristiques décrivant des types d'environnements, donnant toute une variété de formes, de couleurs et de fonctionnements physiques. Nous présentons dans cette section quelques-unes de ces caractéristiques galactiques.

I.1.1 Morphologie

Au-delà de leur luminosité (qui est inhérente au fait d'être observé), l'aspect visuel des galaxies est le premier facteur utilisé pour les classifier. C'est HUBBLE (1926) qui commence à les décrire en une classification qui donnera plus tard (HUBBLE 1936) le graphique présenté Figure I.1, sobrement appelé « séquence de Hubble », depuis revisité et retravaillé.

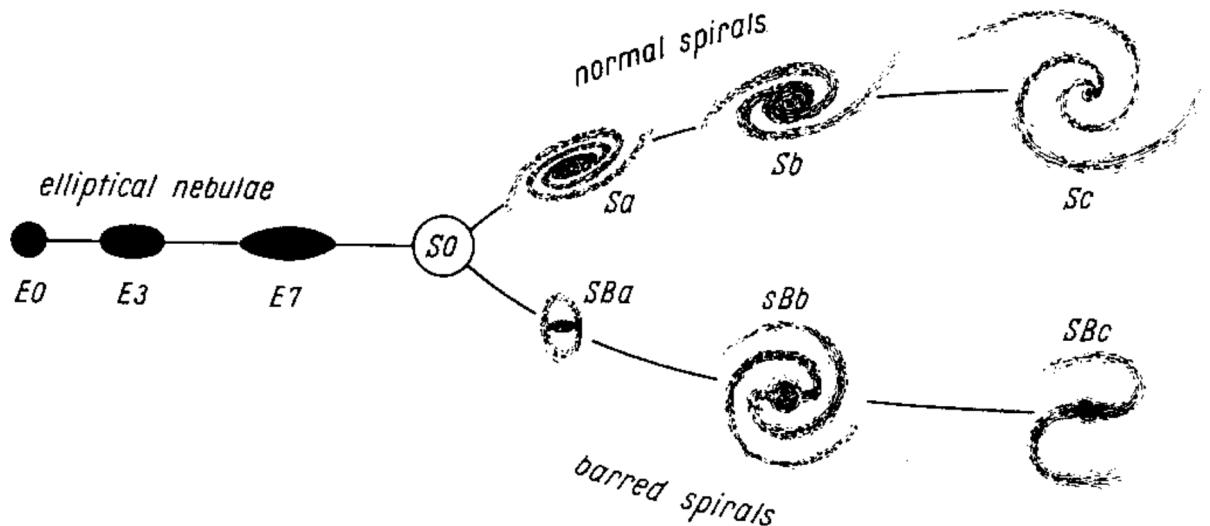


FIGURE I.1 – Classification morphologique des galaxies d'après HUBBLE (1936). De gauche à droite : galaxies elliptiques (E0-7), lenticulaires (S0) et spirales, barrées *en bas* (SBA-c) et non-barrées *en haut* (Sa-c).

Cette étude permet de rapporter trois grandes catégories de galaxies, illustrées Figure I.2 par des images prises par le télescope spatial Hubble¹ :

- **Les elliptiques**, nommées par leur géométrie apparente, donnant lieu à des astres de luminosité continue² et diffuse sur leur surface. La classification va de E0 à E7

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

2. donc sans sous-structure ou trou, mais cependant pas constante

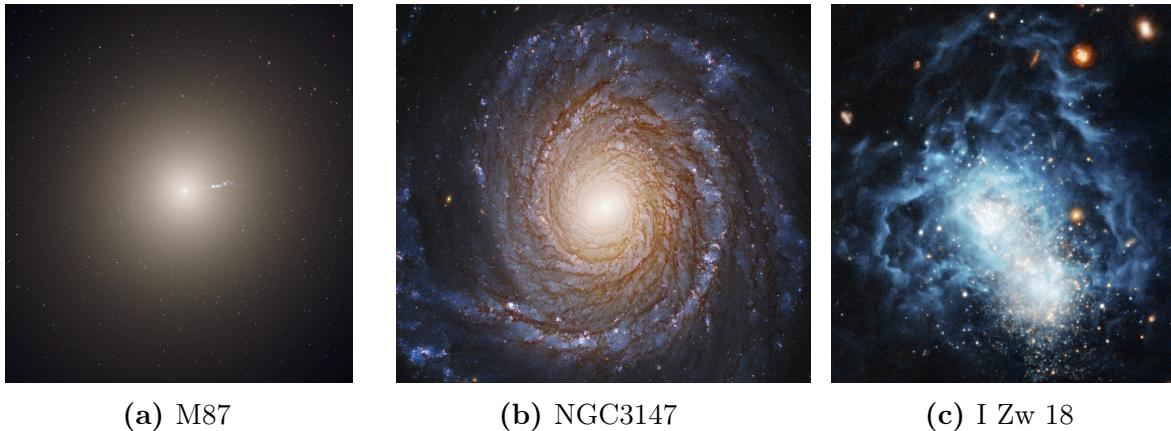


FIGURE I.2 – Exemples de morphologies de galaxies. *De gauche à droite* : elliptique (M87), spirale (NGC3147) et irrégulière (I ZWICKY 18). Images prises avec le télescope spatial HUBBLE¹, tirées du site hubblesite.org.

selon leur allongement, de sphérique à plate, respectivement ;

- **Les spirales**, présentant un bulbe central concentré en étoiles autour duquel tourne un disque s'arrangeant en bras spiralés. Elles sont distinguées selon la présence ou non-présence d'une barre (classifiées SB et S respectivement) semblant traverser le bulbe et duquel partent les bras. Elles se voient également sous-classifiées « a », « b » ou « c » selon le rapport des surfaces entre le bulbe et le disque, de bulbe proéminent à bulbe peu marqué, respectivement ;
- **Les particulières**, regroupant toutes les autres morphologies ni tout à fait elliptiques ni tout à fait spirales ; par exemple les galaxies lenticulaires (S0 sur la Figure I.1), à mi-chemin entre les deux, les irrégulières (inclassables ou en interaction avec d'autres galaxies les déformant), etc.

Ce paramètre n'apparaît cependant pas comme un indicateur précis des propriétés intrinsèques des SNe Ia, comme nous le verrons par la suite.

I.1.2 Couleur

Comme pour les SNe Ia (voir Section ??), nous pouvons caractériser la couleur d'un environnement par une différence de magnitude entre deux bandes photométriques. Cependant, ce paramètre est sujet à de nombreuses contaminations extérieures : dans un premier lieu, de la source à l'observation, le milieu interstellaire présente un effet de rougissement qui peut être non-négligeable selon la direction ; ensuite, la Voie Lactée peut ajouter une extinction non-homogène selon les longueurs d'ondes ; finalement, l'atmosphère a elle aussi un effet de rougissement selon son épaisseur et les conditions météorologiques lors de la (ou des) mesures. En plus de cela, à cause de l'expansion de l'Univers, les longueurs d'ondes subissent un décalage vers le rouge. Les « corrections K » consistent à transposer les mesures pour les placer dans un référentiel au repos, à $z = 0$, ce qui permet de les corriger de cet effet et de comparer les couleurs entre elles.

La multiplicité de ces possibles phénomènes parasites rend compliquées les études utilisant la couleur comme mesure de l'environnement, mais font partie intégrante des

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)³, 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'énergie⁴ (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 Mans. La présence d'hydrogène ionisé est donc un indicateur direct de la présence de « jeunes » étoiles, c'est-à-dire de moins de 100 Mans, 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 un 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 corrélérer 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 promptes** : elles sont associées à des étoiles relativement jeunes, entre 100 et 500 Mans, de taux proportionnel au SFR ;

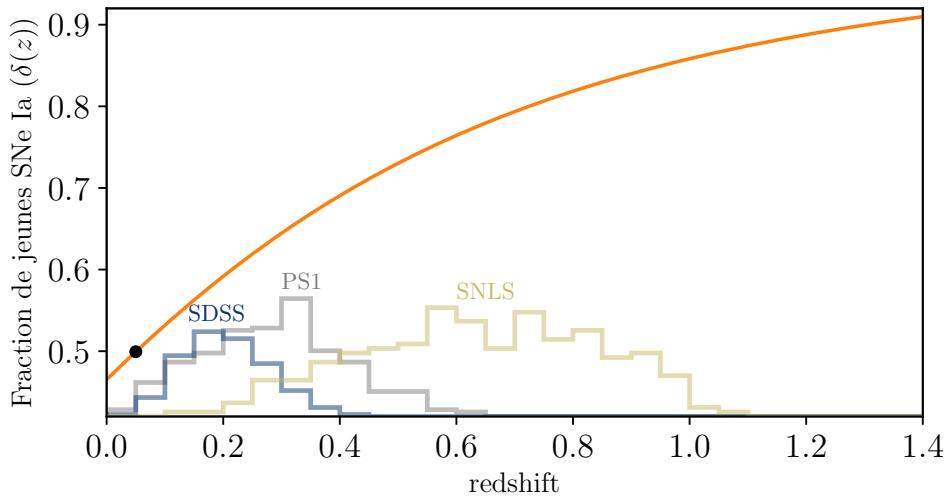


FIGURE I.3 – Évolution de la fraction de jeunes étoiles en fonction du redshift. La fraction est fixée à 50% à $z = 0,05$, représentée par le point noir. Les histogrammes représentent l'évolution du nombre de SNe Ia relevées par différents sondages, montrant l'évolution de l'âge attendu des SNe à l'intérieur 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. \(2022\)](#).

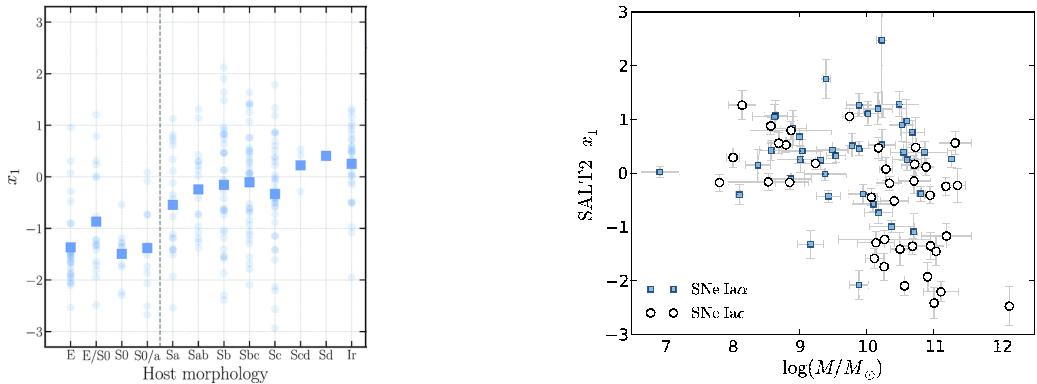
Cependant, afin d'améliorer la mesure des paramètres cosmologiques, il faut avoir une correction sur leur luminosité qui elle-même améliore la mesure de leurs distances *via* l'équation de TRIPP. À cet effet, de multiples « marches de magnitudes » ont été implémentées dans les études astrophysiques. 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 (SCOLNICK 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

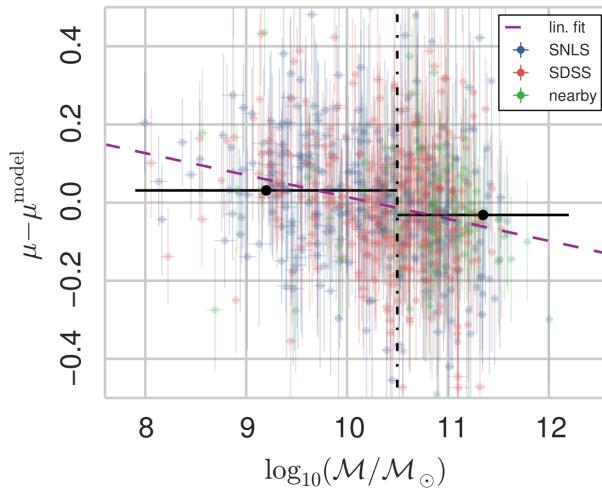


FIGURE I.5 – Différences entre les magnitudes corrigées des SNe Ia et le modèle cosmologique de référence selon la masse de leurs galaxies hôtes. Nous observons que les SNe Ia pour lesquelles $M_* < 10^{10} M_\odot$ sont en moyenne moins lumineuses de +0,050 mag que celles de $M_* > 10^{10} M_\odot$. 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 5σ ⁵ avec la mesure indirecte du programme *Planck*+ Λ 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

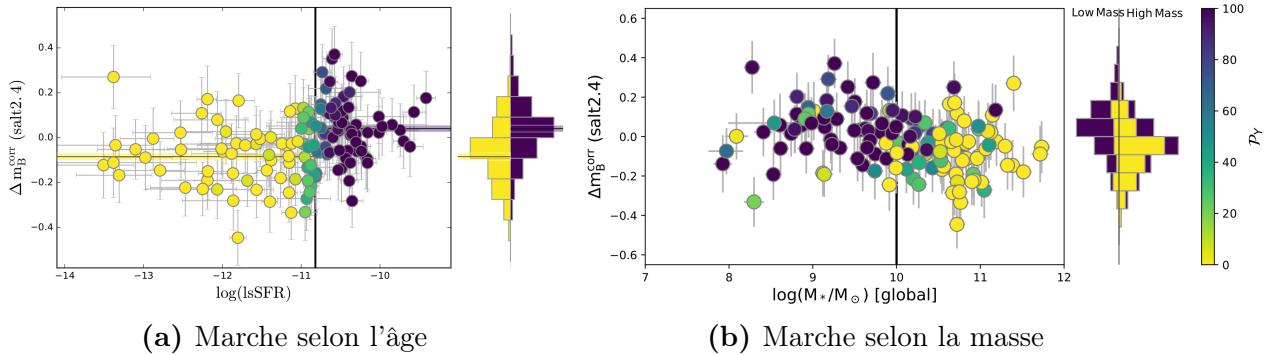


FIGURE I.6 – Marches de magnitudes selon l’âge (à gauche) ou la masse (à droite). Figures de RIGAULT et al. (2020). Pour chacune des figures, nous avons en encadré les différences entre les magnitudes corrigées des SNe Ia et le modèle cosmologique de référence en fonction du paramètre concerné ; et à 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 Anchage 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 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 pourtant un 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 ??) ; celui-ci sera utilisé 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 ??)

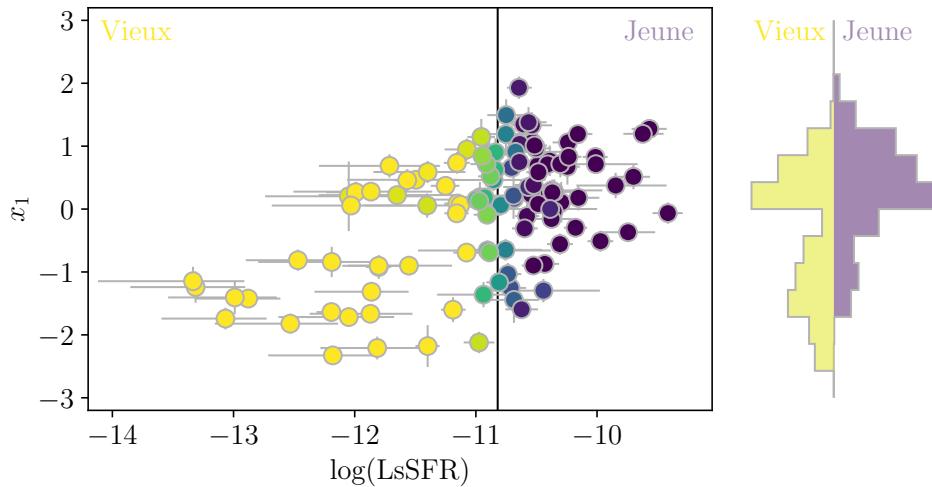


FIGURE I.7 – Principal : étirement de courbe de lumière (x_1) issu d'un ajustement par SALT2.4 en fonction du LsSFR pour certaines SNe de RIGAULT et al. (2020), figure reproduite. La couleur correspond à la probabilité p_y que la SN Ia soit jeune, voir Figure I.6. À droite : histogramme pondéré par p_y 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 SCOLNIE 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 α », *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 $_{\star}$ relation and sSFR since z ≈ 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