

Supernovae de type Ia

« Il faut porter en soi un chaos pour pouvoir mettre
au monde une étoile dansante. »

NIETZSCHE, *Ainsi parlait Zarathoustra*

Il existe toute une zoologie d’astres dans l’Univers, entre les planètes, les étoiles, les galaxies. . . Mais ceux-ci étaient pendant longtemps considérés comme immuables. C’est ainsi qu’en observant une nouvelle « étoile » dans le ciel en 1572, l’astronome Tycho BRAHÉ la nomma *nova*. Ça n’est qu’un peu avant le milieu de XX^e siècle que le terme « supernova » fut employé pour la première fois par **BAADE et ZWICKY (1934)**, ayant déterminé que ces objets pouvaient émettre plus de lumière que leur galaxie hôte sur une courte période de temps.

Au sein des événements caractérisés comme supernova, il existe des sous-catégories, dont les SNe Ia font partie. Nous détaillons dans ce chapitre ce qui les caractérise (Section [I.1](#)), quelles sont leurs propriétés physique d’intérêt (Section [I.2](#)) et comment les utiliser comme chandelles standardisées (Section [I.3](#)).

Sommaire

I.1 Fin de vie des étoiles	2
I.1.1 Classification	2
I.1.2 Physique de l’explosion des SNe Ia	3
I.2 Propriétés	4
I.2.1 Courbe de lumière	4
I.2.2 Spectroscopie	4
I.2.3 Modèle SALT2.4	5
I.3 Standardisation	7
I.3.1 Corrélations	7
I.3.2 SNe Ia aujourd’hui	8

I.1 Fin de vie des étoiles

Si l'existence-même des étoiles est remarquable, la fin de vie de ces réacteurs nucléaires en puissance l'est au moins tout autant. Nous nous attachons dans cette section à décrire une fin de vie particulière de ces astres, les supernovae, et plus particulièrement la sous-catégorie de celles dites de type « Ia »¹.

I.1.1 Classification

Les supernovae sont le résultat de l'explosion spectaculaire d'une étoile. À cet effet, ce sont des phénomènes transitoires, c'est-à-dire dont la durée de vie est courte même à l'échelle humaine : leur luminosité augmente drastiquement et diminue jusqu'à revenir à un état pré-explosion sur une durée typique de quelques semaines. Une première classification par **MINKOWSKI (1941)** a permis de distinguer les types I et les types II selon leur composition chimique : les premières ne possèdent pas de raie d'hydrogène dans leur spectre², les secondes en ont une. Plus tard, **ELIAS et al. (1985)** avec l'amélioration des mesures permet d'affiner cette classification en distinguant des sous-types Ia, Ib et Ic : les Ia présentent des raies de silicium dans leur spectre, les deux autres non et sont séparées selon la force de leurs raies d'hélium. Cette classification est résumée Figure I.1.

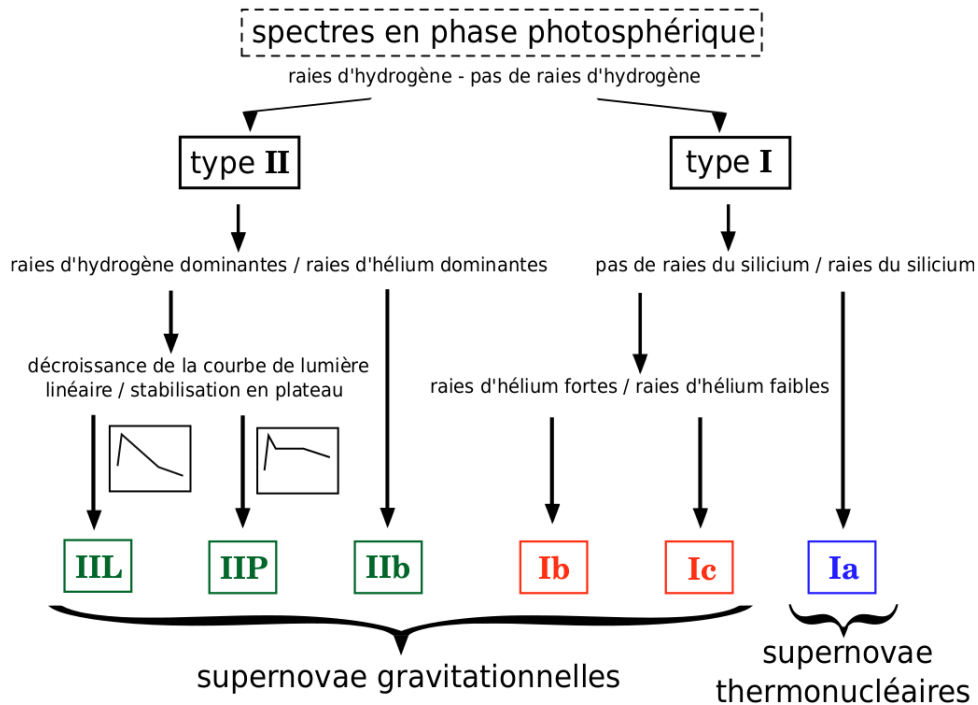


FIGURE I.1 – Classification des différents types de SNe selon leurs caractéristiques spectrales. Graphique tiré de la thèse de **FOURMANOIT (2010)**.

Cependant, une différence de taille sépare les SNe Ia de toutes les autres : l'origine et la physique de leur explosion. **FILIPPENKO (1988)** dans un premier temps et **HEGER et al.**

1. se lit [ɛɑ]

2. mesure du flux lumineux selon la longueur d'onde (c'est-à-dire la « couleur ») : les éléments chimiques rayonnent ou absorbent des couleurs particulières et caractéristiques

(2003) ensuite déterminent que les SNe non-Ia résultent de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, de masse $M^3 \geq 8 M_\odot^4$: la fin des réaction nucléaires exerçant une pression de radiation au cœur de celles-ci ne compense plus l'attraction gravitationnel sur les couches externes, qui s'effondrent au centre avant d'en rebondir en supernova. Elles sont appelées « supernovae gravitationnelles » pour cette raison. Ceci n'est pas possible pour des étoiles de masses inférieures à $8 M_\odot$, qui vont simplement perdre leurs couches extérieurs pour ne conserver que leurs noyaux nucléairement inactifs⁵, formant des naines blanches. Leur masse chute alors à $\approx 1 M_\odot$, pour un volume typiquement égal à celui de la Terre⁶ et une température entre $[8000-14\,000]^\circ\text{C}$. ALTHAUS et al. (2010) estiment qu'approximativement 97% des étoiles connaîtront ce sort (notamment le Soleil, étant donné sa masse). C'est à partir de ce type d'astre que les SNe Ia sont générées, par un mécanisme que nous classifions de « thermonucléaire ». Nous allons maintenant parler de la physique de leur explosion.

I.1.2 Physique de l'explosion des SNe Ia

Une limitation intrinsèque à la cosmologie et à l'astrophysique est l'absence de reproduction des expériences en laboratoire, pour des raisons évidentes. Ceci implique malheureusement que certains phénomènes sont compliqués à décrire avec certitude ; c'est le cas avec le mécanisme d'explosion des SNe Ia. Une étude théorique par CHANDRASEKHAR (1931) sur la pression de dégénérescence impose une masse critique à une naine blanche (sans rotation), appelée « limite de CHANDRASEKHAR » et placée à $\approx 1,44 M_\odot$. Au-delà de celle-ci, l'étoile devient instable et ré-initie des réactions thermonucléaires, amorçant la fusion du carbone et de l'oxygène sans régulation, amenant à son explosion la désintégrant en totalité.

Si cette partie de la physique de l'explosion est bien admise, la manière dont une naine blanche augmente sa masse pour dépasser cette limite est encore débattue. Plusieurs scénarios sont proposés, mais les deux principalement acceptés sont :

Le scénario simplement dégénéré (WHELAN et IBEN 1973) dans lequel la naine blanche est dans un système binaire avec une étoile compagnon qui va perdre de sa matière externe au profit de la première ;

Le scénario doublement dégénéré (WEBBINK 1984) dans lequel la naine blanche est dans un système binaire avec une autre naine blanche. Leurs noyaux durs ne permettant pas de perdre de masse gazeuse, les deux étoiles sont dans une orbite de plus en plus resserrée en perdant de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles⁷ et finissent par fusionner si l'une ne se disloque pas sous l'effet de marée de l'autre.

3. selon le contexte, M peut être soit la magnitude absolue comme présenté dans le chapitre précédent, soit la masse d'un corps comme ici

4. il est usuel d'exprimer les masses des corps par rapport à celle du Soleil : $M_\odot = [1,988\,47 \pm 0,000\,07] \times 10^{30} \text{ kg}$

5. leur équilibre gravitationnel est alors assuré par la pression de dégénérescence des électrons

6. si la Terre avait la masse du Soleil, la gravité serait $\approx 331\,658$ fois plus élevée : ce sont donc des corps très denses

7. la propagation d'une déformation de la métrique même de l'espace-temps, voir Chapitre ??

Malheureusement, aucun de ces scénarios n'a pu être privilégié puisqu'ils sont très difficiles d'observation et que les simulations ne sont pas en mesure de reproduire les observations (RÖPKE et al. 2012). Ainsi, des modèles empiriques de l'évolution du spectre des SNe Ia sont utilisés pour les caractériser⁸ (voir Section I.2.3). Il reste qu'en pratique nous observons une remarquable homogénéité du pic de luminosité de ces explosions, respectant la masse critique impliquant une quantité d'énergie définie disponible pour l'explosion. C'est de cette manière qu'elles sont utilisées en tant que chandelles standard, comme expliqué Section ??.

I.2 Propriétés

Si leur nature reste imprécise, nous avons observé de nombreuses SNe Ia. Ces observations reposent sur leur analyse photométrique (Section I.2.1) ainsi que sur leurs caractéristiques spectroscopiques (Section I.2.2).

I.2.1 Courbe de lumière

Comme introduit Section I.1.1, les SNe Ia sont des phénomènes transitoires. Ainsi, leur observation par une caméra relève une augmentation de leur luminosité jusqu'à un pic avant de redescendre : une telle courbe s'appelle « courbe de lumière ». Nous en donnons un exemple Figure I.2⁹.

Ces observations s'effectuent non seulement dans le temps mais également pour différentes couleurs¹⁰. La diminution de magnitude est typiquement de $[3-6]$ mag sur une quinzaine de jours, que la SN Ia regagne ensuite sur une période de plusieurs dizaines de jours ≈ 50 jours. À partir de cette courbe se définissent plusieurs caractéristiques :

t_0 : date du maximum d'émission dans la bande bleue ;

x_0 : amplitude dans la bande bleue (nous définissons $m_B = -2,5 \log(x_0)$) ;

x_1 : étirement typique de la courbe de lumière, caractérisant la vitesse de l'explosion (petit $x_1 \Rightarrow$ explosion rapide) ;

c : couleur de la SN, définie par la différence de magnitude entre les bandes bleues et vertes (nous écrivons $c = B - V$).

I.2.2 Spectroscopie

En plus d'étudier la magnitude d'une SN dans le temps, nous pouvons étudier sa distribution énergétique en fonction de la longueur d'onde dans le temps, ce que nous appelons une distribution spectrale ou série spectro-temporelle. Nous présentons Figure I.3 la série de la SN Ia SN2011fe.

8. nous les appelons « distributions spectrales en énergie » ou *Spectral Energy Distribution* (SED) en anglais

9. nous remarquerons que l'échelle verticale est inversée étant donné que les magnitudes vont dans le sens opposé à la luminosité

10. moyenne du flux sur une plage de longueurs d'ondes, que nous appelons « bandes photométriques »

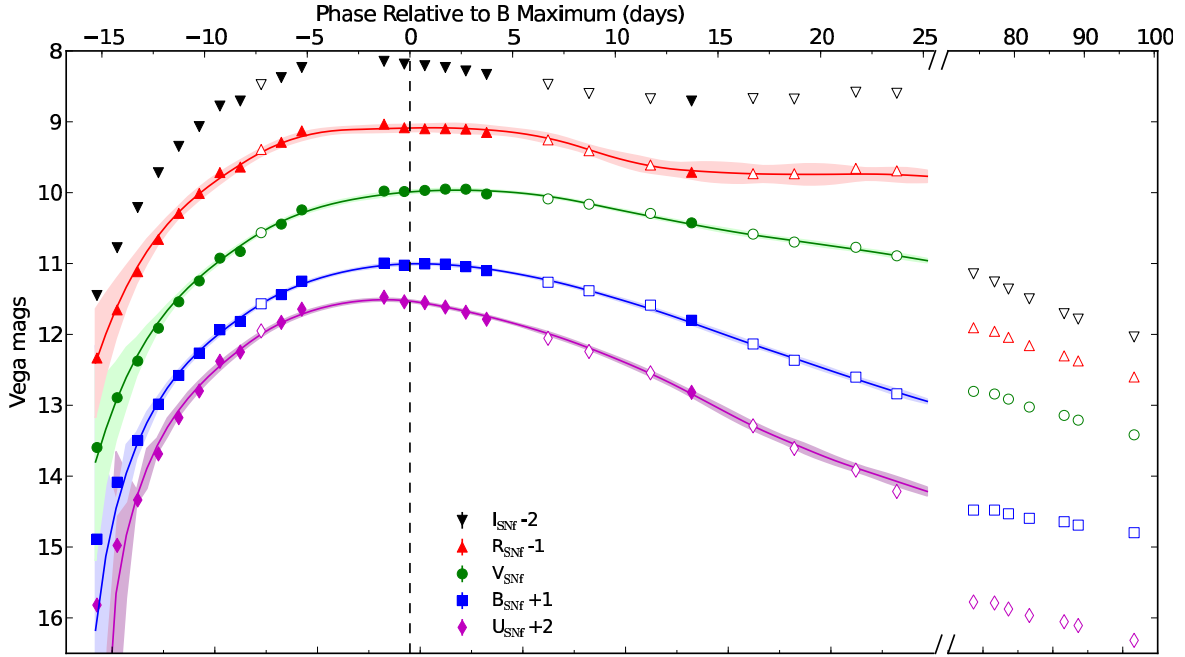


FIGURE I.2 – Courbe de lumière en bandes *UBVRI* de la SN Ia confirmée SN2011fe avec ajustement par SALT2 (ligne pleine et bande pour son erreur ; voir Section I.2.3). Figure de PEREIRA et al. (2013).

L'étude spectrale est plus riche en informations que l'étude photométrique. Nous pouvons en effet voir l'évolution de la composition chimique de la SN *via* la profondeur des raies d'absorption spécifiques à ces éléments (raie prononcée \Rightarrow élément en grande proportion). En effet, sur les quinze premiers jours la désintégration thermonucléaire d'une SN Ia est typiquement dominée par la désintégration $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$, avant d'être dominée par $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ensuite. De plus, les points photométriques sont des moyennes du flux lumineux sur certaines plages de longueurs d'ondes, ce qui permet de reconstruire la courbe de lumière.

C'est également avec la spectroscopie que nous pouvons le plus précisément estimer le redshift d'un corps (appelé alors « redshift spectroscopique »), étant donné qu'il correspond littéralement à un décalage des longueurs d'ondes vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers. Or, du redshift se déduit la distance de luminosité d'après l'Équation ???. Cependant cette étude demande un temps d'acquisition bien plus grand (temps pendant lequel la SN pourrait disparaître) et des appareils de mesure spécifiques, et la caractérisation d'une supernova est d'abord effectuée depuis sa courbe de lumière avant d'être proposée pour un suivi spectroscopique (voir Chapitre ???). S'il vient à manquer, le redshift spectroscopique peut également être remplacé par une estimation depuis sa courbe de lumière (nous parlons alors de redshift photométrique), mais il est généralement acquis par l'analyse spectroscopique de la galaxie hôte de la SN étant donné que ce n'est pas un objet transitoire.

I.2.3 Modèle SALT2.4

La détermination précise des paramètres d'une supernova est effectuée en ajustant un modèle d'évolution spectrale sur les données récoltées. Dans notre thèse, nous utilisons

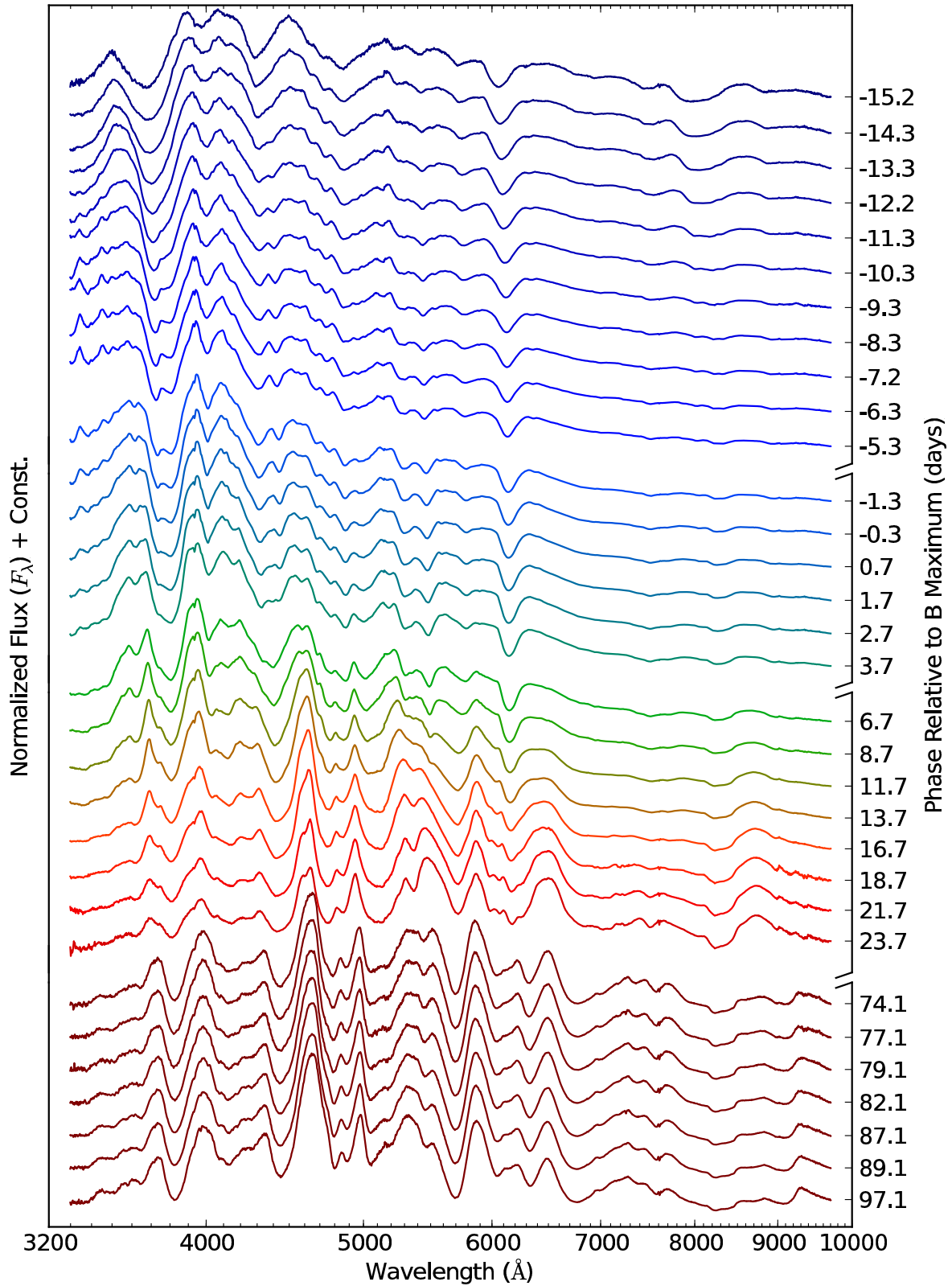


FIGURE I.3 – Série spectro-temporelle de la SN Ia SN2011fe entre -15 et 100 jours par rapport à son maximum d'émission en bande bleue t_0 . La variation dans la profondeur des pics montre l'évolution de la composition chimique de la supernova : désintégration $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ sur les 15 premiers jours, puis $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ensuite. Figure de [PEREIRA et al. \(2013\)](#).

la version 2.4 du modèle *Spectral Adaptive Light-curve Template 2* (SALT2, GUY et al. 2007) décrivant l'évolution de la SED d'une SN Ia au cours du temps. Cette version a été entraînée sur les données empiriques de BETOULE et al. (2014). Dans ce modèle, le flux observé F est décrit à un temps t caractérisé par sa phase p (temps par rapport à t_0) et à une longueur d'onde λ par :

$$F(p, \lambda) = x_0 [M_0(p, \lambda) + x_1 M_1(p, \lambda)] \times \exp(c \cdot CL(\lambda)) \quad (\text{I.1})$$

Ici, M_0 est la séquence spectrale moyenne, M_1 la déviation au premier ordre autour de cette séquence et CL une loi de couleur. Ce sont des propriétés globales du modèle ; les paramètres x_0 , x_1 et c sont spécifique à une SN, comme nous l'avons vu Section I.2.1. C'est avec ce modèle que sont ajustées les courbes de la Figure I.2 et que sont extraites les valeurs des paramètres.

I.3 Standardisation

En calibrant la distance des SNe Ia avec d'autres sondes, il est possible de mesurer leur magnitude absolue. Comme nous l'avons présenté précédemment, nous la trouvons à une valeur relativement stable, avec $M_0 = -19,36$ mag (KESSLER et al. 2009), ce qui leur a valu le terme de « chandelles standard ». Seulement, il existe une variabilité intrinsèque de $\approx 0,35$ mag qui amène à une incertitude finale sur la distance proche de 20%, ce qui ne permet pas leur utilisation rigoureuse. Pour remédier à ce problème, il a fallu trouver un moyen de réduire cette variation : nous appelons cela la « standardisation ».

I.3.1 Corrélations

Par l'étude de la dépendance de la magnitude absolue des SNe Ia avec leur étirement x_1 et leur couleur c , nous pouvons observer une dépendance avec chacun de ces paramètres. Nous présentons Figure I.4 l'évolution des courbes de magnitude absolues des données de la collaboration *Joint Light-curve Analysis* (JLA, BETOULE et al. 2014) en fonction de ces deux paramètres ainsi que les corrélations observées.

PHILLIPS (1993) a montré en premier lieu l'effet avec l'étirement, qui montre que les SNe Ia de grand étirement (évolution lente) sont intrinsèquement plus lumineuses¹¹. Cette corrélation linéaire est caractérisée par un coefficient α . Ensuite, HAMUY et al. (1996) ont montré la dépendance avec la couleur : les SNe Ia les plus bleues sont plus lumineuses¹², relation caractérisée par le coefficient β . Elles sont utilisées pour réduire l'incertitude sur la magnitude absolue selon :

$$M_B = M_0 - \alpha x_1 + \beta c \quad (\text{I.2})$$

Cette relation réduit l'incertitude sur M_B à 0,15 mag, et permet d'établir la relation de TRIPP (1998) :

$$\mu = m_B - M_B + \alpha x_1 - \beta c \quad (\text{I.3})$$

ce qui amène à $\approx 8\%$ d'incertitude sur la distance.

11. nous appelons cette corrélation *slower-brighter* en anglais

12. nous appelons cette corrélation *bluer-brighter* en anglais

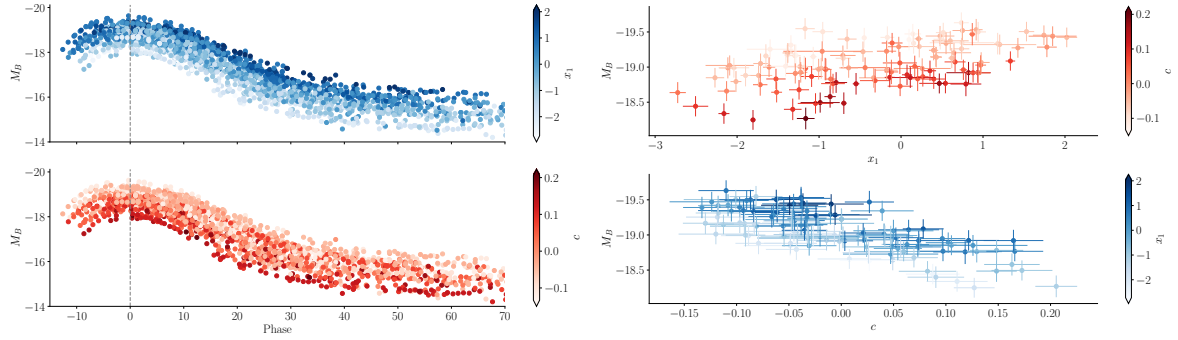


FIGURE I.4 – Dépendance de la magnitude absolue des SNe Ia de la collaboration JLA ([BETOULE et al. 2014](#)) avec l’étirement (*en bleu*) et la couleur (*en rouge*). À gauche : résultat brut. À droite : corrélations linéaires. La relation avec x_1 est caractérisée par un coefficient α , et celle avec c par un coefficient β .

I.3.2 SNe Ia aujourd’hui

De cette manière, les SNe Ia ont pu être utilisées pour découvrir l’expansion accélérée de l’Univers, comme discuté dans le chapitre précédent. Elles continuent d’être au cœur de la cosmologie actuelle. Nous présentons Figure I.5 le diagramme de HUBBLE avec les données de [SCOLNIC et al. \(2018\)](#) utilisant des SNe Ia observées par différents sondages (nous les détaillons Chapitre ??).

Au départ, une incertitude systématique¹³ de 8% était suffisante pour discriminer des modèles cosmologiques très différents étant donné que les incertitudes statistiques¹⁴ étaient elles-mêmes dominantes. Seulement, cela devient de moins en moins vrai au fur et à mesure que les incertitudes statistiques diminuent grâce à la quantité de données recueillies par différents télescopes. Si nous voulons mesurer précisément les paramètres cosmologiques aujourd’hui, il devient nécessaire d’améliorer notre connaissance physique des SNe Ia, et notamment la manière de les standardiser. Il existe plusieurs manières de s’intéresser à cela ; certaines études se concentrent sur de nouveaux modèles spectraux avec plus de paramètres (par exemple [LÉGET et al. 2020](#)), mais la plupart cherche des paramètres de standardisation qui soient extérieurs aux SNe Ia. Nous proposons dans le chapitre suivant un aperçu des environnements des SNe Ia et la manière dont ils sont utilisés pour la cosmologie moderne. Ce chapitre viendra motiver l’étude précise de notre thèse.

13. qui est systématiquement présente ; due à la physique intrinsèque des SNe Ia

14. celles issues du nombre de points de mesure

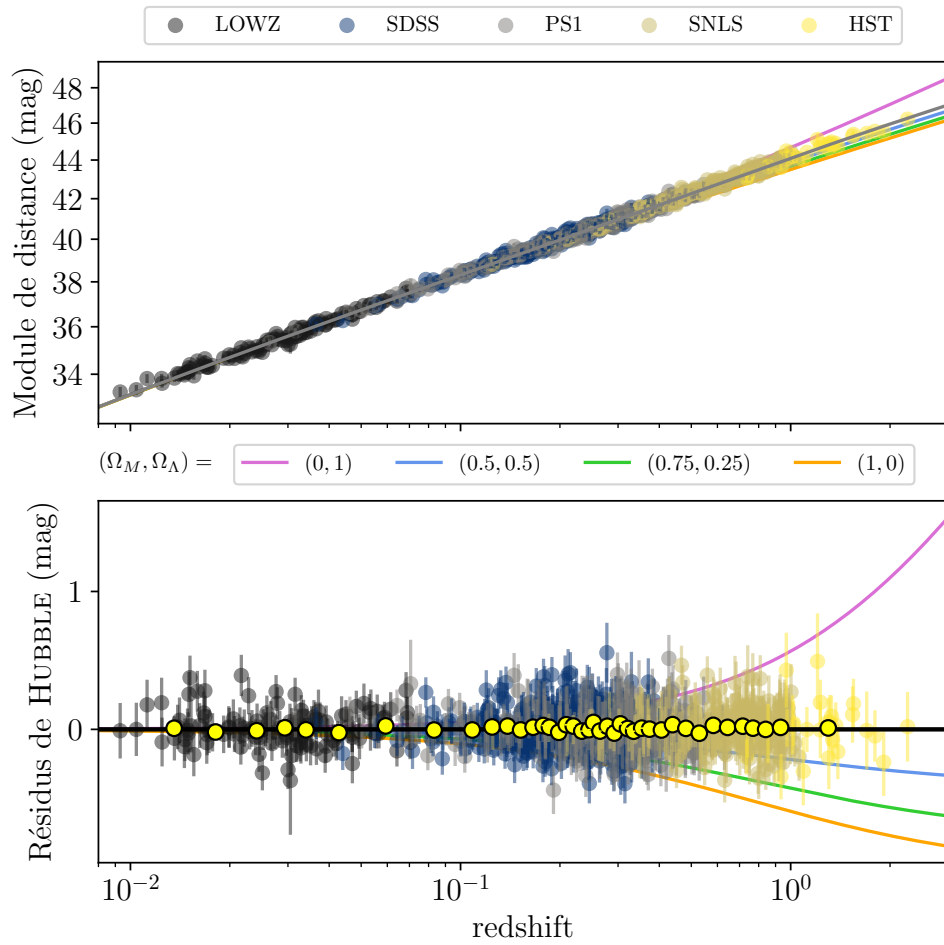


FIGURE I.5 – Diagramme de HUBBLE avec les données de l’analyse Pantheon (SCOLNIC et al. 2018). Figure reproduite. Nous indiquons en couleur les modules de distance attendus selon la composition énergétique de l’Univers : nous illustrons ici comment les SNe Ia permettent de contraindre la physique du cosmos.

Figures

I.1 Classification des différents types de SNe selon leurs caractéristique spectrales	2
I.2 Courbe de lumière de la SN Ia SN2011fe	5
I.3 Série spectro-temporelle de la SN Ia SN2011fe	6
I.4 Dépendance de la magnitude absolue des SNe Ia de la collaboration JLA avec l'étirement et la couleur	8
I.5 Diagramme de HUBBLE avec les données de l'analyse Pantheon	9

Bibliographie

- ALTHAUS L. G., CÓRSICO A. H., ISERN J. et GARCÍA-BERRO E. 2010, « Evolutionary and pulsational properties of white dwarf stars », *A&A Rev.*, **18**, 471 ↑ [Section I.1.1](#)
- BAADE W. et ZWICKY F. 1934, « On Super-novae », *Proceedings of the National Academy of Science*, **20**, 254 ↑ [Section I](#)
- 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.2.3](#), ↑ [Section I.3.1](#), ↑ [Section I.4](#)
- CHANDRASEKHAR S. 1931, « The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs », *ApJ*, **74**, 81 ↑ [Section I.1.2](#)
- ELIAS J. H., MATTHEWS K., NEUGEBAUER G. et PERSSON S. E. 1985, « Type I supernovae in the infrared and their use as distance indicators. », *ApJ*, **296**, 379 ↑ [Section I.1.1](#)
- FILIPPENKO A. V. 1988, « Taxonomy of supernovae. », *PASA*, **7**, 540 ↑ [Section I.1.1](#)
- FOURMANOIT N. 2010, « Analyse des 5 ans de données de l'expérience SuperNova Legacy Survey », Thèse, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, [HAL thèses](#) ↑ [Section I.1](#)
- GUY J., ASTIER P., BAUMONT S. et al. 2007, « SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators », *A&A*, **466**, 11 ↑ [Section I.2.3](#)
- HAMUY M., PHILLIPS M. M., SUNTZEFF N. B. et al. 1996, « The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type IA Supernovae », *AJ*, **112**, 2391 ↑ [Section I.3.1](#)
- HEGER A., FRYER C. L., WOOSLEY S. E., LANGER N. et HARTMANN D. H. 2003, « How Massive Single Stars End Their Life », *ApJ*, **591**, 288 ↑ [Section I.1.1](#)
- KESSLER R., BECKER A. C., CINABRO D. et al. 2009, « First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters », *ApJS*, **185**, 32 ↑ [Section I.3](#)
- LÉGET P. F., GANGLER E., MONDON F. et al. 2020, « SUGAR: An improved empirical model of Type Ia supernovae based on spectral features », *A&A*, **636**, A46 ↑ [Section I.3.2](#)
- MINKOWSKI R. 1941, « Spectra of Supernovae », *PASP*, **53**, 224 ↑ [Section I.1.1](#)
- PEREIRA R., THOMAS R. C., ALDERING G. et al. 2013, « Spectrophotometric time series of SN 2011fe from the Nearby Supernova Factory », *A&A*, **554**, A27 ↑ [Section I.2](#), ↑ [Section I.3](#)

- PHILLIPS M. M. 1993, « The Absolute Magnitudes of Type IA Supernovae », [ApJ](#), 413, L105 ↑ [Section I.3.1](#)
- RÖPKE F. K., KROMER M., SEITENZAHL I. R. et al. 2012, « Constraining Type Ia Supernova Models: SN 2011fe as a Test Case », [ApJ](#), 750, L19 ↑ [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.3.2](#), ↑ [Section I.5](#)
- TRIPP R. 1998, « A two-parameter luminosity correction for Type IA supernovae », [A&A](#), 331, 815 ↑ [Section I.3.1](#)
- WEBBINK R. F. 1984, « Double white dwarfs as progenitors of R Coronae Borealis stars and type I supernovae. », [ApJ](#), 277, 355 ↑ [Section I.1.2](#)
- WHELAN J. et IBEN, ICKO J. 1973, « Binaries and Supernovae of Type I », [ApJ](#), 186, 1007 ↑ [Section I.1.2](#)